



ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر ضایعات پلیمری موکت بر خواص ژئوتکنیکی خاک ماسه ای بندرانزلی

پیام عشقی^۱، عطا جعفری شالکوهی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

چکیده

تسلیح خاک با مواد ضایعاتی پلیمری یکی از روش‌های نوین و کاربردی جهت بهسازی و مقاومسازی خاک می‌باشد. هدف از تسلیح خاک بهبود مقاومت برشی، افزایش شکل پذیری، افزایش پایداری، افزایش ظرفیت باربری، افزایش ضریب اطمینان در برابر لغزش شیروانی‌ها و کاهش نشست می‌باشد. یکی از انواع مواد ضایعاتی پلیمری مورد استفاده در تسلیح خاک استفاده از زوائد ناشی از کارخانه‌های نساجی و تولید موکت می‌باشد. در این پژوهش تاثیر مسلح کردن خاک با ضایعات موکت به شیوه توزیع تصادفی مورد مطالعه قرار گرفته است. برنامه مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر درصد وزنی (۵/۰، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک خاک) و نسبت اضلاع (۱، ۲ و ۵) ضایعات موکت تحت سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در شرایط متراکم و با رطوبت‌های حاصل از آزمایش تراکم استاندارد پروکتور بر مقاومت برشی نمونه‌ها می‌باشد. نتایج آزمایش برش مستقیم و تراکم استاندارد نشان می‌دهد افزودن ضایعات موکت به خاک ماسه‌ای باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی، کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. بدین ترتیب با توجه به بازیافتی بودن این نوع مواد، بکارگیری آن‌ها در پروژه‌های مهندسی عمران و ژئوتکنیک هم به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و هم سبب کاهش معضلات زیست محیطی ناشی از انباشته شدن این ضایعات در طبیعت خواهد شد.

کلید واژه‌ها: خاک مسلح، ضایعات موکت، مقاومت برشی، تراکم خاک.

۱- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران payam.eshghi@qiau.ac.ir

۲- گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران jafary@iaubanz.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

مکانیکی خاک‌ها موثر می‌باشد، ضایعات موکت است که هم بصورت

پرکننده در خاک و هم تاثیر در بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک کاربرد دارد. در پژوهشی به بررسی تاثیر الیاف موکت بر خواص میرایی و مدول برشی ماسه لای‌دار پرداخته شد که الیاف بصورت تصادفی در خاک توزیع شده بود و نتایج آن نشان داد که در درصد‌های بالای الیاف موکت نسبت میرایی دارای افزایش می‌باشد (Ghiassian et al., 2010). نتایج یک پژوهش در مورد استفاده از الیاف ضایعات موکت در تسلیح خاک رس نشان داد که افزودن الیاف ضایعات موکت در خاک‌های رسی می‌تواند مقاومت فشاری محصور نشده را به طور قابل توجهی افزایش دهد و رفتار شکست را از شکننده به شکل پذیر تغییر دهد. همچنین نتایج نشان داد که مزایای نسبی الیاف برای افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های رسی بسیار وابسته به وزن واحد خشک اولیه و میزان رطوبت خاک می‌باشد (Mirzababaei et al., 2013). در پژوهشی دیگر تاثیر الیاف موکت بر روی ماسه لای‌دار با استفاده از آزمایش سه محوری زهکشی شده مورد بررسی گرفت که نتایج آن نشان می‌دهد افزودن الیاف موکت با نسبت ابعاد مختلف به خاک، مقاومت برشی ماسه لای‌دار را بهبود می‌بخشد و باعث شکل پذیری ماسه در محدوده دانه بندی ریز گردیده است (Ghiassian and Poorebrahim., 2004). همچنین در تحقیقی دیگر به بررسی اثر نانوکربنات کلسیم و ضایعات موکت در خاک رس پرداخته شد که نتایج حاصل از آزمایشات آن نشان می‌دهد استفاده همزمان از نانوکربنات کلسیم و الیاف ضایعاتی موکت، چسبندگی زهکشی نشده را تقریباً دو برابر افزایش می‌دهد و افزودن الیاف بازیافتی موکت به خاک باعث افزایش سختی نمونه‌های مورد آزمایش گردیده است (Janalizadeh Choobbasti et al., 2019). در این پژوهش ابتدا برای بدست آوردن پارامترهای اولیه خاک از آزمایشات مطابق با استانداردهای ASTM برای خاک ماسه‌ای مورد مطالعه صورت گرفته است و سپس با استفاده از

