

Using Waste Concrete for Increasing Internal Sand Friction Angle

Masoud Amelsakhi¹✉ , Elham Tehrani Bajgiran²

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

E-mail: mamelsakhi@yahoo.com

2. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran E-mail:

elham_bahar63@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-03-28

Received in revised form

2025-04-24

Accepted

2025-06-13

Available online

2025-06-23

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%. Similarly, adding 10% of concrete waste to dense sand increased the internal angle of friction of the soil by 4%. The obtained results show that the most positive effect in increasing the soil-waste concrete is for loose sand, especially in 30 per cent waste concrete.

Keywords:

Sand,
waste concrete,
internal soil friction angle,
large scale direct shear test

Cite this article: Amelsakhi, Masoud., & Tehrani Bajgiran, Elham. (2025). Using waste concrete for increasing internal sand friction angle. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1),55-65. DOI: 10.22126/amcen.2025.12145.1039



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.12145.1039

Publisher: Razi University

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. 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 [1]. 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 [2]. 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 [11].

Method

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 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

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% .Also, adding 10% of concrete waste to dense sand increased the internal friction angle of the soil by 4%. 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

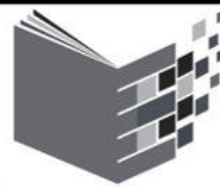
many civil engineering projects in the field of geotechnics.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



استفاده از پسماند بتنی در افزایش زاویه اصطکاک ماسه

مسعود عامل سخی^۱، الهام طهرانی باجگیران^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: mamelsakhi@yahoo.com

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: elham_bahar63@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲ کلیدواژه‌ها: ماسه، ضایعات بتنی، زاویه اصطکاک، برش مستقیم بزرگ مقیاس	در این مقاله با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ و در حالت خشک به بررسی زاویه اصطکاک داخلی ماسه مسلح شده با ضایعات بتنی پرداخته شده است. برای این منظور از ضایعات بتنی با دانه‌بندی حدود ۱/۲ تا ۱ اینچ (۱/۲۵ تا ۲/۵ سانتیمتر) استفاده شده است. برای مطالعه اثر استفاده از ضایعات بتنی از درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بر روی خاک ماسه‌ای خشک در دو تراکم مختلف ماسه پرداخته شده است و نتایج با ماسه خالص مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بزرگ (۳۰ در ۳۰ سانتیمتر)، اضافه کردن ضایعات بتنی باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه با تراکم کمتر 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 مثبت در زاویه اصطکاک مخلوط بوده‌اند بطوری که افزودن ۳۰ درصد ضایعات بتنی به ماسه با تراکم کمتر، زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح را تا حدود ۳۲ درصد افزایش داده است. همچنین افزودن ۱۰ درصد وزنی ضایعات بتنی به ماسه با تراکم بیشتر، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح به میزان تقریباً اندک ۴ درصد بوده است.
استناد: عامل سخی، مسعود؛ طهرانی باجگیران، الهام. (۱۴۰۴). استفاده از پسماند بتنی در افزایش زاویه اصطکاک ماسه. <i>مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران</i>، ۲(۱)، ۵۵-۶۵. DOI: 10.22126/amcen.2025.12145.1039	
ناشر: دانشگاه رازی.	© نویسندگان.



