



بررسی رفتار مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بندرانزلی مسلح شده با پلی اتیلن ترفتالات (PET)

زهرا حاجیان نژاد^۱، محسن کرامتی^{۲*}، مرتضی علینژاد^۱، رضا نادری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۱۹

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۲۵

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۰۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۰۱

کلمات کلیدی:

ماسه

پلی اتیلن ترفتالات

برش مستقیم بزرگ مقیاس

تسلیح

رفتار مکانیکی خاک

خلاصه: باتوجه به تولید روزافزون مواد پلاستیکی، دغدغه ی بین المللی دفع یا بازیافت ضایعات پلاستیکی در جهان مطرح است. یکی از راه کارهای استفاده ی مجدد از ضایعات پلاستیکی، استفاده از آن ها در مهندسی و بهسازی ساخت گاه ها یا زمین های سست است. هدف از انجام این پژوهش یافتن راهی برای استفاده ی مجدد نوعی خاص از پلاستیک ها (بطری های دوغ، نوشابه، آب معدنی و...) در کارهای ژئوتکنیکی جهت بهسازی خاک می باشد. در این مقاله رفتار مکانیکی ماسه‌ی بندرانزلی که با خرده های پلی اتیلن ترفتالات ۱×۱ سانتی متری و نوارهای ۵×۱ سانتی متری به مقادیر ۰ و ۰/۱ و ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد و الیاف پلی اتیلن ترفتالات به مقادیر ۰ و ۰/۱ و ۰/۵ درصد از وزن خاک خشک به طور جداگانه مسلح شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌های دارای تراکم ۷۶٪ انجام شده و تاثیر پارامترهایی چون ابعاد، درصد وزنی مسلح کننده‌ها در خاک و همچنین سربار قائم بررسی گردیده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده اگرچه خرده‌ها و نوارهای پلی اتیلن ترفتالات موجب بهبود رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای شده‌اند؛ اما تاثیر تسلیح با الیاف بر بهبود خصوصیات مکانیکی خاک به مراتب بیشتر بوده است. همچنین درصد بهینه‌ی مسلح کننده‌های نواری و خرده‌های پلی اتیلن ترفتالات ۱٪ از وزن خاک خشک به دست آمده است. مقایسه‌ی بین نمونه‌های مسلح و غیر مسلح نشان داده است نمونه‌های مسلح دارای شکل‌پذیری و مقاومت بیشتری بوده‌اند.

۱- مقدمه

پتانسیل ریسک پذیری کم و غیره) در حال کاهش هستند. در سال های اخیر روش ها، مصالح و تحلیل های عددی متنوعی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی خاک های با مقاومت کم مورد استفاده قرار گرفته اند که به عنوان مثال می توان به استفاده از روش هایی مانند زهکش های ماسه‌ای و شمع ها، تکنیک های تسلیح خاک از قبیل ژئوتکستایل ها، ژئوگریدها و به طور خاص الیاف مصنوعی و طبیعی اشاره کرد.

در این مقاله به روشی کارآمد برای بهسازی خصوصیات مکانیکی خاک پرداخته شده است که از مزایای این روش می توان به ساده بودن فرآیند و هزینه های اجرایی کم اشاره نمود. از طرفی بخش عظیمی از ضایعات جمع آوری شده که به مخازن دفن زباله انتقال

امروزه با گسترش جمعیت و تغییرات فرهنگی در سراسر جهان، نیاز به تولیدات صنعتی و پلاستیکی افزایش یافته است. افزایش تولیدات پلاستیکی منجر به تولید ضایعات تجزیه ناپذیر در مقادیر بزرگ می‌شود. بنابراین یافتن روش های جدید استفاده از پلاستیک ها و کشف راه هایی برای استفاده ی مجدد از آن ها می تواند موجب کاهش تاثیرات مخربشان بر محیط زیست شود.

از گذشته تا به امروز خاک برای ساخت انواع سازه ها بر روی زمین نیازمند بهسازی بوده است. علاوه براین به علت رشد جمعیت، سایت های ژئوتکنیکی مناسب (دارای خاک مناسب، دسترسی آسان،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: keramati@shahroodut.ac.ir



می یابند قابل استفاده می باشند. پلی اتیلن ترفتالات یا پت^۱ معمولاً به شکل بطری های نگهدارنده ی مایعات و پلاستیک های بسته بندی مورد استفاده قرار می گیرد که برای قابل استفاده شدن جهت بهسازی خصوصیات مکانیکی خاک باید خرد شده و یا به صورت الیاف درآید. بنابراین استفاده از ضایعات پت جهت بهسازی خواص مکانیکی خاک منجر به ایجاد منبع مصرف جدیدی برای این ضایعات می گردد در نتیجه مهم ترین حسن بهسازی به وسیله ی پت، کمک به حفظ محیط زیست است.

محققین بسیاری رفتار خاک مسلح شده با الیاف مختلف طبیعی و مصنوعی را مطالعه کرده اند. (به عنوان مثال می توان به دستاوردهای Ohashi, [۱] Andersland و Khattak 1979 و Wang و Youjiang 1999، [۲] Ho 1994 و Maher [۳]، [۴] Tan و Park 2005، [۵] Tang 2007، [۶] Akbulut در سال ۲۰۰۷ [۷] و Consoli و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۸] و اشاره کرد) . نتایج آزمایشگاهی نشان داده است تسلیح خاک با الیاف منجر به افزایش مقاومت فشاری خاک، افزایش کرنش شکست و شکل پذیری نمونه و افزایش مقاومت برشی خاک شده و به طور کلی رفتار خاک بهبود یافته است.

به طور خاص نیز تعدادی از مطالعات جهت بررسی تاثیر تسلیح خاک با پت انجام شده که در این بخش توضیح مختصری پیرامون هریک آورده شده است.

Maher و Ho در سال ۱۹۹۳ آزمایش های سه محوری فشاری و سه محوری سیکلی را بر روی ماسه ترکیب شده با سیمان و مسلح شده با الیاف پت با توزیع تصادفی انجام داده اند. نتایج نشان داده که تسلیح با الیاف، به طور چشم گیری مقاومت فشاری و کششی ترکیب ماسه سیمانیته را افزایش داده که این افزایش مقاومت با افزایش درصد الیاف و افزایش طول الیاف، بیشتر شده است. حداکثر تنش برشی نمونه مسلح شده نشان داده که در اثر افزودن الیاف، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بین دانه ای خاک نیز افزایش پیدا کرده است. [۳]

Ding و Li در سال ۲۰۰۲ خاک چسبنده ای که از مناطقی با شیب تند برداشت شده بود را با استفاده از الیاف پت مسلح کرده و با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی نمونه های مسلح شده، شاهد افزایش یک پارچگی و مقاومت تک محوره بیشتر نمونه و افزایش زاویه اصطکاک داخلی آن بوده اند که امکان برداشت خاک از

1 Polyethylene-Terephthalate (PET)

سطوح باشیب بیشتر را فراهم می آورد. [۹] Consoli و همکاران در سال ۲۰۰۲ درباره ی رفتار مهندسی ماسه ی مسلح شده با پلاستیک ضایعاتی مطالعه کرده اند. مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل ماسه ی ریزدانه ی یکنواخت، الیاف پت تا طول ۳۶ میلی متر و تا مقدار ۰/۹٪ از وزن ماسه و سیمان پرتلند زودگیر به مقدار ۰٪ تا ۷٪ از وزن ماسه بوده اند. آزمایش های فشاری محصور نشده، استحکام کششی، فشاری سه محوره زهکشی شده، همراه یا اندازه گیری کرنش محلی انجام شده و نتایج نشان داده است که تسلیح با الیاف پت، باعث بهبود مقاومت نهایی و مقاومت پیشینه ی خاک حاوی سیمان و خاک بدون سیمان شده و همچنین تردی خاک سیمان دار را کاهش داده است. [۱۰]

Babu و همکاران در سال ۲۰۱۱، موفق به تحلیل پاسخ تنش-کرنش خاک با پلاستیک بازیافتی شده اند. مقدار الیاف پلاستیک از ۰٪ تا ۰/۱٪ بوده است. در این تحقیق، خاک قرمز و ماسه با ذراتی بین ۷ میکرومتر تا ۴۲۵ میکرومتر همراه با الیافی به طول ۱۲ میلی متر و عرض ۴ میلی متر با یکدیگر مخلوط شده اند. از آزمایش ها این گونه دریافت شده که در آزمایش فشاری محصورنشده، مقاومت محصورنشده در خاک مسلح شده با ۱٪ پلاستیک، به میزان ۷۳/۸٪ بیشتر از خاک غیرمسلح بوده است. [۱۱]

اژدرپور و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از خرده پت، تسلیح دو نوع خاک ماسه ای و رسی را انجام داده اند. آن ها از براده های پت با ابعاد رد شده از الک شماره ۱۰، و با درصدهای وزنی صفر تا ۵۰ درصد برای تسلیح استفاده نموده و آزمایش های تراکم و برش مستقیم کوچک مقیاس را بر روی نمونه های مسلح انجام داده اند. نتایج نشان داده است که افزایش مقاومت برشی در خاک ماسه ای در اثر تسلیح، بیشتر از خاک رسی بوده و همچنین درصد بهینه ی مسلح کننده در خاک ماسه ای بیشتر از رس بوده است. ایشان از نتایج آزمایش های تراکم دریافته اند که با افزایش درصد پت، درصد رطوبت بهینه ی خاک رسی افزایش یافته، ولی در خاک ماسه ای تغییری نکرده است. [۱۲]

سیم نگار و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه ی رفتار مکانیکی ماسه ی لای دار مسلح شده با الیاف پت پرداخته اند و بر روی نمونه های مسلح، آزمایش های مقاومت فشاری محصورنشده (تک محوری)، نسبت باربری کالیفرن (CBR) و برش مستقیم انجام داده اند. نتایج نشان داده که افزودن الیاف به خاک، مقاومت فشاری

ضایعاتی در تراکم ۷۰٪ مشاهده کرده‌اند تسلیح خاک با ژئوگریدهای تولیدشده از پلاستیک ضایعاتی موجب بهبود رفتار بار- نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک شده است. [۱۸]

Badawy. در سال ۲۰۱۸ با افزودن نوارهای پت به خاک رسی استفاده شده در زیرسازی راه نتیجه گرفته است که تسلیح خاک با پت موجب افزایش مقاومت و کاهش ترک‌های ناشی از خستگی در خاک شده است. [۱۹]

Peddaiah و همکاران در سال ۲۰۱۸، با افزودن خرده پت با ابعاد $1/5 \times 1/5$ سانتی متر با درصدهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد وزنی به خاک ماسه-سیلتی و انجام آزمایش های برش مستقیم، CBR و تراکم، به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک مسلح شده با پت پرداخته اند که نتایج نشان داده است تسلیح خاک سیلتی مورد آزمایش، موجب افزایش مقاومت برشی آن شده که با افزایش سربار قائم، تاثیر آن مشهودتر بوده و این افزایش مقاومت در ۰/۴ درصد پت، در بهترین حالت بوده است. [۲۰]

هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین ابعاد و درصد وزنی مسلح کننده ی پت تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال که خاک بیشترین سطح مقاومتی را از خود نشان داده است، برای خاک ماسه‌ای بندر انزلی تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار مکانیکی ماسه ی مسلح و غیرمسلح ۳۳ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس انجام شده است. شکل مسلح کننده های پت (خرده های 1×1 سانتیمتری، نوارهای 1×5 سانتیمتری و الیاف)، سربار قائم (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) و درصد وزنی پت در خاک (۰، ۱/۵، ۰/۱ و ۲٪ از وزن خاک خشک) پارامترهایی هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته اند.

