

بررسی آزمایشگاهی اثر تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل و ضخامت آن در مقاومت بیرون کشیدگی

احد اوریا^{۱*}، صباح امامی^۲، سعید کرم زاده گان^۲

^۱ دانشیار، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۳
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۰۱

کلمات کلیدی:

خاک مسلح
مقاومت بیرون کشیدگی
ژئوتکستایل
تثبیت سیمانی
فصل مشترک خاک و ژئو تکستایل

خلاصه: یکی از مهمترین پارامترهای تحلیل و طراحی سیستم‌های خاک مسلح، مشخصات مکانیکی فصل مشترک بین خاک و مسلح کننده است. مشخصات مکانیکی فصل مشترک، تعیین کننده طول مهاری مسلح کننده در این سیستم‌ها است. در بسیاری از موارد، بدلیل عدم امکان تامین طول مهاری مورد نیاز، استفاده از خاک مسلح با محدودیت روبرو می‌شود. تقویت مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک و مسلح کننده، می‌تواند دامنه کاربرد این روش تسلیح خاک را گسترده‌تر نماید. در این تحقیق، اثر ایجاد لایه سیمانی در فصل مشترک مسلح کننده و ماسه بعنوان روشی برای تقویت مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده و کاهش طول مهاری مورد نیاز در طراحی‌ها، بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. با توجه به اینکه ایجاد لایه سیمانی باعث افزایش ضخامت مسلح کننده شد، تاثیر افزایش ضخامت مسلح کننده در مقاومت بیرون کشیدگی آن از خاک نیز بررسی شد. آزمایش‌ها در دستگاه مخصوص بیرون کشیدن مسلح کننده از خاک صورت گرفت. در این آزمایش‌ها، با قرار دادن لایه‌های ماسه در هر رویه مسلح کننده اشباع به همراه ۱/۵ گرم بر سانتیمتر مربع سیمان و عمل آوری آن، دو لایه سیمانی در هر دو طرف مسلح کننده ایجاد گردید. نمونه‌های مسلح کننده با ضخامت‌های مختلف آزمایش شده و نتایج مقاومت بیرون کشیدگی آنها مقایسه گردید. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تثبیت سیمانی مسلح کننده‌ها باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آنها می‌شود. همچنین در مسلح کننده‌های مشابه، افزایش ضخامت مسلح کننده باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آنها می‌شود.

۱- مقدمه

اصطکاکی بودن خاک، با افزایش تنش‌های فشاری محصور کننده، مقاومت برشی آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی خاک ناچیز بوده و در عمل، خاک بعنوان مصالحی بدون مقاومت کششی شناخته می‌شود [۱]. خاک طبیعی در شرایط عادی دارای مقاومت برشی مشخص و محدودی می‌باشد. امروزه با گسترش شهرها، افزایش تعداد سازه‌های عظیم و محدودیت زمین‌های مناسب، استفاده بهینه از زمین‌های موجود اهمیت زیادی یافته است. در بسیاری از موارد، خاک محل پروژه دارای مشخصات مکانیکی مناسب نبوده و نیازمند بهبود و تقویت می‌باشد. از این رو روش‌های تثبیت خاک در ده‌های گذشته رواج یافته‌اند. روش‌های مختلفی برای افزایش مقاومت

خاک بعنوان رایج‌ترین مصالح ساختمانی بیشترین کاربرد در ساخت و سازها و پروژه‌های عمرانی را به خود اختصاص می‌دهد. کلیه سازه‌های ساخت بشر بر روی بستری از خاک قرار می‌گیرند که در واقع تحمل کننده نهایی تمام نیروهای وارد از طرف سازه می‌باشد. با توجه به دانه‌ای بودن خاک، نوع گسیختگی آن شبیه مصالح شکل‌پذیر بوده و بدلیل لغزش برشی دانه‌ها روی یکدیگر اتفاق می‌افتد. به همین دلیل مقاومت خاک بعنوان یک مصالح دانه‌ای از اصطکاک بین ذرات جامد تامین می‌شود. با توجه به خاصیت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aouria@uma.ac.ir



خاک‌ها استفاده می‌شود که این روشها را می‌توان به دو دسته روش‌های تثبیت شیمیایی و مکانیکی تقسیم بندی نمود. روش‌های شیمیایی مانند استفاده از آهک، سیمان، پوزولانها، رزین ها و سایر مواد شیمیایی می‌باشد که با انجام واکنش با ذرات خاک باعث تغییر و تقویت مقاومت توده خاک می‌شوند. تثبیت مکانیکی خاک یا در واقع تسلیح خاک شامل روش‌هایی می‌شود که بیشتر به واسطه نوعی المان سازه‌ای مسلح کننده که با ایجاد محصور کنندگی باعث افزایش تنش های همسان در توده خاک شده و از این رو مقاومت برشی آنها را افزایش می‌دهد. المانهای مسلح کننده معمولا شامل نوارهای فولادی و یا ژئوسینتتیک‌ها می‌شود که فقط دارای مقاومت کششی می‌باشند. استفاده از خاک مسلح در پروژه های ساختمانی قدمتی چند هزار ساله دارد. ایرانیان باستان با افزودن کاه به گل از اولین استفاده کننده گان خاک مسلح در تاریخ بوده اند [۱].

پایداری سیستم خاک مسلح تابع سه عامل گسیختگی برشی خاک، گسیختگی کششی مسلح کننده و لغزش بین مسلح کننده و خاک (بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک) می‌باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، انواع مسلح کننده‌ها با مقاومت‌های کششی بسیار بالا موجود می‌باشد. یکی از مهمترین و تعیین کننده ترین پارامترهای طراحی سیستم‌های خاک مسلح، مقاومت اصطکاکی فصل مشترک بین خاک و مسلح کننده می‌باشد که تابع سطح تنش محصور کننده، مشخصات خاک، جنس و زبری سطح مسلح کننده است. فصل مشترک ضعیف بین خاک و مسلح کننده مانع استفاده از مسلح کننده‌های قوی بوده و باعث افزایش طول مهاری مسلح کننده می‌شود [۲]. نیاز به طول مهاری بزرگ مانع استفاده از خاک مسلح در بسیاری از پروژه ها می‌شود. در دیوارهای خاک مسلح، با افزایش طول مهاری، حجم عملیات خاکی به شدت افزایش یافته و هزینه‌های استفاده از خاک مسلح را بیشتر می‌کند. در بسیاری از پروژه‌ها محدودیت زمین باعث ایجاد محدودیت در طول مهاری شده و استفاده از خاک مسلح را غیر ممکن می‌کند. استفاده از مسلح کننده‌های مجوف باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک می‌شود ولی روش تولید پرهزینه این مسلح کننده‌ها باعث ایجاد محدودیت در استفاده وسیع آنها شده است [۳]. تقوی و مصلی‌نژاد مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌های قلاب شده را بصورت آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند. تحقیقات آنها نشان می‌دهد که قلاب کردن مسلح کننده‌ها باعث

افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آنها می‌شود [۴]. عبادی و همکاران، فصل مشترک ژئوتکستایل و خاک را با استفاده از سیمان تقویت نموده و مقاومت برشی فصل مشترک آنها را در دستگاه برش بررسی نموده‌اند [۵]. نتیجه تحقیقات آنها نشان می‌دهد که با تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده، می‌توان مقاومت برشی فصل مشترک آنها را افزایش داد. توفیق و همکاران با انجام آزمایش‌ها کششی، پارامترهای موثر فصل مشترک در مقاومت بیرون کشیدگی ورقه‌های الیاف کربنی را مورد بررسی قرار دادند [۶ و ۷]. آنها استفاده از رزین را برای افزایش چسبندگی بین خاک و الیاف کربن، جهت افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده الیاف کربنی توصیه نمودند. همچنین نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که عمل آوری رزین در داخل خاک و تحت تنش‌های اضافی باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده خواهد شد. اوریا و محمودی [۷] تاثیر افزودن سیمان به فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل بر روی ظرفیت باربری پی نواری روی خاک مسلح را بصورت آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده باعث افزایش ظرفیت باربری پی روی خاک مسلح خواهد شد. همچنین تثبیت سیمانی باعث کاهش زیادی در طول مهاری مورد نیاز در طراحی پی‌های متکی بر خاک مسلح خواهد شد. مطالعاتی نیز بر روی امکان استفاده از نوارهای حاوی سیمان در سازه‌ها انجام شده است که در این مطالعات نوعی روش ساخت مسلح کننده‌های حاوی سیمان ارائه شده است [۹ و ۸]. نتایج بررسی های عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده تاثیر ضخامت ناحیه فصل مشترک خاک و مسلح کننده در مشخصات مکانیکی تماس بین آنها می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. آزمایش‌های انجام شده در دستگاه برش مستقیم روی فصل مشترک نشان می‌دهد که زبری سطح محل تماس خاک با مسلح کننده تاثیر زیادی در مقاومت برشی فصل مشترک دارد [۱۲ و ۱۳].

