

معرفی و ارزیابی جامع نسل نوینی از مهار مکانیکی با قابلیت استفاده در پایدارسازی های ژئوتکنیکی

نادر دستاران^۱، متین جلالی مقدم^۲، امیرعلی زاد^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
^۲ کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

(دریافت: ۹۷/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۵، نشر آنلاین: ۹۸/۱۱/۱۵)

چکیده

امروزه از انواع مختلف مهارهای خاکی و سنگی با ظرفیت‌های باربری و زمینه‌های کاربردی گوناگون در جهت تثبیت و تسلیح توده خاک ناپایدار و یا پایدارسازی و دوختن سازه‌ها در دریا و خشکی استفاده می‌شود. در حالت کلی، مهارها به دو حالت نفوذیابنده و جایگذاری شونده در محیط‌های خاکی و سنگی تقسیم می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به دو گروه اصلی مهارهای دوغایی و مهارهای مکانیکی تقسیم‌بندی نمود. در این پژوهش نسل جدیدی از مهارهای مکانیکی به نام Expandable Mechanical Plate Anchors (EMPLAs) معرفی و ارزیابی گردیده است که با صرف کم‌ترین هزینه و نیروی پیش‌ران مورد نیاز برای نصب، در درون خاک نصب، قفل و فعال شده و مطابق با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده دارای کارایی مناسبی در مهارها هستند. موارد مورد ارزیابی در این پژوهش شامل بررسی میزان اثرگذاری خصوصیات صفحات مهاری از قبیل شکل صفحات و میزان انحنای آن‌ها بر روی مکانیسم قفل‌شدگی و میزان باربری نهایی مسلح‌کننده و نیز شدت زوال نیروی کششی تحت یک سرعت بیرون‌کشش ثابت بوده است. طبق نتایج به‌دست آمده، شکل دایره‌ای بهترین شکل و انحنای پایین صفحات هم‌بهترین زاویه برای افزایش ظرفیت باربری را دارا می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: مهارهای مکانیکی صفحه‌ای باز شونده، مدل‌سازی آزمایشگاهی، ژئوتکنیک خشکی و دریا، بیرون‌کشش.

۱- مقدمه

و همکاران، ۲۰۱۸؛ Randolph، ۲۰۱۱).
براین اساس می‌توان مهارها را به‌عنوان المان‌های مسلح‌کننده باربر و مقاوم در طراحی‌ها در نظر گرفته و مورد استفاده قرار داد. نوع سازه و درجه اهمیت آن، نوع بار و اندازه آن، وضعیت آب و هوایی محل اجرای پروژه، شرایط خاک و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن، میزان دسترسی به محل پروژه، نوع کاربری، شرایط اقتصادی، فناوری موجود، ماشین‌آلات نصب و غیره از مواردی هستند که بر روی انتخاب نوع مهارهای مکانیکی تأثیر بسزایی دارند. امروزه از انواع مختلف مهارهای خاکی و سنگی با ظرفیت‌های باربری و زمینه‌های کاربردی گوناگون در جهت پایدارسازی توده خاک ناپایدار و یا تثبیت سازه‌ها استفاده می‌شود. مهارها را می‌توان به صورت افقی به منظور مقابله با نیروی بالازدگی یا مایل به منظور مقابله با بار کششی و یا قائم به منظور مقابله با بار افقی نصب نمود. در حالت کلی، تمامی مهارها به دو روش نفوذیابنده و جایگذاری شونده (مدفون‌شونده) در خاک نصب می‌شوند و می‌توان آن‌ها را

با افزایش قابلیت ساخت مسلح‌کننده‌های مختلف خاک‌ها و پیشرفت ماشین‌آلات اجرایی و صنعتی، امروزه مهارهای تزریقی و مکانیکی گوناگونی به‌منظور استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیکی خشکی و دریا طراحی و ساخته می‌شوند. هدف اصلی از نصب این مسلح‌کننده‌ها، تثبیت و تسلیح توده خاک ناپایدار و یا پایدارسازی و دوختن سازه موردنظر به ناحیه ایمن و مقاوم خاک است. از زمره کاربردهای این مهارها می‌توان به تقویت فونداسیون‌ها، ساخت دیوارهای حائل، پایدارسازی مخازن، تثبیت خطوط لوله مدفون و مستغرق، مقابله با بالازدگی فونداسیون دکل‌های انتقال برق، دوختن کابل‌های کششی پل‌های معلق و سقف چادرها به زمین، پایدارسازی سازه‌های دریایی نظیر توربین‌های بادی و سکوه‌های نفتی - گازی در آب‌های سطحی، نیمه عمیق و عمیق در برابر امواج و مهاربندی در بسیاری از کاربردهای دیگر اشاره نمود (Das و Moghadam، ۲۰۱۳؛ Moghadam و همکاران، ۲۰۱۸؛ Moghadam

