



University Of Qom



Experimental Investigation of Stress Relaxation Behavior in Sand and Sand-Geotextile Interface

Javad Ghaffari¹ , Somayyeh Fazeli² 

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marand Technical College. University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: j.ghaffari@tabrizu.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Fundamental Sciences, Marand Technical College. University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: fazeli@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 May 2022
Revised 17 Aug 2022
Accepted 28 Aug 2022

Keywords:
Stress relaxation,
Direct shear,
Sand-geotextile
interface,
Shear speed,
Shear stress level.

ABSTRACT

In this research, the phenomenon of stress relaxation in unreinforced and reinforced sandy soil with geotextile layer has been studied using a large-scale direct shear test. To investigate the effect of shear speed and soil density on the amount of resistance loss due to stress relaxation, two shear speeds of 0.5 and 5 mm/min and two relative densities of 35% and 60%, respectively, loose and medium density, have been used. All samples have been tested in direct shear test under vertical stress of 100 kPa. The results show that the amount of resistance loss due to stress relaxation depends on the shear stress level, soil density, presence of a geotextile layer in the soil and shear speed. In such a way that by increasing the level of shear stress and shear speed and by decreasing the density of sand and also with the presence of a geotextile layer in soil, the amount of resistance loss due to stress relaxation increases.

Cite this article: Ghaffari Javad, Fazeli Somayyeh. Experimental Investigation of Stress Relaxation Behavior in Sand and Sand-Geotextile Interface. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 187-198. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.9284.1507>



بررسی آزمایشگاهی رفتار آسودگی تنش در ماسه و سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل

جواد غفاری^۱، سمیه فاضلی^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: j.ghaffari@tabrizu.ac.ir

۲. استادیار گروه مهندسی مواد و پایه، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: fazeli@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، پدیده آسودگی تنش در خاک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با لایه ژئوتکستایل با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس مطالعه شده است. برای بررسی اثر سرعت برش و دانسیته خاک بر میزان افت مقاومت ناشی از آسودگی تنش، از دو سرعت برش به مقدار ۵ و ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه و دو دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰٪ به ترتیب دانسیته سست و متوسط استفاده شده است. همه نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار افت تنش ناشی از پدیده آسودگی تنش به تراز تنش برشی، دانسیته خاک، وجود لایه ژئوتکستایل در خاک و سرعت برش بستگی دارد. به نحوی که با افزایش تراز تنش برشی و سرعت برش و با کاهش دانسیته ماسه و همچنین وجود لایه ژئوتکستایل در خاک، مقدار افت تنش ناشی از آسودگی تنش افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

کلیدواژه‌ها:

آسودگی تنش،
برش مستقیم،
سطح تماس ماسه-
ژئوتکستایل،
سرعت برش،
تراز تنش برشی.

استناد: غفاری جواد، فاضلی سمیه. بررسی آزمایشگاهی رفتار آسودگی تنش در ماسه و سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل. پژوهش‌های زیرساخت‌های

عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱)، ۱۸۷-۱۹۸. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.9284.1507>

۱- مقدمه

خزش ارائه می‌دهد. یک تفاوت اساسی بین خزش و آزمایشات آسودگی این است که در آزمایش خزش ساختار خاک با گذشت زمان تغییر می‌کند، گاهی اوقات به شیوه‌ای غیرقابل پیش‌بینی، در حالی که در طول آزمایش آسودگی، ساختار خاک عمدتاً با توزیع مجدد تنش‌های داخلی ثابت می‌ماند [۸]. معمولاً پذیرفته شده است که در آزمایش آسودگی تنش، خاک رفتار قابل پیش‌بینی بیشتری نسبت به آزمایش خزش دارد. در هر دو خاک رس و ماسه، نرخ آسودگی طولانی‌مدت تقریباً خطی است (در مقیاس لگاریتم زمان)، که امکان تفسیر ساده‌تر سطوح تنش در طول زمان را فراهم می‌کند. بسته به کاربرد داده‌ها، نتایج به‌دست آمده از آزمایش آسودگی تنش بر روی مواد دانه‌ای می‌تواند برای ارزیابی منطقی رفتار خزش استفاده شود.

اثرات وابسته به زمان شامل نرخ کرنش، خزش (تنش انحرافی ثابت) یا آسودگی تنش (نرخ کرنش صفر) است. اولین مطالعه آزمایشگاهی اثرات نرخ کرنش توسط کاساگراند و شانون^۱ بر روی ماسه متراکم و با استفاده از دستگاه سه محوری در تنش همه جانبه پایین انجام شد [۱۰]. در مطالعات مشابه دیگری نیز وابستگی نرخ تنش-کرنش در مواد دانه‌ای مطالعه شده است [۱۱-۱۹]. رفتار خزشی مواد دانه‌ای نیز به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷، ۱۸، ۲۰ و ۲۱].

تحقیق کمتری در مورد آسودگی تنش انجام شده است. محققان در پژوهشی آزمایش‌های آسودگی تنش را بر روی انواع مختلفی از خاک رس و ماسه کوارتز انجام دادند [۲۲ و ۲۳]. نتایج آنها نشان داد که وقتی تغییر شکل متوقف می‌شود، یک تأخیر اولیه در زمان وجود دارد قبل از اینکه یک رابطه خطی بین لگاریتم زمان و تنش انحرافی در طول آسودگی تنش برای هر دو خاک رس و ماسه کوارتز مشاهده شود و تغییر در نرخ کرنش برشی تأثیری بر روی شیب منحنی‌های آسودگی تنش

رفتار مکانیکی خاک‌ها وابسته به زمان بوده که در برخی از خاک‌ها این ویژگی با توجه به عملکردشان مفید و در برخی دیگر، زیان‌آور می‌باشد. تغییرات وابسته به زمان در رسوبات چسبنده به‌صورت گسترده شناخته شده است. همچنین نتایج مطالعات نشان می‌دهند که رسوبات تازه یا ماسه تمیز متراکم شده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در سختی و مقاومت با زمان دارد [۱-۳]. بیشتر این مشاهدات در آزمایش‌های درجا مانند آزمایش نفوذ استاندارد و مخروطی دیده شده است. این پدیده، به‌عنوان اثر کهولت شناخته شده است. علاوه بر اثر کهولت، پدیده‌های وابسته به زمان دیگری همچون خزش و آسودگی تنش در بسیاری از کارهای ژئوتکنیکی دیده می‌شود. خزش در خاک عبارت است از افزایش تدریجی تغییرشکل‌هایی در خاک در طول زمان که تحت تنش ثابتی اتفاق می‌افتد. در شرایط آسودگی تنش نیز برخلاف خزش، افت تنشی در خاک تحت کرنش ثابت صورت می‌گیرد. بررسی تغییرشکل‌ها و تنش‌های درازمدت پدیده‌های فوق، جهت در نظر گرفتن اثرات آنها در کارهای اجرایی ضروری می‌باشد.