تسلیح خاک یکی از روش‌های کاربردی جهت بهسازی و مقاوم سازی زمین می‌باشد. تقویت خاک با منسوجات ژئوتکستایل که یک فن آوری کاملاً اثبات شده است، به طور گسترده‌ای در راهسازی برای تقویت خاک، تثبیت، زهکشی و جداسازی استفاده می‌شود. همچنین تسلیح خاک با الیاف می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی خاک، مقاومت برشی، مقاومت فشاری و ظرفیت باربری گردد (Wang, 1999). از سوی دیگر در سال‌های اخیر استفاده از مصالح ضایعاتی برای تسلیح خاک‌ها به طور گسترده‌ای مورد توجه محققین قرار گرفته است که استفاده از این مواد در صورتیکه بتواند سبب بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها شود به لحاظ مقرون به صرفه بودن و کاهش معضلات زیست محیطی ناشی از حضور این مصالح و دفن آن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌ها در اثر افزودن مواد بازیافتی، مصرف این مواد نظیر ضایعات لاستیک می‌تواند بعنوان مصالح پرکننده در مهندسی عمران بکار گرفته شود (Akbarimehr et al., 2020, Khosh et al., 2020). در زمینه بررسی تاثیر ترکیب پلی استر ضایعاتی و نانوسیلیس تحقیقاتی صورت گرفته که نتایج حاصل از آن نشان داد افزودن ترکیب این دو ماده سبب بهبود مقاومت برشی خاک گردیده است (Sarli et al., 2020, Changizi and Haddad, 2015). در پژوهشی به بررسی تاثیر ترکیب الیاف بازیافتی پلی پروپیلن با نانوآکسید منیزیم بر روی خاک رس پرداخته شد که نتایج نشان داد افزودن الیاف بازیافتی به نمونه‌ها سبب کنترل کرنش نمونه‌ها و بهبود پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت فشاری تک محوری شده است (Ahmadi et al., 2020). در پژوهشی دیگر در زمینه تسلیح خاک با مواد ضایعاتی به تاثیر ترکیب خاک رس با ضایعات پودر شیشه پرداخته شد که نتایج آن نشان داد حضور این مواد بازیافتی در خاک سبب افزایش مقاومت برشی خاک شده است (Blayi et al., 2020). در ادامه یکی دیگر از مواد ضایعاتی که در بهبود خصوصیات

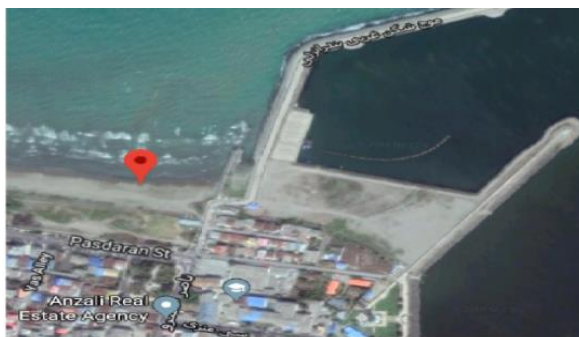
۱.۱.۲. مشخصات خاک

ماسه مصرفی در این پژوهش از شهرستان بندرانزلی واقع در شمال ایران تهیه گردیده و دارای ارزش ماسه‌ای حدود ۹۵ درصد می‌باشد و همچنین موقعیت جغرافیایی آن در شکل (۱) آورده شده است و همچنین جدول (۱) مشخصات فیزیکی ماسه مورد پژوهش را نشان می‌دهد و در ادامه طبقه بندی خاک مطابق با استاندارد ASTM D-2487 صورت پذیرفته است. علاوه بر این جهت تعیین مشخصات شیمیایی و کانی‌های تشکیل دهنده ماسه به ترتیب از روش آنالیز عنصری بنام X-Ray Fluorescence (XRF) مطابق با جدول (۲) و پراش پرتو ایکس X-Ray Diffraction (XRD) مطابق با شکل (۲) استفاده شده است.

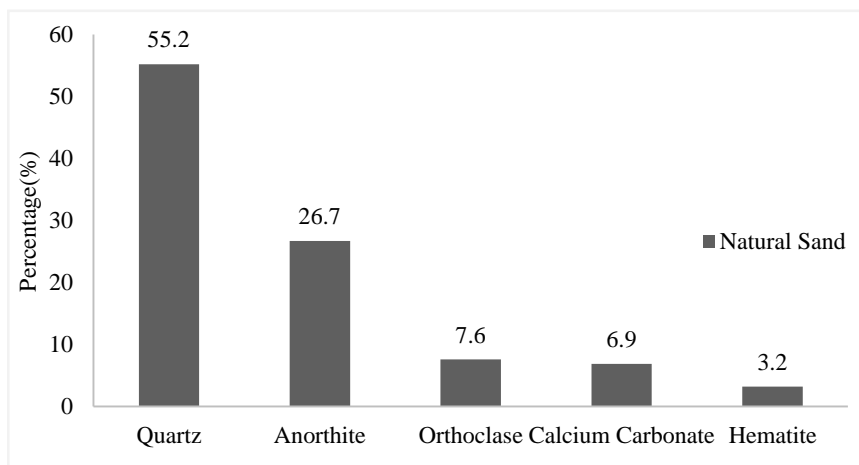
ضایعات موکت در نسبت ابعاد مختلف و درصدهای وزنی متفاوت، آزمایش تراکم استاندارد پروکتور جهت بررسی مشخصات تراکمی نمونه‌ها و همچنین آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس جهت بررسی تنش‌های برشی ماکزیمم، پارامترهای مقاومت برشی و جابجایی قائم نمونه‌ها انجام پذیرفته است. همچنین قابل ذکر است در این پژوهش با توجه به اهمیت بهسازی خاک در مهندسی ژئوتکنیک از مواد ضایعاتی بازیافتی نظیر ضایعات موکت استفاده گردیده که هم به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و هم از نظر زیست محیطی باعث کاهش مشکلات و مسایل ناشی از انباشته شدن این مواد در طبیعت می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد و مصالح



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی برداشت ماسه مصرفی در این پژوهش



شکل ۲. کانی‌های تشکیل دهنده ماسه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده

Property	standard	Value
Soil Classification	ASTM D-2487	SP
Coefficient of uniformity, C_u	ASTM D-421	1.5
Coefficient of curvature, C_c		1.1
Specific gravity of solids, G_s	ASTM D-854	2.65
Maximum dry unit weight, d_{max} (kN/m^3)	ASTM D-698	15.3
Moisture content, ω_{opt}		10.6