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۳۴۴۷۴۹

را با کاهش زاویه بیرون کشش مهار گزارش شده است (Song همکاران ۲۰۱۹). طی آزمایش بیرون کشش صفحات دایره‌ای در خاکریز سیمانی تثبیت شده با فیبر تسلیح یافته، به ترتیب افزایش ۲۰٪ و ۴۳٪ ظرفیت بیرون کشش برای عمق‌های مدفون شده یک و دو متری طی اضافه کردن ۰/۵٪ فیبر گزارش شد و با به-کارگیری تکنیک (PIV) اقدام به بررسی تغییر شکل خاک و سطوح گسیختگی شد و همچنین مشخص شد که تراکم خاک و عمق مدفون‌شدگی مهار، بیشترین تأثیر و اندازه ذرات کم‌ترین تأثیر را بر روی تغییر شکل خاک و مقاومت بیرون کشیدگی دارند (Liu و همکاران، ۲۰۱۱).

مطالعاتی بر روی رفتار مهارهای صفحه‌ای با تقویت نیروهای عمودی با استفاده از سانترفیوژ و تکنیک PIV انجام شد و مشخص شد، در صورتی که جابه‌جایی مهار در زمان اعمال بار ثابت از ۴۰٪ تجاوز نکند، بار ثابت را می‌توان به صورت نامحدود به مهار وارد نمود و شکل‌گیری یک فاصله در پایین مهار در بالا بردن میزان تقویت نیرو و عدم شکل‌گیری آن در کاهش میزان تقویت نیرو دارد (Han و همکاران، ۲۰۱۶).

مطالعاتی بر روی مهارهای مارپیچ برای پایداری دیواره‌های گودبرداری شده و تثبیت فونداسیون برج‌های انتقال نیرو و خطوط لوله در برابر نیروی بالازدگی انجام شد، که به بررسی تأثیر تعداد گام‌ها بر کارایی مهارهای مارپیچ در ماسه بر اساس نتایج آزمایش سانترفیوژ پرداخته بودند (Tsuha و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین آزمایش‌هایی بر روی بالازدگی ۱۲ نوع شمع مختلف نصب شده در دو محفظه ماسه خشک آماده‌شده با چگالی‌های مختلف انجام شد، که نتایج این بررسی نشان داد، در مهارهای با دو و سه گام مارپیچ، سهم صفحه دوم و سوم نسبت به کل ظرفیت‌زدگی مسلح کننده، با افزایش دانسیته نسبی ماسه و قطر صفحه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آزمایش‌ها نشان داد که تغییرات رفتار بار-جابه‌جایی مهار به تعداد گام‌های مارپیچ‌ها وابسته است و رفتار بالازدگی مهارهای مارپیچ در خاک‌های زهکشی نشده با استفاده از آزمایش‌های سانترفیوژ و روش (LDFE)^۵ مورد ارزیابی قرار گرفت و ۹ مهار در شعاع سانترفیوژهای ژئوتکنیکی با چیدمان‌های مختلفی از صفحات مارپیچ، فواصل متفاوت مارپیچ‌ها و عمق‌های مختلف جاگذاری و مورد آزمایش قرار گرفت که راه‌حل‌های عددی از روش LDFE با داده‌های سانترفیوژ و راه‌حل‌های نیمه تئوری مورد مقایسه قرار گرفت و با توجه به تأثیر هم‌زمان عمق جایگذاری مسلح کننده، فاصله صفحات و مقاومت پروفیل خاک، یک روش ساده برای محاسبه ظرفیت بالازدگی مهارهای مارپیچ ارائه شد (Wang و همکاران، ۲۰۱۶).