۱-۲- خاک ماسه‌ای مورد استفاده

خاک مورد استفاده، ماسه ی گردگوشه ی یکنواخت و از نوع کربناته بوده و متعلق به سواحل دریای خزر (بندر انزلی در شمال ایران) می باشد. پس از تهیه ی خاک از ساحل بندر انزلی، آزمایش دانه بندی بر روی ماسه بر اساس استاندارد ASTM D422-87

محصولنشده، CBR و مقاومت برشی خاک را بهبود بخشیده است. [۱۳]

Acharyya و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی بهبود مقاومت برشی زهکشی نشده ی خاک رس همراه با خرده های بطری های پت پرداخته اند. خاک رسی با ۱۰٪ و ۲۰٪ ماسه مخلوط شد و خرده های پت با طول هایی از ۵ میلی متر تا ۱۵ میلی متر و عرض ۵ میلی متر و مقدار ۲٪ تا ۵٪ از وزن خاک، به آن اضافه شده اند. آزمایش های مقاومت فشاری محصورنشده و برش مستقیم انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که افزایش درصد پت تا مقدار ۱٪، مقاومت فشار محصورنشده ی مخلوط خاک-الیاف هم افزایش یافته است. [۱۴]

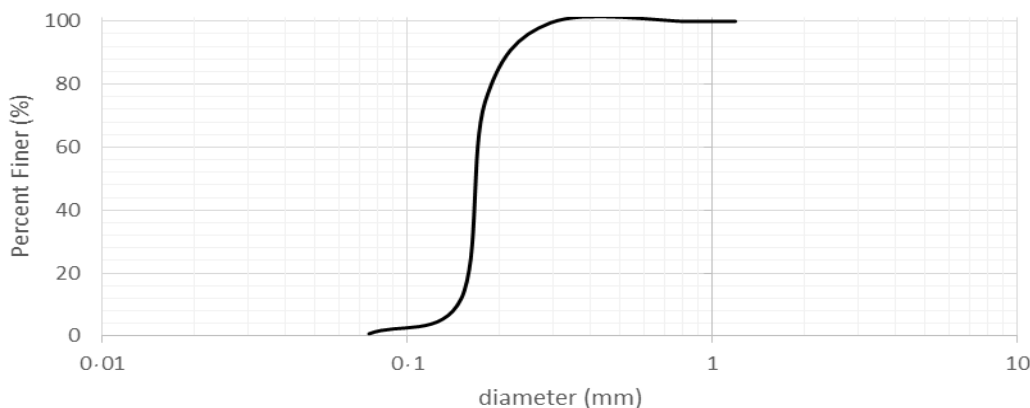
Botero و همکاران در سال ۲۰۱۵، خاک سیلتی (MH) عبوری از الک شماره ۶۰ را با الیاف پت حاصل از بازیافت بطری ها مسلح کرده و بر روی نمونه های مسلح شده آزمایش های UU با فشارهای سربار معادل ۲/۵، ۵ و ۷/۵ متر و با درصد الیاف صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ درصد انجام داده اند. نتایج نشان داده است که حضورالیاف پت باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی خاک شده است. همچنین درنمونه های غیرمسلح بر خلاف نمونه های مسلح، شکست ترد رخ داده که این امر به دلیل تغییرشکل پذیری نمونه های مسلح بوده است. [۱۵]

Patil و همکاران در سال ۲۰۱۶ با انجام آزمایش های برش مستقیم و سه محوری بر روی خاک ریزدانه‌ی مسلح شده با خرده‌های پت به مقدار ۱٪ از وزن خاک خشک مشاهده کرده اند که افزودن پت به خاک منجر به افزایش چسبندگی و ظرفیت باربری خاک گردیده است. [۱۶]

مالیدره و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی ماسه ی بابلسر، مسلح شده با سیمان و الیاف پت، پلی پروپیلن و کیسه‌های پلاستیکی به طور جداگانه انجام داده اند و طی آن با انجام آزمایش های برش مستقیم و سه محوری، پارامترهای مقاومتی خاک را بررسی کرده و دریافته اند الیاف پت باعث بیشترین افزایش در مقاومت برشی خاک های ماسه ای شده اند. مقدار بهینه الیاف برای تقویت ماسه، ۱٪ به دست آمده و همچنین الیاف باعث افزایش مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده بودند. [۱۷]

Di Emidio و همکاران در سال ۲۰۱۸ با انجام آزمایش بر روی ماسه‌ی رودخانه‌ای مسلح شده با ژئوگریدهایی از جنس پلاستیک

منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی بندر انزلی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی بندر انزلی

Fig. 1. The particle size distribution curve of Bandar-e Anzali sand

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی ماسه‌ی بندر انزلی

Table 1. Physical properties of Anzali port sand

ویژگی	G_s	e_{min}	e_{max}	$(\gamma_d)_{min}$ gr/cm ³	$(\gamma_d)_{max}$ gr/cm ³	D_{50} , mm	Cu	Cc
مقدار	۲/۶۵	۰/۶۵	۱/۱۲	۱/۲۵	۱/۶	۰/۱۷	۱/۲۵	۱/۰۷

اسید^۲ حاصل می‌شود.

مسئله‌کننده‌های استفاده شده شامل خرده‌های پت به ابعاد ۱×۱ سانتیمتر، نوارهای پت به ابعاد ۵×۱ سانتیمتر و الیاف با طول میانگین ۵ و قطر ۰/۰۲ میلی‌متر بوده‌اند. لازم به ذکر است مسلح‌کننده‌ها از خرد کردن بطری‌های پلاستیک ضایعاتی به دست آمده‌اند. شکل ۲ انواع مسلح‌کننده‌های استفاده شده در پژوهش را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مقادیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پت آورده شده است.

۲-۳- تجهیزات و روش انجام آزمایش

از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد جعبه‌ی برش ۳۰×۳۰×۱۵ سانتی‌متر، با جک پنوماتیک جهت اعمال سربار قائم استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری دقیق تغییرشکل‌های افقی و قائم، از سنسورهای LVDT در راستای افقی و قائم جعبه برش استفاده شد که بلافاصله اطلاعات را از طریق یک دستگاه Data

انجام شده است. در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی این خاک نشان داده شده است. طبق این نمودار متوسط اندازه‌ی ذرات خاک (D_{50})، ۰/۱۷ میلی‌متر بوده و ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک نیز به ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۰۷ می‌باشد. همچنین ماسه‌ی بندر انزلی در سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه‌ی بدانه‌بندی شده (SP) قرار دارد. طبق آزمایش تعیین وزن مخصوص مواد جامد خاک بر اساس ASTM D854-87 چگالی ویژه ماسه ۲/۶۵ می‌باشد. ضمناً خاک ماسه‌ای از نوع کربناته می‌باشد. مشخصات خاک در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- مسلح‌کننده‌های مورد استفاده

به منظور تسلیح خاک ماسه‌ای از پلی‌اتیلن ترفتالات استفاده شده است. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET یا PETE)، یک فیبر مصنوعی و رزین محکم و خشک است. یکی از اعضای خانواده‌ی پلی‌استرهاست که پلیمر هستند و از طریق پلیمرسازی اتیلن گلیکول^۱ و ترفتالات

2 Terephthalate acid

1 Ethylene glycol



شکل ۲. شکل‌های مختلف مسلح کننده‌ها
 Fig. 2. Different shapes of reinforcements

جدول ۲. مقادیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پت
 Table 2. Values of physical and mechanical properties of PET

شماره	مقدار	واحد	کد آزمایش ASTM	پارامتر
			۱	خصوصیات فیزیکی
الف	۰/۰۴۹۹	lbs/cu in ³	D792	چگالی
ب	۰/۱	%	D570	جذب آب
			۲	خصوصیات مکانیکی
الف	۱/۳۸	g/cu cm ³	D792	Gs
ب	۱۱۵۰۰	Psi	D638	مقاومت کششی در هنگام گسیختگی
ج	۴×۱۰۵	Psi	D638	مدول کششی
د	۷۰	%	D638	تغییر طول در هنگام گسیختگی
ه	۱۵۰۰۰	Psi	D790	مقاومت خمشی
و	۴×۱۰۵	Psi	D790	مدول خمشی
ز	۰/۷	ft-lbs/in	D259	استحکام ضربه‌ی ایزوتوپ
ح	R117	-	D785	سختی راک ول
ط	۰/۰-۱۹/۲۵	Static-dynamic	-	ضریب زاویه‌ی اصطکاک



شکل ۳. دستگاه برش مستقیم و دیتالاگر ۸ کاناله

Fig. 3. direct shear machine and 8-channel data logger

جدول ۳. دقت و بازه ی اندازه گیری سنسورهای استفاده شده

Table 3. Accuracy and measurement range of sensors used

ردیف	سنسور	دقت	بازه ی اندازه گیری
۱	LVDT جهت اندازه گیری جابجایی قائم	۰/۰۱ میلیمتر	صفر تا ۵۰ میلیمتر
۲	LVDT جهت اندازه گیری جابجایی افقی	۰/۰۱ میلیمتر	صفر تا ۱۰۰ میلیمتر
۳	LoadCell جهت اندازه گیری نیروی برشی اعمال شده	۱۵۰ گرم-فرس (gr.f)	صفر تا ۱۰ تن

چکش لاستیکی کوبیده شده است تا به تراکم مورد نظر برسد. جهت ایجاد تراکم یکنواخت در تمام نمونه، لایه های زیرین کمتر از لایه ی بالایی کوبیده شده اند. سطح هر لایه قبل از ریختن لایه ی بعدی با استفاده از یک کاردک چوبی صاف شده است تا اتصال بین لایه ها در نمونه های مختلف به طور یکسان صورت گیرد. برای تمام نمونه ها با توجه به حداکثر وزن مخصوص خشک مینیمم و ماکزیمم نمونه، سعی شده است تا نمونه به تراکم نسبی ۷۶٪ برسد. لازم به ذکر است که وزن مخصوص مینیمم و ماکزیمم نمونه ها به ترتیب با توجه به استانداردهای ASTM D4254 و ASTM D4253 به دست آمده اند. در جدول ۴ مقادیر وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص خشک مینیمم و ماکزیمم برای نمونه های مختلف آورده شده است. ضمناً ارتفاع نمونه ها بعد از اعمال سربار قائم اندازه گیری شده و وزن مخصوص خشک با توجه به ارتفاع نمونه بعد از اعمال سربار قائم محاسبه شده است؛ هرچند که به دلیل تراکم نسبتاً بالای نمونه ها اعمال سربار قائم نشست محسوس در نمونه ها ایجاد نکرده است. نمونه ها تحت سربارهای قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و با نرخ برش ثابت ۲/۰۶۷ میلی متر بر دقیقه طبق استاندارد