جدول ۲. مشخصات شیمیایی (XRF) ماسه مورد استفاده

Chemical composition	Weight (%)
SiO ₂	60
Al ₂ O ₃	12
CaO	9
Fe ₂ O ₃	4.5
L.O.I	4
K ₂ O	4
MgO	2.5
Na ₂ O	2.15
TiO ₂	0.9
SO ₃	0.6
MnO ₂	0.15
Cl	0.15
P ₂ O ₅	0.05
La&Lu	<0.01

کششی و ازدیاد طول تا حد گسیختگی المانهای مسلح کننده از دستگاه Micro50 استفاده گردیده است. هدف از این آزمایش تعیین نیروی گسیختگی و ازدیاد طول تا حد پارگی تک لیف در شرایط مشخص می‌باشد که توسط دستگاه مقاومت سنج با سرعت ثابت کشیده شده است. شکل ظاهری ضایعات موکت مصرفی در این پژوهش در شکل (۳)، دستگاه Micro50 و نحوه کشش مسلح کننده در شکل (۴) و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی ضایعات موکت در جدول (۳) آورده شده است.

۲.۱.۲. مشخصات مسلح کننده مصرفی در این پژوهش
المان مسلح کننده مصرفی در این پژوهش ضایعات موکت از جنس الیاف مصنوعی پلی پروپیلن می‌باشد که از برش دادن و قیچی کردن نوارهای زائد ضایعات موکت تهیه شده است. با توجه به مشکل بودن محاسبه دقیق سطح مقطع مسلح کننده مورد مطالعه (ضایعات موکت) با استفاده از یک استوانه مدرج که مقدار مشخصی آب در آن ریخته شده تغییر حجم مسلح کننده تعیین گردید و با توجه به در دسترس بودن وزن مسلح کننده، وزن مخصوص ضایعات موکت مورد استفاده در این پژوهش محاسبه شده است. همچنین جهت تعیین مقاومت



شکل ۳. نمونه‌ای از ضایعات موکت مصرفی در این پژوهش با نسبت اضلاع ۱



شکل ۴. دستگاه Micro50 و نحوه کشش مسلح کننده مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ضایعات موکت مصرفی در این پژوهش

Specific gravity (kN/m ³)	Elongation rate before failure (mm)	Tensile strength (kgf)
1.07	12.96	7.13

کیلوپاسکال جهت بررسی پارامترهای مقاومت برشی انجام شده است. برنامه آزمایشگاهی تراکم استاندارد و برش مستقیم در این پژوهش به ترتیب مطابق با جداول (۴) و (۵) می‌باشد. جدول ۴. برنامه آزمایش تراکم استاندارد در این پژوهش

Standard Proctor Test			
Sand+0% Carpet Waste	×		
L/B	1	2	5
Sand+0.5% Carpet Waste	×	×	×
Sand+1% Carpet Waste	×	×	×
Sand+1.5% Carpet Waste	×	×	×
Sand+2% Carpet Waste	×	×	×
Total Tests	13		

۲.۲. روش آزمایش

۱.۲.۲. برنامه آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی اثر ضایعات موکت بر روی خاک ماسه‌ای مورد مطالعه جهت تعیین مشخصات تراکمی و همچنین پارامترهای مقاومت برشی خاک به ترتیب از آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D-698 و آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس مطابق با استاندارد ASTM D-3080 استفاده شده است. همچنین آزمون‌های آزمایشگاهی با درصدهای مختلف از ضایعات موکت (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نسبت به وزن خاک خشک) در ۳ نسبت اضلاع مختلف (۱، ۲ و ۵) صورت پذیرفته است. در آزمایش برش مستقیم هر آزمایش تحت سه سربر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰

جدول ۵. برنامه آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در این پژوهش

	Overhead 100 kPa			Overhead 200 kPa			Overhead 400 kPa		
Sand+0% Carpet Waste	×			×			×		
L/B	1	2	5	1	2	5	1	2	5
Sand+0.5% Carpet Waste	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Sand+1% Carpet Waste	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Sand+1.5% Carpet Waste	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Sand+2% Carpet Waste	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Total Tests	39								

مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه انجام گرفت و در ادامه جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی از آزمایش برش مستقیم تحت شرایط ثابت و مطابق با استاندارد ASTM D-3080 با سرعت یکسان به مقدار ۱/۵ میلی متر بر دقیقه یعنی بصورت کند بارگذاری صورت گرفته است. نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم دارای ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر می باشند و همچنین در این پژوهش سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.