۱. مقدمه

خاک‌ها در احداث سازه‌های مهندسی عمران مثل راه‌ها، فرودگاه‌ها، خاکریزها، سدها و پی‌های کم عمق به کار می‌رود. با این همه رشد سریع صنعت منجر به تولید مواد زائدی شده است که بیشتر این مواد استفاده مهمی ندارند و سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند، به‌علاوه درسال‌های اخیر مدیریت پسماند جامد، به مشکلی جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. بیشتر صنایع برای دفع پسماندهای تولیدی خود، صرف نظر از هزینه‌های گزاف، از دو روش متداول سوزاندن و دفن در خاکچال استفاده می‌کنند. ترکیبات خطرناک موجود در این نوع پسماندها، سبب آلودگی‌های محیط زیست و به خطر افتادن سلامت بشر می‌شود. علاوه بر آن علاقه روزافزون به استفاده از مواد زائد در مهندسی عمران، زمینه را برای ساخت سازه‌های خاکی تقویت شده با انواع مواد زائد فراهم کرده است. در بعضی موارد این مواد زائد دارای پتانسیل بالایی هستند و می‌توانند به‌عنوان ماده اولیه در صنایع ساخت سیمان و یا صنایع دیگر مفید واقع شوند. استفاده از مواد زائد نه تنها سبب کاهش مشکلات زیست‌محیطی می‌شود؛ بلکه به حفظ منابع طبیعی مانند آهک و سنگدانه نیز کمک می‌کند. نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان‌ها و بافت‌های فرسوده شهری، مشکلات فراوانی را در شهرهای بزرگ به وجود آورده است، مشکلات زیست‌محیطی که در اثر دفع غیر اصولی و غیر فنی این مصالح پدید آمده، توجه پژوهشگران را در راستای بازیافت این مواد به خود جلب کرده است. آمارهای موجود از ترکیب نخاله‌های ساختمانی شهرهای بزرگ ایران نشان می‌دهد که آجر، ملات ماسه سیمان و بتن، دو ماده اصلی تشکیل دهنده نخاله‌های ساختمانی هستند که از این مصالح به طور مستقیم و یا پس از بهسازی و تثبیت، در لایه‌های روسازی راه و یا زیرسازس استفاده می‌شود. در ادامه به چند مورد از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد.

۲. پیشینه پژوهش

عامل سخی با استفاده از تراشه لاستیکهای فرسوده به بررسی اثرات مثبت اضافه کردن آنها در خاک ماسه‌ای پرداخت [۱]. همچنین در مطالعه دیگری به تعیین ابعاد بهینه این مصالح ضایعاتی پرداخته شد [۲]. یوسفی و همکاران به مطالعه اثر آنزیم اوره آز بر

روی ماسه مسلح به ژئولیت پرداختند [۳]. یوسفی و همکاران در مطالعه دیگری اثر آنزیم اوره آز بر مقاومت تک محوری خاک مسلح شده با سیمان و ژئولیت را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند [۴]. 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 بدست آمده 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 بطوری که بیشترین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در این حدود خاکستر بادی بدست می‌آید [۵]. 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 در این 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 شده SP)، ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی یافته است مقادیر بهینه بین ۲ تا ۲/۵ درصد وزنی از قطعات پلاستیکی نسبت به ماسه، بدست آمده است. مشاهده شد که با 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 [۶]. 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

شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پوزولان و فعال کننده، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد همچنین با افزایش غلظت فعال کننده نوع II، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت‌های به دست آمده، با مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان مورد مقایسه قرار گرفته شده است. نتایج تحلیل ریزساختاری نشان دهنده واکنش شدید افزودنی‌های شیمیایی و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی در ترکیبات ژئوپلیمری است. خاک ماسه ای مورد استفاده در این پژوهش آزمایشگاهی از حاشیه اتوبان هفت باغ علوی در محور کرمان-ماهان تامین شد که براساس طبقه بندی متحد، در دسته به ماسه بد دانه بندی شده (SP) قرار گرفته است. پودر شیشه نیز از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده است [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ کوبیاشی و همکاران برای بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای سیلتی از گچ بازیافتی به عنوان یک عامل تثبیت کننده 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 حالی که 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 [۱۱]. ابراهیمی و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی عددی استفاده از تراشه لاستیک‌های فرسوده در تحلیل سپری احداث شده در چنین محیط‌هایی پرداختند و اثر مثبت حضور خاک مسلح به تراشه لاستیک‌ها را بر روی پاسخ سپری نشان دادند [۱۲]. عامل سخی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی اثرات افزودن الیاف پلی پروپیلن بر خاک تثبیت شده با سیمان و ژئولیت پرداختند [۱۳]. سلطانی و