Logger به کامپیوتر انتقال می دهند. شکل ۳، دیتالاگر و دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس به کار رفته را نشان می دهد. در جدول ۳ دقت و بازه ی اندازه گیری سنسورها آمده است. در این آزمایش ها خاک مسلح و غیرمسلح با تراکم نسبی ۷۶ درصد طبق استاندارد ASTM 3080 مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته است. به دلیل انعطاف پذیر بودن پت، استفاده از مسلح کننده های پت با ابعاد مساوی و یا کوچکتر از یک سوم کوچکترین بعد دستگاه قابل توجیه می باشد [۲۱]. در تسلیح خاک با خرده ها و نوارهای پت مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد و در تسلیح با الیاف پت مقادیر ۰/۱ و ۰/۵ درصد (به دلیل عدم اختلاط مناسب خاک و الیاف در درصدهای بالاتر الیاف، به همین مقادیر بسنده شد) از وزن خاک خشک، مسلح کننده به خاک اضافه و خاک مسلح در داخل جعبه ی برش به صورت نمونه های ۱۸ کیلوگرمی و در سه لایه ی ۶ کیلوگرمی، ریخته شده (به دلیل اینکه هنگام ریختن خاک مسلح درون جعبه ی برش، الیاف پت و خاک از یکدیگر جدا می شدند، فرآیند ریختن خاک درون جعبه به آرامی و توسط یک کاسه ی کوچک مسی صورت گرفته است) و به وسیله ی یک

جدول ۴. مقادیر وزن مخصوص خشک مینیمم، وزن مخصوص خشک ماکزیمم و وزن مخصوص خشک نمونه ها برای رسیدن به تراکم نسبی ۷۶٪

Table 4. Values of minimum specific gravity, maximum dry specific gravity and dry specific gravity of samples to achieve a relative density of 76%

ردیف	نمونه	وزن مخصوص خشک مینیمم (gr/cm ³)	وزن مخصوص خشک ماکزیمم (gr/cm ³)	وزن مخصوص خشک (gr/cm ³)	تراکم نسبی (%)
۱	مرجع	۱/۲۵	۱/۶	۱/۵	۷۶
۲	مسلح شده با ۰/۱ درصد از نوارها / خرده‌های پت	۱/۲۴۵	۱/۵۹۵	۱/۴۹۵	۷۶
۳	مسلح شده با ۰/۵ درصد از نوارها / خرده‌های پت	۱/۲۳۳	۱/۵۸	۱/۴۸	۷۶
۴	مسلح شده با ۱ درصد از نوارها / خرده‌های پت	۱/۲۱	۱/۵۶	۱/۴۶	۷۶
۵	مسلح شده با ۲ درصد از نوارها / خرده‌های پت	۱/۱۷۵	۱/۵۲۵	۱/۴۳	۷۶
۶	مسلح شده با ۰/۱ درصد از الیاف پت	۱/۲۴۲	۱/۵۹۲	۱/۴۹۲	۷۶
۷	مسلح شده با ۰/۵ درصد از الیاف پت	۱/۲۲۶	۱/۵۷۶	۱/۴۷۶	۷۶

متناظر با تنش برشی ماکزیمم افزایش یافته است. در تغییر شکل های برشی نرمالیزه شده بعد از کرنش گسیختگی، تنش برشی تحمل شده از سوی نمونه های مسلح شده با ۲ درصد از نوارها و خرده های پت تقریباً با تنش برشی تحمل شده از جانب نمونه های مسلح شده با ۱ درصد وزنی از خرده ها و نوارهای پت یکسان و یا کمتر از آن بوده است؛ به همین دلیل از افزودن مقادیر وزنی بیشتر پت به خاک صرف نظر شده است. می توان گفت بروز این رفتار از سوی نمونه ها به دلیل اندرکنش فیزیکی بین ذرات خاک و پت می باشد که منجر به افزایش مقاومت خاک و بهبود رفتار مکانیکی آن شده است. به علاوه شکل ۴ نشان می دهد نمونه های مسلح شده با الیاف پت نسبت به نمونه هایی که با نوارها و خرده های پت مسلح شده بودند، تنش برشی بیشتری را متحمل شدند. می توان این گونه توضیح داد که الیاف نسبت به دو شکل دیگر پت دارای مقاومت کششی بیشتری بوده و همچنین قابلیت همبند شدن بهتری با ذرات خاک داشته اند. نکته ی قابل توجه این است که افزودن پت به ماسه باعث کاهش سختی ماسه و بروز رفتار شکل پذیرتری از سوی خاک شده است. جهت بررسی دقیق تر شکل پذیری، سطح زیر نمودار تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده محاسبه گردیده و در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که جدول ۵ نشان می دهد با افزایش درصد وزنی پت در خاک، سطح زیر نمودار تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده افزایش یافته و به عبارتی شکل پذیری نمونه ها بیشتر شده است.

ASTM 3080 مورد برش قرار گرفته اند. آزمایش ها تا زمانیکه نمونه ها به کرنش ۱۰ درصد برسند ادامه یافته است.

۳- بحث و بررسی

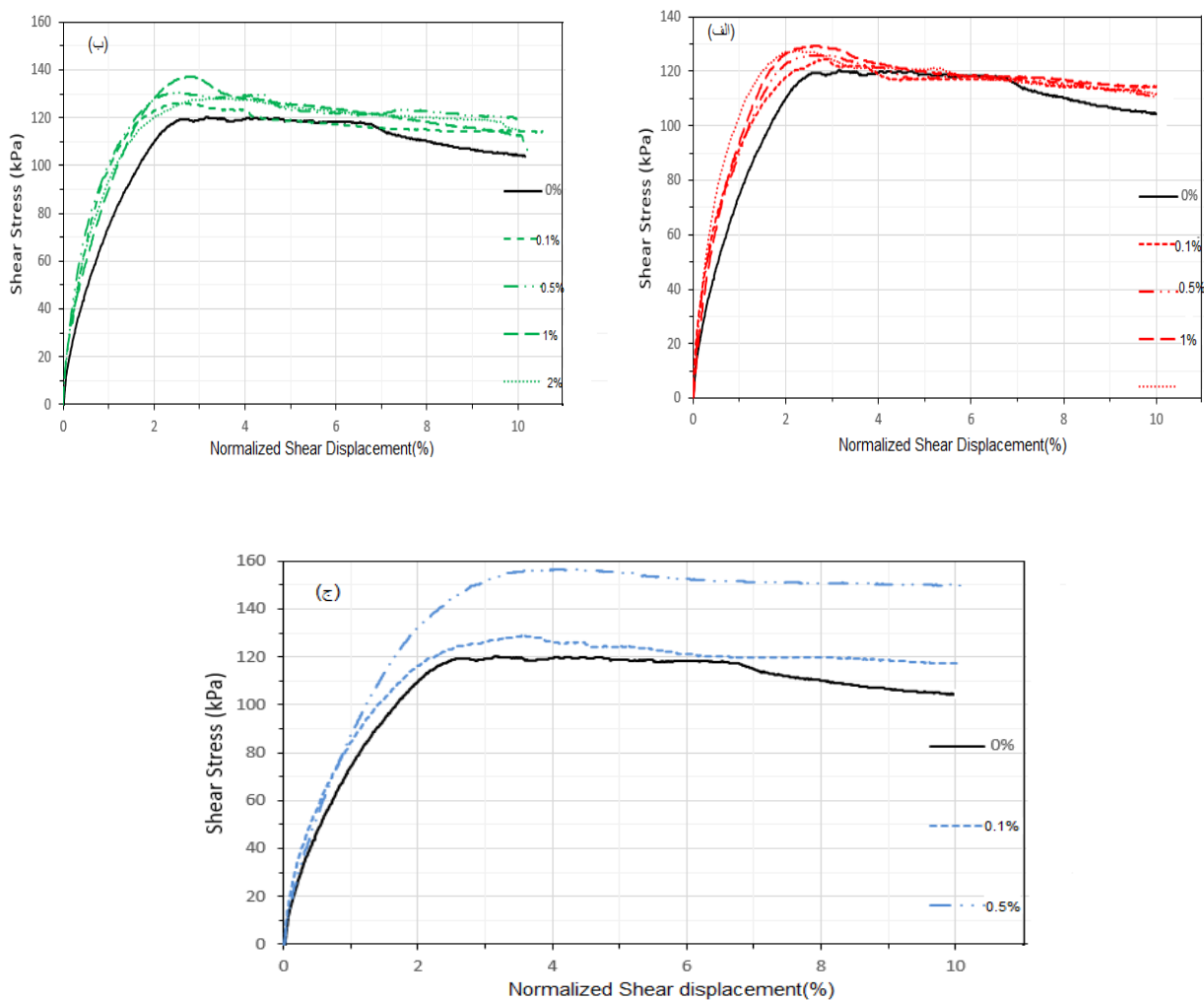
در این بخش با ارائه ی نمودارهای مختلف به بحث پیرامون رفتار مکانیکی نمونه های مسلح شده با مقادیر و ابعاد مختلف پت و مقایسه ی آن با نمونه ی مرجع پرداخته شده است.

۳-۱- بررسی رفتار تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده و تغییر شکل

پذیری نمونه ها

شکل ۴ تغییرات تنش برشی را نسبت به تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح و غیرمسلح نشان می دهد که تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته اند. منحنی های مشابه دیگر نیز تحت سربارهای مختلف (۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال) مشاهده گردید که برای رعایت اختصار در اینجا نشان داده نشده اند.

همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، هریک از منحنی های تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده دارای یک قله بوده که متناظر با نقطه ی گسیختگی نمونه می باشد. همچنین رفتار نمونه های مسلح شده با توجه به مقدار و ابعاد مسلح کننده ها متغیر است به طوریکه با افزایش درصد وزنی پت در نمونه ها (تا ۱٪ برای خرده ها و نوارهای پت و ۰/۵٪ برای الیاف) تغییر شکل برشی نرمالیزه شده



شکل ۴. نمودارهای تنش-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های غیرمسلح و مسلح شده با درصد های وزنی مختلف از (الف) خرده های پت (ب) نوار های پت (ج) الیاف پت

Fig. 4. Normalized shear stress-deformation diagrams for unreinforced and reinforced specimens with different weight percentages of (a) PET particles (b) PET strips (c) PET fibers