به دو گروه اصلی مهارهای دوغابی و مهارهای مکانیکی تقسیم‌بندی نمود. از مهارهای دوغابی می‌توان به مهارهای میله‌ای و سیمی دوغابی، میلگرد انتقال‌دهنده نیرو فولادی، میلگرد انتقال‌دهنده نیرو فایبر گلاسی، لوله‌های دوغابی، خود حفرار میلگردی و میلگرد انتقال‌دهنده نیرو، میلگرد انتقال‌دهنده نیرو کوبشی، میلگرد پیچی فولادی و فایبر گلاسی اشاره نمود که علاوه بر مکانیسم مکانیکی خود مهار، در تحمل نیروی وارده، حاوی دوغاب تزریق شده با هدف دستیابی به ظرفیت باربری بیشتر، مقابله با خوردگی، انسجام بیشتر مسلح کننده با محیط خاکی یا سنگی پیرامون و غیره هستند (Hung و همکاران، ۲۰۰۹؛ Hoek و همکاران، ۲۰۰۰). انواع مختلف مهارهای مکانیکی (بدون دوغاب) که در پروژه‌های خشکی و دریا استفاده شده عبارت‌اند از: مهارهای صفحه‌ای عمودی، مهارهای دفن شونده، مهارهای چند صفحه‌ای، مهارهای صفحه‌ای صلیبی، مهار انبساطی قفل شونده، مهارهای مارپیچ، مهارهای مدفون کششی، مهارهای عمودی بارگذاری شونده (VLAS)^۱، مهارهای صفحه‌ای دفن شونده مکشی (SEPLAS)^۲، مهارهای صفحه‌ای دفن شونده دینامیکی (DEPLAS)^۳ مانند مهارهای Manta ray, Duckbill, Torpedo, Omni max و Stingray است (Studier و Copstead، ۱۹۹۰؛ Shukla و Das، ۲۰۱۳؛ Gaudin و همکاران، ۲۰۱۴؛ O'Loughlin و همکاران، ۲۰۱۴؛ O'Loughlin و همکاران، ۲۰۱۵؛ Randolph و همکاران، ۲۰۱۱؛ Shelton، ۲۰۰۷).

تاکنون آزمایش‌های باربری کششی گسترده‌ای روی مهارهای صفحه‌ای افقی، مایل و قائم با شکل‌های مختلف صفحات انجام شده است (Shukla و Das، ۲۰۱۳). بررسی مهارهای نواری افقی با نسبت‌های ظاهری $L/B \leq 5$ ، نشان داد که پیش از رسیدن مهار به عمق مدفون‌شدگی بحرانی، ظرفیت مهار با افزایش نسبت مدفون-شدگی افزایش می‌یابد و صفحات افقی نواری، دایره‌ای و مستطیلی با دو سطح صیقلی و زبر، اختلاف قابل توجهی در آزمایش ظرفیت بیرون کشش دارند. همچنین با آزمایش بیرون کشش قائم صفحات دایره‌ای افقی، مکانیسم‌های گسیختگی بار-جابه‌جایی مقایسه شد و تأثیر شکل مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و نواری صفحات بر روی ظرفیت شکست بررسی شد که بزرگ‌تر بودن ظرفیت نهایی بیرون کشش صفحات مربعی و دایره‌ای از صفحات نواری و مستطیلی مشاهده شد و از آزمایش بیرون کشش صفحات مربعی تحت زوایای ۳۰ تا ۹۰ درجه در آزمایش‌های سانترفیوژ، تأثیر مسقیم ضریب بدون بعد مهار ژئومتری، زاویه بارگیری و لحظه ویژه اعمال کردن بار، بر روی میزان از دست دادن عمق مدفون-شدگی مهار به هنگام قفل‌شدگی و کاهش خطی عمق مهار مدفون

4. Particle Image Velocimetry
5. Large deformation finite element

1. Vertically loaded anchors
2. Suction- embedded plate anchors
3. Dynamically-embedded plate anchors

۲۰۱۴؛ O'Loughlin و همکاران، ۲۰۱۶؛ Wang و O'Loughlin، ۲۰۱۴.