بررسی تحقیقات انجام شده روی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک نشان می‌دهد که مطالعات جامعی در خصوص تاثیر تثبیت سیمانی روی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌ها صورت نگرفته است. در صورتی که یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در طراحی سازه‌های خاک مسلح، طول مهاری مسلح کننده‌ها است [۱۴]. در این تحقیق، تاثیر تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده



شکل ۱: دستگاه بیرون کشیدن ژئوتکستایل
Fig. 1. Pullout test setup.

جعبه بارگذاری به ابعاد $40 * 40 * 20$ سانتیمتر (طول، عرض و ارتفاع) بوده که نوار مسلح کننده در وسط آن قرار می‌گیرد. دیواره‌های جعبه تا حد امکان صاف شده و همچنین طول و عرض جعبه کشش به اندازه کافی بزرگ نظر گرفته شده تا فاصله کافی جهت از بین رفتن اثر اصطکاک دیواره‌ها در توزیع تنش قائم وجود داشته باشد [۱، ۶، ۱۵ و ۱۶]. حدود ۱۰ سانتیمتر خاک در زیر و بالای مسلح کننده قرار می‌گیرد. سیستم بارگذاری کششی این دستگاه از یک جک الکترومکانیکی گیربکس‌دار تشکیل شده است. این سیستم بصورت کنترل جابجائی عمل کرده و حداکثر دامنه جابجائی قابل اعمال برابر ۱۵ سانتیمتر می‌باشد. دو لودسل ۵ تنی برای اندازه‌گیری نیروهای کشش افقی و نیروی قائم اعمال شده تعبیه شده است. جهت سهولت جایگذاری مسلح کننده‌ها در داخل جعبه، دیواره سمت سیستم بارگذاری جعبه با استفاده از مفتول‌های فولادی بصورت تطبیق پذیر ساخته شده است. این دیواره از روی هم قرار گرفتن مفتول‌های فولادی تشکیل شده که امکان تنظیم و تغییر محل قرارگیری مسلح کننده‌ها را فراهم می‌سازد. دستگاه مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

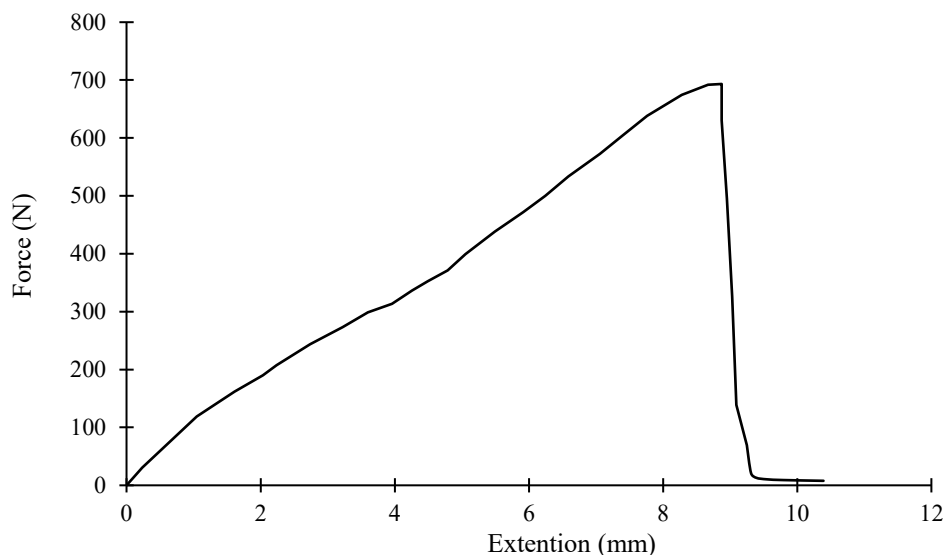
در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آن از خاک، بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تسلیح خاک یک مکانیسم مکانیکی برای افزایش مقاومت آن می‌باشد. استفاده از سیمان در فصل مشترک خاک با مسلح کننده از طریق شیمیایی باعث ایجاد پیوندی قویتر بین خاک و مسلح کننده می‌شود که علاوه بر درگیری مکانیکی بین آنها بوده و باعث تقویت بیشتر مشخصات مکانیکی فصل مشترک آنها می‌شود. به همین دلیل استفاده از روش تثبیت سیمانی برای افزایش مقاومت فصل مشترک بین خاک و مسلح کننده می‌تواند با هر نوع مسلح کننده‌ای مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به فراوانی و قیمت مناسب سیمان در ایران، این روش می‌تواند باعث بهینه‌تر شدن روشهای طراحی و اجرای سیستم‌های خاک مسلح گردد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، کلیه آزمایش‌ها در دستگاه کشش ژئوتکستایل صورت گرفته است. دستگاه مورد استفاده دارای سیستم بارگذاری قائم و افقی مستقل می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات ماسه مورد استفاده در این تحقیق
Table.1. Properties of the sand used in this study.

نسبت تراکم	وزن مخصوص خشک	زاویه اصطکاک داخلی	D _{۱۰}	D _{۳۰}	D _{۶۰}	طبقه بندی خاک
۰.۸۸	۱۶/۳ کیلونیوتن بر متر مکعب	۳۴ درجه	۰/۴ میلیمتر	۰/۶ میلیمتر	۱/۲ میلیمتر	ماسه بد دانه بندی شده



شکل ۲: آزمایش کشش ژئوتکستایل تک لایه
Fig. 2. Tensile test results conducted on a single layer geotextile.

۱۷/۵ مگاپاسکال، ۳۵ کیلونیوتن بر متر طول و ۴/۵ درصد بوده است. نمودار تنش کرنش مسلح کننده مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. آزمایش تعیین مشخصات کششی ژئوتکستایل بر روی نمونه هایی به عرض ۲ سانتیمتر و طول ۲۰ سانتیمتر انجام شده است.

۳-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند معمولی نوع ۱ تولید شده در کارخانه سیمان اردبیل بوده است.

۴-۲- آماده سازی نمونه ها

آزمایش های بیرون کشیدگی بر روی نوارهای مسلح کننده به طول و عرض ۴۰ و ۵ سانتیمتر که ۲۰ سانتیمتر از طول آن در داخل خاک قرار گرفته، انجام شده است. جهت ایجاد فصل مشترک سیمانی

۱-۲- ماسه

ماسه مورد استفاده در این تحقیق از معادن شن و ماسه شمال شرق اردبیل تهیه شده است. ماسه مورد استفاده شسته شده و فاقد ریزدانه بوده است که قبل از آزمایش از الک شماره ۸ رد شده است. ماسه مورد آزمایش طبق سیستم طبقه بندی متحد، ماسه تمیز بدانه بندی شده (SP) بوده است. زاویه اصطکاک داخلی ماسه مورد استفاده در دستگاه برش مستقیم حدود ۳۴ درجه تعیین شد. در جدول ۱ مشخصات ماسه مورد استفاده ارائه شده است.

۲-۲- مسلح کننده

در این آزمایش ها از نوعی ژئوتکستایل بافته شده پرمقاومت بعنوان مسلح کننده استفاده شده است. وزن واحد سطح ژئوتکستایل مورد استفاده شده حدود ۴۵۰ گرم بر مترمربع بوده و مدول الاستیک، مقاومت کششی و کرنش طولی نظیر گسیختگی آن به ترتیب حدود



شکل ۳: مراحل تهیه نمونه های ژئوتکستایل های سیمان شده
 Fig. 3. Cement treatment of the surfaces of geotextile specimens.