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 مقادیر وزنی اضافه شده آن‌ها به خاک ۰،۰۲/۴، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی خاک است. آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم 10×10 سانتیمتر مربع تحت سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شدند. نتایج به دست 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 درصد ژئوفوم 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 مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌های آزمایش شده را در صورت اختلاط با درصد‌های دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد [۷]. بابایی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی مقاومت برشی ماسه رس‌دار اصلاح شده با دی اکسید تیتانیوم و سیمان پرداختند [۸]. 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 نشان دادند [۹]. در سال ۱۳۹۸ صباغ‌گل و توفیق، به مطالعه امکان‌سنجی تثبیت خاک ماسه‌ای با ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و پودر شیشه پرداختند. در این مطالعه از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده شده است. همچنین تلاش شده است تا از خواص شیمیایی پودر شیشه به عنوان یک ماده ضایعاتی برای جایگزینی پوزولان طبیعی استفاده شود. محلول فعال کننده دو نوع بوده است. نوع I ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع و نوع II شامل غلظت‌های مختلف سدیم هیدروکسید (۶، ۸ و ۱۰ مولار) است علاوه بر آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده که معیار اصلی مقایسه نمونه‌ها بوده است، تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی ریزساختاری ترکیبات ژئوپلیمری انجام

جدول ۱. مشخصات خاک

نوع خاک	وزن مخصوص سست KN/m ³	زاویه اصطکاک داخلی درجه	چسبندگی kg/cm ²
ماسه	۲۲	۲۸	۰
نام خاک	e _{max}	C _c	C _u
۱۶۱ فیروزکوه	۰/۶۲	۰/۹۷	۵/۵۶
			G _s
			۲/۵۶

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%Na ₂ O	%K ₂ O
۹۸/۴۱	۰/۲	۰/۸۹	۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۰۲۲

همکاران به بررسی استفاده از ژئولیت و خرده های لاستیک برای پایداری سازی ماسه پرداختند [۱۴].

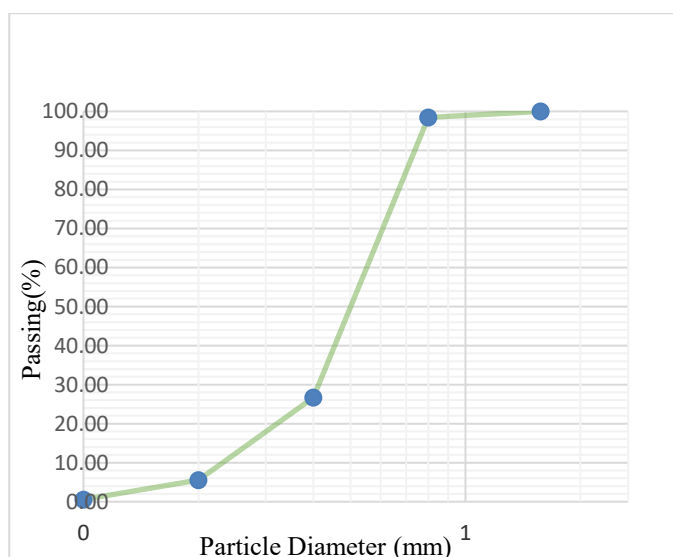
۳. روش شناسی پژوهش

۳-۱. مشخصات خاک و ضایعات بتنی

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 مورد استفاده قرار می گیرد. 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 دانه بندی شده بانماد SP طبقه بندی گردید. نتایج آزمایش های شناسایی در جدول های ۱ و ۲ و منحنی دانه بندی و تصاویر مصالح مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده اند. برای انجام آزمایش دانه بندی از استاندارد ASTM D2487 استفاده شد.



شکل ۱. تصویر ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و مخلوط با ضایعات بتنی



شکل ۲. منحنی دانه بندی ماسه

در پژوهش حاضر بمنظور بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه از ضایعات بتنی استفاده شده است. ضایعات بتنی از محل یک کارگاه ساختمانی در تهران تهیه گردید و پس از خرد کردن بخش عبوری از الک ۱ اینچ و مانده روی الک ۱/۲ اینچ مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲. آزمایش برش مستقیم بزرگ

