

بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی تأثیر المان‌های تسلیح در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک

حسین غیاثیان^۱، سهیل قره^{۲*}، حسین صالح زاده^۱، رزا رسولی^۱ و ایرج رحمانی^۲

^۱دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲دانشگاه پیام نور، مرکز مشهد، مشهد، ایران.

^۳پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۰/۰۹

چکیده

استفاده از عناصر کمکی در بهسازی و اصلاح خواص مهندسی خاک از دیر باز مورد توجه بشر بوده است. امروزه کارایی و توانایی روش تسلیح خاک در ارائه راهکارهای عملی مناسب در پروژه‌های مختلف موجب شده تا این دانش به سرعت جای خود را در مهندسی ژئوتکنیک باز نماید. در راستای افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست‌های آن، سامانه‌های سلولی ژئوسینتیکی (GCS) ابداع شده است، که این سامانه‌ها متشکل از قاب، پوسته ژئوسینتیکی و خاک هستند. در نوشتار حاضر، رفتار تحلیلی و آزمایشگاهی سامانه‌های سلولی ژئوسینتیکی کوچک مقیاس بر روی نمونه‌های استوانه‌ای پر شده از ماسه سواحل دریای خزر و به ارتفاع ۱۰/۵ و قطر ۱۰ سانتی‌متر در شرایط مسلح و غیرمسلح بررسی شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی در دستگاه سه محوری و در شرایط فشار همه جانبه خارجی صفر و بررسی‌های تحلیلی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7 انجام شده است. همچنین در این نوشتار، تأثیر مسلح کننده‌های قائم و افقی، تعداد و آرایش آنها در افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و تغییر شکل‌های جانبی نمونه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌خوانی مناسبی میان نتایج به دست آمده از بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد و در همه موارد بررسی‌های تحلیلی نتایج محافظه کارانه تری نسبت به نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. افزون بر نتایج نشان می‌دهد المان‌های تسلیح قائم نسبت به المان‌های تسلیح افقی به میزان قابل توجهی سبب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست سامانه سلولی ژئوسینتیکی (GCS) می‌شوند، اما تغییر شکل‌های جانبی نمونه در تسلیح افقی نسبت به تسلیح قائم کمتر است.

کلیدواژه‌ها: سامانه سلولی ژئوسینتیکی (GCS)، بهسازی خاک، تسلیح قائم و افقی، بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی

*نویسنده مسئول: سهیل قره

۱- مقدمه

صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شده که بررسی‌های آزمایشگاهی در دستگاه سه محوری و در شرایط فشار همه جانبه خارجی صفر و مطالعات تحلیلی با بهره‌گیری از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7 انجام شده است. لازم به یادآوری است در این پژوهش اثر مسلح کننده‌های قائم و افقی، تعداد و آرایش آنها در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست و تغییر شکل‌های جانبی نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳- مصالح مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه سیلیسی ساحل جفروند بندر انزلی از سواحل باختری خزر در شمال ایران است. پوسته خارجی و همچنین المان‌های تسلیح مورد استفاده در ساخت نمونه‌های مدل فیزیکی GCS از دسته ژئوسینتیک هاست.

۴- آزمایش‌های آزمایشگاهی

به منظور شناخت و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تعیین وزن مخصوص، تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک، سه محوری و برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM انجام گرفته که خلاصه نتایج آنها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین برای شناخت بیشتر و دقیق‌تر خواص مکانیکی و تعیین پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی و ستبرای روی پوسته خارجی و المان‌های تسلیح انجام گرفت (Korner, 2005). آزمایش تعیین مقاومت کششی برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته و استحکام پوسته و المان‌های تسلیح در جهت تار و پود انجام شد که برای انجام این آزمایش، دستگاه انجام آزمایش Wide Width Test بر اساس استاندارد ASTM D-4595، طراحی و ساخته شد و برای اطمینان از عملکرد دستگاه و موازنه کردن (کالیبراسیون) آن، نتایج به