۳.۱. اثر ضایعات موکت بر مشخصات تراکمی خاک

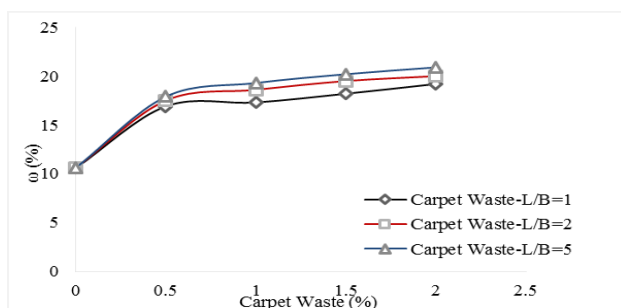
جهت بررسی خصوصیات تراکمی نمونه ها و ایجاد شرایط بهتر برای ساخت آن‌ها، ماسه مخلوط شده با درصد‌های مختلف ضایعات موکت در نسبت اضلاع مختلف از آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D698 انجام شده است. نتایج آزمایش تراکم انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه مسلح شده با ضایعات موکت در شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب برای حداکثر وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه آورده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد به ازای افزودن مقادیر ضایعات موکت در نسبت اضلاع مختلف، مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کاهش یافته و به دنبال آن رطوبت بهینه نمونه افزایش یافته

۲.۲.۲. آماده سازی نمونه

به منظور تهیه نمونه‌ها، ابتدا ماسه کاملاً خشک و از الک عبور داده می‌شود. برای تهیه و ساخت هر نمونه ابتدا خاک، المان‌های تسلیح‌کننده با ابعاد و نسبت اضلاع مشخص و آب به مقدار مشخصی که از روابط وزنی حجمی بدست آمده، محاسبه گردیده است و همچنین قابل ذکر است مقدار آب و مسلح کننده نسبت به وزن خشک خاک محاسبه می‌گردد. در ادامه برای رسیدن به مخلوط بهتر و دقیق‌تر جهت نمونه سازی از رطوبت بهینه در درصد‌های وزنی مختلف که از آزمایش تراکم استاندارد بدست آمده استفاده شده است. سپس خاک به منظور اختلاط بهتر با مسلح‌کننده مرطوب شده و در ادامه، رطوبت تا رسیدن به مقدار بهینه افزایش یافته است. شایان ذکر است در این آزمایش خاک با تراکم نسبی ۷۵ درصد یعنی از نوع متراکم در نظر گرفته شده است.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش پس از انجام آزمایش تراکم استاندارد، آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه طبیعی و ماسه شامل ضایعات موکت با در صد‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ با نسبت اضلاع ۱، ۲ و ۵ انجام پذیرفته است. در ابتدا آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D-698 بر روی مخلوط ماسه با درصد‌های مختلف ضایعات موکت جهت تعیین وزن

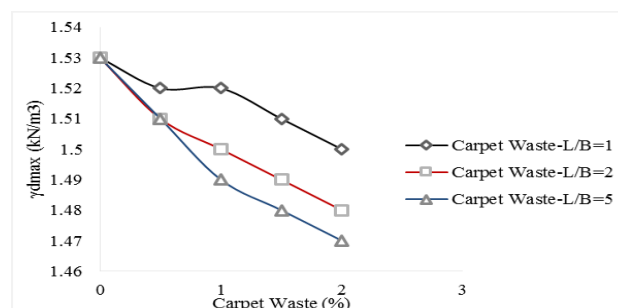


شکل ۶. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر رطوبت بهینه نمونه‌ها

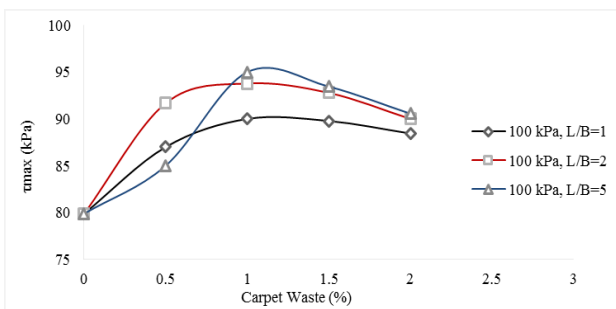
۳.۲. آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس

۳.۲.۱. اثر ضایعات موکت بر پارامترهای مقاومت برشی خاک نتایج مربوط به تغییرات تنش برشی ماکزیمم حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس که بر روی ماسه مسلح شده با درصدهای وزنی متفاوت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک خاک) ضایعات موکت با نسبت اضلاع ۱، ۲ و ۵ انجام گرفته در شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده است. همچنین قابل ذکر است سربارهای در نظر گرفته برای انجام آزمایش برش مستقیم جهت بررسی تنش برشی ماکزیمم نمونه‌ها به ترتیب ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و نمونه‌ها در شرایط متراکم با تراکم نسبی ۷۵ درصد ساخته شده‌اند. در این پژوهش برای رسیدن به نمونه‌های همگن و یکسان از آزمایش تراکم استاندارد برای تمام نمونه‌ها استفاده گردیده و در نهایت آزمایش برش مستقیم تحت شرایط ثابت و مطابق با استاندارد ASTM D-3080 با سرعت یکسان به مقدار ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه یعنی بصورت کند بارگذاری شده است. شکل (۷) نشان می‌دهد افزودن ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال سبب افزایش تنش برشی ماکزیمم گردیده و بیشترین افزایش در نسبت اضلاع ۵ با افزودن ۱ درصد وزنی مسلح کننده می‌باشد که نسبت به ماسه طبیعی حدود ۱۹ درصد افزایش داشته است. و نسبت به ماسه طبیعی حدود ۱۴ درصد افزایش داشته و بعد