در این مقاله، طی آزمایش‌های بیرون‌کشش انجام شده با استفاده از روش آزمایشگاهی، روی نسل نوینی از مهارهای مکانیکی به نام (EMPLAS)؛ مکانیسم رفتاری آن‌ها از جوانب مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. موارد مورد ارزیابی عبارت از میزان تأثیر شکل صفحات مهاری و انحنای آن‌ها بر سرعت قفل-شدگی صفحات بازشونده در خاک و فعال شدن مهارها، ظرفیت باربری کششی و درنهایت ارزیابی میزان زوال نیروی کششی مسلح کننده‌ها تحت یک نیروی کششی ثابت بوده است.

۲- مصالح آزمایش

۲-۱- مهار مکانیکی بازشونده (EMPLAS)

برای ساخت صفحات مهاری از ورق فلزی به ضخامت سه میلی‌متر استفاده شده است. علت انتخاب این ضخامت، لهدگی صفحات با ضخامت دو میلی‌متر در آزمایش‌های اول بوده است. بسته به ظرفیت باربری لازم برای تقویت مهار صفحه‌ای مکانیکی، صفحات با ابعاد مختلف طراحی و اجرا گردید. در این مطالعه، از آنجایی که هیچ‌گونه تحقیقی در رابطه با این نوع مهارهای نوین گزارش نشده است، با در نظر گرفتن شرایط مرزی یعنی ابعاد محفظه، مساحت صفحه مهار در حالت باز شده در خاک برابر ۶۲۵ سانتی‌متر مربع انتخاب گردیده و برای تمامی صفحات در نظر گرفته شد. انحنا دگی صفحات در ۱/۳ طول/ شعاع صفحات برای هر سه شکل مربعی، دایره‌ای و نواری انجام شد. علت انحنای صفحات، ارزیابی میزان اثرگذاری انحنای صفحه و میزان زاویه آن نسبت به راستای صفحه بر روی سرعت بازشدگی صفحات در خاک، طی بیرون‌کشش مسلح کننده‌ها بوده است. به عبارت دیگر، انحنای صفحات تأثیر مستقیمی بر روی میزان جابه‌جایی مورد نیاز به منظور باز شدن سریع تر صفحات در خاک (فعال شدن مهار) و به دنبال آن افزایش ظرفیت باربری به علت افزایش عمق مفید مدفون شده دارد که در قسمت تحلیل نتایج به تفصیل به آن پرداخته شده است. به منظور ارتباط دادن صفحات متحرک با میله نفوذ، از یک غلاف فلزی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر استفاده گردید. ارتباط بین این غلاف با صفحات مهاری، طی جوش دادن المان‌های سوراخ شده فلزی بر روی محل‌های از پیش تعریف شده بر روی صفحات، طی پیچ نمودن حاصل شده است. به این ترتیب، غلاف رابط بین دو المان اصلی مسلح کننده یعنی صفحات بازشونده و میل مهار تعریف گردید. ارتفاع و قطر میله فلزی نفوذ یابنده در خاک یا همان میل مهار، به ترتیب ۱۳۰۰ و ۳۰ میلی‌متر بوده است، که از بالا به لودسل (Load Cell) و از پایین به غلاف

محققین با انجام آزمایش‌های سانترفیوژ و به کارگیری تکنیک PIV، پژوهش‌های جامعی را بر روی عملکرد SEPLAS و مکانیسم رفتاری باله قفل‌شونده انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که:

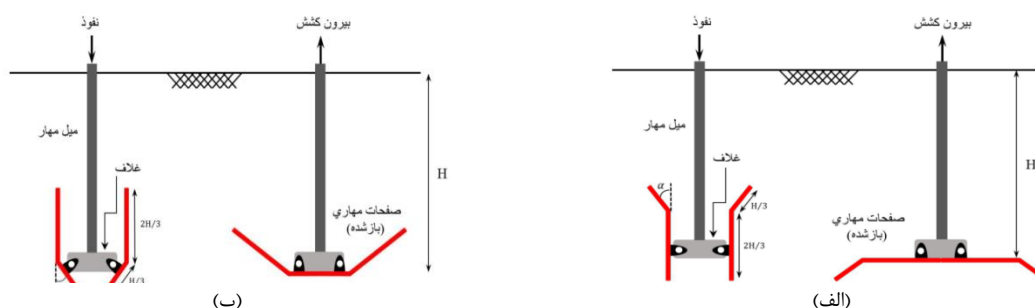
- (۱) عملکرد SEPLA بلافاصله پس از بازیابی صندوق مکشی به علت کاهش مقاومت خاک مجاور مهار افت می‌کند.
- (۲) باله قفل‌شونده بر روی مسیر مهار تنها در زمان حضور بار خارج از محور تأثیر مثبت دارد.
- (۳) با هدف کاهش افت مدفون‌شدگی مهار در زمان قفل‌شدگی یک روند بهینه طراحی شد.
- (۴) بیشینه شدن ظرفیت باربری باله قفل‌شونده و امکان نصب مهار در خاک‌های سخت معرفی شد.
- (۵) مدل پلاستیسیته به منظور تخمین عملکرد و مسیر مهار SEPLA ارائه شد.