خاک به عنوان مهم‌ترین مصالح ساختمانی و اصلی‌ترین تکیه‌گاه سازه، از دیرباز در ساخت و ساز مورد توجه بشر بوده است اما به سبب ضعف مقاومت برشی و عدم مقاومت در برابر نیروهای کششی، پژوهشگران پیوسته در صدد افزایش ظرفیت باربری، مقاومت و بهبود خواص آن بر آمده و روش‌های مختلفی از جمله اصلاح مکانیکی مانند تراکم، اصلاح شیمیایی مانند تثبیت با آهک یا سیمان و استفاده از ایده خاک مسلح یا به‌کارگیری عناصر کمکی و با مقاومت کششی زیاد را در این زمینه به کار گرفته‌اند. در این میان، روش تسلیح خاک به دلیل هزینه پایین، اجرای آسان و تأثیر زیاد آن در بهبود خواص خاک به عنوان یک روش مناسب برای بهسازی و اصلاح خاک شناخته می‌شود.

خاک مسلح ساختاری متشکل از دو نوع ماده مختلف است، که عملکرد همزمان آنها ضعف هر کدام را به کمترین میزان می‌رساند و در این ایده، خاک تنش‌های فشاری و المان‌های تسلیح تنش‌های کششی را تحمل می‌کند. امروزه تسلیح خاک به عنوان روشی مؤثر و قابل اعتماد در بهسازی و تثبیت لایه‌های خاک افزون بر افزایش ظرفیت باربری، مقاومت برشی و کاهش نشست‌های آن، در تثبیت بسترهای سطحی، خاکریز راه و روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در راستای این اهداف، سامانه‌های سلولی ژئوسینتیکی GCS ابداع شده است (Ghiassian & Holtz, 2005).

۲- اهداف پژوهش

سامانه سلولی ژئوسینتیکی (GCS) متشکل از قاب، پوسته ژئوسینتیکی و خاک است که تحت تأثیر نیروهای قائم و افقی قرار می‌گیرد و می‌توان آنها را به صورت مسلح و غیرمسلح به کار برد (Ghiassian & Holtz, 2005).

در نوشتار حاضر، رفتار سلول‌های کوچک مقیاس GCS بر روی نمونه‌های استوانه‌ای پر شده از ماسه به ارتفاع ۱۰/۵ و قطر ۱۰ سانتی‌متر در حالت مسلح و غیرمسلح به

مسلح شده با یک المان تسلیح افقی، مسلح شده با دو المان تسلیح افقی و مسلح شده با سه المان تسلیح افقی مطابق مقطع نشان داده شده در شکل ۴ ساخته شده و تحت آزمایش سه محوری در شرایط فشار همه جانبه خارجی صفر قرار گرفتند.

نتایج نشان می دهد با افزایش تعداد المان های مسلح کننده افقی، ظرفیت باربری نمونه کوچک مقیاس GCS به میزان قابل توجهی افزایش و تغییر شکل جانبی و نشست آن کاهش می یابد. لازم به یادآوری است، ظرفیت باربری نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح افقی GCS به میزان ۶۱ درصد نسبت به نمونه های غیر مسلح آن افزایش می یابد و همچنین میزان نشست و تغییر شکل های جانبی نمونه در شرایط سه لایه مسلح نسبت به شرایط غیر مسلح به میزان ۷ و ۷۷ درصد کمتر است.

۵-۲. بررسی های تحلیلی

در این بخش برای بررسی رفتار نمونه های کوچک مقیاس GCS به صورت تحلیلی و همچنین مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نمونه های مورد آزمایش به کمک نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7 مدل سازی شد و پارامترهای مورد نیاز مدل سازی از نتایج آزمایش های انجام شده بر روی خاک، پوسته ژئوسینتیکی و المان های مسلح کننده به دست آمدند.

– **نمونه های مسلح شده با المان های تسلیح قائم:** برای بررسی تحلیلی تأثیر افزایش قطر المان های تسلیح، نمونه های کوچک مقیاس GCS، در شرایطی مشابه شرایط آزمایشگاهی (شکل ۲) مدل سازی شد. نتایج بررسی های تحلیلی نشان می دهد با افزایش قطر المان مسلح کننده قائم، تغییر شکل جانبی و نشست نمونه کوچک مقیاس GCS به ترتیب به میزان ۵۰/۹ و ۶/۶ درصد کاهش می یابد و ظرفیت باربری آن به گونه ای مشابه با نتایج به دست آمده از بررسی های آزمایشگاهی همراه با افزایش است و هم خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد، افزون بر این، بررسی های تحلیلی نسبت به بررسی های آزمایشگاهی نتایجی با ضریب اطمینان بیشتر ارائه می کند. مقایسه نتایج بررسی های آزمایشگاهی و تحلیلی در شرایط یکسان و در بارگذاری معادل ۹/۰۷ کیلونیوتن در شکل ۵ آورده شده است.