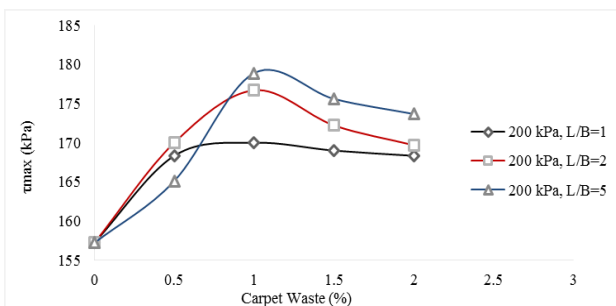
است که بیشترین کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک ماکزیمم مربوط به افزودن ۲ درصد وزنی ضایعات موکت در نسبت اضلاع ۵ می‌باشد که حدود ۴ درصد نسبت به ماسه طبیعی کاهش یافته و همچنین بیشترین میزان رشد درصد رطوبت بهینه در ۲ درصد وزنی ضایعات موکت در نسبت اضلاع ۵ می‌باشد که حدود ۲ برابر افزایش داشته است. در مورد مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد با تحقیقات دیگر قابل ذکر است که در برخی پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص افزودن الیاف‌های مختلف در درصدها وزنی متفاوت روند کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم و افزایش درصد رطوبت بهینه در خاک با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد (Akbarimehr et al., 2020, Sarli et al., 2020, Blayi et al., 2020, Mirzababaei et al., 2013). علت این امر را می‌توان در سبک‌تر بودن مسلح کننده مصرفی نسبت به خاک ماسه ای دانست که با توجه به افزودن مقادیر این الیاف در درصد وزنی بالاتر جایگزین خاک می‌شوند و در نهایت باعث سبک سازی نمونه‌ها می‌گردند و همچنین به علت جذب آب توسط این مواد میزان اضافه کردن آب به نمونه‌ها با افزایش الیاف رشد داشته و سبب افزایش درصد رطوبت با توجه به افزایش مسلح کننده در نمونه‌ها می‌گردد.



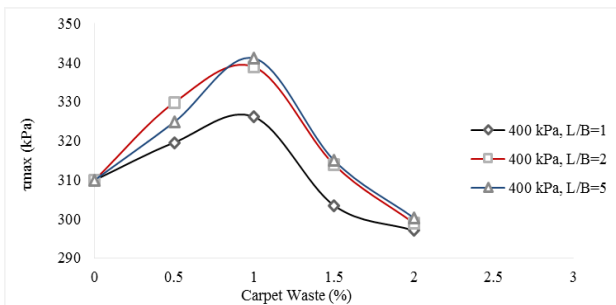
شکل ۵. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها



شکل ۷. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر تنش برشی ماکزیمم نمونه‌ها تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۸. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر تنش برشی ماکزیمم نمونه‌ها تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال



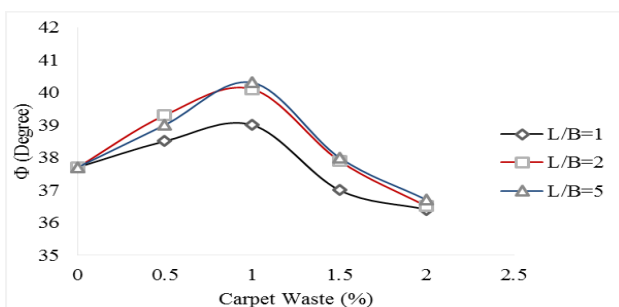
شکل ۹. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر تنش برشی ماکزیمم نمونه‌ها تحت سربار ۴۰۰ کیلوپاسکال.

در ادامه جهت بررسی پارامترهای مقاومت برشی که زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی می‌باشد پس از استخراج نتایج که مطابق با مقادیر شکل‌های ۷ تا ۹ می‌باشد با استفاده از رابطه (۱) مقادیر پارامترهای مقاومت برشی محاسبه گردیده است:

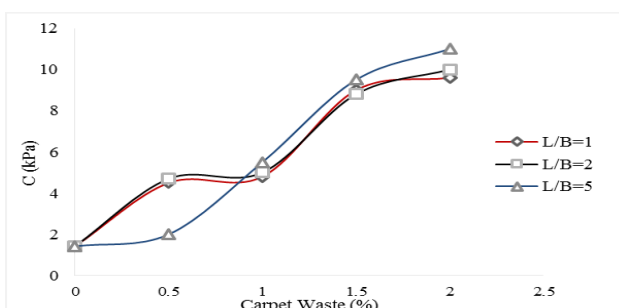
$$\tau_f = \sigma \tan \Phi + c \quad (1)$$