جهت بررسی تاثیر ضایعات بتنی، بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای، مجموعاً تعداد ۲۴ آزمایش برش مستقیم 30×30 سانتیمتر مربع، تحت سه تنش قائم 0.5 ، 1 و 1.5 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، انجام شد. به منظور بهسازی خاک مذکور از ضایعات بتنی با درصدهای وزنی مختلف 0 ، 10 ، 20 و 30 درصد با توزیع تصادفی استفاده شده است. نمونه‌ها در دو حالت سست با وزن مخصوص 1370 کیلوگرم بر متر مکعب (سری A) و متراکم با وزن مخصوص 1434 کیلوگرم بر متر مکعب (سری B) تهیه شدند. برای تهیه نمونه‌ها در حالت با تراکم کمتر، هیچ لرزشی صورت نگرفت و نمونه‌ها به آرامی در قالب قرار گرفتند اما برای تهیه نمونه‌های با تراکم بیشتر برای رسیدن به وزن مخصوص مشخص، از متراکم کردن برای رسیدن به ارتفاع مشخص و ونیز وزن مشخص در داخل قالب استفاده گردید. ضمناً بازم به ذکر است که برخی از آزمایشها مجدداً مورد تکرار قرار گرفتند تا روند کلی نتایج بررسی گردد. البته بدیهی است که عیناً نتایج قبلی بدست نیامد اما روند کلی بدون ایراد بوده است.

برای انجام آزمایش برش مستقیم از استاندارد ASTM D3080 استفاده گردید. دستگاه برش مستقیم بزرگ 30×30 سانتیمتر مربع 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 $6/88$ میلیمتر در دقیقه بوده است.

۴. نتایج آزمایش برش مستقیم

در ادامه به بررسی نمودارهای تنش و کرنش در حالات مختلف نمونه‌های سست و متراکم و بیان نتایج پرداخته می‌شود. نتایج مربوط به زوایای اصطکاک داخلی نمونه‌های با تراکم کمتر و تراکم بیشتر در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است تمامی آزمایش‌ها در حالت خشک صورت گرفته است.

جدول ۳. تغییرات زاویه اصطکاک ماسه با تراکم کمتر

زاویه اصطکاک	درصد وزنی ضایعات
۲۸	۰
۳۳	۱۰
۳۳	۲۰
۳۷	۳۰

همانطور که در جدول ۳ مشخص است افزودن 10 و 20 درصد وزنی ضایعات بتنی به ماسه خالص باعث افزایش حدود 18 درصدی مقدار زاویه اصطکاک مخلوط ماسه- ضایعات بتنی شده است. همچنین افزودن 30 درصد وزنی ضایعات باعث افزایش حدود 32 درصد در زاویه اصطکاک ماسه خالص شده است. این مقدار قابل توجه افزایش در زاویه اصطکاک نشان دهنده اثر مثبت استفاده از این مصالح بازیافتی در ژئوتکنیک است.

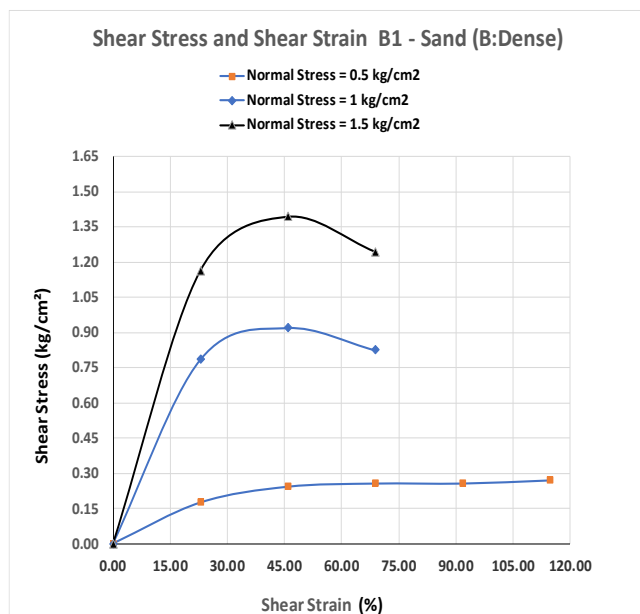
جدول ۳. تغییرات زاویه اصطکاک ماسه با تراکم بیشتر