برای بررسی تحلیلی تأثیر افزایش تعداد المان های تسلیح قائم، نمونه های کوچک مقیاس GCS در شرایطی مشابه شرایط آزمایشگاهی (شکل ۳) مدل سازی شد. نتایج بررسی های تحلیلی نشان می دهد با افزایش تعداد المان های مسلح کننده قائم، تغییر شکل جانبی و نشست نمونه کوچک مقیاس GCS به ترتیب به میزان ۷۰/۸ و ۸/۴ درصد کاهش می یابد و همچنین ظرفیت باربری آن به طور مشابه با نتایج به دست آمده از بررسی های آزمایشگاهی همراه با افزایش است و در نهایت هم خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی دیده می شود، افزون بر این، بررسی های تحلیلی نسبت به بررسی های آزمایشگاهی نتایج محافظه کارانه تری را ارائه می کند. مقایسه نتایج بررسی های آزمایشگاهی و تحلیلی در شرایط یکسان و در بارگذاری معادل ۹/۰۷ کیلونیوتن در شکل ۶ آورده شده است.

– **نمونه های مسلح شده با المان های تسلیح افقی:** برای بررسی تحلیلی تأثیر افزایش تعداد المان های تسلیح افقی، نمونه های کوچک مقیاس GCS در شرایطی مشابه شرایط آزمایشگاهی (شکل ۴) مدل سازی شد. نتایج بررسی های تحلیلی نشان می دهد با افزایش تعداد المان های مسلح کننده افقی، تغییر شکل جانبی و نشست نمونه کوچک مقیاس GCS به ترتیب به میزان ۷۶/۷ و ۶/۷ درصد کاهش می یابد و همچنین ظرفیت باربری آن به گونه ای مشابه با نتایج به دست آمده از بررسی های آزمایشگاهی همراه با افزایش است و هم خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی دیده می شود، افزون بر این، بررسی های تحلیلی نسبت به بررسی های آزمایشگاهی نتایج محافظه کارانه تری را ارائه می کند. مقایسه نتایج بررسی های آزمایشگاهی و تحلیلی در شرایط یکسان و در بارگذاری معادل ۹/۰۷ کیلونیوتن در شکل ۷ آورده شده است.

دست آمده از دستگاه ساخته شده با نتایج دستگاه Instron مقایسه شد (شکل ۱) (ASTM D5321,2002).

لازم به یادآوری است برای تعیین ستبرای پوسته ژئوسینتیکی خارجی و المان های تسلیح برای استفاده در بررسی های تحلیلی با استفاده از دستگاه ستبراسنج (Thickness Gage) ستبرای پوسته مورد استفاده، آزمایش شد که در نتیجه ستبرای پوسته خارجی و المان های تسلیح ۰/۳۴ میلی متر به دست آمد.

۵-۱. نمونه سازی

برای ساخت نمونه های غیر مسلح، با استفاده از پوسته ژئوسینتیکی نمونه های استوانه ای با ارتفاع ۱۰/۵ و قطر ۱۰ سانتی متر ساخته شده و درون آن از ماسه سواحل دریای خزر پر شد و در نمونه های مسلح، پس از ساخت پوسته استوانه ای خارجی ژئوسینتیکی، المان های تسلیح با قطر، تعداد و آرایش های مختلف در درون پوسته خارجی قرار گرفته و سپس نمونه ها با خاک ماسه ای مورد نظر پر شدند (Heibaum, 2002). شایان توجه است در نمونه های مسلح و غیر مسلح برای رسیدن به تراکم نسبی یکسان، حجم معینی از ماسه در ۴ مرحله و به کمک لرزش به درون پوسته ریخته شده است.