و تخلخل اولیه نمونه های ماسه مورد آزمایش، سعی گردیده است که وزن مخصوص تمامی آنها در حدود $16/3$ کیلونیوتن بر متر مکعب با نسبت تراکم حدود ۸۸ درصد ثابت نگهداشته شود. جهت رسیدن به این نتیجه، وزن نمونه های مورد استفاده در هر آزمایش ثابت نگهداشته شده است. در هر آزمایش حدود ۵۲ کیلوگرم ماسه در داخل جعبه کشش قرار گرفته است. با توجه به اینکه محل قرار گیری مسلح کننده ها در وسط نمونه قرار داشته، لذا ابتدا ۲۶ کیلوگرم ماسه از ارتفاع ۵۰ سانتیمتری بصورت بارشی در داخل جعبه ریخته شده است. تعداد ۲۰ ضربه با چکشی به وزن ۱۵ کیلوگرم به لایه اول وارد شده تا تاضخامت لایه به ۱۰ سانتیمتر برسد. بعد از قرارگیری مسلح کننده در محل خود، نیمه فوقانی جعبه نیز مشابه نیمه تحتانی به روش ریزشی با ۲۶ کیلوگرم خاک پر شده و با ۱۵ ضربه متراکم شده است. نحوه قرارگیری مسلح کننده ها در داخل جعبه در شکل ۴ نشان داده شده است.

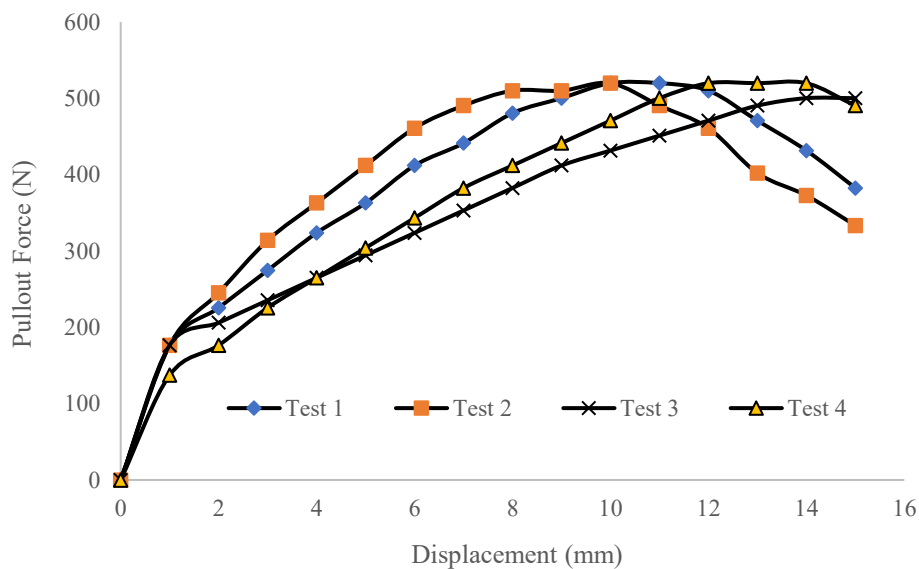
ایجاد لایه سیمانی بر روی نوارهای مسلح کننده باعث تغییر ضخامت نوارها شد. به همین دلیل جهت بررسی تاثیر این پارامتر بر

شده، ابتدا نوارهای مسلح کننده در ابعاد مورد نظر بریده شده و به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع گردید. سپس حدود $0/15$ گرم بر سانتیمتر مربع سیمان بر روی نوارهای اشباع پاشیده شد. نوارهای سیمانی شده بطوری که سطح سیمانی آنها روبه پائین باشد، در ظرف مسطحی که با ماسه اشباع پر شده قرار داده شده و طرف دیگر آنها نیز سیمان پاشی شد. سپس لایه ای از ماسه اشباع روی آنها پخش شده و تحت تنشی حدود ۶ کیلوپاسکال به مدت دو روز قرار گرفت. بعد از دو روز نمونه ها از داخل ماسه خارج شده و به مدت یک هفته در دمای ۲۵ درجه نگهداری شده اند. در طول یک هفته اول رطوبت نمونه ها حفظ شد. بعد از دو هفته، آزمایش ها بر روی نمونه های خشک شده صورت گرفته است. در این تحقیق، روند تهیه نمونه های آزمایشگاهی مطابق روش ارائه شده توسط اوریا و محمودی [۷] بوده است. شکل ۳ مراحل تهیه نمونه ها را نشان می دهد.

جهت جلوگیری از اثرات تغییر رطوبت و یکسان بودن نمونه ها، تمامی آزمایشها بر روی نمونه های خشک انجام شد. برای کنترل تراکم



شکل ۴: نحوه قرار گیری مسلح کننده داخل دستگاه کشش
Fig. 4. Implanting the reinforcement in the pullout test setup.



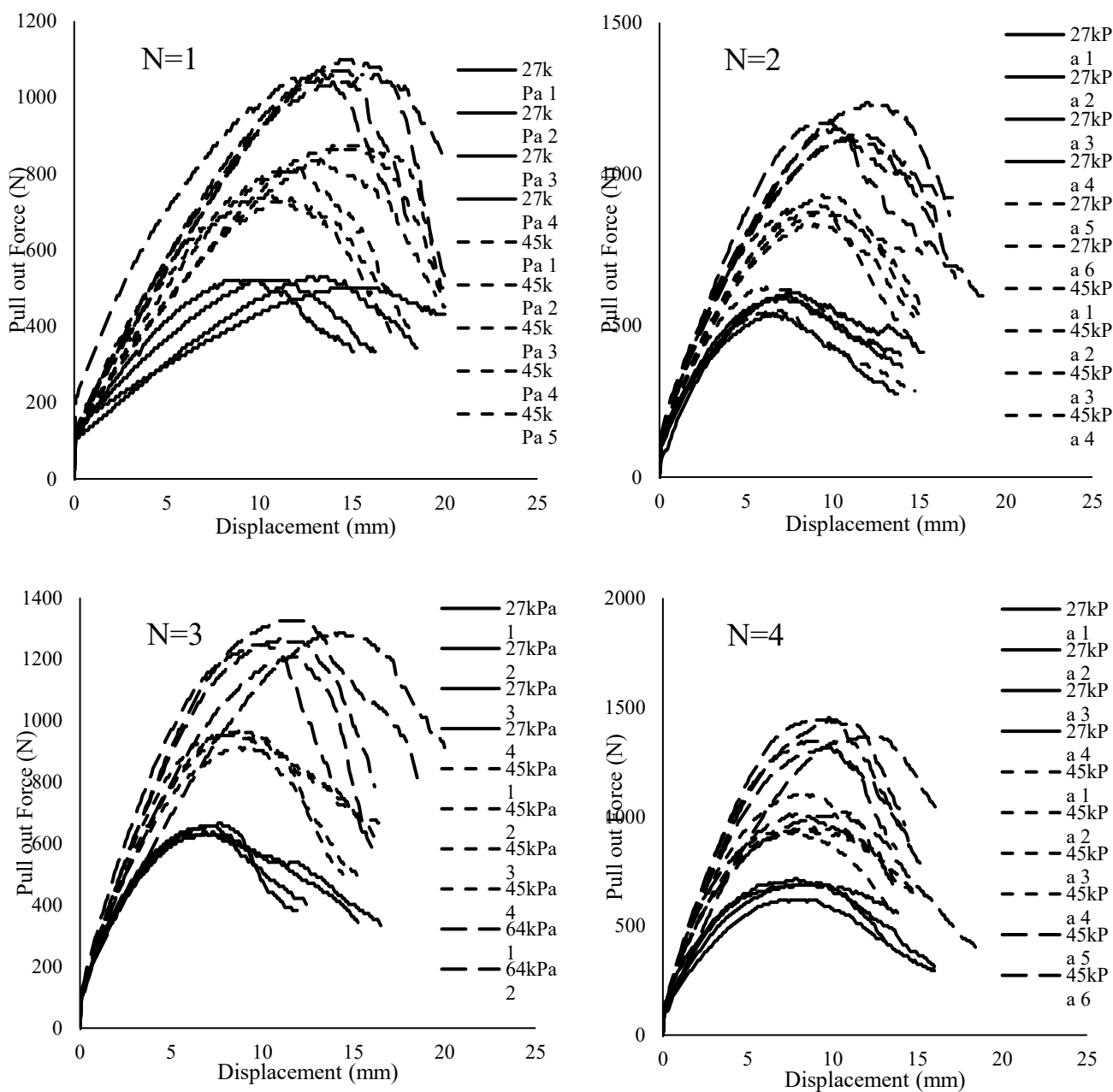
شکل ۵: نتایج آزمایشات تکراری کشش روی ژئوتکستایل تک لایه غیر سیمانی تحت متوسط تنش قائم ۲۷ کیلوپاسکال
Fig. 5. Results of repetitive tests on single layer uncemented geotextile under 27 kPa of normal stress.