از آن با افزودن مسلح کننده روند کاهشی پیدا کرده است. در ادامه با مشاهده شکل (۹) که نمونه‌ها تحت سربار ۴۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته‌اند میزان افزایش مقدار تنش برشی ماکزیمم در نسبت اضلاع ۵ که بیشترین تنش برشی در این نسبت اضلاع برای ۱ درصد وزنی مسلح کننده می‌باشد که حدود ۱۰ درصد نسبت به ماسه طبیعی رشد داشته است. بنابراین افزودن مسلح کننده باعث درگیری بهتر دانه‌های خاک می‌گردد و به سبب نیروی کششی نسبتاً بالای مسلح کننده نسبت به خاک در افزایش تنش برشی ماکزیمم موثر می‌باشد. همچنین قابل ذکر است یکی از عوامل مهم در رفتار خاک ماسه‌ای مسلح شده، اندرکنش بین ذرات خاک و مسلح کننده می‌باشد که این تعامل بین خاک و مسلح کننده عملاً تابعی از نسبت اضلاع، زبری سطح، میزان ریز بودن دانه‌های ماسه و ابعاد الیاف می‌باشد. نتایج مطالعات (Michalowski et al., 2003) نشان می‌دهد که در صورت یکسان بودن شرایط آزمایش، نمونه‌هایی که دارای الیاف با طول بلندتر می‌باشند مقاومت برشی بیشتری در نمونه‌ها از خود نشان می‌دهند. همچنین از عوامل موثر تعامل بین ذرات خاک و مسلح کننده مواردی از قبیل تمایل نمونه به تغییر حجم، تراکم، اندازه ذرات، شکل هندسی و زبری سطح مسلح کننده، درجه اشباع، شرایط زهکشی و نرخ بارگذاری می‌تواند تاثیر گذار باشد (Li., 2005). خاک مسلح شده عملاً بصورت یک ماده مرکب عمل می‌کند بطوریکه مسلح کننده‌های قرار گرفته مقاومت کششی بالای دارند و همچنین تنش‌های برشی ایجاد شده در نمونه حاصل از بسیج مقاومت کششی ضایعات موکت بوده و باعث افزایش مقاومت برشی در نمونه‌ها گردیده است که روند این تغییرات در شکل‌های ۷ تا ۹ قابل رویت می‌باشد. با بررسی نمودارهای ۷ تا ۹ مشاهده می‌گردد افزودن درصد‌های مختلف مسلح کننده مورد استفاده در نسبت اضلاع ۱، ۲ و ۵، دارای یک پیک مشخص در اثر افزودن ۱ درصد وزنی مسلح کننده به ماسه طبیعی می‌باشد و می‌تواند باعث افزایش پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های خاک گردد

جو کرد که سبب افزایش چسبندگی در نمونه گردیده است. همچنین ذکر این نکته ضروری است نیروی کششی بسیج شده در مسلح کننده عملا دارای دو نیروی عمودی و مماس بر سطح می باشد که مولفه عمودی بر سطح موجب افزایش تنش نرمال و به دنبال آن سبب افزایش اصطکاک بین دانه ها در سطح برش می گردد و همچنین مولفه مماسی بطور مستقیم از لغزش جلوگیری می کند و در نتیجه پارامترهای مقاومت برشی را افزایش می دهد. در ادامه برای مشاهده نتایج مشخصات تراکمی نمونه ها و همچنین پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه ای و نمونه های مسلح به ضایعات موکت در یک جمع بندی کلی جدول (۶) ارائه شده و نتایج در قالب این جدول آورده شده است.



شکل ۱۰. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر زاویه اصطکاک داخلی نمونه ها



شکل ۱۱. تاثیر ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف بر چسبندگی نمونه ها

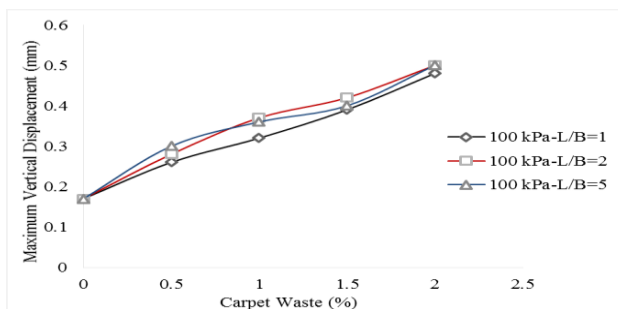
که در آن تنش برشی گسیختگی، σ تنش قائم، Φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و c چسبندگی خاک می باشد. همچنین در ادامه نتایج مربوط به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در شکل (۱۰) و تغییرات چسبندگی نمونه ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج حاصل از تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نشان می دهد با افزودن درصد های مختلف مسلح کننده به ماسه تا ۱ درصد وزنی روند صعودی داشته و سپس روند آن بصورت نزولی می باشد که در تمام نسبت اضلاع مورد استفاده در این پژوهش به همین صورت صدق می کند. با بررسی شکل (۱۰) مشاهده می گردد یک نقطه اوج مشخص برای همه نسبت اضلاع در ۱ درصد وزنی ضایعات موکت برای نمونه ها وجود دارد که بیشترین مقدار مربوط به نسبت اضلاع ۵ می باشد که نسبت به ماسه طبیعی حدود ۷ درصد افزایش یافته است. همچنین با بررسی شکل (۱۱) که مربوطه به تغییرات چسبندگی می باشد مشاهده می شود در این پژوهش روند همواره بصورت صعودی بوده و مسلح کننده در هنگام درگیری با دانه های خاک زمانی که در معرض رطوبت بهینه قرار می گیرد باعث افزایش چسبندگی نمونه ها می گردد که در تمام نسبت اضلاع این افزایش مشاهده شده و بیشترین افزایش در این پژوهش در اثر افزودن ۲ درصد وزنی مسلح کننده می باشد که حدود ۸ برابر نسبت به ماسه طبیعی رشد داشته است. با توجه به نتایج بدست آمده از پارامترهای مقاومت برشی مشاهده می گردد در این پژوهش با توجه به نوع المان مسلح کننده مصرفی که ضایعات موکت در نسبت اضلاع ۱، ۲ و ۵ و همچنین درصد های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک می باشد، یک مقدار بهینه در این پژوهش در نسبت اضلاع ۵ و درصد وزنی ۱ مشاهده شده است که علاوه بر بیشترین تنش برشی ماکزیمم دارای بیشترین زاویه اصطکاک داخلی نیز می باشد. اما در مورد چسبندگی روند همواره بصورت صعودی بوده که علت آن را می توان در رطوبت و جذب آب توسط مسلح کننده جست و

جدول ۶. اثر ضایعات موکت بر مشخصات تراکمی و پارمترهای مقاومت برشی خاک (S: Sand, CW: Carpet Waste)