۵-۱. بررسی های آزمایشگاهی

در بخش بررسی های آزمایشگاهی تأثیر افزایش قطر و همچنین تعداد المان های تسلیح قائم و افقی بر روی ظرفیت باربری، نشست و تغییر شکل های جانبی نمونه های کوچک مقیاس GCS مورد بررسی قرار گرفت.

– **نمونه های مسلح شده با المان های تسلیح قائم:** تأثیر المان های تسلیح قائم با افزایش قطر و همچنین تعداد المان های مسلح کننده مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر افزایش قطر مسلح کننده، نمونه های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح و مسلح شده با یک لایه تسلیح قائم و در قطرهای ۲/۴۵، ۴/۹۵ و ۷/۳۵ سانتی متری، مطابق مقطع نشان داده شده در شکل ۲ ساخته شده و تحت آزمایش سه محوری در شرایط فشار همه جانبه خارجی صفر قرار گرفتند.

نتایج نشان می دهد، با افزایش قطر المان مسلح کننده قائم، ظرفیت باربری نمونه کوچک مقیاس GCS، افزایش و تغییر شکل جانبی و نشست آن کاهش می یابد. لازم به یادآوری است، ظرفیت باربری نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۷/۳۵ سانتی متر GCS، به میزان ۳۲ درصد نسبت به نمونه های غیر مسلح آن افزایش می یابد و همچنین میزان نشست و تغییر شکل های جانبی نمونه در شرایط یک لایه مسلح نسبت به شرایط غیر مسلح به ترتیب حداکثر به میزان ۶/۸ و ۵۱/۳ درصد کمتر است. برای بررسی تأثیر افزایش تعداد المان های تسلیح در این حالت، نمونه های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح، مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۲/۴۵ سانتی متر، مسلح شده با دو المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵ و ۴/۹۵ سانتی متر و مسلح شده با سه المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵، ۴/۹۵ و ۷/۳۵ سانتی متر مطابق مقطع نشان داده شده در شکل ۳ ساخته شده و تحت آزمایش سه محوری در شرایط فشار همه جانبه خارجی صفر قرار گرفتند.

نتایج نشان می دهد با افزایش تعداد المان های مسلح کننده قائم، ظرفیت باربری نمونه کوچک مقیاس GCS به میزان قابل توجهی افزایش و تغییر شکل جانبی و نشست آن کاهش می یابد. لازم به یادآوری است، ظرفیت باربری نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح قائم GCS به میزان ۸۲ درصد نسبت به نمونه های غیر مسلح آن افزایش می یابد و همچنین میزان نشست و تغییر شکل های جانبی نمونه در شرایط سه لایه مسلح نسبت به شرایط غیر مسلح به میزان ۸/۶ و ۷۱ درصد کمتر است.

– **نمونه های مسلح شده با المان های تسلیح افقی:** برای بررسی تأثیر افزایش تعداد المان های تسلیح در این حالت، نمونه های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح،