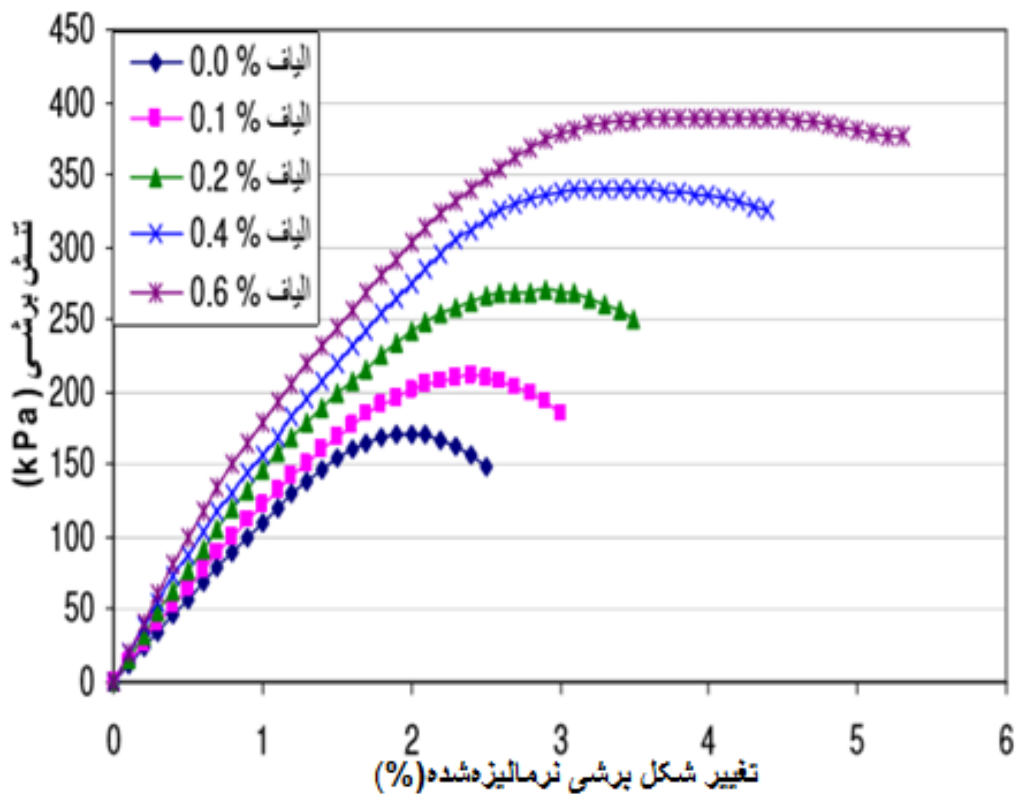
به منظور بررسی تراکم و اتساع نمونه ی غیرمسلح و نمونه های مسلح شده با ابعاد و درصد های وزنی مختلف پت در حین برش، نمودارهای شکل ۶ ترسیم شده اند. با توجه به شکل ۶ تمامی نمودارهای تغییر شکل قائم نرمالیزه شده-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده نمایانگر یک رفتار تراکمی اولیه از جانب نمونه ها هستند و بعد آن دچار اتساع شده اند، همچنین افزودن پت به خاک منجر به افزایش رفتار انقباضی اولیه ی خاک و تغییر شکل قائم نرمالیزه شده ی ماکزیمم در حین برش شده است. همانطور که انتظار می رفت نمونه های مسلح شده با الیاف رفتار تراکمی بهتری نسبت به سایر نمونه ها نشان داده اند.

در مورد مشابه می توان به پژوهش سیم نگار و همکاران در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد که به مطالعه ی رفتار مکانیکی ماسه ی لای دار مسلح شده با ۰/۱ تا ۰/۶ درصد الیاف پت پرداختند و بر روی نمونه های مسلح، آزمایش های برش مستقیم انجام دادند که نمودارهای تنش برشی-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده حاصل از آزمایش های برش مستقیم آن ها در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۳]. با توجه به نمودار شکل ۵، مشابه با پژوهش حاضر مشاهده شده است که افزودن الیاف به خاک موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده و رسیدن به تنش حداکثر در کرنش های بالاتر نشان می دهد تسلیح موجب افزایش شکل پذیری خاک شده است

جدول ۵. سطح زیر منحنی تنش برشی - تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح و غیر مسلح

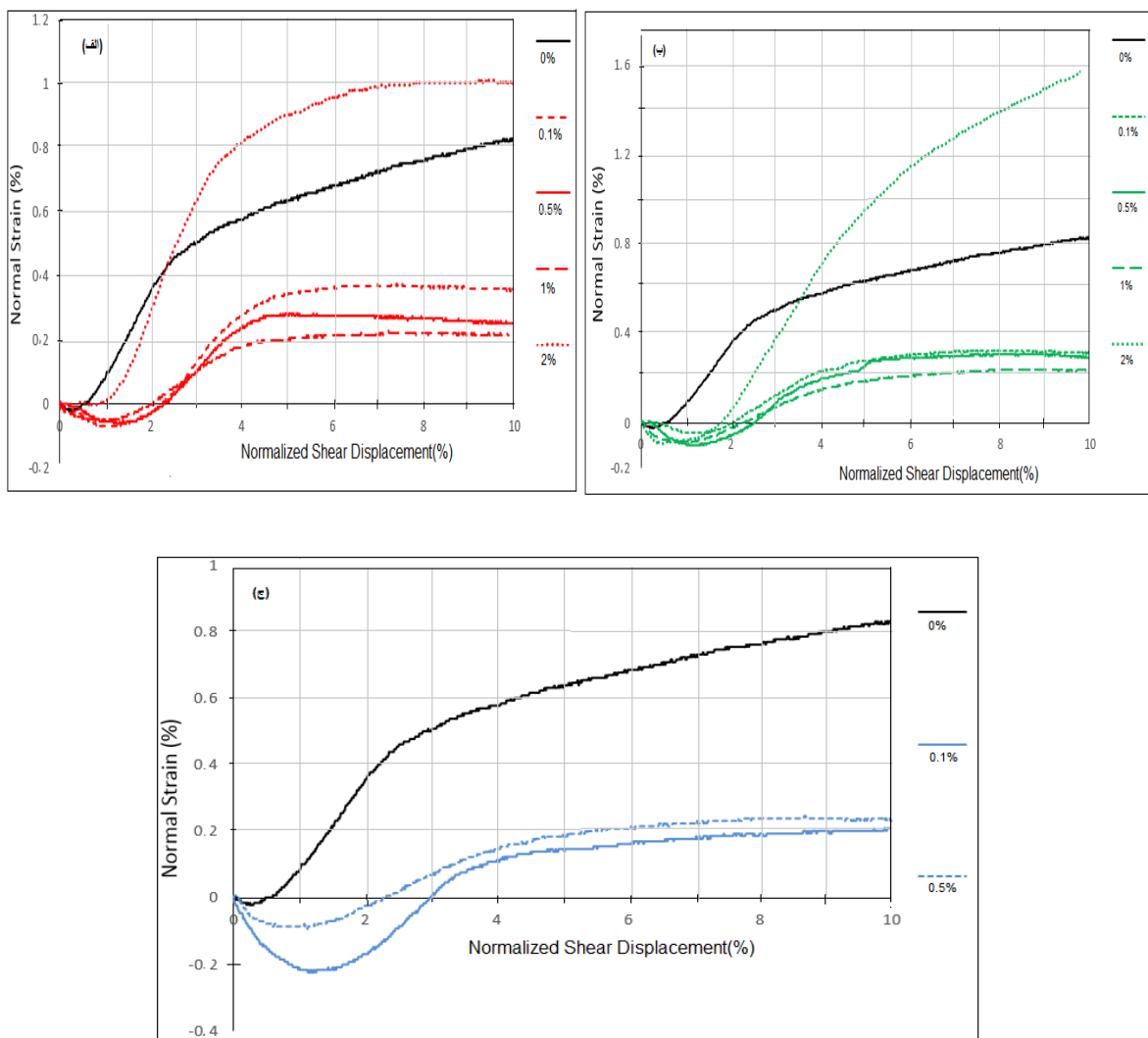
Table 5. Area below the shear stress-normalized shear deformation curve for reinforced and unreinforced specimens

ردیف	مسلح کننده	درصد وزنی پت	سطح زیر منحنی تنش - تغییر شکل برشی نرمالیزه شده (kPa)
۱	نمونه ی مرجع	۰	۱۱۴۱/۴۸
۲	۱×۱	۰/۱	۱۱۸۶/۴۲
۳		۰/۵	۱۱۹۸/۲۶
۴		۱	۱۲۱۶/۸۶
۵		۲	۱۲۲۱/۵۴
۶		۰/۱	۱۲۴۸/۶۳
۷	۵×۱	۰/۵	۱۲۶۶/۱
۸		۱	۱۲۸۰/۹۹
۹		۲	۱۲۹۶/۷۸
۱۰		۰/۱	۱۲۲۴/۱
۱۱	الیاف	۰/۵	۱۴۹۷/۹۳



شکل ۵. اثر تسلیح خاک بر نمودارهای تنش برشی - تغییر شکل برشی نرمالیزه شده در تحقیقات سیم نگار و کمالی [۱۳]

Fig. 5. The effect of soil reinforcement on shear stress diagrams - normalized shear deformation in Simnagar & Kamali [13]



شکل ۶. نمودارهای تغییر شکل قائم نرمالیزه شده-تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های غیر مسلح و مسلح شده با درصد های وزنی مختلف از (الف) خرده های پت (ب) نوار های پت (ج) الیاف پت

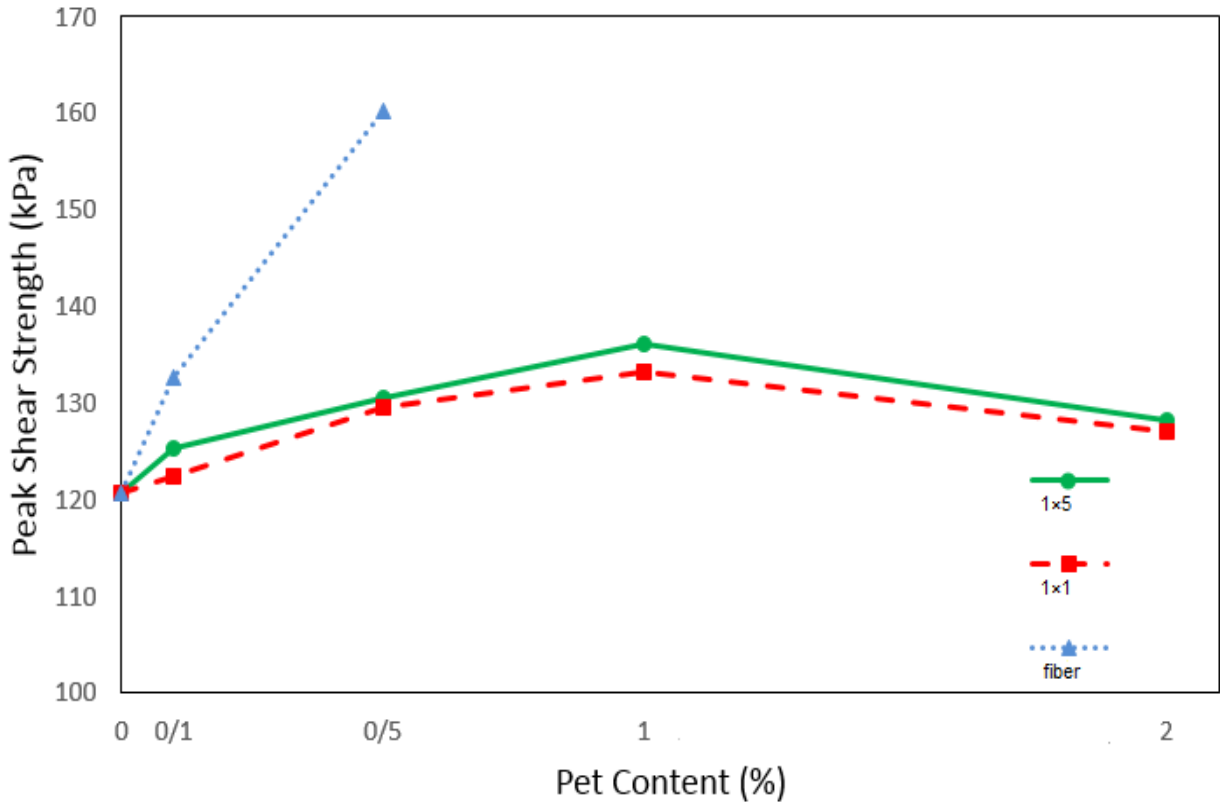
Fig. 6. Normalized vertical deformation diagrams - Normalized shear deformation for unreinforced and reinforced specimens with different weight percentages of (a) PET chips (b) PET strips (c) PET fibers