رس و ماسه نسبت به زمان رفتار متفاوتی دارند. یک تابع تنش-کرنش-نرخ کرنش منحصر به فرد در خاک رس وجود دارد که پدیده خزش و آسودگی تنش را یکی می‌کند [۴-۸]. این رابطه، توسعه مدل‌های رفتاری را برای پیش‌بینی رفتار یکی براساس پارامترهای به‌دست آمده از دیگری تسهیل کرده است. مدل‌های مشابهی برای استفاده در پیش‌بینی رفتار ماسه وجود دارند، اگرچه کاربردهای آنها نسبت به راه‌حل تئوری به تقریب‌هایی محدود می‌شود. مطالعات گذشته مربوط به خزش بیشتر از مطالعات مربوط به آسودگی تنش است، عمدتاً به این دلیل که اغلب مشکلات ژئوتکنیکی شامل اعمال بار ثابت و نه تغییرشکل ثابت است [۹]. با این حال، آزمایش آسودگی تنش یک جایگزین مهم برای بررسی خواص

^۱- Casagrande and Shannon

آسودگی تنش ادامه می‌یابد و مشابه آنچه تاتسوکا^۶ و همکاران آن را به عنوان اثرات موقت نرخ کرنش و شتاب (به عنوان مثال، TESRA) تعریف کرده‌اند مشاهده می‌شود [۳۰]. کریم‌پور و لاد، تأثیر نرخ کرنش را بر رفتار آسودگی تنش ماسه ساحلی ویرجینیا تحت تنش همه‌جانبه ۸۰۰۰ کیلوپاسکال، که در آن شکستگی ذرات تجربه شد، مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده شد که نرخ بارگذاری اولیه بالاتر، مقادیر نسبتاً بیشتری از آسودگی تنش را ایجاد می‌کند، اما پس از مدتی نرخ آسودگی تنش تقریباً برای همه نرخ‌های بارگذاری اولیه یکسان شد. به دلیل انرژی اضافی ناچیز و تغییر حجم در طول آسودگی تنش، مقادیر ناچیزی خرد شدن ذرات در طول آسودگی تنش مشاهده گردید [۱۷]. در مورد مکانیسم پشت اثرات نرخ بارگذاری، محققان پیشنهاد کردند که تغییرات در زنجیره‌های نیروی توسعه یافته در مجموعه دانه‌ها می‌تواند رفتارهای خزش و آسودگی تنش را در ماسه توضیح دهد [۱۷-۲۱ و ۲۹]. این به این دلیل است که شرایط مرزی متفاوتی در نتیجه خرد شدن ذرات حاکم است که ناشی از خستگی استاتیکی است. خستگی استاتیکی پدیده‌ای است که شکست در بار کمتری نسبت به بار مورد نیاز برای ایجاد خرابی کوتاه‌مدت رخ می‌دهد. بنابراین، پس از یک دوره بارگذاری ثابت توسط بار کوچکتر، بار لازم برای ایجاد خستگی استاتیکی با افزایش زمان تحت بار کاهش می‌یابد. در مواد شکننده، مانند کوارتز، خستگی استاتیکی به دلیل رشد آهسته ترک‌های زیربحرانی تا طولی است که در آن به‌طور فاجعه‌باری منتشر می‌شوند. لاد و کریم‌پور این پدیده و پیامد آن را در مواد دانه‌ای توضیح دادند [۱۹]. فام^۷ و همکاران، آزمایش‌های سه‌محوری را روی ماسه خشک Hostun جهت بررسی خواص ویسکوزیته ماسه انجام دادند. آن‌ها سه نوع بارگذاری وابسته به زمان شامل خزش، آسودگی

ندارد. پیش از این نیز چنین رفتاری را برای خاک رس گزارش شده بود [۲۴-۲۶]. مورایاما و شیباتا^۲ مشاهده کردند که تنش محدود شده‌ای برای آسودگی تنش وجود دارد، در حالی که دیگران چنین مشاهده‌ای را گزارش نکردند [۲۴]. لاسردا^۳ و هیوستون^۳ چندین آزمایش آسودگی تنش زهکشی نشده را انجام دادند. نتایج نشان داد که میزان فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در طول آسودگی تنش، کم تا ناچیز است و این مشاهدات با فرضیه‌ای که توسط لو^۴ پیشنهاد شده بود تأیید شد که براساس آن تولید فشار آب حفره‌ای تنها با مقدار کرنش اعمال شده مرتبط است [۲۳ و ۲۷]. لادانی و بنیامینا^۵ با هدف تخمین پارامترهای خزش از آزمایش‌های آسودگی تنش، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آسودگی تنش را بر روی ماسه منجمد اتاوا انجام دادند. برای محدوده فشارهای همه‌جانبه اعمال شده (۱۰۰-۳۰۰ کیلوپاسکال)، آنها به این نتیجه رسیدند که میزان فشار همه‌جانبه تأثیری بر رفتار آسودگی تنش ماسه منجمد اتاوا ندارد [۲۸]. پژوهشگران یک سری آزمایشات آسودگی تنش را روی ماسه مرجانی خرد شده انجام دادند. مقادیر قابل‌توجهی از آسودگی تنش در سطوح مختلف تنش‌های انحرافی مشاهده شد. مشابه آزمایش‌های خزش [۲۰]، مشاهده دقیق کرنش حجمی، مقداری انقباض را در طول آسودگی تنش نشان داد، در حالی که محققان آسودگی تنش را به صورت کاهش تنش همراه با نرخ کرنش محوری صفر تعریف کردند [۲۹]. بارگذاری اضافی پس از هر آسودگی تنش با اثرات ساختاری همراه بود، که به عنوان تغییرات در ویژگی‌های تنش-کرنش تعریف می‌شود و با تغییرات در وزن مخصوص خشک و (یا) اثرات تاریخچه کرنش قابل توضیح نیست، و به‌صورت یک جهش موقتی در منحنی تنش-کرنش اولیه زمانی که بارگذاری پس از خزش یا

^۲- Murayama and Shibata

^۳- Lacerda and Houston

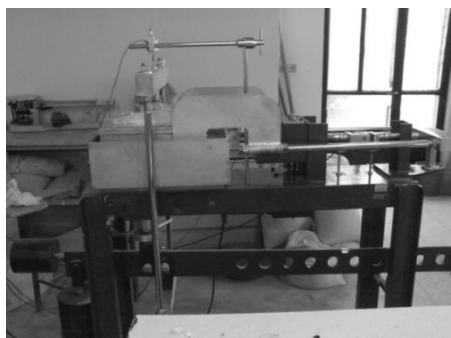
^۴- Lo

^۵- Ladanyi and Benyamina

^۶- Tatsuoka

^۷- Pham

ثبت جابه‌جایی‌های افقی و قائم می‌باشد. نیروی قائم توسط اهرمی با بازوی ۱ به ۲۰ به صورت مکانیکی اعمال می‌شود و نیروی برشی با تنظیم سرعت برش به صورت دیجیتال وارد می‌شود. مقادیر نیروی برشی و جابه‌جایی‌های قائم و افقی توسط Data logger ثبت شده و به کامپیوتر انتقال داده می‌شود. در شکل ۱، دستگاه برش مستقیم استفاده شده نشان داده شده است.