زاویه اصطکاک	درصد وزنی ضایعات
۴۲	۰
۴۴	۱۰
۴۴	۲۰
۳۷	۳۰

در جدول ۳ اثرات استفاده از ضایعات بتنی بر زاویه اصطکاک مخلوط ماسه-ضایعات بتنی مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ نشان داده است که استفاده از 10 و 20 درصد وزنی از این ضایعات، باعث افزایش تقریباً ناچیز 5 درصدی در زاویه اصطکاک مخلوط در مقایسه با ماسه خالص شده است. افزودن 30 درصد وزنی باعث کاهش زاویه اصطکاک ماسه خالص با تراکم نسبتاً بیشتر شده است. این مقدار کاهش در نتایج حدود 11 درصد بوده است.

از نظر تئوری نیز این مطلب قابل بیان و دفاع است که بهترین شرایط برای مسلح کردن ماسه، زمانی است که ماسه در حالت سست باشد. استفاده از مسلح کننده (همچون ضایعات بتنی) باعث از بین بردن اصطکاک و درگیری بین ذرات ماسه متراکم شده و باعث می‌شود که ماسه زاویه اصطکاک کمتری از خود نشان دهد. از سوی دیگر استفاده بیشتر از ضایعات بتنی باعث ایجاد اثر منفی هم خواهد شد.

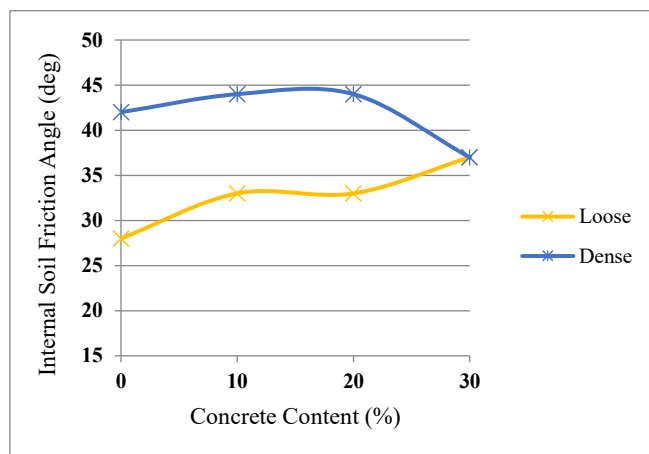
در شکل ۴ نمونه‌ای از نتایج بدست آمده برای نمونه متراکم ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد در تنشهای قائم بالاتر نمونه متراکم دارای یک قله مشخص در تنش برشی می‌باشد. از نمودارهای اخیر برای تعیین مقادیر زاویه اصطکاک مخلوط استفاده شده است.



شکل ۴. نمودار تنش برشی-تنش قائم برای نمونه متراکم

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق از دو ماسه با تراکم‌های مختلف کمتر و بیشتر (می‌توان گفت سست و متراکم) استفاده شد و آزمایش برش مستقیم ۳۰ سانتیمتر در ۳۰ سانتیمتر علاوه بر روی دو ماسه خالص، بر روی مخلوط ماسه و ۳ درصد وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ضایعات بتنی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین عملکرد در استفاده از



شکل ۳. تغییرات زاویه اصطکاک ماسه در دو تراکم مختلف

در شکل ۳ نمودار تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک بدست آمده در دو حالت با تراکم‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته اند.

۴-۱. بحث در مورد نتایج

نتایج بدست آمده در این تحقیق در حالت ماسه با تراکم کمتر نشان داده است که افزودن ضایعات بتنی حاصل از تخریب سازه‌ها به ماسه با تراکم کمتر اثر مثبت بر روی افزایش پارامتر مقاومت برشی زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ماسه- ضایعات بتنی داشته است. این اثر مثبت در تمامی درصدهای مورد آزمایش مشاهده شده است. در دو درصد ۱۰ و ۲۰، نتایج تقریباً یکسان بوده است اما در ۳۰ درصد، تغییر مثبت بیشتری مشاهده شده است. به عبارت دیگر درصد بهینه برای استفاده در ماسه با تراکم کمتر، حدود ۳۰ درصد وزنی است. به عبارت دیگر وجود ضایعات بتنی در ماسه با تراکم کمتر، باعث ایجاد قفل و بست در ماسه مخلوط شده که در مدل رفتاری موهر-کولمب می‌توان آن را به صورت افزایش در زاویه اصطکاک داخلی خاک نشان داد.