(۶) عمق کم مدفون‌شدگی مهار از ۰/۲ تا ۱/۵ برابر ارتفاع آن برای بارگذاری‌های با شیب بین ۴۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق بررسی شد (Cassidy و همکاران، ۲۰۱۲؛ Gaudin و همکاران، ۲۰۰۶؛ Gaudin و همکاران، ۲۰۱۰؛ Wang و Gaudin، ۲۰۱۵).

تاکنون آزمایش‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای، به منظور بررسی عملکرد DEPLAS انجام گرفته است. با مدل‌سازی‌های عددی و مقایسه نتایج با تست‌های سانترفیوژ پیشین، بر روی دو نوع مختلف مهار Torpedo، یک دستورالعمل عددی جامعی با هدف شبیه‌سازی روند نصب دینامیکی مهار، تثبیت یا گیرش مجدد خاک مجاور مهار پس از نصب و بیرون‌کشش یکنواخت آن‌ها ارائه شد. محققین تحت یک بررسی پژوهشی جامع با انجام مدل‌سازی‌های عددی و تست‌های سانترفیوژ و میدانی، اقدام به بررسی کامل DEPLAS کرده و نتایج خود را در چندین مقاله منتشر کردند. آن‌ها نشان دادند که:

- (۱) افت عمق مدفون‌شدگی مهار در شرایط واقعی بسیار بیشتر از نتایج تست‌های سانترفیوژ است.
- (۲) پایان مرحله قفل‌شدگی مهار مصادف است با حداکثر ظرفیت مهار.
- (۳) مهارهای دینامیکی راکتی شکل (یا همان مهار Torpedo) رفتاری مشابه مهارهای نصب‌شونده داشته و قفل‌شدگی و پاسخ بیرون‌کشش آن‌ها با مهارهای عمودی دفن‌شونده یکسان است.
- (۴) شتاب اندازه‌گیری شده DEPLAS به منظور ارزیابی مکانیسم مربوط به نفوذ دینامیکی در خاک و استفاده برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های مدفون‌مهاری دینامیکی نصب‌شونده بررسی شد.
- (۵) روندی ساده برای طراحی ارائه شد (O'Loughlin و Blake، ۲۰۱۵؛ Blake و همکاران، ۲۰۱۴؛ O'Loughlin و همکاران،

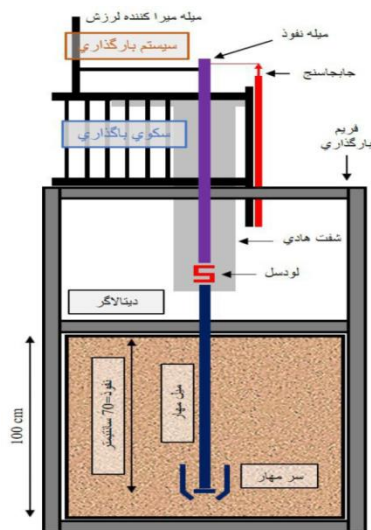
وصل گردید. در شکل (۱) شماتیک مسلح کننده‌های ساخته شده نشان داده شده است. در جدول (۱) جزئیات صفحات مهاري بازشونده نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک مهار صفحه‌ای با انحنای بالا و پایین: الف) صفحه بازشونده با انحنای بالا، ب) صفحه بازشونده با انحنای پایین