گردید. تمامی آزمایش‌ها با نرخ کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

۳- نتایج آزمایشات

در شکل ۵، نتایج چهار سری آزمایش روی ژئوتکستایل تک لایه غیر سیمانی با ضخامت ۲ میلی‌متر تحت نیروی قائم ۳/۹۲ کیلو نیوتن و متوسط تنش قائم ۲۷ کیلوپاسکال نشان داده شده است. همانگونه

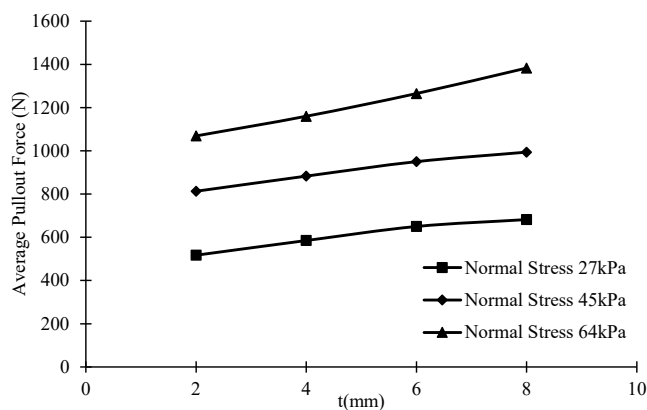
روی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک، آزمایش‌های انجام شده، با نوارهایی با ضخامت‌های مختلف شامل ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه در شرایط سیمانی شده و عادی صورت گرفت. آزمایش‌های کشش، تحت تنش‌های قائم حدود ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال برای نوارهای چند لایه استفاده گردید. بدلیل گسیختگی نوارهای تک لایه سیمانی شده تحت تنش‌های بالا، آزمایش‌های مربوط به نوار تک لایه سیمانی شده در تنش‌های قائم پائین‌تر در حدود ۱۴، ۲۷ و ۵۲ کیلو پاسکال انجام



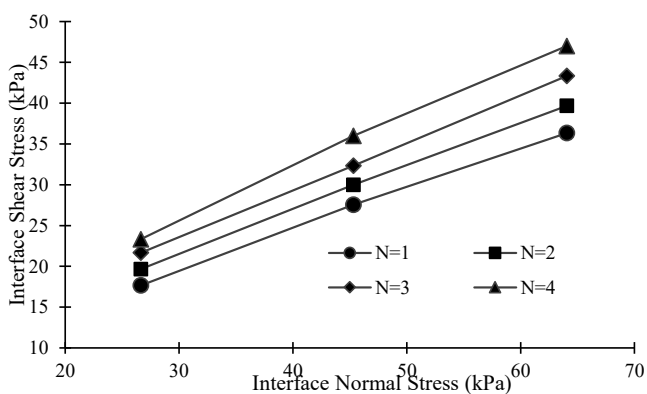
شکل ۶: نتایج آزمایشات کشش روی ژئوتکستایل های تک، دو، سه و چهار لایه غیر سیمانی تحت تنش های قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال
 Fig. 6. Results of tests conducted on 1, 2, 3, and 4 layered ordinary geotextiles under normal stresses of 27, 45, and 64 kPa.

آزمایش‌های انجام شده تا رسیدن به حداقل سه نتیجه مشابه تکرار شده و میانگین آماری آنها بعنوان نتیجه نهایی آن آزمایش‌ها ثبت شده است. بعنوان مثال، آزمایش‌های انجام شده با ژئوتکستایل سیمانی شده دو لایه تحت تنش قائم ۶۴ کیلوپاسکال ۱۲ مرتبه تکرار شده که مقاومت بیرون کشیدگی آنها به ترتیب ۱۴۰۲، ۱۵۱۷، ۱۵۳۷، ۱۶۱۵، ۱۶۶۳،

که در این شکل دیده می‌شود، حداکثر نیروی لازم برای بیرون کشیدن ژئوتکستایل در این حالت در آزمایش‌های ۱، ۲ و ۴ حدود ۵۲۰ نیوتن و در آزمایش ۳ حدود ۵۰۰ نیوتن بوده است. در این آزمایش‌ها با میانگین گیری از مقادیر فوق، مقدار مقاومت بیرون کشیدگی ژئوتکستایل تک لایه سیمانی نشده ۵۱۵ نیوتن در نظر گرفته شده است. تمامی



شکل ۷: تغییرات متوسط مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها در تنش های قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال با ضخامت مسلح کننده ها
Fig. 7. Pullout strength of ordinary reinforcements vs. their thicknesses under normal stresses of 27, 45, and 64 kPa.



شکل ۸: پوش گسیختگی موهر-کولمب برای فصل مشترک ماسه و مسلح کننده های معمولی
Fig. 8. Mohr-Coulomb failure envelopes for the interface of ordinary geotextiles and the sand.

ارقام فوق می توان نتیجه گرفت که با افزایش چهار برابری ضخامت مسلح کننده غیر سیمانی میزان مقاومت بیرون کشیدگی آن بصورت متوسط حدود ۲۸ درصد افزایش یافته است که بصورت میانگین، نرخ افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده های معمولی نسبت به ضخامت آنها بصورت میانگین ۶/۹ درصد افزایش یافته است. همچنین با توجه به تغییرات این روند افزایشی با مقادیر تنش قائم، می توان به این نتیجه رسید که در حالت غیر سیمانی روند افزایش مقاومت بیرون کشیدگی رابطه معنی داری با سطح تنش نداشته و می تواند مستقل از سطح تنش باشد.

در شکل ۸ پوش گسیختگی و در جدول ۲ پارامترهای معیار

۱۶۸۳، ۱۷۰۲، ۱۷۰۲، ۱۷۱۲، ۱۷۳۱، ۱۷۱۲ و ۱۷۱۲ نیوتن بوده است. با حذف مقادیر ۱۴۰۲ و ۱۷۷۵ بعنوان مقادیر حداکثر و حداقل، میانگین آماری آنها ۱۶۵۷ نیوتن بوده است. بنابر این، عدد ۱۶۵۷ بعنوان مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده سیمانی دولایه در نظر گرفته شده است.