شکل ۱- دستگاه برش مستقیم و اجزای مختلف آن

به منظور انجام این تحقیق از ماسه سیلیسی معدن فیروزکوه که در صنعت ریخته‌گری و سند بلاست مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده شده است. خصوصیات ماسه مورد مطالعه که براساس معیارهای استاندارد ASTM مربوطه تعیین گردیده، در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به توزیع دانه‌بندی و براساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید خاک (USCS)، ماسه در رده SP (ماسه بد دانه‌بندی شده) قرار می‌گیرد. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ماسه نشان داده شده است. همچنین برای بررسی اندرکنش سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل از یک نوع ژئوتکستایل بافته نشده ساخت ایران استفاده شده است.

تنش و تغییر نرخ کرنش را روی رفتار ماسه بررسی کردند [۳۱].

با توجه به مطالعات صورت گرفته در خصوص رفتار آسودگی تنش در ماسه‌ها، به نظر می‌رسد مطالعات و تأثیر پارامترهای مختلف دیگری همچون سرعت برش و مخصوصاً وجود مسلح‌کننده در خاک‌های مسلح قابل بررسی می‌باشد که در این تحقیق به تأثیر عوامل مختلفی شامل تراز تنش برشی، دانسیته خاک، سرعت برش و وجود لایه ژئوتکستایل در خاک پرداخته شده است.

۲- برنامه آزمایش‌ها

۱-۲- دستگاه و مصالح مورد استفاده

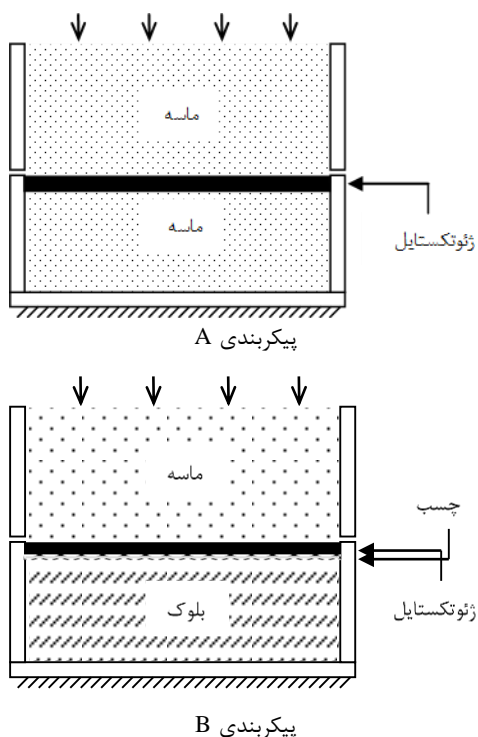
آزمایش برش مستقیم برای ارزیابی اندرکنش خاک-ژئوسینتتیک‌ها از سال ۱۹۹۱ توسط ASTM تحت شماره D:5321 به صورت استاندارد درآمده است. گرچه تعیین مقاومت برشی خاک-ژئوسینتتیک در سطح تماس با انجام آزمایش‌های دیگری از جمله آزمایش میز مایل مورد تحقیق قرار گرفته است، ولی آزمایش برش مستقیم هنوز به عنوان عمومی‌ترین آزمایش برای تعیین اندرکنش خاک-ژئوسینتتیک شناخته شده است [۳۲-۳۴]. طبق توصیه استاندارد ASTM D 5321-02 برای همه آزمایش‌ها از دستگاه برش مستقیم ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است [۳۵].

در این تحقیق از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با ابعاد قالب ۳۰×۳۰ سانتیمتر استفاده شده است. دستگاه برش مستقیم شامل دو گیج الکتریکی برای

جدول ۱- مشخصات ماسه استفاده شده

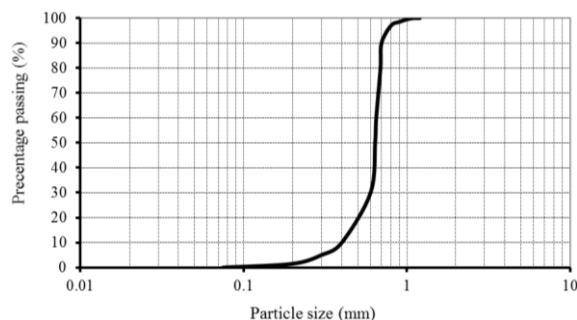
آزمایش	استاندارد	ماسه
دانه بندی	ASTM D422-98	Cu=۱/۵۱ Cc=۱/۲۹
توده ویژه	ASTM D854-02	G _s =۲/۶۷
نسبت تخلخل حداقل	ASTM D4253-00	e _{min} =۰/۵۵
نسبت تخلخل حداکثر	ASTM D4254-00	e _{max} =۱/۱۲

برش مستقیم به منظور بررسی سطح تماس خاک-ژئوتکستایل یک قطعه صلب در جعبه برش تحتانی قرار گیرد نتیجه بهتری حاصل می‌گردد [۳۶]. در پژوهشی دیگر، اعلام شد که در آزمایش برش مستقیم برای بررسی اندرکنش خاک-ژئوممبرین یا ژئوتکستایل می‌توان از قطعه صلب در جعبه برش تحتانی استفاده کرد، ولی برای بررسی اندرکنش خاک-ژئوگرید باید در هر دو جعبه برش تحتانی و فوقانی از نمونه خاک استفاده گردد [۳۷]. بنابراین در مطالعه حاضر، برای بررسی آسودگی تنش روی پارامترهای مقاومت برشی سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل به خاطر سادگی و کاهش حجم کاری و کنترل هر نوع حرکت ژئوتکستایل در طول برش، از پیکربندی B شکل ۴ استفاده شده و آزمایش‌ها انجام گرفته است.