در ماسه با تراکم بیشتر نتایج نشان داده است که استفاده از ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی ضایعات بتنی، باعث اندکی افزایش در زاویه اصطکاک مخلوط شده است. اما افزودن ۳۰ درصد وزنی اثر کاهشی و معکوس داشته است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که استفاده از ضایعات بتنی در ماسه با تراکم بیشتر تاثیر قابل قبولی در افزایش پارامتر زاویه اصطکاک ندارد.

- Iranian Journal of Engineering Geology, 14(32), 43-57.
- [۵] بیات، میثم و بحرینیان، سید محمد حسین. (۱۳۹۹). تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه ای. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی/ایران، ۹۵-۸۵، ۱۳ (۲).
- [۶] هوشیارا، رستمی، و. (۱۳۹۷). استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰ (۴): ۷۵۵ - ۷۶۴.
- [۷] 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): ۱۳۳-۱۴۸.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [۱۰] 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): ۱۶۹-۱۸۲.
- [11] 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.
- [12] Mohammad Ebrahimi, M. A., Amelsakhi, M., & Bakhtiari Doost, R. (2024). Numerical Analysis of Lateral Displacement and Bending Moment of Double Anchored Sheet Pile with Embankment Reinforced with Tire Chips in Static and Pseudo-Static Conditions. Bulletin of Earthquake Science and Engineering, 11(2), 73-83.
- [13] Amelsakhi, M., Yousefi, R., Amooei, A. A., & Karimi, A. (2022). Experimental Study on the Effect of Adding Polypropylene Fibers on Soil Stabilized by Cement and Zeolite Replacement. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(4), 1553-1572.
- ضایعات بتنی مربوط به ۳۰ درصد وزنی و در ماسه با تراکم کمتر رخ داده است. این مقدار افزایش حدود ۳۲ درصد بوده است. از سوی دیگر نتایج نشان داد که استفاده از ضایعات بتنی در ماسه با تراکم بیشتر اثر چندان مثبتی ندارد و حتی در ۳۰ درصد وزنی، اثر کاهشی نیز داشته است. یکی از نکات قابل توجه این است که از درصدهای وزنی بیشتر از ۳۰ درصد استفاده نشده است. دلیل آن عدم امکان اجرای در محل به صورت واقعی است. به عبارت دیگر استفاده از درصدهای بالای ۳۰ درصد در واقع غیرکاربردی و صرفاً به صورت تئوری است. همچنین برای انجام آزمایش برای درصدهای بیش از ۳۰ درصد وزنی در آزمایش برش مستقیم نیز محدودیت انجام آزمایش وجود دارد. نکته مهم دیگر این است که محققین این مقاله اذعان می‌دارند که نتایج برای شرایط محدود انجام شده در آزمایشگاه بدست آمده است. هرچند که با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ سعی شده است شرایط واقعی مدل شوند اما تمامی نتایج برای محدوده ضایعات بتنی ارائه شده و ماسه مبنا می‌باشد. بدیهی است برای هر شرایط خاص و ویژه بهتر است مطالعات مربوط به همان خاک و ابعاد ضایعات صورت گیرد تا نتایج قابل قبول‌تری برای پروژه موردنظر حاصل گردد.

منابع

- [1] Amel-Sakhi, M. (2001). Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds. Partial Fulfillment of the Requirements the Degree of Master of Science, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- [2] Ghazavi, M., & Sakhi, M. A. (2005). Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand. International Journal of Geomechanics, 5(1), 58-65.
- [3] 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.
- [4] Yousefi, R., Amelsakhi, M., Karimi, A., (2021b), the effect of adding urease enzyme on uniaxial strength of soil stabilized by cement and zeolite,

- [14] Soltani, M. S., Jiryaee Sharahi, M., & Amelsakhi, M. (2022). Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2), 759-774.