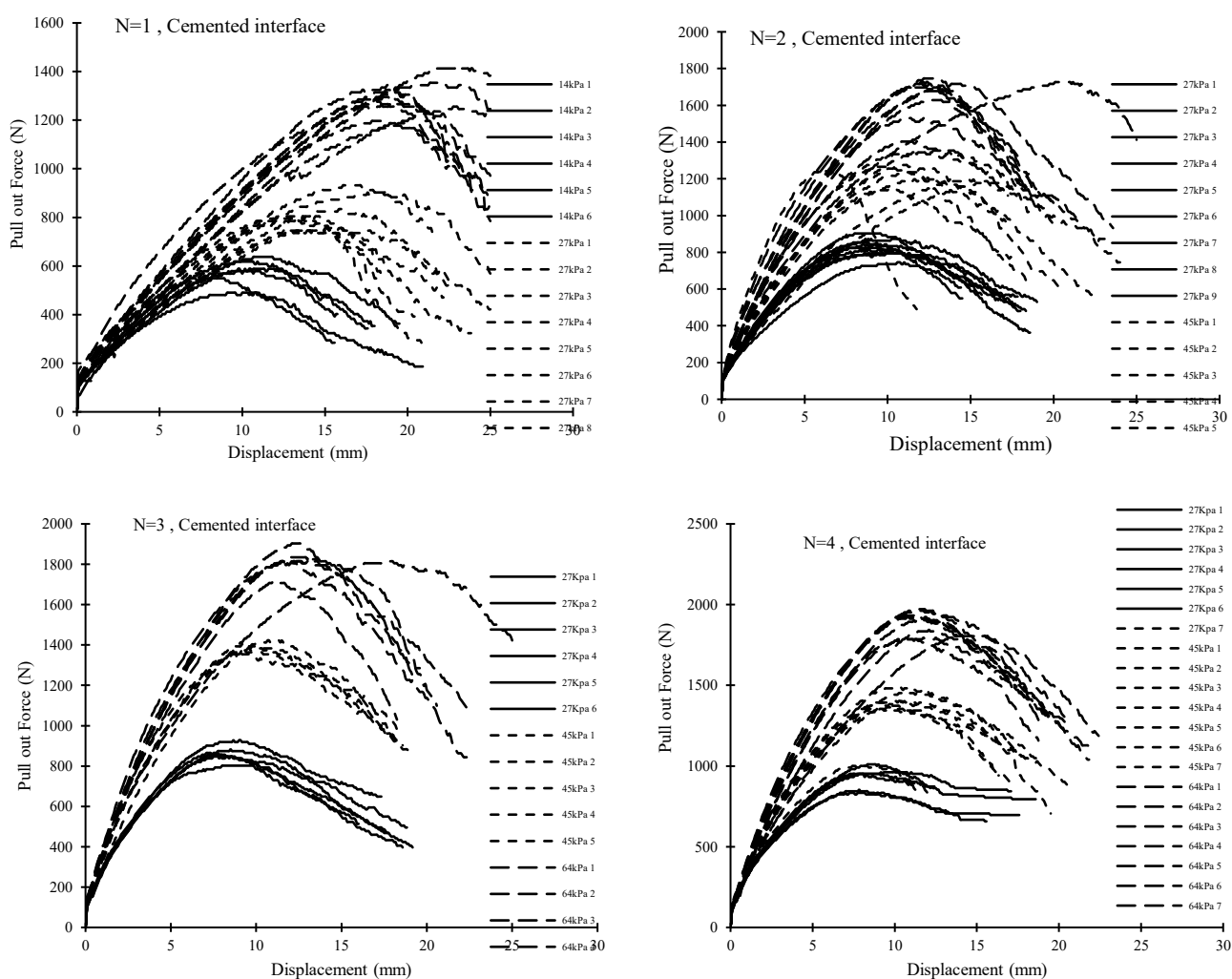
۳-۱- بررسی اثر ضخامت مسلح کننده در مقاومت بیرون کشیدگی آن

ضخامت ژئوتکستایل های مورد استفاده در این تحقیق حدود ۲ میلیمتر بود که مشابه استاندارد 12-ASTMD5199 تعیین شد. ایجاد لایه سیمانی و به دنبال آن چسبیدن ذرات ماسه در هر دو طرف ژئوتکستایل باعث افزایش ضخامت آن می شود. ضخامت لایه ماسه سیمان در هر طرف ژئوتکستایل های سیمانی شده حدود ۲ میلیمتر بود. به همین دلیل، با توجه به اینکه ایجاد لایه های سیمانی در دو طرف ژئوتکستایل باعث افزایش بیش از دو برابری ضخامت آن می شود، آزمایش های کشش بر روی ژئوتکستایل هایی با ضخامت های مختلف صورت گرفت تا در مقایسه اثر سیمانی شدن فصل مشترک ماسه و ژئوتکستایل در مقاومت بیرون کشیدگی آن، بتوان اثر ضخامت مسلح کننده را نیز مشاهده نمود. ایجاد ضخامت های متفاوت مسلح کننده با چسباندن لایه های ژئوتکستایل با استفاده از چسب رزینی انعطاف پذیر صورت گرفت. با این توصیف، این سری آزمایش ها علاوه بر ژئوتکستایل های تک لایه با ضخامت ۲ میلیمتر، با ژئوتکستایل های دو، سه و چهار لایه با ضخامت های ۴، ۶ و ۸ میلیمتر انجام شد. نتایج آزمایش های بیرون کشیدگی مسلح کننده های معمولی با ضخامت های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت اطمینان از نتیجه آزمایشات، این آزمایشات نیز چندین بار تکرار شده اند.

در شکل ۷، میانگین مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها تحت تنش های قائم مختلف بر اساس ضخامت آنها نشان داده شده است. همانگونه که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود، افزایش ضخامت مسلح کننده باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آن می شود. روند افزایش مقاومت بیرون کشیدگی با افزایش ضخامت در هر سه سطح تنش نیز مشاهده شده و این روند تقریباً بصورت خطی می باشد. میزان افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده با افزایش چهار برابری ضخامت مسلح کننده به ترتیب برابر ۳۲، ۲۲ و ۲۹ درصد به ترتیب برای تنش های قائم ۲۷، ۵۲ و ۶۴ کیلوپاسکال بوده است. با توجه به

جدول ۲: مقادیر پارامترهای معیار گسیختگی موهر-کولمب در فصل مشترک ژئوتکستایل های غیر سیمانی و ماسه
 Table. 2. Parameters of the Mohr-Coulomb criterion for the interface of the sand and ordinary geotextiles.

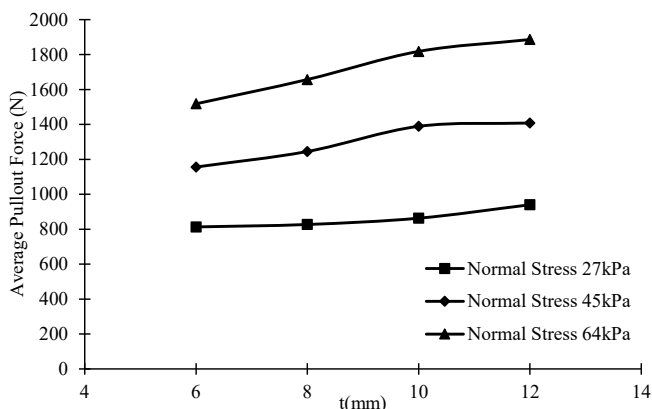
ضریب اندرکنش تماس خاک و مسلح کننده	چسبندگی ظاهری (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک ظاهری (درجه)	ضخامت (میلیمتر)	تعداد لایه
۰/۷۴	۴/۶	۲۶/۵	۲	۱
۰/۷۹	۵/۵	۲۸/۱	۴	۲
۰/۸۶	۶/۲	۳۰/۱	۶	۳
۰/۹۴	۶/۸	۳۲/۳	۸	۴



شکل ۹: نتایج آزمایشات کشش روی ژئوتکستایل های تک، دو، سه و چهار لایه سیمانی تحت تنش های قائم ۱۴، ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال
 Fig. 9. Results of tests conducted on 1, 2, 3, and 4 layered cement treated geotextiles under normal stresses of 27, 45, and 64 kPa.

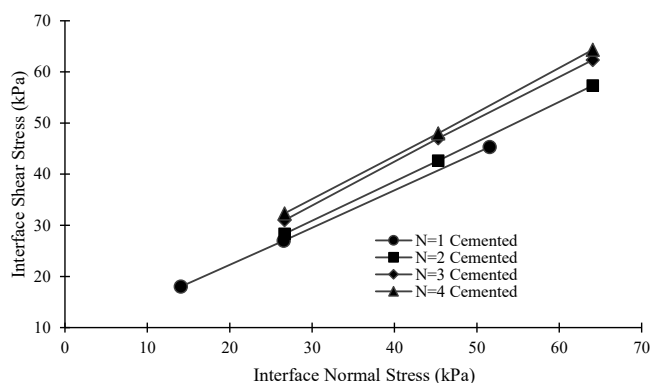
زاویه اصطکاک داخلی خاک به تانژانت زاویه اصطکاک ظاهری فصل مشترک با ضریب اندرکنش خاک و مسلح کننده نشان داده شده

گسیختگی موهر-کولمب برای فصل مشترک ماسه و مسلح کننده های غیر سیمانی نشان داده شده است. در جدول ۲، نسبت تانژانت



شکل ۱۰: تغییرات متوسط مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده های سیمانی شده در تنش های قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال با ضخامت مسلح کننده ها

Fig. 10. Pullout strength of cement treated reinforcements vs. their thicknesses under normal stresses of 27, 45, and 64 kPa.