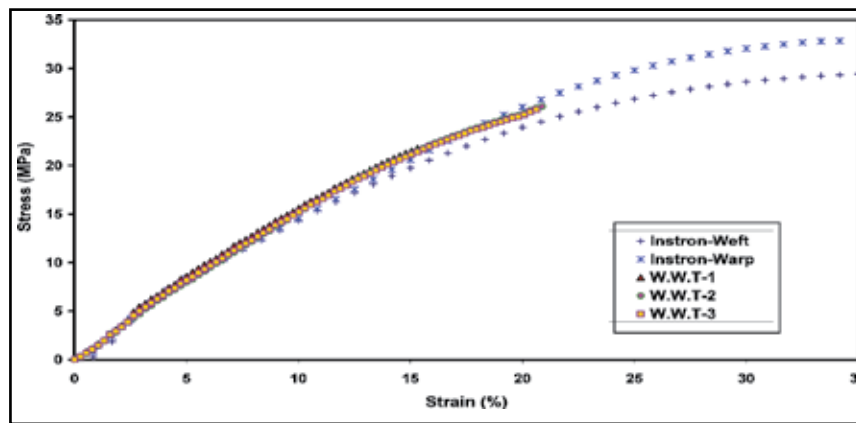
۶- بحث و نتیجه گیری

در بستر راه‌ها و سازه‌های حفاظت ساحلی استفاده از تسلیح افقی منطقی تر است. لازم به یادآوری است که هم‌خوانی و تطابق مناسبی بین نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی وجود داشته و نرم افزار اجزای محدود ABAQUS برآورد مناسبی از رفتار سامانه‌های سلولی ژئوسینتتیکتیکی تحت بارگذاری سه‌محوری را نشان می‌دهد و می‌توان از آن در تحلیل و طراحی سامانه GCS استفاده کرده و این سامانه را در تقویت بستر راه‌ها، بهسازی پی سازه‌های آسیب دیده یا در حال ساخت و سامانه‌های حفاظت سواحل به کار برد (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1987 ; Otto, 1979). بدیهی است اعمال فشار خارجی همه جانبه صفر در حین پژوهش، در شرایطی که سامانه GCS در بهسازی و بهبود شرایط باربری و نشست خاک در بستر راه و پی سازه‌ها در زیر سطح زمین و تحت فشار جانبی طبیعی خاک اطراف به کار گرفته شود برای اطمینان بوده و ضریب اطمینان این سامانه را افزایش خواهد داد.

سپاسگزاری

ضمن تشکر از پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، این تحقیق برگرفته از پژوهش انجام شده در این پژوهشکده می‌باشد.

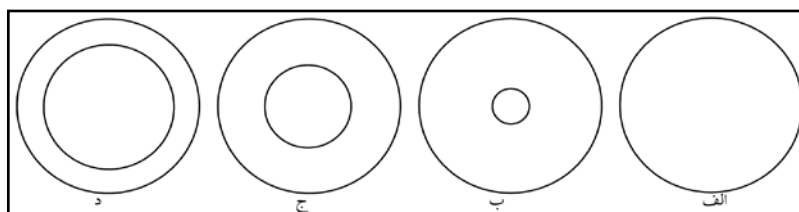
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود به کارگیری المان‌های تسلیح قائم و افقی روشی نوین در بهسازی و بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها است و سبب افزایش چشم‌گیری در ظرفیت باربری نمونه‌های کوچک مقیاس GCS و همچنین کاهش میزان نشست و تغییرشکل‌های جانبی نمونه می‌شوند. در تسلیح با المان‌های قائم، با افزایش قطر و تعداد مسلح کننده‌های قائم این تأثیرات بیشتر آشکار بوده و بیشترین میزان افزایش ظرفیت باربری ۸۲ درصد و مربوط به شرایطی است که نمونه GCS توسط سه المان تسلیح قائم، مسلح می‌شود و در این حالت نشست‌های نمونه و تغییرشکل‌های جانبی آن نیز تا ۸/۶ و ۷۱ درصد کاهش می‌یابد. در شرایط تسلیح افقی نسبت به شرایط بدون تسلیح، افزایش ظرفیت باربری ۶۱ درصد و کاهش میزان نشست ۷ درصد بوده و در مقابل تغییرشکل‌های جانبی به میزان ۷۷ درصد کاهش داشته‌اند. از مقایسه به کارگیری المان‌های قائم و افقی نتیجه می‌گیریم اگرچه المان‌های قائم نسبت به المان‌های افقی به میزان قابل ملاحظه‌ای ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند، اما در کاهش نشست‌ها فرق چندانی با المان‌های افقی نداشته و در کاهش تغییرشکل‌های جانبی عملکرد ضعیف‌تری دارند. با توجه به مطالب یاد شده و همچنین اجرای مشکل تسلیح قائم در سازه‌های طویل مانند سازه‌های حفاظت سواحل، استفاده از تسلیح قائم در زیر پی‌ها (فونداسیون) عملی تر، مقرون به صرفه و همراه با هزینه کمتری به نظر می‌رسد، اما