سانتیمتری، نوارهای 1×5 سانتیمتری و الیاف) نشان می دهد الیاف پت بهترین عملکرد را در تسلیح خاک داشته اند به گونه ای که افزایش مقاومت برشی بیشینه ی ماسه پس از افزودن 0.5% از خرده ها و نوارها به خاک به ترتیب 6% و 9% بوده در حالی که این مقدار در تسلیح خاک با الیاف به 30% افزایش یافته است. همچنین نمودارها نشان می دهند مقاومت بیشینه ی خاک مسلح شده با 0.5% درصد الیاف از مقاومت بیشینه ی خاک مسلح شده با 1% از خرده ها و نوارهای پت به ترتیب 21% و 15% بیشتر بوده است. به عبارت دیگر می توان گفت تسلیح با 0.5% الیاف نسبت به تسلیح با 1% از نوارها یا خرده های پت تاثیر بهتری بر افزایش مقاومت برشی بیشینه ی

۳-۲- مقاومت برشی بیشینه

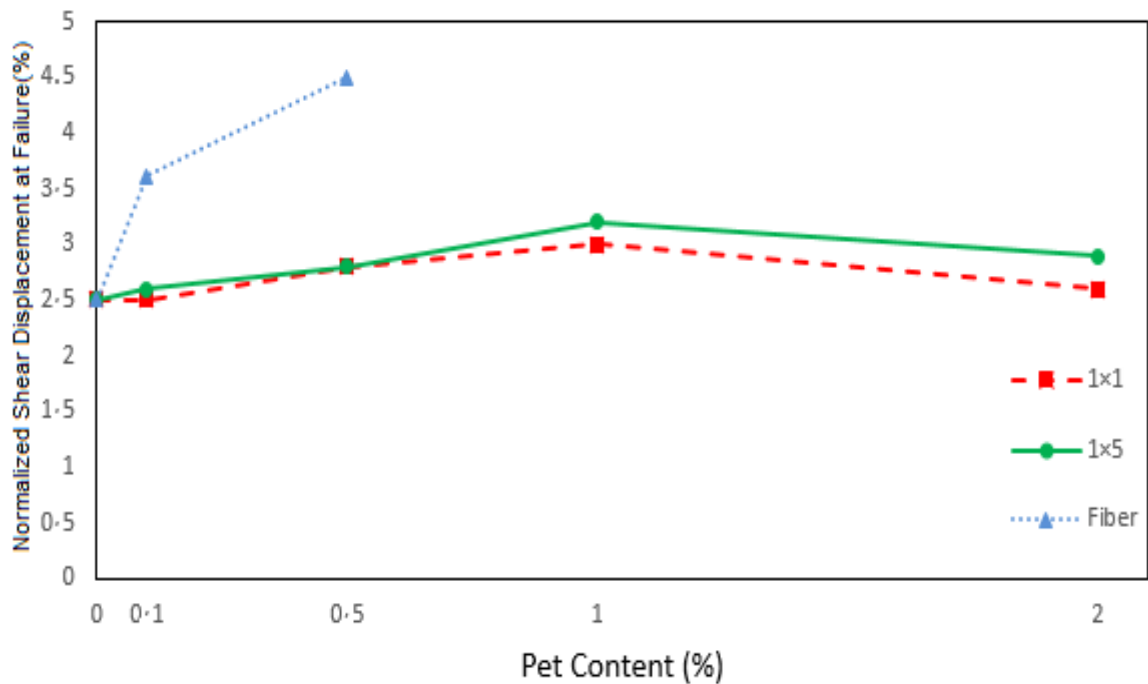
تاثیر درصد وزنی و ابعاد پت بر مقاومت برشی بیشینه ی ماسه (تحت سربار 150 کیلو پاسکال) در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود با افزایش درصد خرده ها و نوارهای پت تا 1% مقاومت برشی بیشینه ی خاک افزایش و بعد از آن کاهش یافته است. برای الیاف نیز با افزایش درصد پت تا 0.5% همین روند حاکم بوده است (افزودن مقادیر بیشتر الیاف به خاک به دلیل حجم بالای الیاف و محدودیت ابعاد جعبه برش عملاً امکان پذیر نبوده و به همین مقدار بسنده شده است).

مقایسه ی بین عملکرد سه شکل مسلح کننده (خرده های 1×1



شکل ۷. نمودار مقاومت برشی بیشینه-درصد وزنی مسلح کننده برای شکل های مختلف بت تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال

Fig. 7. Diagram of maximum shear strength-weight percentage of reinforcement for different PET shapes under 150 kPa overload



شکل ۸. نمودار تغییر شکل برشی نرمالیزه شده در نقطه ی گسیختگی-درصد وزنی مسلح کننده برای شکل های مختلف بت تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال

Fig. 8. Normalized shear deformation diagram at failure point - the percentage by weight of the reinforcement For different PET shapes under vertical overload 150 kPa

زیادی مشاهده شد که دو نوار یا دو خرده پت بر روی یکدیگر لغزیده اند و به دلیل نبود اصطکاک بینشان، زاویه اصطکاک داخلی در نمونه کاهش یافته است.

در شکل ۱۰ نمودارهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی (در لحظه ی گسیختگی) در مقابل درصد وزنی های مختلف برای نمونه های مسلح شده با ابعاد مختلف پت رسم شده اند.

با توجه به شکل ۱۰ (الف) می توان استنباط کرد که در تسلیح خاک با خرده های پت، با افزودن مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد پت به خاک، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۰/۱، ۲/۲ و ۴/۲۲ درصد افزایش یافته است و بعد از آن با افزودن ۲/۲ پت به خاک، ۱٪ کاهش یافته است. همچنین در تسلیح خاک با نوارهای پت نیز، با افزودن مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد پت به خاک، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۰/۶، ۶ و ۷ درصد افزایش یافته است و بعد از آن با افزودن ۲٪ پت به خاک، ۰/۶ درصد کاهش یافته است. برای نمونه های مسلح شده با الیاف، اثر تسلیح به این صورت بوده است که با افزودن ۰/۱ و ۰/۵ درصد الیاف به خاک، زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۷ و ۱۰ درصد افزایش یافته است. زیرا الیاف توانسته اند درگیری بیشتری بین دانه های خاک با یکدیگر و دانه های خاک با خود الیاف ایجاد کنند.

همچنین مقایسه ی چسبندگی نمونه های مختلف با استفاده از شکل ۱۰ (ب) بیان گر این واقعیت است که در تسلیح با خرده های پت، با افزودن ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد پت به خاک، چسبندگی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۲۴/۸، ۵۳/۲، ۶۲ و ۷۰ درصد افزایش یافته است. به همین صورت، در تسلیح با نوارهای پت، با افزودن ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد پت به خاک، چسبندگی نسبت به حالت غیر مسلح به ترتیب ۴۵، ۵۰، ۵۷ و ۷۱ درصد افزایش یافته است. در تسلیح خاک با ۰/۱ درصد و ۰/۵ درصد از الیاف نیز چسبندگی به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۸۰ درصد افزایش یافته است. بنابراین افزودن تا ۲ درصد پت همواره باعث افزایش چسبندگی در نمونه ها شده است.

شکل ۱۱ به صورت شماتیک ساز و کار مسلح کننده ی پت درون خاک را نشان می دهد. با اعمال سربار، دانه های خاک به پت فشار وارد کرده درگیری مسلح کننده ها و خاک بیشتر شده است که این اتفاق منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی شده است.

خاک داشته است. هرچند که خرده های پت کمترین میزان افزایش مقاومت برشی را نسبت به دو شکل دیگر پت ارائه داده اند اما فرآیند آماده سازی نمونه ها و و اختلاط خاک با خرده های پت در مقایسه با دوشکل دیگر آسان تر بوده است.

۳-۳- تغییر شکل برشی نرمالیزه شده در لحظه ی گسیختگی

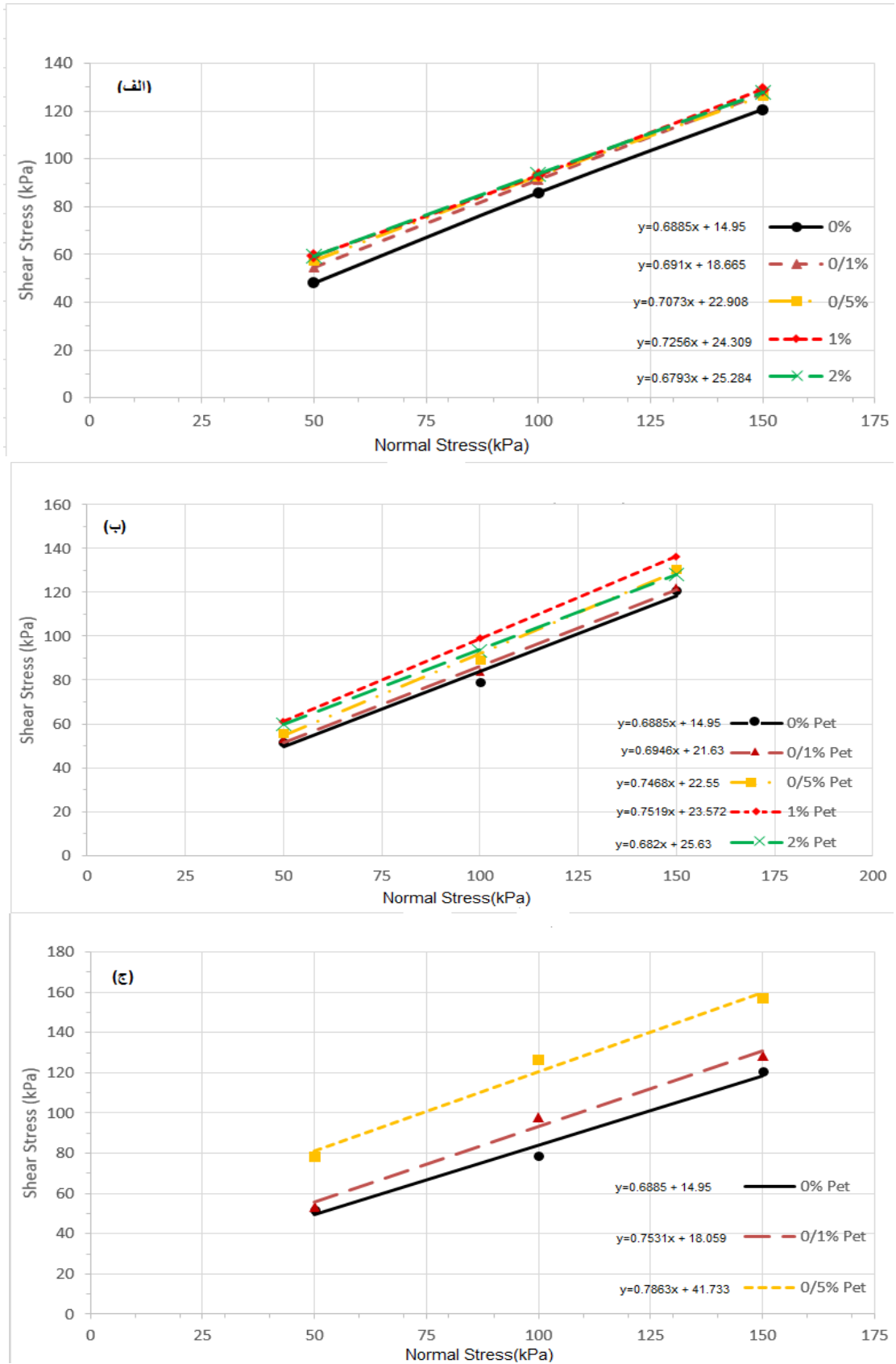
تاثیر درصد وزنی پت در خاک و اشکال مختلف آن بر تغییر شکل برشی نرمالیزه شده در لحظه ی گسیختگی ماسه (تحت سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال) در شکل ۸ نشان داده شده است.