شکل ۱۱: پوش گسیختگی موهر-کولمب برای فصل مشترک ماسه و مسلح کننده های سیمانی

Fig. 11. Mohr-Coulomb failure envelopes for the interface of cement treated geotextiles and the sand.

ژئوتکستایل های دارای فصل مشترک تثبیت شده با سیمان برای نوارهای تک لایه در تنش های قائم ۱۴، ۲۷ و ۵۲ کیلو پاسکال و نوارهای چند لایه تحت تنش های قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلو پاسکال انجام شد. نتایج این آزمایش ها در نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان داده شده در شکل ۹ برای مسلح کننده های سیمانی با نتایج نشان داده شده در شکل ۶، نشان می دهد که با تثبیت سیمانی، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها بصورت چشمگیری افزایش یافته است.

در شکل ۱۰ متوسط مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده های دارای فصل مشترک تثبیت شده با سیمان بصورت تابعی از ضخامت

است. همچنین در تعیین تنش قائم وارد بر فصل مشترک خاک و مسلح کننده، نیروی قائم بر سطح کل جعبه کشش تقسیم شده و در تمام آزمایشات سه مقدار مشخص و ثابتی داشته است. در محاسبه تنش برشی در فصل مشترک خاک و مسلح کننده، نیروی بیرون کشیدگی بر سطح مدفون مسلح کننده در لحظه گسیختگی تقسیم شده است.

با توجه نمودارهای پوش گسیختگی در شکل ۸ و مقادیر عددی پارامترهای معیار گسیختگی موهر کولمب در فصل مشترک ماسه و مسلح کننده ها، میتوان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد لایه ها، هم زاویه اصطکاک ظاهری و هم چسبندگی ظاهری در فصل مشترک خاک و مسلح کننده ها افزایش یافته است.

زاویه اصطکاک ظاهری خاک از مجموع زاویه اصطکاک ذاتی و زاویه اتساع تامین می شود. زاویه اصطکاک ذاتی تابع جنس مصالح و زاویه اتساع تابع تراکم و قفل وبست ذرات خاک می باشد. با در نظر گرفتن این موضوع و نیز با توجه به اینکه شرایط تنش و تخلل خاک در تمامی آزمایشات ثابت و جنس همه مسلح کننده ها یکسان بوده، می توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت بیرون کشیدگی در اثر افزایش ضخامت خاک، مربوط به افزایش زاویه اتساع بوده است. ضخامت بیشتر مسلح کننده امکان فرو رفتگی بیشتر دانه های جامد خاک در بین بافت مسلح کننده را فراهم آورده و باعث ایجاد قفل و بست بیشتر و در نتیجه مقاومت برشی فصل مشترک و مقاومت بیرون کشیدگی بیشتر شده است.

نتایج مدلسازی های عددی با روش المانهای مجزا نیز بیانگر تاثیر ضخامت ناحیه فصل مشترک و میزان فرورفتگی دانه های خاک در بافت مسلح کننده در مقاومت برشی آن بوده و با افزایش این فرورفتگی، مقاومت برشی فصل مشترک نیز افزایش می یابد [۱۲].

۲-۳- بررسی اثر تثبیت سیمانی فصل مشترک مسلح کننده و خاک در مقاومت بیرون کشیدگی

بدلیل افزایش چشمگیر مقاومت بیرون کشیدگی ژئوتکستایل های دارای فصل مشترک سیمانی شده، تغییر طول های بزرگی در نوارهای تک لایه مشاهده گردید. به همین دلیل و جهت جلوگیری از گسیختگی مسلح کننده ها و نیز محدود شدن دامنه تغییر طول مسلح کننده ها در یک دامنه مشابه، آزمایش های انجام شده بر روی

جدول ۳: مقادیر پارامترهای معیار گسیختگی موهر کولمب در فصل مشترک ژئوتکستایل های سیمانی و ماسه
 Table 3. Parameters Mohr-Coulomb criterion for the interface of the sand and cement treated geotextiles.

تعداد لایه	ضخامت (میلیمتر)	زاویه اصطکاک ظاهری (درجه)	چسبندگی ظاهری (کیلوپاسکال)	ضریب اندرکنش تماس خاک و مسلح کننده
۱	۶	۳۶/۱	۷/۷	۱/۰۸
۲	۸	۳۷/۸	۷/۶	۱/۱۵
۳	۱۰	۳۹/۹	۸/۸	۱/۲۴
۴	۱۲	۴۰/۶	۹/۴	۱/۲۷

است.

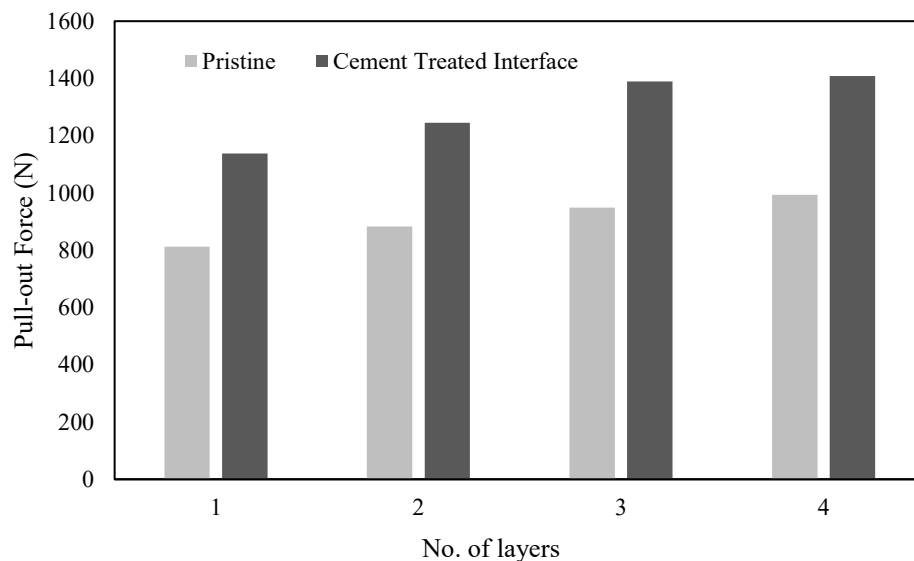
مقایسه زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده‌ها با ضخامت‌های ۶ و ۸ میلیمتر و ماسه نشان می‌دهد که تثبیت سیمانی باعث افزایش حدود ۶ و ۵/۵ درجه در زاویه اصطکاک ظاهری آنها شده است که این مقادیر بسیار به هم نزدیک می‌باشند. با توجه به اینکه این نتایج میانگین حاصل حداقل ۶ تا ۱۲ بار تکرار آزمایشات می باشد، می‌توان نتیجه گرفت که اثر سایر پارامترهای کنترل نشده مانند تغییرات دما، رطوبت، خطای اندازه گیری و خطای روش تهیه نمونه سرشکن شده و اثر ضخامت نیز وارد نتایج گردیده است. با در نظر گرفتن این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد لایه سیمانی در دوطرف مسلح کننده باعث افزایش حدود ۶ درجه ای زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده و ماسه در این تحقیق شده است. لازم به ذکر است که این نتایج ممکن است با تغییر درصد سیمان، دانه بندی ماسه مورد استفاده و نوع مسلح کننده استفاده شده، تغییر کند.

نتایج آزمایشات برش فصل مشترک بین ژئوتکستایل و خاک تثبیت شده با سیمان که توسط عبادی و همکاران [۵] انجام شده، نشان می‌دهد که با افزودن ۱۰ درصد سیمان بعنوان تثبیت کننده، ضریب اندرکنش تماس اصطکاکی از ۰/۶ به ۰/۸ افزایش یافته که افزایشی حدود ۳۳ درصد را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که در تحقیق عبادی و همکاران [۵]، تثبیت سیمانی در کل حجم توده خاک صورت گرفته است ولی در تحقیق حاضر این تثبیت فقط در فصل مشترک انجام شده است. در تحقیق دیگری که توسط توفیق و همکاران [۶] بر روی اثر استفاده از چسب رزینی بر تقویت مشخصات فصل مشترک ماسه و ورقه های الیاف کربنی در مقاومت بیرون

کل مسلح کننده که مجموع ضخامت تعداد نوارهای مسلح کننده با ضخامت دو لایه تثبیت سیمانی در دو طرف مسلح کننده بوده، نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقادیر افزایش مقاومت بیرون کشیدگی حدود ۱۱، ۷/۵، و ۱۸ درصد تحت تنش های ۲۷، ۵۲ و ۶۴ کیلوپاسکال بوده است. میانگین نرخ افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌های سیمانی شده به ضخامت مسلح کننده حدود ۶/۱ درصد بوده است. قابل ذکر است که متوسط نرخ افزایش مقاومت به ضخامت در مسلح کننده های معمولی حدود ۷ درصد بوده است. با توجه به مطالب بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت مسلح کننده ها که در شرایط سیمانی نیز تقریباً مشابه حالت سیمانی می‌باشد.