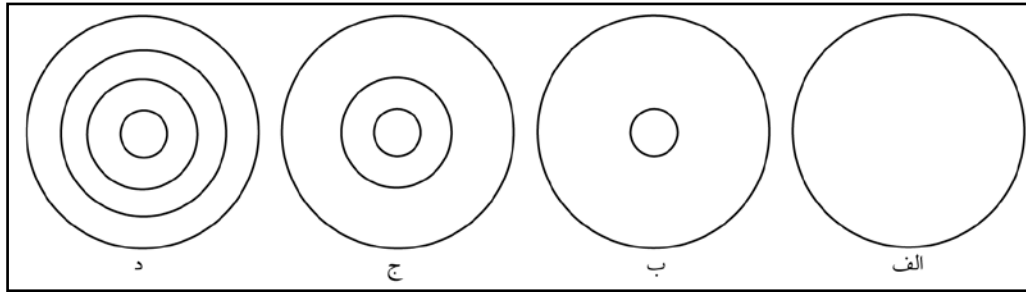
شکل ۱- نمودار تغییرات تنش کششی در برابر کرنش با استفاده از دستگاه‌های Instron و Wide Width Test

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

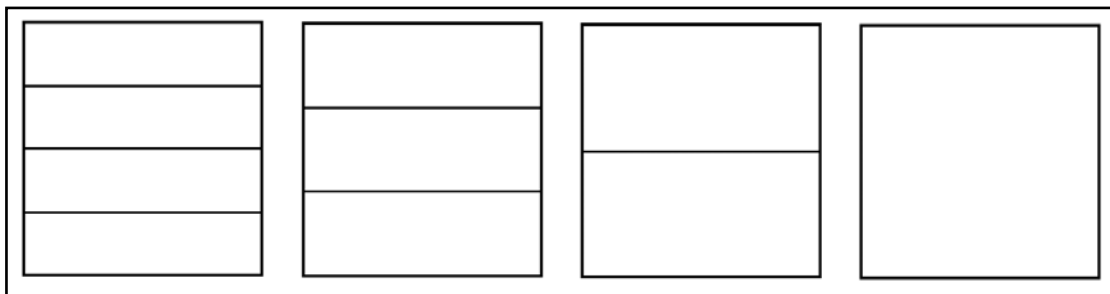
زاویه اصطکاک داخلی (Φ) (Degree)	چسبندگی (c) (kN/m ²)	وزن مخصوص (γ) (kN/ m ³)	درصد رطوبت (w) (%)	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)
۳۸/۸	۰	۱۷/۱	۰	-	-



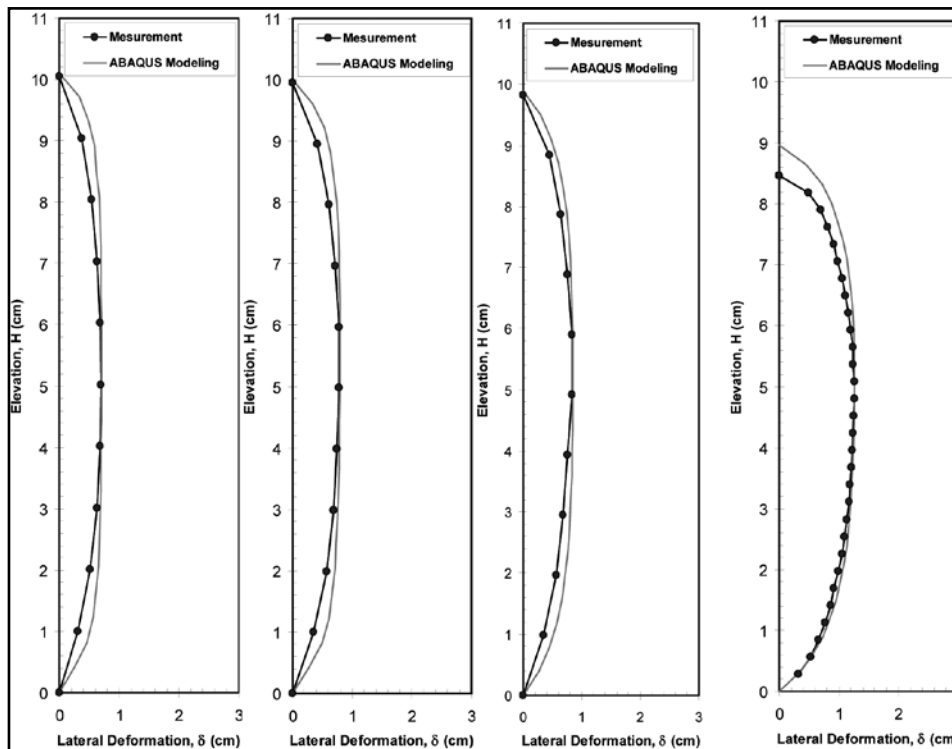
شکل ۲- مقطع نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیرمسلح و مسلح شده با یک لایه تسلیح قائم (الف) نمونه غیرمسلح، (ب) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۲/۴۵ سانتی‌متر، (ج) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۴/۹۵ سانتی‌متر، (د) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۷/۳۵ سانتی‌متر