شکل ۴- نحوه قرارگیری لایه ژئوسینتتیک داخل خاک

در پیکربندی نوع B، بلوکی با ابعاد ۲۹/۸×۲۹/۸ میلی‌متر انتخاب شده و لایه ژئوتکستایل با همان ابعاد بلوک بریده و توسط چسب قوی روی بلوک چسبانده می‌شود و در جعبه پایینی برش قرار داده می‌شود، به طوری که مجموع ارتفاع بلوک و ژئوتکستایل برابر با



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده شده در آزمایش‌ها

به نظر می‌رسد ژئوتکستایل بافته نشده و با ضخامت زیاد، افت تنش ناشی از آسودگی تنش را بهتر نشان می‌دهد. در جدول ۲، خواص و در شکل ۳، وضعیت ظاهری ژئوتکستایل مورد استفاده مشاهده می‌شود.

جدول ۲- مشخصات ژئوتکستایل به کار گرفته شده

عنوان	مقدار
نام ژئوتکستایل	GTN.50
نوع پلیمر	Polypropylene
ضخامت (mm)	۳/۸
جرم در واحد سطح (gr/m ²)	۵۰۰
مقاومت کششی (kN/m)	۲۷
کشیدگی (/)	>۵۰



شکل ۳- نمونه‌ای از ژئوتکستایل بافته نشده

۲-۲- روش آزمایش و تهیه نمونه‌ها

برای بررسی اندرکنش سطح تماس خاک-ژئوسینتتیک با استفاده از دستگاه برش مستقیم، دو روش آزمایش در خصوص نحوه قرارگیری لایه ژئوسینتتیک در داخل خاک وجود دارد که در شکل ۴ نشان داده شده است. اسکات و ریچارد^۸ گزارش کردند چنانچه در آزمایش

^۸- Richards and Scott

برشی، برش متوقف شده و به نمونه مدت ۳۰ دقیقه اجازه آسودگی تنش داده شده است. در این مدت زمان مقدار افت تنش اندازه‌گیری شده است.

در شکل ۵-الف، افت تنش برشی ناشی از پدیده آسودگی تنش در پنج تراز تنش برشی و برای نمونه ماسه تنها با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. مقادیر R1 الی R5 به ترتیب برابر ترازهای تنش برشی متناظر با جابه‌جایی افقی ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر است که در آن ترازها، افت تنش برشی ناشی از پدیده آسودگی تنش بررسی شده است. مطابق شکل ۵-ب، نمونه در هر تراز تنش، به مدت ۳۰ دقیقه آسودگی تنش را تجربه کرده است. همچنین در شکل ۵-پ، منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه‌لگاریتمی رسم شده است. $\tau_{relaxation}$ مقدار افت تنش و τ_0 تراز تنشی است که از آن افت تنش شروع شده است. در شکل ۶-الف، افت تنش برشی ناشی از پدیده آسودگی تنش در هفت تراز تنش برشی و برای نمونه ماسه با دانسیته متوسط و سرعت برش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. مقادیر R1 الی R7 به ترتیب برابر ترازهای تنش برشی متناظر با جابه‌جایی افقی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر است که در آن ترازها، افت تنش برشی ناشی از پدیده آسودگی تنش بررسی شده است. مطابق شکل ۶-ب، نمونه در هر تراز تنش، به مدت ۳۰ دقیقه آسودگی تنش را تجربه کرده است. همچنین در شکل ۶-پ، منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی رسم شده است.

در ادامه، تأثیر عوامل مختلفی همچون دانسیته خاک، وجود لایه ژئوتکستایل و میزان نرخ برش بر افت تنش برشی ناشی از آسودگی تنش بررسی شده است.

۳-۱- تأثیر دانسیته خاک بر آسودگی تنش

شکل ۷، به ترتیب، تغییرات آسودگی تنش با تراز تنش برشی و تأثیر دانسیته خاک را برای نمونه ماسه تنها

ارتفاع جعبه پایینی باشد. روی ژئوتکستایل دوباره با ماسه پر شده و متراکم می‌شود. بعد از اعمال تنش قائم $\sigma_n=100$ (kPa)، برش اعمال شده و آزمایش انجام می‌گیرد. برای بررسی اثر آسودگی تنش، روش کار بدین ترتیب بوده است که در حین اعمال برش در نمونه، در ترازهای مختلف تنش برشی (جابه‌جایی‌های افقی مشخص)، برش متوقف شده و به نمونه مدت ۳۰ دقیقه اجازه آسودگی تنش داده شده است. در این مدت زمان مقدار افت تنش، اندازه‌گیری می‌شود. برای بررسی اثر سرعت برش و دانسیته خاک بر میزان افت مقاومت ناشی از آسودگی تنش، از دو سرعت برش به مقدار ۰/۵ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه و دو دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰٪ به ترتیب دانسیته سست و متوسط استفاده شده است. لازم به یادآوری است که در نظر گرفتن دانسیته نسبی ۳۵ و ۶۰ درصد برای تمامی نمونه‌ها مربوط به شرایط قبل از انجام آزمایش (قبل از اعمال سربار قائم) می‌باشد. قطعا تراکم نمونه‌های مختلف در حین برش مخصوصا برای سرعت‌های برش متفاوت، تغییر یافته است که این موضوع در حین انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری و بررسی نشده است. در تمامی آزمایش‌ها نمونه خاک ماسه‌ای به صورت خشک بوده است.

۳- نتایج آزمایش‌ها

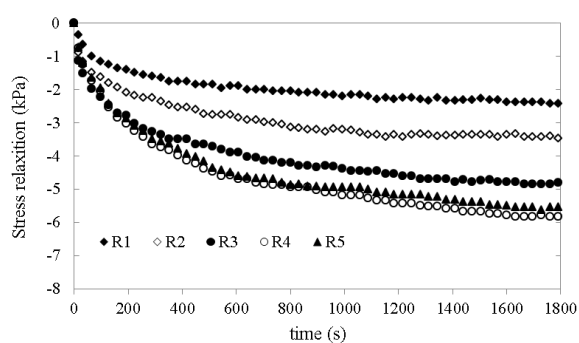
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد اثر زمان حین برش می‌تواند به سه صورت خزش^۹، آسودگی تنش^{۱۰} و تغییر پله‌ای سرعت برش بررسی شود. در این تحقیق اثر زمان به صورت آسودگی تنش مطالعه شده است. سعی شده است عواملی مانند دانسیته خاک، سطح تنش، سرعت برش و وجود ژئوتکستایل در خاک بر میزان آسودگی تنش بررسی شود. روش کار بدین ترتیب بوده است که در حین اعمال برش در نمونه، در ترازهای مختلف تنش

^۹- Creep

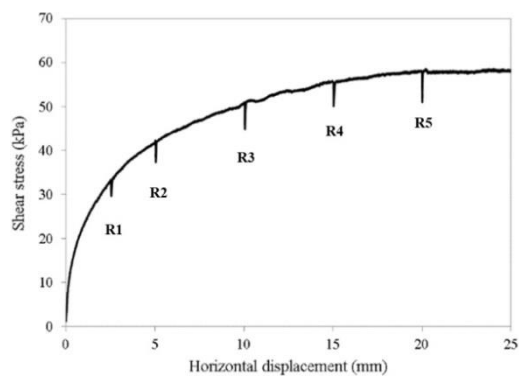
^{۱۰}- Stress Relaxation

می‌دهد.