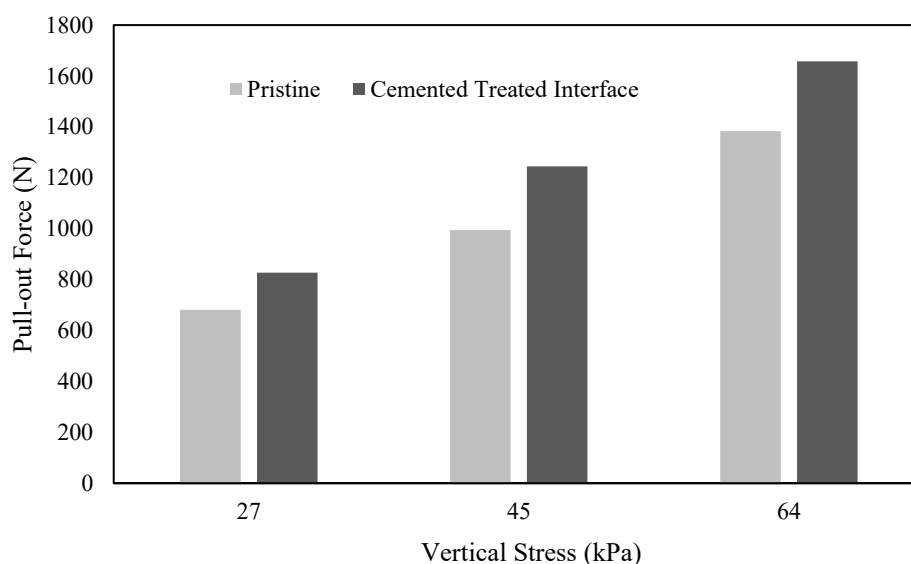
پوش گسیختگی موهر کولمب در فصل مشترک ماسه با مسلح کننده‌های سیمانی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای معیار گسیختگی موهر کولمب در فصل مشترک ماسه با مسلح کننده‌های با فصل مشترک تثبیت شده با سیمان در جدول ۳ نشان داده شده است.

مقادیر چسبندگی فصل مشترک خاک و مسلح کننده در هر دو حالت معمولی و تثبیت شده در جدول ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر، می‌توان نتیجه گرفت که تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده باعث افزایش چسبندگی ظاهری بین خاک و مسلح کننده می‌شود ولی با توجه به مقادیر چسبندگی در این آزمایش‌ها، در مورد این پارامتر نمی‌توان بصورت دقیق و قطعی بحث نمود. به همین دلیل در این تحقیق فقط در مورد زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده و خاک در فصل مشترک آنها بحث شده



شکل ۱۲: مقایسه مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌های معمولی و سیمانی شده با تعداد لایه های مشابه

Fig. 12. Comparing the pullout strength of ordinary and cement treated reinforcements with similar number of layers.



شکل ۱۳: مقایسه مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده‌های معمولی و سیمانی شده با ضخامت‌های مشابه

Fig. 13. Comparing the pullout strength of ordinary and cement treated reinforcements with similar thicknesses.

می‌شود، با ایجاد لایه سیمانی در فصل مشترک مسلح کننده و خاک، مقاومت بیرون کشیدگی آنها بصورت متوسط حدود ۴۲٪ افزایش یافته است. حداقل مقدار افزایش حدود ۴۰ و حداکثر مقدار آن حدود ۴۶ درصد بوده است. این نتایج بدون در نظر گرفتن اثر افزایش ضخامت مسلح کننده در مقاومت بیرون کشیدگی آن ارائه شده است. با توجه به مطالب قبلی، این مقدار افزایش در مقاومت بیرون کشیدگی، تنها اثر سیمانی شدن فصل مشترک نبوده و اثر افزایش ضخامت مسلح

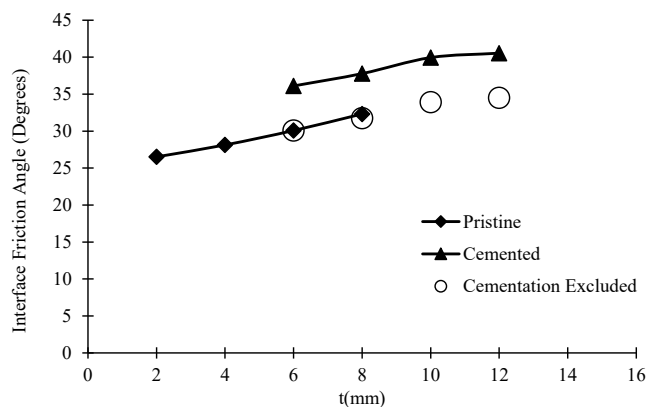
کشیدگی صورت گرفته، ضریب اندرکنش تماس خاک و مسلح کننده از حدود ۰/۸ تا ۱/۲۹ گزارش شده است که تابع تنش قائم در زمان عمل آوری چسب رزینی بوده است که افزایش حدود ۶۰ درصد در ضریب اندرکنش تماس خاک و مسلح کننده را نشان می‌دهد.

تاثیر تثبیت سیمانی در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها با تعداد لایه های مشابه تحت تنش قائم ۴۵ کیلوپاسکال در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده

غیر سیمانی با ضخامت مشابه) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، روند افزایش زاویه اصطکاک داخلی فصل مشترک مسلح کننده های سیمانی نسبت به ضخامت، با حذف اثر سیمان شدن دقیقاً در امتداد روند افزایش زاویه اصطکاک ظاهری مسلح کننده‌های معمولی و در یک راستا قرار می‌گیرد. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که سیمانی کردن محل فصل مشترک مسلح کننده و ماسه از دو جهت باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آن از خاک می‌گردد. دلیل اول افزایش ضخامت مسلح کننده بوده که باعث ایجاد امکان فرو رفتگی ذرات جامد در بافت مسلح کننده و قفل و بست بیشتر می‌شود. دلیل دوم ایجاد سطح زبری است که از چسبیدن ذرات جامد ماسه روی سطح مسلح کننده ایجاد می‌شود. با توجه به نتایج این آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که این دو عامل بصورت مستقل از یک دیگر بوده‌اند. زیرا روند افزایش زاویه اصطکاک ظاهری بین ماسه و خاک نسبت به ضخامت مسلح کننده چه در شرایط سیمانی شده و چه در شرایط معمولی یکسان بوده است. تثبیت سیمانی باعث ایجاد یک افزایش ثابت در میزان زاویه اصطکاک ظاهری در تمامی ضخامت‌ها شده است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق از تثبیت سیمانی محل فصل مشترک مسلح کننده با خاک بعنوان روشی برای تقویت مشخصات مکانیکی فصل مشترک، افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک و در نهایت کاهش طول مهاری مورد نیاز در طراحی و اجرای سازه های خاک مسلح استفاده شد. آزمایشات با استفاده از دستگاه مخصوص کشش ژئوتکستایل بر روی نوعی ژئوتکستایل بافته شده پرمقاومت انجام شد. در این آزمایشات مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از خاک در دو حالت معمولی و فصل مشترک تقویت شده با سیمان انجام شد. با توجه به اینکه در تقویت سیمانی محل فصل مشترک مسلح کننده و ماسه تشکیل لایه های سیمانی و ذرات ماسه چسبیده به آن باعث افزایش ضخامت مسلح کننده ها می‌شد، این آزمایشات جهت امکان مقایسه بهتر، با مسلح کننده هایی با ضخامت های متفاوت انجام شد. ضخامت های متفاوت مسلح کننده از چسبانیدن چندین لایه مسلح کننده معمولی ایجاد گردید. آزمایش های انجام شده بین ۴ تا ۱۲ مرتبه تکرار شده و میانگین آماری نتایج بعنوان نتیجه آزمایش در



شکل ۱۴: تغییرات زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده و خاک با ضخامت و اثر سیمانی شدن

Fig. 14. Effect of the thicknesses and cementation on the interface friction angle reinforcement and the sand.