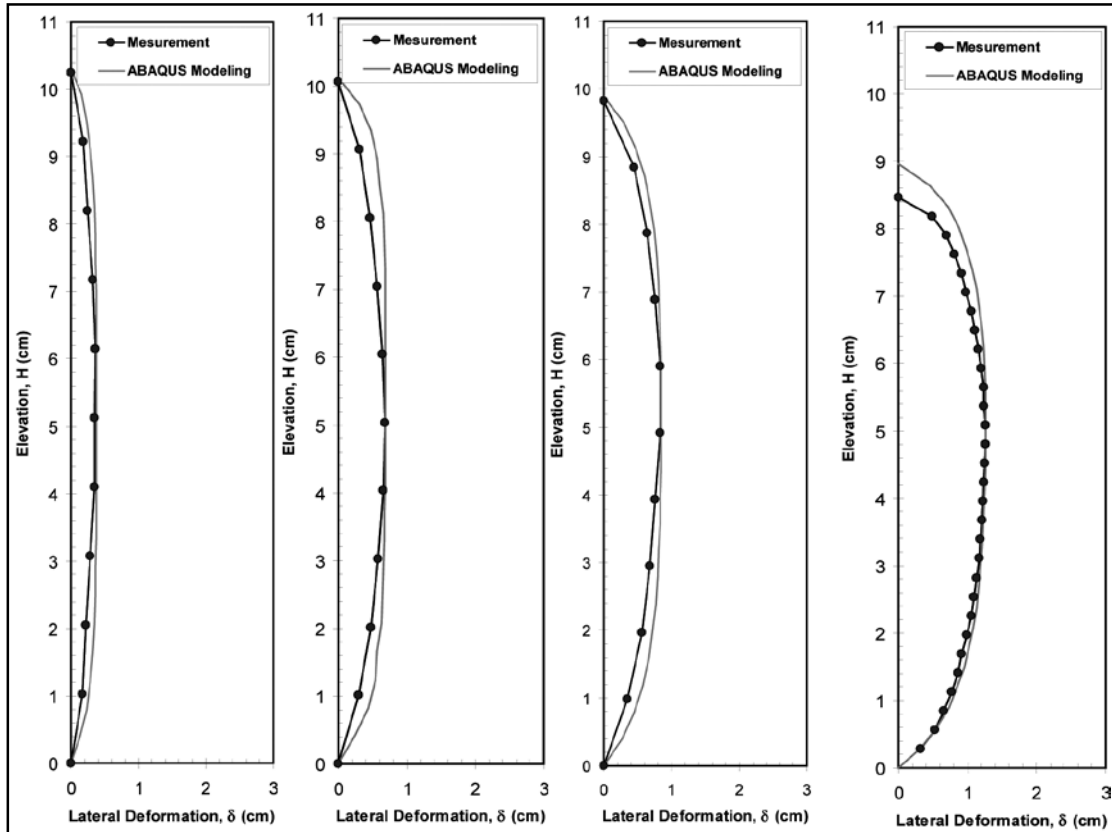
شکل ۳- مقطع نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح و مسلح شده با المان‌های تسلیح قائم الف) نمونه غیر مسلح، ب) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۲/۴۵ سانتی متر، ج) نمونه مسلح شده با دو المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵ و ۴/۹۵ سانتی متر، د) نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵، ۴/۹۵ و ۷/۳۵ سانتی متر