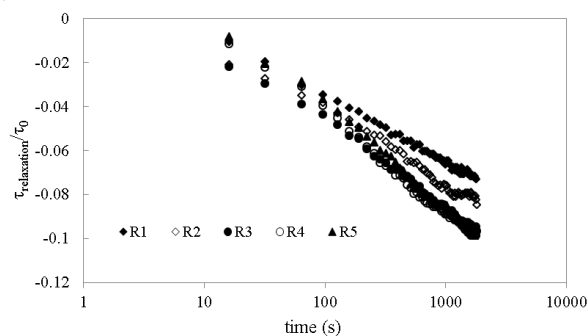
با سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان



(ب)

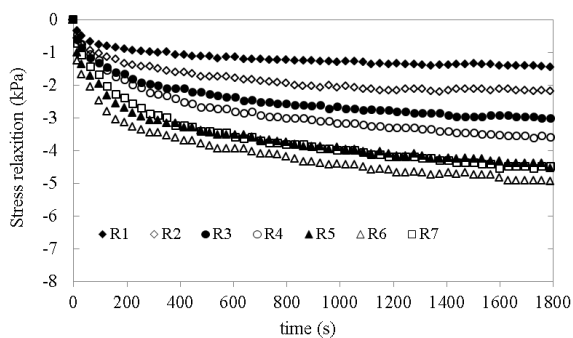


(الف)

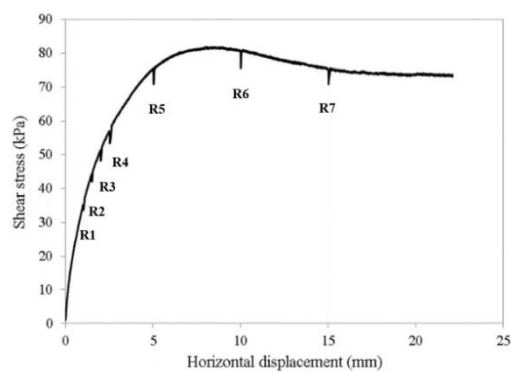


(پ)

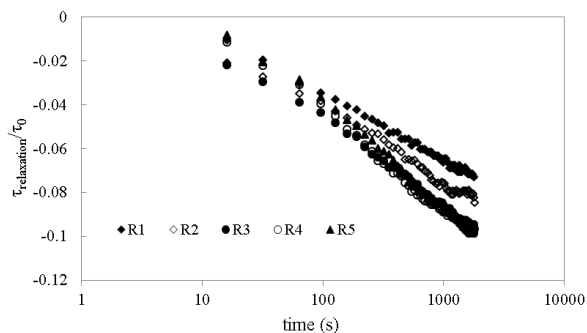
شکل ۵- تغییرات (الف) تنش برشی با جابه‌جایی افقی، (ب) کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف و (پ) $\tau_{\text{relaxation}}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه تنها با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه



(ب)



(الف)



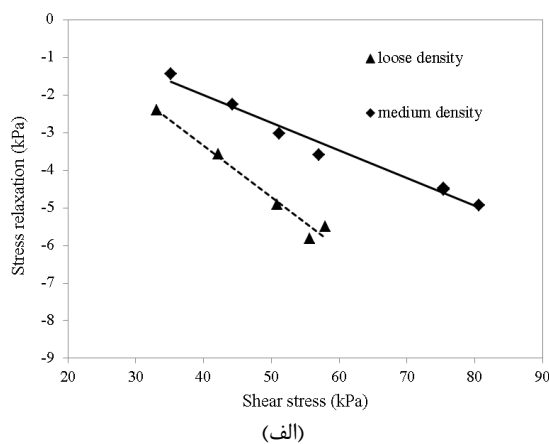
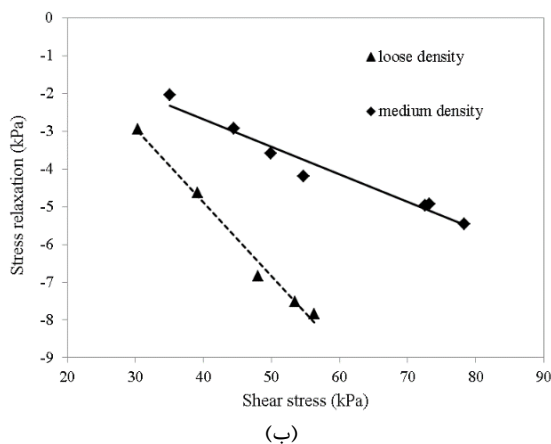
(پ)

شکل ۶- تغییرات (الف) تنش برشی با جابه‌جایی افقی، (ب) کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف و (پ) $\tau_{\text{relaxation}}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه تنها با دانسیته متوسط و سرعت برش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه

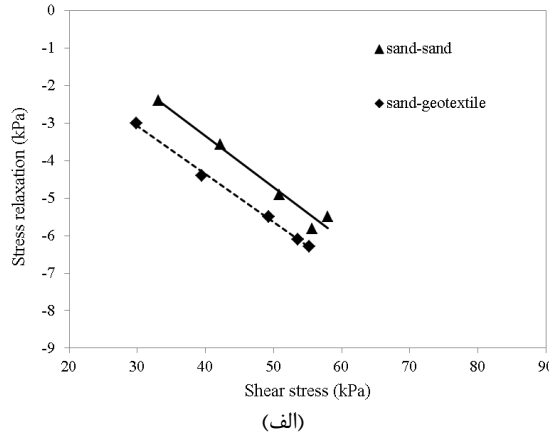
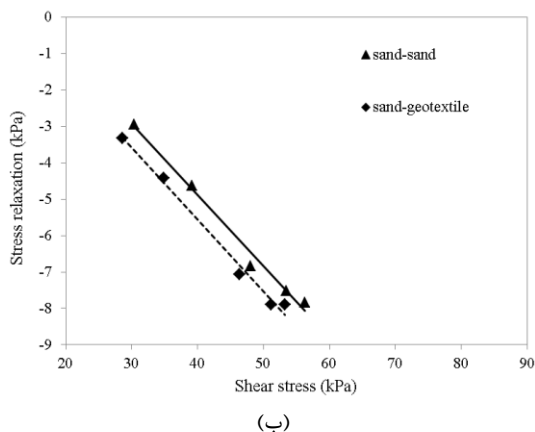
همچنین در شکل ۸، به ترتیب تغییرات آسودگی تنش با تراز تنش برشی و تأثیر ژئوتکستایل در خاک برای نمونه با دانسیته سست و سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در نمونه‌های خاک مسلح شده با لایه ژئوتکستایل در مقایسه با خاک تنها، افت مقاومت بیشتری ناشی از آسودگی تنش اتفاق می‌افتد.