نمودارهای مربوطه نشان می دهند با افزایش درصد پت (تا ۱٪ برای خرده ها و نوارها و ۰/۵٪ برای الیاف) مقدار تغییر شکل برشی نرمالیزه شده در لحظه ی گسیختگی افزایش یافته است که این اتفاق منجر به شکل پذیری بیشتر خاک می گردد. همچنین نقش الیاف در تغییر شکل پذیری خاک به مراتب بیشتر از دو شکل دیگر پت بوده است.

۳-۴- پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی خاک

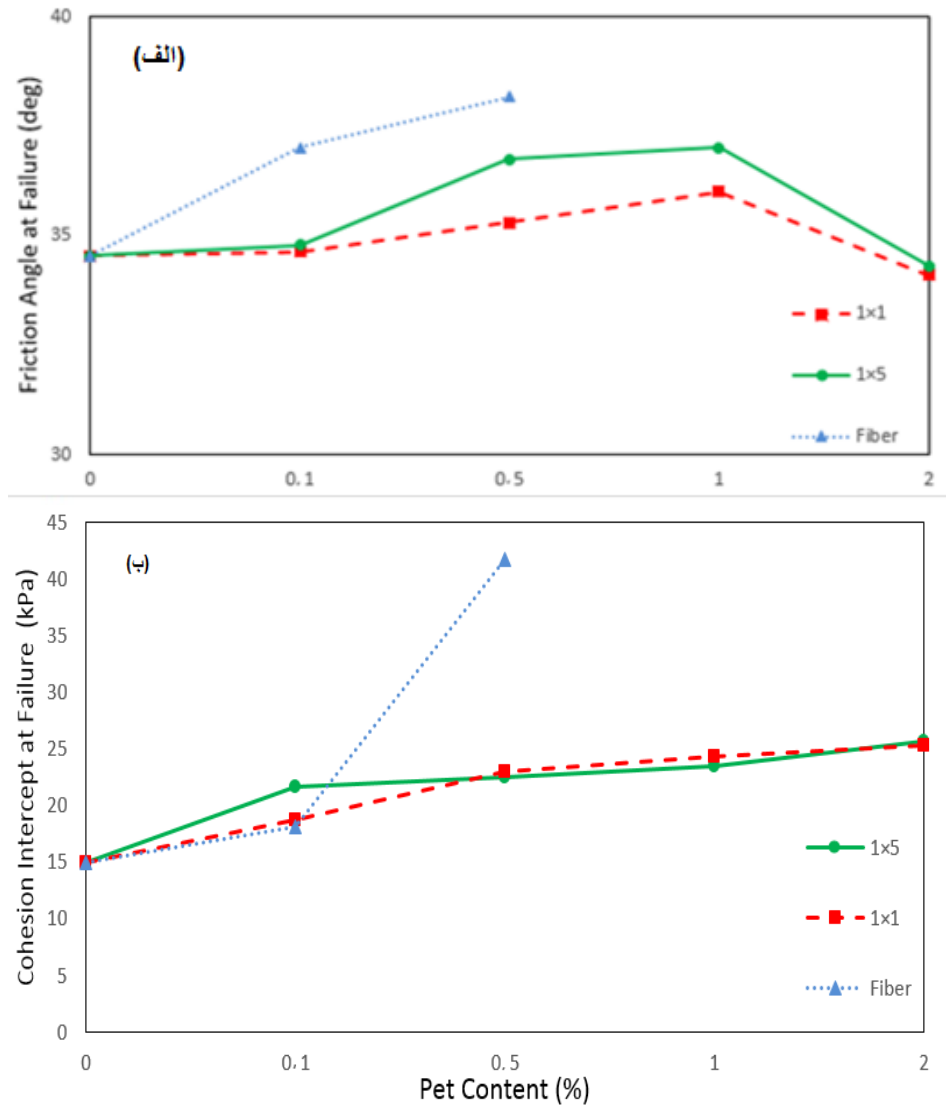
پوش گسیختگی نمونه های ماسه ای مسلح و غیرمسلح در نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده و همانطور که مشخص است جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک از رگرسیون خطی استفاده شده است. نمودارهای شکل ۱۰ به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک را در مقابل درصدهای مختلف وزنی از پت نشان می دهند. به دلیل وجود مقدار کمی لای در ماسه ای استفاده شده و همچنین تراکم نسبی بالای نمونه ها، خاک مقدار کمی چسبندگی از خود نشان داده است.

نمودارهای شکل ۹ نمایانگر این است که با افزایش درصد پت (تا ۱٪ برای خرده ها و نوارهای پت و ۰/۵٪ برای الیاف) زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش یافته، حال آن که چسبندگی تا ۲٪ پت (برای خرده ها و نوارها) همواره افزایشی بوده است. اما همانطور که در شکل ۴ دیده شد با افزودن ۲٪ پت به خاک مقاومت برشی بیشینه ی آن کاهش یافته است، دلیل این امر را می توان اینگونه تفسیر کرد که چون خاک از نوع ماسه ای بوده تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت، بیشتر از تاثیر چسبندگی بوده است. دلیل کاهش زاویه اصطکاک داخلی پس از افزودن ۲ درصد پت به خاک این بوده است که پت ها حجم زیادی از نمونه را اشغال کردند و در قسمت های



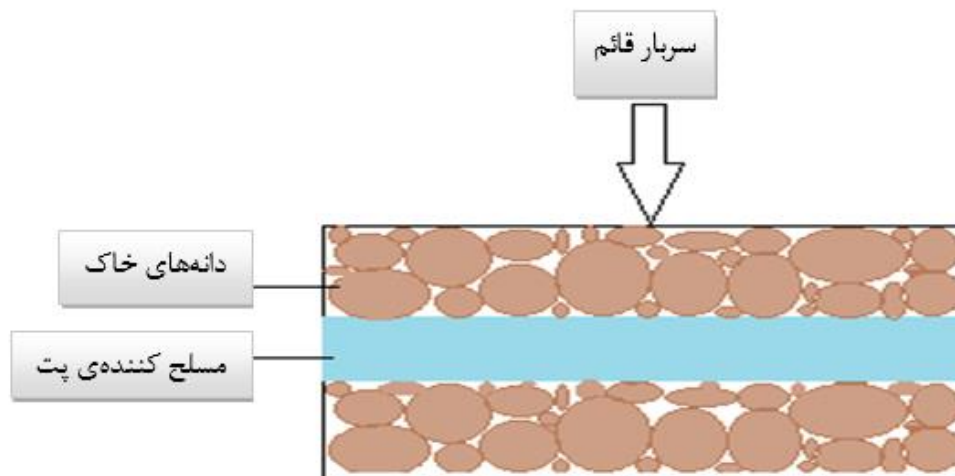
شکل ۹. پوش گسیختگی برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح ماسه ای مسلح شده با (الف) خرده‌های پت ۱×۱سانتیمتری (ب) نوارهای پت ۵×۱سانتیمتری (ج) الیاف پت

Fig. 9. Failure envelope for reinforced and unreinforced samples of sand reinforced with (a) 1 × 1 cm PET chips (b) 5 × 1 cm PET strips (c) PET fibers



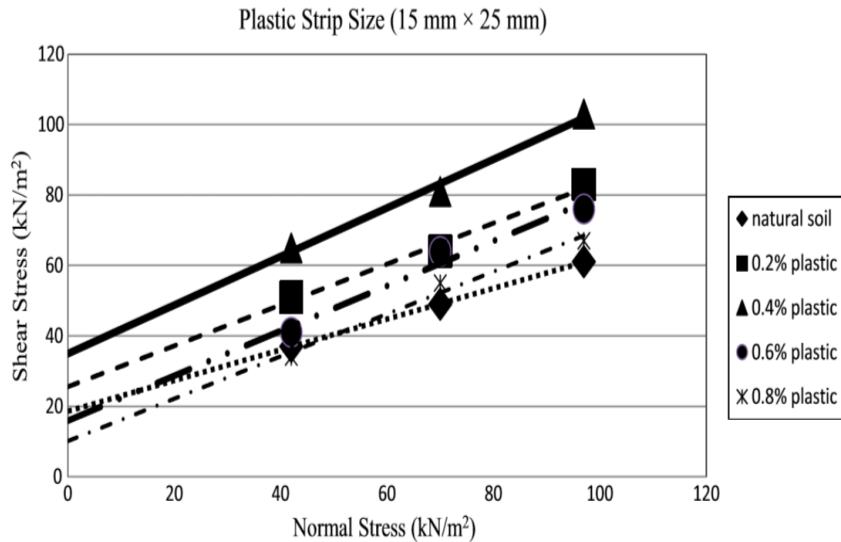
شکل ۱۰. نمودارهای (الف) زاویه اصطکاک داخلی خاک-درصد وزنی پت (ب) چسبندگی خاک-درصد وزنی پت

Fig. 10. Diagrams (a) Internal soil friction angle-PET weight percentage (b) Soil cohesion-PET weight percentage



شکل ۱۱. نمای شماتیک یک مسلح کننده داخل خاک

Fig. 11. Schematic view of a reinforcement in soil



شکل ۱۲. نمودار تغییرات تنش برشی در درصد مسلح کننده های مختلف در پژوهش پدیا و همکاران [۲۰]

Fig. 12. Diagram of shear stress changes in the different percentages of reinforcements in the study of Pedia et al. [20]

تا کرنش ۱۰٪ افزایش یافته است. در حالیکه با توجه به شکل (ب) در تسلیح خاک با الیاف پت، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به نمونه ی مرجع همواره افزایش یافته است که این افزایش در تسلیح خاک با ۰/۵٪ الیاف بیشتر بوده است.

در شکل ۱۴ نمودار چسبندگی نرمالیزه شده در مقابل تغییرشکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح رسم شده است.

همانطور که از نمودارهای (الف) در شکل ۱۴ پیداست، در تسلیح خاک با ۰/۵، ۱، ۲ درصد از مختلف از خرده های پت، در تغییرشکل برشی نرمالیزه شده ی ۲ تا ۱۰ درصد، چسبندگی نسبت به نمونه ی مرجع افزایش یافته است که این افزایش در تسلیح با ۱٪ وزنی بیشتر بوده است و پس از آن تا کرنش ۱۰٪ افزایش یافته است. در حالیکه با توجه به شکل (ب) در تسلیح خاک با الیاف همواره چسبندگی نرمالیزه شده افزایش یافته است که این افزایش در تسلیح خاک با ۰/۵٪ الیاف بیشتر بوده است.