کننده‌ها نیز در آن سهم می‌باشد.

در شکل ۱۳، تاثیر تثبیت سیمانی در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در ضخامت مشابه نشان داده شده است. جهت جداسازی اثر افزایش ضخامت مسلح کننده در اثر سیمانی شدن سطح آن، در این نمودار، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده غیر سیمانی ۴ لایه با ضخامت ۸ میلی‌متر با مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده سیمانی شده دولایه با ضخامت نهایی ۸ میلی‌متر در سه سطح تنش قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال مقایسه شده است که ضخامت نهایی هر دو مسلح کننده با هم برابر می‌باشد. در این شرایط افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در اثر تثبیت سیمانی تحت تنش‌های قائم ۲۷، ۴۵ و ۶۴ کیلوپاسکال، به ترتیب برابر ۲۱، ۲۵ و ۲۰ درصد که بصورت میانگین حدود ۲۲ درصد بوده است. مطابق شکل ۱۲، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده دولایه در اثر تثبیت سیمانی تحت تنش قائم ۴۵ کیلوپاسکال، حدود ۴۲ درصد بوده است. این مقایسه نشان می‌دهد که سیمانی کردن سطح مسلح کننده با دو مکانیسم افزایش ضخامت و افزایش زبری سطح مسلح کننده باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده می‌شود.

در شکل ۱۴، تغییرات زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده و ماسه در شرایط معمولی و سیمانی نشان داده شده است. همچنین در این شکل، نمودار تغییرات زاویه اصطکاک ظاهری مسلح کننده‌های سیمانی شده با کسر ۵/۷۵ درجه (برابر میانگین افزایش زاویه اصطکاک ظاهری مسلح کننده‌های سیمانی نسبت مسلح کننده های

مراجع

- [1] Toufigh, V., Saeid, F., Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C., S., Saadatmanesh, H., "Laboratory study of Soil-CFRP interaction using pull-out test" *Geomechanics and Geoen지니어ing*.
- [2] Ouria A., V., Desai, C., Toufigh, V., & Saadatmanesh, H., "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall" *Geomechanics and Engineering*, 10(6), pp. 757-774, 2016
- [3] Racan, Grediacm M., Gourves, R., "Pull-out response of corrugated geotextile strips" *Geotextiles and Geomembranes*, 21 pp. 265-288, 2008.
- [4] Taghavi, S.H.S., Mosallanezhad, M., "Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems" *Canadian Geotechnical Journal*, 54(5) pp.621-630,2017
- [5] Ebadi, M., Habibagahi, G., Hataf, N., "Effect of cement treatment on soil non-woven geotextile interface", *Scientia Iranica*, A22(1) pp. 69-80,2015
- [6] Toufigh, V., Ouria, A., Desai, C.S., Javid, N., Toufigh, V., Saadatmanesh, H., "Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand" *Journal of Testing and Evaluation*, 44(1) pp. 385-390, 2015
- [7] Ouria, A., and Mahmoudi, Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1) pp. 29-39, 2018.
- [8] Colombo, I.G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., di Prisco, M., "Erratum to: textile reinforced concrete: experimental investigation on design parameters" *Materials and Structures*, 46 (11) pp. 1953-1971, 2013
- [9] Li, H., Chen, H., Liu, L., Zhang, F., Han, F., Lv, T., Zhang, W., Yang, Y., "Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure" *Geotextiles and Geomembranes*, 44, pp. 557-567, 2016
- [10] Xiaoqiang, G., Yuanwen, H., Maosong, H., "Critical state shear behavior of the soil-structure interface determined by discrete element modeling" *Particuology*, 35, pp. 67-75, 2017
- [11] Saberi, M., Annan, C. D., Konrad, J. M., "Constitutive

نظر گرفته شد.

نتایج آزمایشات انجام شده نشان داد که تثبیت سیمانی محل فصل مشترک مسلح کننده و خاک بدون در نظر گرفتن افزایش ضخامت مسلح کننده، حدود ۳۲ تا ۴۴ درصد باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی آن می‌شود. بصورت میانگین و با صرف نظر کردن از تاثیر افزایش ضخامت مسلح کننده ها، تثبیت سیمانی باعث افزایش ۳۹ درصدی مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها شده است.

همچنین نتایج این آزمایشات نشان داد که با افزایش ضخامت مسلح کننده ها، مقاومت بیرون کشیدگی آنها نیز افزایش می‌یابد. در محدوده آزمایشات انجام شده در این تحقیق، نرخ افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده ها نسبت به افزایش ضخامت آنها بصورت خطی مشاهده شد. با توجه به اینکه سختی فشاری مسلح کننده ها نسبت به سختی ذرات جامد خاک کمتر است، چنین به نظر می‌رسد که با افزایش ضخامت مسلح کننده ها، امکان نفوذ دانه های جامد خاک در بین بافت مسلح کننده افزایش یافته و باعث ایجاد قفل و بست بیشتر و در نتیجه مقاومت بیرون کشیدگی بیشتر شده است.

روند مشابهی برای نرخ افزایش زاویه اصطکاک ظاهری بین مسلح کننده و خاک با ضخامت مسلح کننده در هر دو نوع مسلح کننده معمولی و تثبیت شده با سیمان مشاهده شد. ولی مقایسه زاویه اصطکاک ظاهری مسلح کننده های سیمانی شده با مسلح کننده های معمولی با ضخامت یکسان نشان داد که تقریباً افزایش زاویه اصطکاک ظاهری در اثر سیمانی شدن مقدار ثابتی بوده و در این آزمایشات بصورت میانگین ۵/۷۵ درجه بوده است.

در نهایت با توجه به نتایج این آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که در تثبیت سیمانی فصل مشترک خاک و مسلح کننده دو عامل موثر نقش دارند. (۱) با ایجاد لایه سیمانی در سطح مسلح کننده، ضخامت آن افزایش یافته و افزایش ضخامت باعث افزایش امکان نفوذ ذرات خاک در بافت مسلح کننده شده، امکان قفل و بست را زیاد و باعث ایجاد زاویه اتساع بزرگتر در محل فصل مشترک می‌شود. (۲) ایجاد لایه سیمانی باعث ایجاد سطحی زبر در محل فصل مشترک مسلح کننده و خاک می‌شود که آن نیز می‌تواند باعث افزایش زاویه اتساع در محل فصل مشترک باشد.

- length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil” *Soils and Foundations*, 55(4), pp. 661-677, 2015
- [15] Karamzadegan, S., Ouria, A. “Effect of the wall friction and the overlaying soil height on the soil-steel strip interface in pull-out tests” 3rd International and 7th National Conference on Modern Materials and Structures in Civil Engineering, Hamedan, Iran, 2018
- [16] Perkins, S. W., Cuelho, E.V. “Soil-geosynthetic interface strength and stiffness relationships from pullout tests.” *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(6), pp. 791- 804, 2010.
- [17] ASTM D5199-12(2019), “Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019,
- modeling of gravelly soil–structure interface considering particle breakage, *Journal of Engineering Mechanics*, 143(8) pp. 4017044-1-14, 2017
- [12] Jing XY., Zhou WH., Zhu HX., Yin ZY., Li Y. “On the interface shearing behavior between granular soil and artificial rough surfaces” In: Ferrari A., Laloui L. (eds) *Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales (ATMSS)*. ATMSS 2017. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham, pp. 437-444, 2017
- [13] Li-ming, H., Jialiu, P., “Testing and modeling of soil-structure interface” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), pp. 851-860, 2004
- [14] ıcek, E., Guler, E., Yetimoglu, T., “Effect of reinforcement

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ouria, S. Emami, S. Karamzadegan, *Laboratory Investigation of the Effect of the Cement Treatment of the Interface and the Thicknesses of Reinforcement on its Pull-out Capacity*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2831-2846.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16191.6149](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16191.6149)