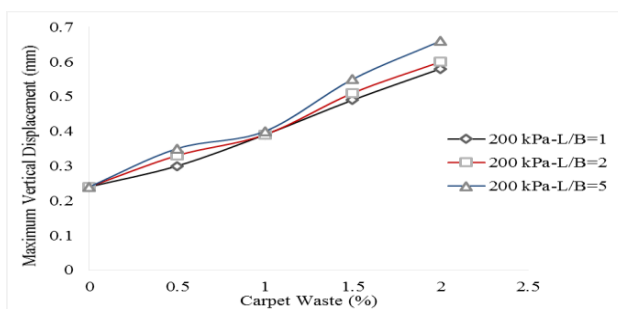
NO	Name of specimens	L/B	Carpet Waste (%)	Direct Shear Test		Standard Proctor Test	
				Φ (Degree)	C (kPa)	γ_a (kN/m ³)	ω (%)
1	S0%CW	0	0	37.7	1.42	1.53	10.6
2	S0.5%CW	1	0.5	38.5	4.5	1.52	16.9
3	S1%CW	1	1	39	4.8	1.52	17.3
4	S1.5%CW	1	1.5	37	9	1.51	18.2
5	S2%CW	1	2	36.4	9.6	1.5	19.2
6	S0.5%CW	2	0.5	39.3	4.7	1.51	17.5
7	S1%CW	2	1	40.1	5	1.5	18.6
8	S1.5%CW	2	1.5	37.9	8.8	1.49	19.5
9	S2%CW	2	2	36.5	10	1.48	20
10	S0.5%CW	5	0.5	39	2	1.51	17.9
11	S1%CW	5	1	40.3	5.5	1.49	19.3
12	S1.5%CW	5	1.5	38	9.5	1.48	20.2
13	S2%CW	5	2	36.7	11	1.47	20.9

۳.۲.۲. اثر ضایعات موکت بر حداکثر جابجایی قائم خاک

افزایش بیشتری داشته و روند افزایشی در آن‌ها مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۲. حداکثر جابجایی قائم نمونه‌ها تحت سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

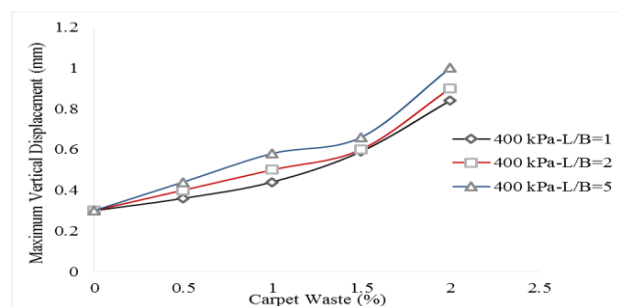


شکل ۱۳. حداکثر جابجایی قائم نمونه‌ها تحت سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال

نتایج مربوط به تغییرات جابجایی قائم ماکزیمم حاصل از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس که بر روی ماسه مسلح شده با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ ضایعات موکت با نسبت اضلاع ۱، ۲ و ۵ انجام شده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ آورده شده است. با بررسی شکل (۱۲) که مربوط به سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد ملاحظه می‌گردد که بیشترین جابجایی در ۲ درصد وزنی در همه نسبت‌های اضلاع مسلح کننده رخ داده که نسبت به خاک ماسه طبیعی حدود ۳ برابر رشد داشته است. در شکل (۱۳) با بیشتر شدن سربار که ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد میزان جابجایی نسبت به قبل بیشتر شده و در نسبت اضلاع ۵ درصد وزنی مسلح کننده حدود ۲/۵ برابر نسبت به ماسه طبیعی رشد داشته است. همچنین حداکثر جابجایی قائم مخلوط ماسه و ۲ درصد وزنی ضایعات موکت با نسبت اضلاع ۵ در سربار ۴۰۰ کیلوپاسکال ۱ میلیمتر در شکل (۱۴) نشان داده شده که حدود ۳ برابر ماسه طبیعی می‌باشد و در یک جمع بندی کلی می‌توان ملاحظه کرد در سربارهای مختلف تقریباً میزان جابجایی نزدیک بهم بوده لذا این نکته نیز قابل ملاحظه می‌باشد که مقادیر این جابجایی‌ها در حالات مختلف ناچیز می‌باشد اما با توجه به افزایش سربار و همچنین افزایش درصد وزنی مسلح کننده مقدار جابجایی

افزایش در نسبت اضلاع ۵ با افزودن ۱ درصد وزنی ضایعات موکت در همه سربارها می‌باشد که به ترتیب نسبت به ماسه طبیعی حدود ۱۹، ۱۴ و ۱۰ درصد افزایش داشته است و مشاهده می‌شود که در سربار کمتر درصد رشد بالاتری داشته است. قابل ذکر است تنش های برشی ایجاد شده در نمونه حاصل از بسیج مقاومت کششی ضایعات موکت بوده و باعث افزایش مقاومت برشی در نمونه‌ها گردیده است.