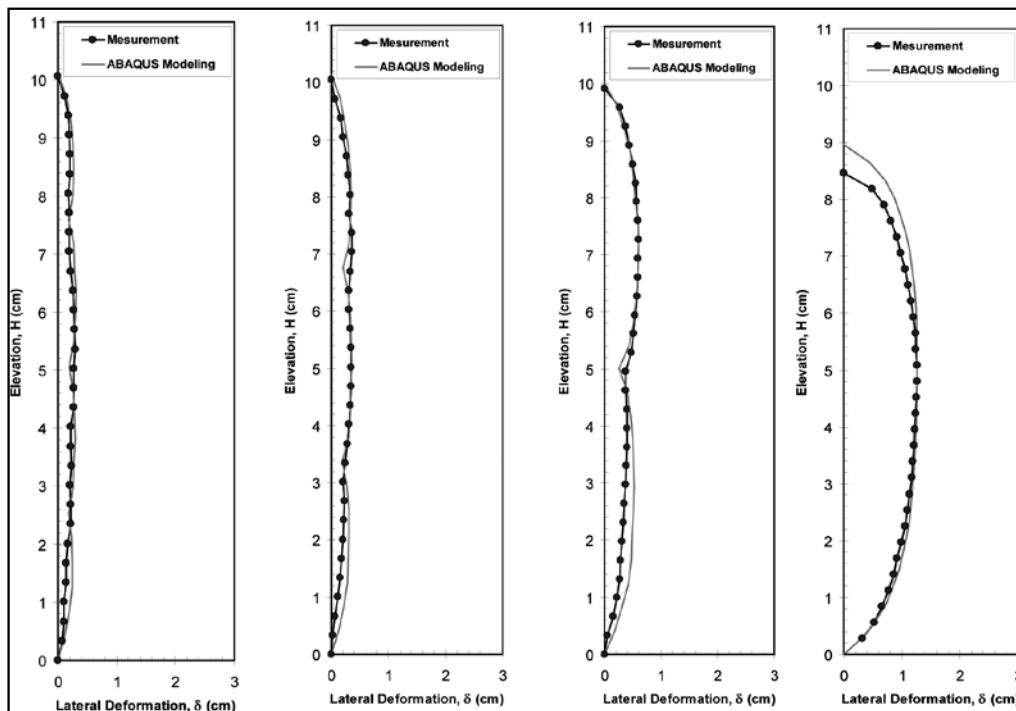
شکل ۴- مقطع نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح و مسلح شده با المان‌های تسلیح افقی الف) نمونه غیر مسلح، ب) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح افقی، ج) نمونه مسلح شده با دو المان تسلیح افقی، د) نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح افقی



شکل ۵- مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط یکسان در حالت غیر مسلح و مسلح شده با یک المان تسلیح قائم الف) نمونه غیر مسلح، ب) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۲/۴۵ سانتی متر، ج) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۴/۹۵ سانتی متر، د) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۷/۳۵ سانتی متر



شکل ۶- مقطع نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح و مسلح شده با المان‌های تسلیح قائم الف) نمونه غیرمسلح، ب) نمونه مسلح شده با یک المان تسلیح قائم به قطر ۲/۴۵ سانتی‌متر، ج) نمونه مسلح شده با دو المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵ و ۴/۹۵ سانتی‌متر، د) نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح قائم به قطرهای ۲/۴۵، ۴/۹۵ و ۷/۳۵ سانتی‌متر



شکل ۷- مقطع نمونه‌های کوچک مقیاس GCS در شرایط غیر مسلح و مسلح شده با المان‌های تسلیح افقی الف) نمونه غیرمسلح، ب) نمونه

مسلح شده با یک المان تسلیح افقی، ج) نمونه مسلح شده با دو المان تسلیح افقی، د) نمونه مسلح شده با سه المان تسلیح افقی

References

- ASTM D5321, 2002- 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 and Material, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Ghiassian, H. & Holtz, D. H., 2005- Geosynthetic cellular systems (GCS) in coastal application, Report University of Washington, Dept. of Civ. & Envir. Eng., September.
- Heibaum, M. H., 2002- Geosynthetic containers a new field of application with nearly no limits, Proceedings of the seventh international conference on geosynthetics 7 ICG-NICE, France, vol. 3, pp. 1013–1016.
- Korner, R. M., 2005- Designing with Geosynthetics, Fifth Edition, Prentice Hall.
- Otto, F., 1979- Tensile Structures, The MIT Press, the Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- Timoshenko, S. & Woinowsky-Krieger, S., 1987- Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill, p-4.