به طور کلی می توان گفت در کرنش های بالاتر (۵ تا ۱۰ درصد) زاویه اصطکاک داخلی نرمالیزه شده تقریباً ثابت بوده اما چسبندگی تغییرات قابل ملاحظه ای داشته است.

۳-۵- بررسی ظرفیت باربری نمونه های مسلح شده با پت

در سال های اخیر، ستون های سنگی جهت افزایش ظرفیت باربری در رس های نرم و ماسه ها مورد استفاده ی گسترده قرار

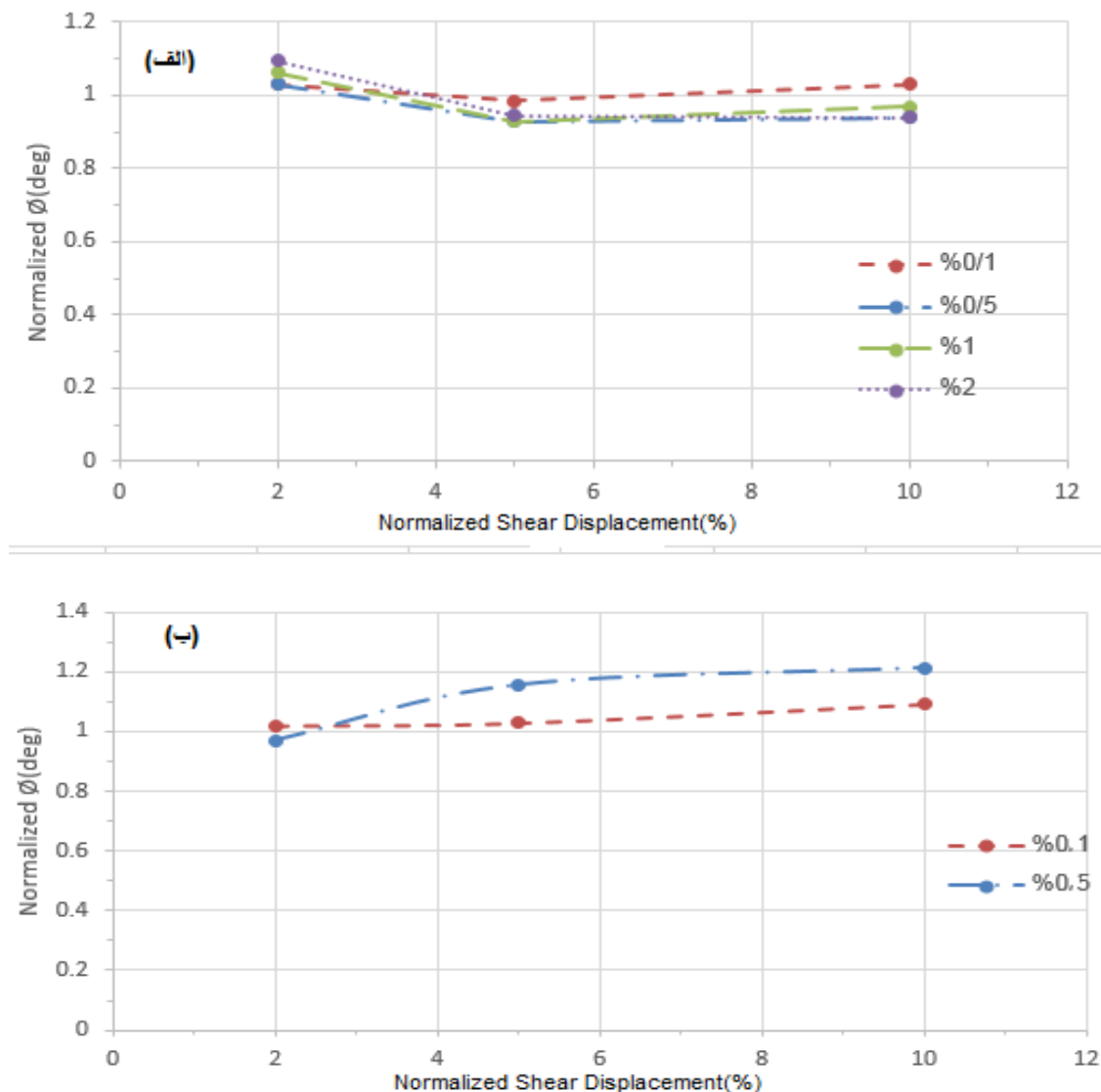
در مورد مشابه می توان به تحقیقات پدیا و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۸ اشاره کرد. آن ها با افزودن خرده پت با ابعاد $1/5 \times 1/5$ سانتی متر با درصدهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ از وزن خاک خشک به خاک ماسه-سیلتی و انجام آزمایش های برش مستقیم، به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک مسلح شده با پت پرداخته اند که نتایج آزمایش هایشان در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. [۲۰]

۱-۴-۳- بررسی پارامترهای نرمالیزه شده ی مقاومت برشی در تغییرشکل های برشی نرمالیزه شده ی متفاوت

در این بخش به بررسی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نرمالیزه شده ی نمونه های مسلح (نسبت به نمونه ی مرجع) در سه تغییرشکل برشی نرمالیزه شده ی ۲، ۵ و ۱۰ درصد پرداخته شده است.

در شکل ۱۳ نمودار زاویه اصطکاک داخلی نرمالیزه شده در مقابل تغییرشکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح رسم شده است.

همانطور که از نمودارهای (الف) در شکل ۱۳ پیداست، در تسلیح خاک با درصدهای مختلف از خرده های پت، در تغییرشکل برشی نرمالیزه شده ی ۲ تا ۵ درصد، زاویه اصطکاک داخلی نسبت به نمونه ی مرجع تقریباً ثابت مانده و یا کاهش یافته است و پس از آن



شکل ۱۳. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نرمالیزه شده در مقابل تغییرشکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح شده با (الف) خرده های پت ۱×۱سانتیمتری (ب) لیاف پت

Fig. 13. Diagram of normalized internal friction angle versus normalized shear deformation for specimens reinforced with (a) 1 × 1 cm PET chips (b) PET fiber

پت در این پژوهش با ظرفیت باربری خاک ماسه ای متراکم، مسلح شده با ستون های سنگی که طبق استاندارد FHWA(1983)¹ در پژوهش ساهو^۲ و شانکار^۳ انجام شده، صورت گرفته است. خاک از نوع بد دانه بندی شده بوده و دارای چگالی ویژه ی ۲/۶۲، ضریب یکنواختی ۰/۹۶، ضریب انحنای ۸/۶۵۶، ماکزیمم وزن مخصوص خشک ۱۷/۸۳ کیلونیوتن بر متر مکعب، رطوبت بهینه ی ۱۲ درصد، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و فاقد چسبندگی بوده است. نمونه ها با ستون های

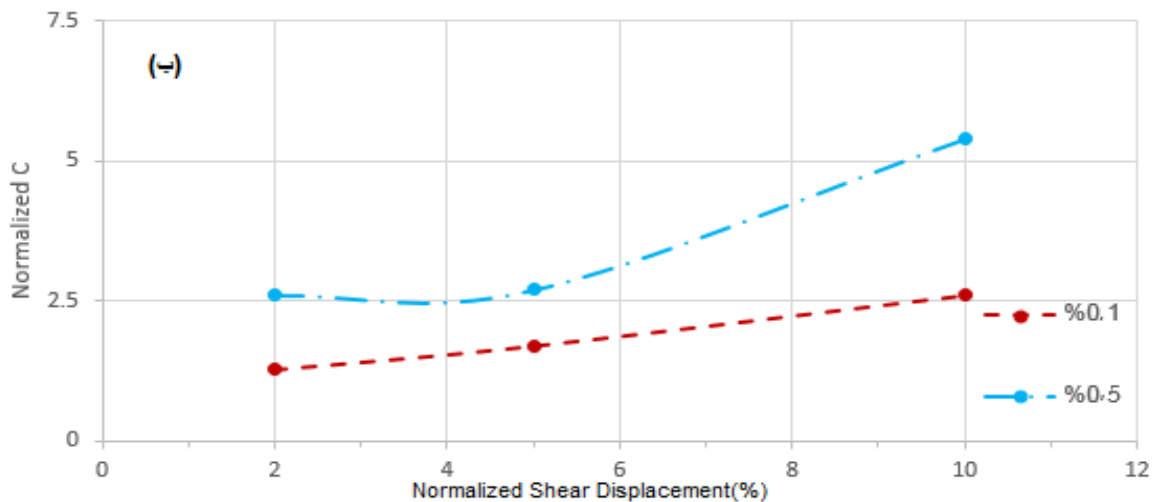
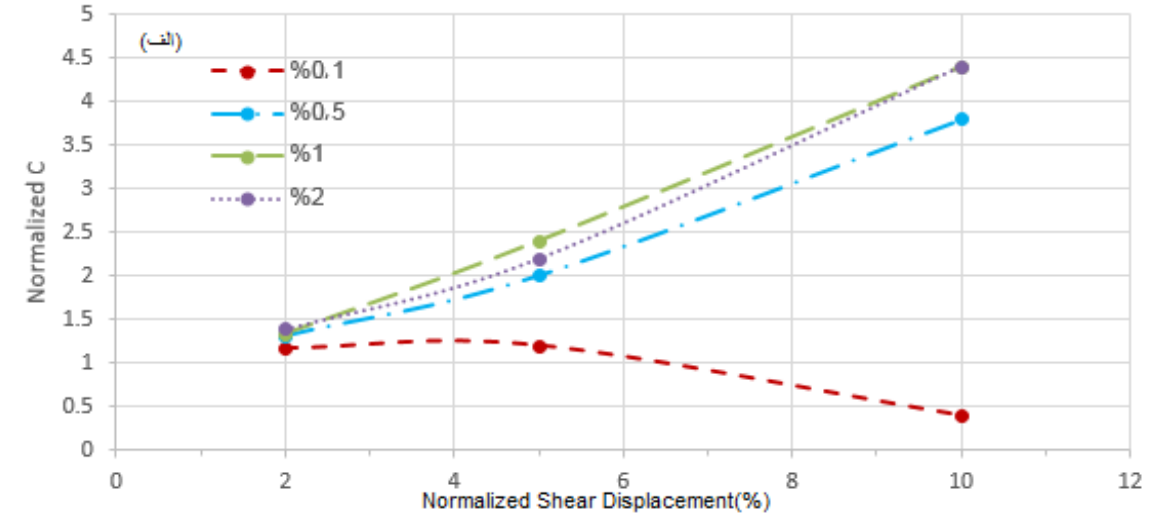
گرفته اند. این ستون ها غالباً در مواردی که حجم وسیعی از خاک نیازمند بهسازی باشد (مانند خاکریزها)، به کار گرفته می شوند. در مورد عملکرد ستون های سنگی در خاک، به طور خلاصه می توان گفت افزایش ظرفیت باربری خاک بعد از اجرای ستون های سنگی، ناشی از اندرکنش میان ذرات خاک اطراف ستون و ستون می باشد بنابراین در مواقعی که خاک موجود در سایت بسیار سست باشد، ستون سنگی نقش به سزایی در افزایش ظرفیت باربری خاک نخواهد داشت.