همانطور که مشاهده می‌شود در ترازهای تنش برشی بالاتر، مقدار افت تنش برشی بیشتری ناشی از آسودگی تنش اتفاق می‌افتد. در ضمن در نمونه‌های با دانسیته سست ($D_r=35\%$)، آسودگی تنش بیشتری مشاهده می‌شود.

۳-۲- تأثیر لایه ژئوتکستایل بر آسودگی تنش



شکل ۷- تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها در دو دانسیته سست و متوسط در سرعت برش (الف) ۰/۵ و (ب) ۵ میلیمتر بر دقیقه



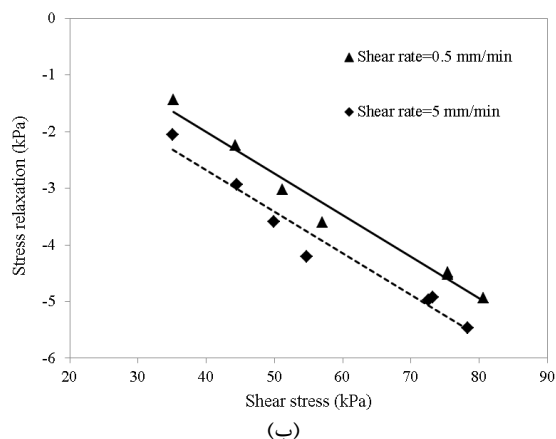
شکل ۸- تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای دو حالت ماسه تنها و سطح تماس ماسه- ژئوتکستایل با دانسیته سست در سرعت برش (الف) ۰/۵ و (ب) ۵ میلیمتر بر دقیقه

در شکل ۱۰، تغییرات آسودگی تنش با تراز تنش برشی و تأثیر سرعت برش برای نمونه ماسه- ژئوتکستایل با دانسیته سست نشان داده شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که هرچه سرعت برش نمونه‌ای (در هر دوی خاک تنها و خاک مسلح با ژئوتکستایل) بیشتر

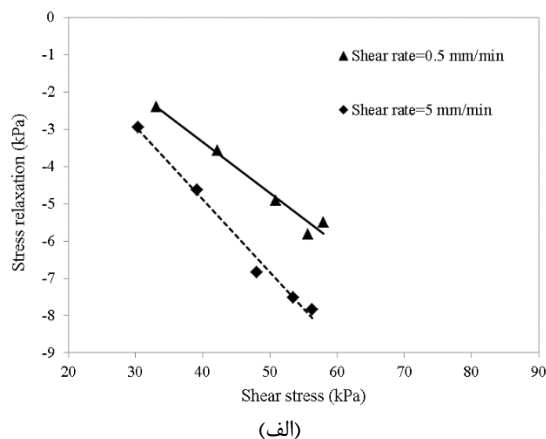
۳-۳- تأثیر سرعت برش بر آسودگی تنش

شکل ۹، تغییرات آسودگی تنش با تراز تنش برشی و تأثیر سرعت برش را برای نمونه ماسه تنها با دانسیته‌های سست و متوسط نشان می‌دهد.

آن بیشتر خواهد بود.



باشد، مقدار افت تنش برشی ناشی از آسودگی تنش در

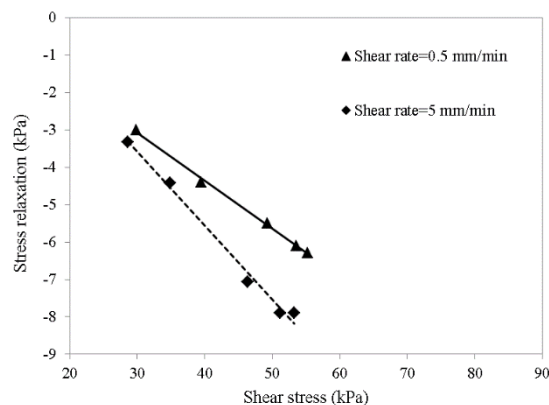


شکل ۹- تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها با دانسیته (الف) سست و (ب) متوسط در سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه

کرنش‌های پلاستیک باشد به نحوی که مقدار کل کرنش ثابت مانده است. آسودگی تنش نسبتاً سریع به ویژه در زمان‌های اولیه، قابل ارزیابی است. نتایج سایر مطالعات مربوطه نیز تأییدکننده نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر است که نشان می‌دهد نرخ افت تنش ناشی از آسودگی تنش با افزایش زمان آسودگی تنش کاهش می‌یابد [۳۹-۴۲]. در صورت رسم منحنی نسبت $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه‌لگاریتمی، همانطور که در شکل‌های ۵- پ و ۶- پ دیده می‌شود، این تغییرات تقریباً خطی بوده که شیب آن وابسته به تراز تنش برش‌ای که آسودگی تنش در آن تراز اتفاق می‌افتد است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار افت تنش برشی ناشی از آسودگی تنش وابسته به سطح تنش برشی، سرعت برش، دانسیته خاک و وجود لایه ژئوتکستایل در داخل خاک است. در همه نمونه‌ها تأثیر تراز تنش برشی بر مقدار آسودگی تنش واضح است. به عبارتی بهتر، هرچه نمونه در ترازهای تنش برشی بالاتری آسودگی تنش را تجربه کند، افت تنش برشی در آن بیشتر خواهد بود. این نتیجه در مطالعات فام و همکاران و وانگ و ژیا^{۱۱} نیز مشاهده شده است [۳۱ و ۴۳]. از میان سایر عوامل تأثیرگذار باقی

۳-۴- بحث و بررسی نتایج

همان‌طور که در شکل‌های ۵- الف و ۶- الف، مشاهده می‌شود با ثابت نگه داشتن جابه‌جایی افقی در مقدار جابه‌جایی‌های مختلف، مقدار مقاومت برشی کاهش یافته به نحوی که بعد از ۳۰ دقیقه مقدار افت تنش برشی ناشی از آسودگی تنش ناچیز می‌باشد. افت مقاومت برشی در مطالعات لاد و کریم پور نیز مشاهده شده است [۳۸].