جدول ۱- دسته‌بندی مهارهای مکانیکی صفحه‌ای

اسم مخفف	میله مهار: طول - قطر (میلی‌متر)	شکل مهارها	ضخامت صفحات (میلی‌متر)	انحنا (α)	شکل	انحنای صفحات
EMPLA-۱	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	-		ساده (بدون انحنا)
EMPLA-۲	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۱۵ درجه		انحنای بالا
EMPLA-۳	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۳۰ درجه		
EMPLA-۴	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۴۵ درجه		
EMPLA-۵	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۱۵ درجه		انحنای پایین
EMPLA-۶	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۳۰ درجه		
EMPLA-۷	۳۰-۱۰۰۰	مربع	۳	۴۵ درجه		
EMPLA-۸	۳۰-۱۰۰۰	دایره	۳	۴۵ درجه		
EMPLA-۹	۳۰-۱۰۰۰	مستطیلی (نواری)	۳	۴۵ درجه		



(الف)

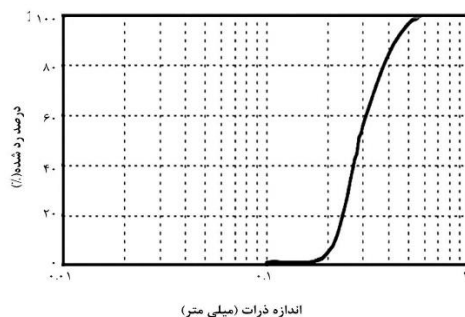


(ب)

شکل ۲- محفظه آزمایش، ابزارگذاری ها و سیستم بارگذاری: (الف نمای شماتیک، ب) شرایط واقعی

۲-۳- خاک

خاک به کار رفته در تمامی آزمایش‌ها ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی ایران بوده است. شکل (۳) نمودار دانه‌بندی خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳- توزیع اندازه دانه‌ای

شایان‌ذکر است، علت انتخاب انحنای ۴۵ درجه‌ای برای صفحات با شکل‌های دایره‌ای و نواری آن بوده است که پس از انجام آزمایش‌های صفحات مربعی شکل با انحنای مختلف، صفحه با انحنای پایین ۴۵ درجه‌ای (EMPLA-۷) دارای کم‌ترین جابه‌جایی موردنیاز برای بازشدگی صفحات و نیز بیشترین ظرفیت باربری بوده است. به عبارت دیگر شکل مربعی صفحات، به عنوان شکل مبنا (اولیه) انتخاب گردیده و تمامی تغییرات بر روی آن پیاده‌سازی و آزمایش گردید. سپس، پس از دست‌یابی به بهینه‌ترین شرایط در خصوص انحنای بالا یا پایین صفحات و نیز میزان زاویه‌ی انحنای، صفحات دایره‌ای و نواری ساخته‌شده و مشخصات بهینه بر روی آن‌ها پیاده گردید.

۲-۲- محفظه آزمایش و سیستم بارگذاری

برای انجام آزمایش‌ها یک محفظه مکعب مربعی به ابعاد ۱۰۰۰ میلی‌متر از ورق ۴ میلی‌متر ساخته شد. همچنین، ناودانی‌هایی به نمره ۱۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر در زیر محفظه همراه با یک صفحه ۱۰ میلی‌متری و پیچ‌های تراز در زیر آن به منظور تراز نمودن دقیق محفظه آزمایش تعبیه گردید. یک فریم توانمند سرتاسری از قوطی ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در چهار گوشه محفظه تا ارتفاع ۲۱۰۰ میلی‌متر به منظور انسجام یک‌پارچه محفظه خاک با سیستم بارگذاری ساخته شد. سکوی محل قرارگیری سیستم بارگذاری در ارتفاع ۲۱۰۰ میلی‌متر، به صورت کاملاً متحرک و قابل حرکت در دو جهت افقی تعریف گردید. همچنین یک غلاف فلزی به ارتفاع ۱۳۰۰ میلی‌متر به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در زیر سکوی بارگذاری تا بالای سطح خاک به منظور مهار جانبی میله نفوذ و جلوگیری از انحراف آن در زمان نفوذ در خاک نصب گردید. علت تعبیه این غلاف، انحراف بسیار زیاد میل مهار در زمان نفوذ آن به درون محفظه خاک در آزمایش‌های اول و تاب برداشتن (کج‌شدگی بدنه آن) بود. سیستم بارگذاری از نوع موتور- گیربکس و دارای پیچی به ارتفاع ۱۲۰۰ میلی‌متر بوده است. موتور با قدرت ۱/۵ اسب بخار با سرعت (rpm) ۱۴۲۰ و گیربکس با قدرت ۷/۵ kg بوده است. پیچ، از پایین به لودسل و پایین لودسل نیز به میل مهار یا همان میله نفوذ کننده در خاک کوپل گردید تا بدین وسیله قرائت نیرو میسر شود. میزان جابه‌جایی قائم میل مهار به درون خاک، به میزان یک متر تعریف گردید. سیستم قرائت و ثبت داده‌ها شامل یک خط کش دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر و لودسل با ظرفیت باربری ۲ تن با دقت ۱ کیلوگرم بوده که هر دو پس از کالیبره شدن، به دیتا لاگر (Data Logger) کوپل گردیدند. سیستم دیتا لاگر نیز دارای قابلیت ثبت داده با نرم‌افزار نوشته‌شده مخصوصی بود که پس از اتصال آن به لب‌تاپ، دیتاهای هر آزمایش به‌طور مستقل ذخیره می‌گردید. در شکل (۲) تصویر واقعی و شماتیک محفظه ساخته‌شده نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) آزمایش بالا زدگی، ب) نصب EMPLA-۳