در این بخش مقایسه ای بین ظرفیت باربری خاک مسلح شده با

1 ¹ Design and Construction of Stone Columns(1983)

2 Sahu

3 Shankar



شکل ۱۴. نمودار تغییرات چسبندگی نرمالیزه شده در مقابل تغییر شکل برشی نرمالیزه شده برای نمونه های مسلح شده با (الف) خرده های پت ۱×۱ سانتیمتری (ب) الیاف پت

Fig. 14. Diagram of normalized cohesion versus normalized shear deformation for specimens reinforced with (a) 1 × 1 cm PET chips (b) PET fibers

ستون های سنگی در پژوهش کومار و ایشان را نشان می دهد. در جدول ۷ ظرفیت باربری نمونه ی غیر مسلح و نمونه های مسلح شده از ماسه ی بندر انزلی، با ابعاد و درصدهای مختلف پت آورده شده است. در این پژوهش برای تسلیح، مسلح کننده ی پت به کار برده شده است. در نهایت ظرفیت باربری با استفاده از رابطه ی هنسن^۱ محاسبه شده است که در این رابطه برای محاسبه ی ظرفیت

سنگی به قطرهای ۲۰۰ و ۱۵۰ و طول ۶۰۰ میلی متر مسلح شده که طی آزمایش بارگذاری صفحه، تحت سربار قائم ۲۰۰۰ نیوتن قرار گرفته اند. در نهایت ظرفیت باربری با توجه به زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی معادل که از طریق میانگین گیری بین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک و ستون های شنی حاصل شده است؛ محاسبه گردیده است. [۲۲]

جدول ۶ ظرفیت باربری خاک غیر مسلح و مسلح شده با

1 Hansen

جدول ۶. مقایسه ی ظرفیت باربری نمونه ی غیر مسلح و نمونه های مسلح شده با ستون های سنگی در پژوهش ساهو و شانکار [۲۲]

Table 6. Comparison of bearing capacity of unreinforced samples and reinforced samples with stone columns in Saho & Shankar [22]

مشخصات نمونه	ستون سنگی به قطر ۱۵۰ میلیمتر		ستون سنگی به قطر ۲۰۰ میلیمتر	
	ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m ²)	درصد بهسازی (%)	ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m ²)	درصد بهسازی (%)
خاک متراکم	۳/۴۶	-	۳/۲۴	-
خاک متراکم مسلح شده با ستون سنگی	۶/۸۳	۹۷/۳۴	۵/۲	۵۹/۹۱

جدول ۷. مقایسه ی ظرفیت باربری نمونه ی غیر مسلح و نمونه های مسلح شده با ابعاد و درصد های وزنی مختلف پت در پژوهش حاضر

Table 7. Comparison of bearing capacity of un reinforced samples and reinforced samples with different dimensions and weight percentages of PET in the present study

ردیف	مسلح کننده	درصد وزنی پت	ظرفیت باربری نهایی با توجه به معیار تنش مجاز (KN/m ²)	درصد بهسازی (%)
۱	نمونه ی مرجع	۰	۴/۹۲	۰
۲	۱×۱	۰/۱	۵/۹۲	۲۰
۳		۰/۵	۷/۵۴	۵۳
۴		۱	۸/۶	۷۵
۵		۲	۷/۱۵	۳۰
۶	۱×۵	۰/۱	۶/۷۸	۳۸
۷		۰/۵	۸/۸۳	۸۰
۸		۱	۹/۴۳	۹۲
۹		۲	۷/۳۹	۵۰
۱۰	الیاف	۰/۱	۷/۶۵	۵۵
۱۱		۰/۵	۱۴/۳۶	۱۹۱

است. بنابراین تسلیح با ۰/۵ درصد الیاف بهترین عملکرد را در افزایش ظرفیت باربری داشته است.

۴- نتیجه گیری

استفاده ی مجدد از پسماندهای جامد مصنوعی جهت تسلیح خاک در پروژه های عمرانی از دو حیث حائز اهمیت است؛ یکی کمک به حفظ محیط زیست از طریق کاهش ضایعات و دیگری بهبود رفتار مکانیکی خاک. از طرفی رشد جمعیت موجب شده است تا زمین های

باربری هر نمونه از زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به همان نمونه استفاده شده است.

همانطور که از جدول ۷ دریافت می گردد، تسلیح خاک با پت منجر به افزایش ظرفیت باربری خاک شده است به طوریکه در تسلیح خاک با خرده ها و نوارهای پت، بیشترین افزایش ظرفیت باربری در تسلیح با یک درصد مسلح کننده صورت گرفته است که این افزایش ظرفیت باربری به ترتیب ۷۵ و ۹۲ درصد بوده است. در تسلیح با ۰/۵ درصد الیاف نیز افزایش ظرفیت باربری ۱۹۱ درصد مشاهده شده

داشته است؛ به طوریکه افزودن ۰/۵ درصد از الیاف پت به خاک منجر به افزایش ۱۹۱ درصدی ظرفیت باربری خاک نسبت به حالت غیر مسلح شده است.

مراجع

- [1] O. Andersland, Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture, in: Proc. of the 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement, 1979
- [2] D.H. Gray, H. Ohashi, Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, 109(3) (1983) 335-353
- [3] M. H. Maher, Y.-C. Ho, Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite, 1994
- [4] Y. Wang Utilization of Recycled Carpet Waste Fibers for Reinforcement of Concrete and Soil AU - Wang, Youjiang, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 38(3) (1999) 533-546
- [5] T. Park, S.A. Tan, Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber, Geotextiles and Geomembranes, 23(4) (2005) 348-361
- [6] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai, Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, Geotextiles and Geomembranes, 25(3) (2007) 194-202
- [7] S. Akbulut, S. Arasan, E. Kalkan, Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers, Applied Clay Science, 38(1-2) (2007) 23-32
- [8] N.C. Consoli, M.A. Vendruscolo, A. Fonini, F. Dalla Rosa, Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, Geotextiles and Geomembranes, 27(3) (2009) 196-203
- [9] J. Li, D. Ding, Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12) (2002) 977-983
- [10] N.C. Consoli, J.P. Montardo, P.D.M. Prietto, G.S. Pasa, Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(6) (2002) 462-472
- [11] G.S. Babu, S.K. Chouksey, Stress-strain response of

دارای خصوصیات ژئوتنیکی مناسب کاهش یابند بنابراین امروزه نیاز به بهسازی خصوصیات مکانیکی خاک بیش از پیش احساس می‌شود. از این رو استفاده از ضایعات جامد جهت تسلیح خاک محبوبیت بسیاری را در سرتاسر جهان به دست آورده است.

در این مطالعه با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی ماسه‌ی مسلح شده‌ی بندر انزلی با خرده‌ها، نوارها و الیاف پت مشاهده گردیده که مقاومت برشی، ضریب اصطکاک داخلی، چسبندگی و شکل پذیری خاک با افزایش قابل توجهی نسبت به حالت غیر مسلح همراه بوده است. نتایج دقیق‌تر این بررسی در زیر آورده شده است.

۱) در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس، افزودن پت به ماسه (تا ۱٪ برای خرده‌ها و نوارها و ۰/۵٪ برای الیاف) موجب افزایش مقاومت برشی ماکزیمم شده است، به عبارتی خاک مسلح مقاومت بیشتری نسبت به خاک غیرمسلح از خود نشان داده است.

۲) در تسلیح خاک با انواع شکل‌های پت، پس از افزودن پت به نمونه‌ها، سطح زیر نمودار تنش برشی-تغییرشکل برشی نرمالیزه شده افزایش یافته است، یعنی خاک در کرنش‌های بزرگتر مقاومت بیشتری از خود نشان داده که این امر نشانگر شکل پذیر شدن خاک می‌باشد. ۳) با افزایش سربار مقاومت نمونه‌های مسلح و غیرمسلح افزایش یافته است. اثر تسلیح خاک با پت تحت سربار قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال نسبت به دو سربار دیگر (۱۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال) چشمگیرتر بوده است.

۴) بیشترین افزایش در مقاومت برشی بیشینه‌ی خاک مسلح شده با ۰/۵٪ از خرده‌ها، نوارها و الیاف پت تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۶٪، ۹٪ و ۳۰٪ بوده است. بنابراین در حضور الیاف خاک مقاومت بیشتری از خود نشان داده و الیاف نقش بهتری در تسلیح خاک داشته اند.

۵) افزودن پت به خاک (تا ۱٪ برای نوارها و خرده‌های پت و ۰/۵٪ برای الیاف) منجر به افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک به شده است.

۶) افزودن پت به خاک (تا ۲٪ برای نوارها و خرده‌های پت و ۰/۵٪ برای الیاف) همواره با افزایش چسبندگی خاک همراه بوده است. اما تاثیر خرده‌ها بر چسبندگی از تاثیر نوارها چشمگیرتر بوده است.

۷) الیاف پت بیشترین نقش را در افزایش ظرفیت باربری خاک

- behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(5) (2018) 491-499
- [18] G. Di Emidio, J. Meeusen, D. Snoeck, R.V. Flores, Enhanced Sustainable Soils: A Review, in: *The International Congress on Environmental Geotechnics*, Springer, 2018, pp. 515-522
- [19] S. El-Badawy, Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements, in: *Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering: Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, Egypt 2018–The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE), Springer, 2018, pp. 7
- [20] S. Peddaiah, A. Burman, S. Sreedeeep, Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5) (2018) 2907-2920
- [21] D.P. Zeccos, Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid-waste, University of California, Berkeley, 2005
- [22] A.K. Sahu, I. Shankar, Load-Carrying Capacity of Stone Column Encased with Geotextile plastic waste mixed soil, *Waste management*, 31(3) (2011) 481-488
- [12] A.m. Azhdarpour, M.r. Nicodel, d. Mohammadi, The effect of increasing polyethylene terephthalate (PET) polymer chips on the engineering properties of sandy and clay soils, in: *7th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment*, Shahroud University of Technology, 2011
- [13] S. Simnegar, Gh. Kamali, Laboratory study of sand reinforcement with polyethylene terephthalate (PET) waste plastic fibers, in: *Sixth National Congress of Civil Engineering*, Semnan University, 2011.]
- [14] R. Acharyya, A. Lahiri, S. Mukherjee, P. Raghu, IMPROVEMENT OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF CLAYEY SOIL WITH PET BOTTLE STRIPS, (2013)
- [15] E. Botero-Jaramillo, A. Ossa, G. Sherwell, E. Ovando-Shelley, Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET), 2015
- [16] A. Patil, Experimental review for utilisation of waste plastic bottles in soil improvement techniques, *Int. J. Eng. Res. Appl*, 6(8) (2016) 25-31
- [17] N. Malidarreh, I. Shooshpasha, S. Mirhosseini, M. Dehestani, Effects of reinforcement on mechanical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Hajianezhad, M. Keramati, R. Naderi, M. Alinezhad, *Evaluation of Shear Strength Behaviour of Anzali Port Sand Reinforced with Polyethylene terephthalate (PET)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3183-3202.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16281.6181](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16281.6181)