شکل ۱۰- تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل با دانسیته سست در سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه

مقدار افت تنش برشی شاید به دلیل تبدیل کرنش‌های الاستیک به کرنش‌های پلاستیک باشد به نحوی که مقدار کل کرنش ثابت مانده است. مقدار افت تنش برشی شاید به دلیل تبدیل کرنش‌های الاستیک به

¹¹- Wang and Xia

در مجموع می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در شرایطی که نمونه خاک از نظر تراکم، سست بوده و یا سرعت برش بیشتر بوده و یا لایه ژئوتکستایل در خاک قرار گرفته است در همه موارد بالا، امکان جابه‌جایی و ترتیب مجدد قرارگیری ذرات ماسه فراهم می‌گردد و در نتیجه، افت مقاومت بیشتری ناشی از آسودگی تنش اتفاق می‌افتد. بنابراین بهتر است جهت طراحی دقیق سازه‌های خاکی در پروژه‌های عمرانی، تأثیر آسودگی تنش نیز جهت افزایش ایمنی و بهینه کردن طراحی لحاظ شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پدیده آسودگی تنش در خاک ماسه‌ای غیرمسلح و مسلح شده با لایه ژئوتکستایل با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس مطالعه شده است. برای بررسی اثر سرعت برش و دانسیته خاک بر میزان افت مقاومت ناشی از آسودگی تنش، از دو سرعت برش به مقدار 0.5 و 5 میلی‌متر بر دقیقه و دو دانسیته نسبی 35 و 60% به ترتیب دانسیته سست و متوسط استفاده شده است. همه نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم تحت تنش قائم 100 کیلوپاسکال بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار افت تنش ناشی از پدیده آسودگی تنش به تراز تنش برشی، دانسیته خاک، وجود لایه ژئوتکستایل در خاک و سرعت برش بستگی دارد. به‌نحوی که با افزایش تراز تنش برشی و سرعت برش و با کاهش دانسیته ماسه، مقدار افت تنش ناشی از آسودگی تنش بیشتر می‌شود.

نتایج آزمایش‌ها بیانگر این موضوع است که تراز تنش برشی و دانسیته ماسه نقش مهمی در کاهش مقاومت ناشی از پدیده آسودگی تنش دارد. نمونه‌های با دانسیته کم، علاوه بر افت مقاومت بیشتر، نرخ افت مقاومت بیشتری را نیز به دلیل آسودگی تنش با در نظر گرفتن تراز تنش برشی نشان می‌دهند. در حالی که وجود لایه ژئوتکستایل در خاک علیرغم افت مقاومت بیشتر، تأثیری

مانده، تأثیر دانسیته خاک بر آسودگی تنش بیشتر از همه است. هرچه نمونه خاک از نظر تراکم، سست‌تر باشد میزان آسودگی تنش در آن نیز بیشتر است. همچنین نرخ افزایش آسودگی تنش در نمونه‌های سست‌تر، بیشتر است. به‌عبارتی بهتر، تأثیر تراز تنش برشی در مقدار آسودگی تنش در نمونه‌های سست بیشتر است. این نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است.

از عوامل تأثیرگذار بر آسودگی تنش در خاک می‌توان به وجود لایه ژئوتکستایل در داخل خاک نیز اشاره کرد. نتایج شکل ۸، نشان می‌دهد در نمونه‌های خاکی که لایه ژئوتکستایل در آن وجود دارد (سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل) آسودگی تنش بیشتری مشاهده می‌شود. این مشاهده در نمونه‌های خاک مسلح با دانسیته سست، بیشتر دیده می‌شود. در سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل، زمانی که آسودگی تنش اتفاق می‌افتد به دلیل وجود حفره‌های ریز در لایه ژئوتکستایل، ترتیب مجدد قرارگیری بیشتری برای ذرات ماسه رخ می‌دهد؛ به نحوی که باعث افزایش آسودگی تنش در آنها می‌شود. ولی وجود ژئوتکستایل در خاک تأثیری بر نرخ آسودگی تنش ندارد و نرخ آسودگی تنش در آن مشابه خاک ماسه تنها است.

تأثیر سرعت برش بر میزان آسودگی تنش را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. مطابق نتایج شکل ۹، هرچه سرعت برش در نمونه‌ها بیشتر باشد میزان آسودگی تنش بیشتری نیز در آنها مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد سرعت برش تأثیر خیلی ناچیزی بر نرخ آسودگی تنش داشته باشد. این تأثیر در نمونه‌های با دانسیته سست بیشتر مشاهده می‌شود. این نتایج مشابه نتایج مطالعات فام و همکاران می‌باشد. آنها مطالعاتی روی خواص ویسکوزیته خاک ماسه‌ای با استفاده از دستگاه سه محوری انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مقدار آسودگی تنش و خزش در نمونه‌های با دانسیته کم خیلی واضح است. همچنین برای سرعت‌های برش زیاد، مقدار آسودگی تنش و خزش بیشتر می‌باشد [۳۱].

بر نرخ افت مقاومت ناشی از آسودگی تنش در مقایسه با خاک تنها ندارد.