علاوه بر این، مطالعاتی با بیرون کشش صفحات مهاری در مقیاس آزمایشگاهی، با عکس برداری از سطح شفاف محفظه در خلال آزمایش‌ها و با به کارگیری روش DIC^۹ به منظور پردازش تصاویر و ارزیابی تغییر شکل ذرات خاک مجاور مهار صفحه‌ای و تعیین سطوح گسیختگی و منطقه نفوذ انجام شده است.

در این تحقیق دو نسبت مدفون شدگی مختلف (نسبت عمق صفحه به ضلع آن (H/D)) یعنی $H/D=1/5$ و $H/D=7$ در دو خاک ماسه‌ای سست و متراکم بررسی شد. از آنجایی که عمق مدفون شدگی آزمایش‌های مهارهای EMPLAs برابر ۷۰۰ میلی‌متر و اندازه ضلع صفحه مهار ۲۵۰ میلی‌متر بوده، بنابراین نسبت مدفون شدگی (H/D) در آزمایش‌ها تقریباً برابر ۳ بوده است. از مقایسه نسبت مدفون شدگی مهارهای EMPLAs با تغییر شکل خاک اطراف مهار در ارزیابی‌های مطالعات سال ۲۰۱۱، این اطمینان حاصل گردید، که سطوح گسیختگی تشکیل شده و امتداد یافته در زمان بالا زدگی دارای فاصله مناسبی از چهار وجه کناری بوده و تغییر شکل خاک کاملاً شبیه به تغییر شکل خاک برای بالا زدگی مهارها در خاک‌های ماسه‌ای سست در مطالعات سال ۲۰۱۱ بوده است (Liu و همکاران، ۲۰۱۱).

روند انجام آزمایش‌ها مطابق با ترتیب مهارهای معرفی شده در جدول (۱) بوده است. به این صورت که ابتدا آزمایش‌های بیرون کشش بر روی مهار صفحه ساده (بدون انحنای) یعنی EMPLA-۱ و سپس مهارها با صفحاتی که $1/3$ ارتفاعی بالای آن‌ها انحنای دارد یعنی EMPLA-۲ تا EMPLA-۴ انجام شده است. سپس، آزمایش‌های بیرون کشش بر روی مهارها با صفحاتی که $1/3$ ارتفاعی پایین آن‌ها انحنای دارد یعنی EMPLA-۵ تا EMPLA-۷

با توجه به سیستم طبقه‌بندی خاک متحد (USCS)^۷، خاک ماسه ضعیفی (SP)^۸ می‌باشد. مقاومت برشی این خاک از طریق انجام آزمون برشی مستقیم و بر اساس (استاندارد ASTM D3080) در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی خاک

پارامتر	مقدار
C_u	۱/۳۶
C_c	۰/۸۷
$D_{10}(mm)$	۰/۲۲
$D_{30}(mm)$	۰/۲۴
$D_{50}(mm)$	۰/۲۸
$D_{60}(mm)$	۰/۳
e_{max}	۰/۸۲
e_{min}	۰/۵۴
G_s	۲/۶۴
E (MPa)	۱۱۰۰۰
γ_{dmax} (Kn/m ³)	۱۶/۷۶
γ_{dmin} (Kn/m ³)	۱۴/۲
ϕ (degree)	۲۸