- نیروی کششی بسیج شده در مسلح کننده عملاً دارای دو نیروی عمودی و مماس بر سطح می‌باشد که مولفه عمودی بر سطح موجب افزایش تنش نرمال و به دنبال آن سبب افزایش اصطکاک بین دانه‌ها در سطح برش می‌گردد که بر این اساس مقدار زاویه اصطکاک داخلی با افزودن تا ۱ درصد مسلح کننده افزایش و به دنبال آن کاهش می‌یابد که بیشترین افزایش نسبت به ماسه طبیعی در نسبت اضلاع ۵ ضایعات موکت حدود ۷ درصد می‌باشد.
- در تمامی نسبت اضلاع مورد مطالعه مقدار تنش برشی ماکزیمم و زاویه اصطکاک داخلی تا ۱ درصد وزنی مسلح کننده دارای رشد بوده و بعد از آن، روند بصورت کاهشی می‌باشد و به عبارتی دیگر می‌توان برای تمامی نمونه‌ها یک نقطه بهینه یا پیک مشخص در نسبت اضلاع ۵ و افزودن مسلح کننده تا ۱ درصد وزنی به ماسه مصرفی در این پژوهش در نظر گرفت.
- مقدار چسبندگی نمونه‌های مسلح شده در تمامی نسبت اضلاع ضایعات موکت همواره بصورت صعودی بوده و بیشترین افزایش در نسبت اضلاع ۵ با افزودن ۲ درصد وزنی ضایعات موکت به نمونه خاک بوده و حدود ۸ برابر نسبت به ماسه طبیعی رشد داشته است.



شکل ۱۴. حداکثر جابجایی قائم نمونه‌ها تحت سربار ۴۰۰ کیلوپاسکال

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر ضایعات موکت بر مشخصات تراکمی، پارامترهای مقاومت برشی و تغییرات جابجایی قائم خاک ماسه‌ای پرداخته شده است که افزودن ضایعات موکت باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک شده است و همچنین استفاده از مواد بازیافتی نظیر ضایعات موکت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و به دنبال آن سبب جلوگیری از آسیب به محیط زیست می‌گردد. با توجه به اثر مناسب و مطلوب مواد بازیافتی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک، تسلیح با این نوع مواد را می‌توان یک روش عملی و اجرایی در پروژه‌های مهندسی عمران در نظر گرفت. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش بصورت موارد زیر استخراج گردیده و بیان شده است:

- با افزودن مقادیر ضایعات موکت در نسبت اضلاع مختلف، میزان رطوبت بهینه نمونه افزایش یافته است که بیشترین میزان رشد درصد رطوبت بهینه در ۲ درصد وزنی ضایعات موکت در نسبت اضلاع ۵ می‌باشد که حدود ۲ برابر می‌باشد که با توجه به میزان جذب آب بیشتر مسلح کننده باعث نگهداری و جذب بیشتر آب در نمونه‌ها می‌گردد و در نتیجه سبب افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. - افزودن ضایعات موکت با نسبت اضلاع مختلف در سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال سبب افزایش تنش برشی ماکزیمم گردیده و بیشترین

می‌باشد که مقادیر این جابجایی‌ها در حالات مختلف ناچیز می‌باشد.

- در مورد جابجایی قائم نمونه‌ها در سربارهای مختلف و نسبت اضلاع متفاوت با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در این پژوهش می‌توان مشاهده نمود که در سربارهای مختلف تقریباً میزان جابجایی قائم نزدیک بهم بوده لذا این نکته نیز قابل ملاحظه

منابع

- Ahmadi, H., Janati, S., Jamshidi Chenari, R. Strength Parameters of Stabilized Clay Using Polypropylene Fibers and Nano-MgO: An Experimental Study. *Geotechnical and Geological Engineering* 38.3 (2020): 2845-2858.
- Akbarimehr, D., Eslami, A., Esmail, A. Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste. *Journal of Cleaner Production* 271 (2020): 122632.
- ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM International, West Conshohocken, 2017).
- ASTM D421, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (ASTM International, West Conshohocken, 2007).
- ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (ASTM International, West Conshohocken, 2000).
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM International, West Conshohocken, 2014).
- ASTM D3080, D3080M-11, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. (ASTM International, West Conshohocken, 2011)
- Blayi, R.A., Sherwani, A.F.H., Ibrahim, H.H., Faraj, R.H. Daraei, A. Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020), p.e00427.
- Changizi, F., Haddad, A. Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber. *Journal of rock mechanics and Geotechnical Engineering* 7.4 (2015): 367-378.
- Ghiassian, H., Poorebrahim, G., Gray, D.H. Soil reinforcement with recycled carpet wastes. *Waste Management & Research* 22.2 (2004): 108-114.
- Ghiassian, H., Shahnazari, H., Shafiee, A., Tabarsa, A.R., Jamshidi Chenari, R. Damping characteristics of silty sand reinforced with carpet waste strips. *Amirkabiar Journal of Civil Engineering* 42, no. 1 (2010): 65-73.
- Janalizadeh Choobbasti, A., Amozadeh Samakoosh, M., Soleimani Kutanaei, S. Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers. *Construction and Building Materials* 211 (2019): 1094-1104.
- Khosh, B., Atapour, H., Abbaspour, M. Effect of waste tire textile Fibers on strength and deformability of shotcrete. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology* (2020).
- Li, C. Mechanical response of fiber reinforced soil. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, USA, 2005.
- Michalowski, Radoslaw L., and Jan Čermák. "Triaxial compression of sand reinforced with fibers." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 129.2 (2003): 125-136.
- Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M., McMahan, P. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139, no. 3 (2013): 483-493.
- Sarli, J.M., Hadadi, F., Bagheri, R. Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO₂. *Geotechnical and Geological Engineering* 38.2 (2020): 1151-1163.
- Wang, Y. Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 38.3 (1999): 533-546.