References

- [1] Mesri G, Feng TW, Benak JM. Postdensification penetration resistance of clean sands. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990 Jul; 116(7): 1095-115. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1095)**
- [2] Acar YB. Discussion of "Time-Dependent Strength Gain in Freshly Deposited or Densified Sand" by James K. Mitchell and Zoltan V. Solymar (November, 1984). *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987 Feb; 113(2): 171-173. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:2(171)**
- [3] Mitchell JK, Solymar ZV. Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1984 Nov; 110(11): 1559-1576. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:11(1559)**
- [4] Lade PV. Experimental study and analysis of creep and stress relaxation in granular materials. *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior*. 2012; 236(15): 1-11. doi: **10.1061/40917(236)15**
- [5] Lade PV, Liggio Jr CD, Nam J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Jul; 135(7): 941-953. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000067**
- [6] Lade PV, Nam J, Liggio Jr CD. Effects of particle crushing in stress drop-relaxation experiments on crushed coral sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010 Mar; 136(3): 500-509. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000212**
- [7] Liingaard M, Augustesen A, Lade PV. Characterization of models for time-dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*. 2004 Sep; 4(3): 157-177. doi: **10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:3(157)**
- [8] Sheahan TC, Kaliakin VN. Microstructural considerations and validity of the correspondence principle for cohesive soils. In *Engineering Mechanics, Proc., 13th Conf 1999*. ASCE, Baltimore, Md.
- [9] Borja RI. Generalized creep and stress relaxation model for clays. *Journal of geotechnical engineering*. 1992 Nov; 118(11): 1765-1786. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:11(1765)**
- [10] Casagrande A, Shannon WL. Strength of soils under dynamic loads. *Transactions of the american society of civil engineers*. 1949 Jan; 114(1): 755-772. doi: **10.1061/TACEAT.0006198**
- [11] Tatsuoka F. Some new aspects of time effects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials, *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*. In *Proc. 2nd Int. Symp. on Hard Soils-Soft Rocks*. 2000; 1285-1371.
- [12] Tatsuoka F, Ishihara M, DI BH, Kuwano R. Time-dependent shear deformation characteristics of geomaterials and their simulation. *Soils and foundations*. 2002 Apr 15; 42(2): 103-129. doi: **10.3208/sandf.42.2_103**
- [13] Tatsuoka F, Enomoto T, Kiyota T. Viscous property of geomaterial in drained shear. In *Geomechanics II: Testing, Modeling, and Simulation*. 2006; 156: 285-312. doi: **10.1061/40870(216)20**
- [14] Kuwano R, Jardine RJ. On measuring creep behaviour in granular materials through triaxial testing. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002 Oct 1; 39(5): 1061-1074. doi: **10.1139/t02-059**
- [15] Di Benedetto H. Time effects on the behaviour of geomaterials, *Keynote Lecture. Proc. 3rd Int. Sym. Deformation Characteristics of Geomaterials, IS Lyon 03, September, 2005*; 59-123.
- [16] Augustesen A, Liingaard M, Lade PV. Evaluation of time-dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*. 2004 Sep; 4(3): 137-156. doi: **10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:3(137)**
- [17] Karimpour H, Lade PV. Time effects relate to crushing in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010 Sep; 136(9): 1209-1219. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000335**
- [18] Karimpour H, Lade PV. Creep behavior in Virginia Beach sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 2013; 50(11): 1159-1178. doi: **10.1139/cgj-2012-0467**
- [19] Lade PV, Karimpour H. Static fatigue controls particle crushing and time effects in granular materials. *Soils and foundations*. 2010 Oct 1; 50(5): 573-583. doi: **10.3208/sandf.50.573**
- [20] Lade PV, Liggio Jr CD, Nam J. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Jul; 135(7): 941-953. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000067**
- [21] Karimpour H. Time effects in relation to crushing in sand. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The Catholic University of America, Washington, D.C. 2011.
- [22] Lacerda WA. Stress-relaxation and creep effects on soil deformation. University of California, Berkeley; 1976.
- [23] Lacerda WA. Stress relaxation in soils. *Proc. 8th ICSMFE, Moscow, 1973*; 1973: 221-227.
- [24] Murayama S, Shibata T. Rheological properties of clays. In *Proceedings 1961 Jul 17*; 1: 269-273.

- [25] Vialov SS, Skibitsky AM. Problems of the rheology of soils. InProc., 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1961 Jul; 1: 387-391.
- [26] Saada AS. A rheological analysis of shear and consolidation of saturated clays. Highway Research Board Bulletin. 1962; 342: 52-75.
- [27] Lo KY. The pore pressure-strain relationship of normally consolidated undisturbed clays: part II. Experimental investigation and practical applications. Canadian Geotechnical Journal. 1969 Nov 1; 6(4): 395-412. doi: **10.1139/t69-041**
- [28] Ladanyi B, Benyamina MB. Triaxial relaxation testing of a frozen sand. Canadian Geotechnical Journal. 1995 Jun 1; 32(3): 496-511. doi: **10.1139/t95-052**
- [29] Lade PV, Nam J, Liggio Jr CD. Effects of particle crushing in stress drop-relaxation experiments on crushed coral sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010 Mar; 136(3): 500-509. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000212**
- [30] Tatsuoka F, Di Benedetto H, Enomoto T, Kawabe S, Kongkitkul W. Various viscosity types of geomaterials in shear and their mathematical expression. Soils and Foundations. 2008 Feb 1; 48(1): 41-60. doi: **10.3208/sandf.48.41**
- [31] Pham Van Bang D, Di Benedetto H, Duttine A, Ezaoui A. Viscous behaviour of dry sand. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2007 Dec 25; 31(15): 1631-1658. doi: **10.1002/nag.606**
- [32] Wu W, Wang XT, Aschauer F. Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir. Geotextiles and Geomembranes. 2008 Aug 1; 26(4): 363-370. doi: **10.1016/j.geotextmem.2007.12.001**
- [33] Lee KM, Manjunath VR. Soil-geotextile interface friction by direct shear tests. Canadian geotechnical journal. 2000 Feb 1; 37(1): 238-252. doi: **10.1139/t99-124**
- [34] Bergado DT, Ramana GV, Sia HI. Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand. Geotextiles and Geomembranes. 2006 Dec 1; 24(6): 371-393. doi: **10.1016/j.geotextmem.2006.04.001**
- [35] ASTM D 5321-02. Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. American Society for Testing of Materials, West Conshohocken, PA, USA. 2002. doi: **10.1520/D5321-02**
- [36] Richards EA, Scott JD. Soil geotextile frictional properties. InSecond Canadian symposium on geotextiles and geomembranes, Edmonton 1985 Sep 23; 13-24.
- [37] Jewell RA, Milligan GW, Dubois D. Interaction between soil and geogrids. InPolymer grid reinforcement 1984; 18-30.
- [38] Lade PV, Karimpour H. Stress drop effects in time dependent behavior of quartz sand. International Journal of Solids and Structures. 2016 Jun 1; 87: 167-182. doi: **10.1016/j.ijsolstr.2016.02.015**
- [39] Augustesen A, Liingaard M, Lade PV. Evaluation of time-dependent behavior of soils. International Journal of Geomechanics. 2004 Sep; 4(3): 137-156. doi: **10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:3(137)**
- [40] Tong F, Yin JH. Experimental and constitutive modeling of relaxation behaviors of three clayey soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013 Nov 1; 139(11): 1973-1981. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000926**
- [41] Bagheri M, Rezaia M, Mousavi Nezhad M. Rate dependency and stress relaxation of unsaturated clays. International Journal of Geomechanics. 2019 Dec 1; 19(12): 04019128. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001507**
- [42] Komurlu E, Çelik AG. An experimental study on stress relaxation behaviour of cement stabilized sands. Journal of GeoEngineering. 2022 Dec 1; 17(4): 189-194. doi: **10.6310/jog.202212_17(4).2**
- [43] Wang J, Xia Z. DEM study of creep and stress relaxation behaviors of dense sand. Computers and Geotechnics. 2021 Jun 1; 134: 104142. doi: **10.1016/j.compgeo.2021.104142**