۳- روش آزمایش

روند انجام آزمایش برای تمامی مهارها یکسان بوده و شامل نصب میل مهار به غلاف، پیچ نمودن صفحات مهاری به غلاف، نفوذ مسلح کننده به درون خاک تا عمق ۷۰۰ میلی‌متر با سرعت ثابت (۱ mm/sec) و در نهایت بیرون کشش مسلح کننده به همان اندازه و سرعت بوده است. در خلال انجام هر آزمایش، قرائت میزان بار و جابه‌جایی قائم مسلح کننده با استفاده از ابزار گذاری‌های انجام شده و توسط دیتا لاگر ثبت و ذخیره می‌گردد. علت انتخاب عمق نفوذ ۷۰۰ میلی‌متری، جلوگیری از وقوع هرگونه اندرکنش میان خاک و کف محفظه آزمایش بوده تا با رعایت فاصله مناسب ۳۰۰ میلی‌متری از حصول نتایج غیرواقعی پرهیز شود. شایان ذکر است، علت ساخت محفظه به بزرگی ۱۰۰۰ میلی‌متر، ممانعت از رسیدن سطوح گسیختگی به وجوه کناری محفظه در خلال بیرون کشش مسلح کننده‌ها بوده است. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، تغییر شکل توده خاک واقع در بالای صفحات، پس از انجام بیرون کشش، دارای فاصله زیادی از وجوه کناری محفظه می‌باشد که این نشان‌دهنده فاصله مناسب وجوه کناری محفظه با توده خاک در گیر در خلال آزمایش بوده است.

9. Digital image correlation

7. Unified Soil Classification System

8. Poorly graded sand

درواقع تأثیرگذارترین پارامتر را در ظرفیت حداکثری این مهار می‌توان به کم‌تر بودن امکان فرار ذرات خاک از روی صفحات آن به‌علت انحنای ناچیز ۱۵ درجه‌ای صفحات آن نسبت به دو مهار EMPLA-۳ و EMPLA-۴ و در سمت مقابل عمق مدفون‌شدگی مناسب آن دانست. از مقایسه پیک‌های باربری نمودار EMPLA-۳ با EMPLA-۲ نتیجه‌گیری می‌شود که بازشدگی صفحات EMPLA-۳ سریع‌تر بوده و پس از بیرون‌کشش ۱۰ سانتی‌متری، مهار فعال و باربر شده است. با این حال، به‌علت ۱۵ درجه انحنای بیشتر صفحات آن نسبت به صفحات EMPLA-۲ فرار ذرات خاک از روی صفحات بیشتر شده و به‌دنبال آن ظرفیت باربری EMPLA-۳ کاهش قابل‌توجهی نسبت به EMPLA-۲ داشته است.

سریع‌ترین قفل‌شدگی مسلح‌کننده در خاک، مربوط به EMPLA-۴ بوده است به‌نحوی که بازشدگی این صفحه تنها پس از ۸ سانتی‌متر بیرون‌کشش اتفاق افتاده و عمق مفید مدفون‌شدگی مهار بیش از ۶۲ سانتی‌متر به‌دست آمده است. با این حال به‌علت انحنای ۴۵ درجه‌ای صفحات این مهار، فرار ذرات خاک از روی صفحات بسیار زیاد بوده که تأثیر بسزایی در کاهش چشمگیر ظرفیت باربری داشته است.

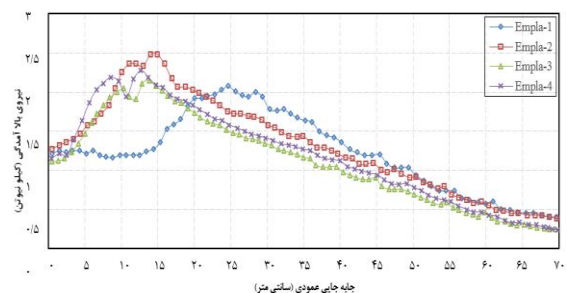
از مقایسه ۱۰ سانتی‌متر بیرون‌کشش ابتدایی هر چهار مسلح‌کننده، ارتباط مستقیمی میان زاویه انحنای صفحات با شیب نمودارها مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که با افزایش زاویه انحنای صفحات، شیب رشد نمودارهای باربری نیز افزایش یافته است. بر این اساس، در نمودار EMPLA-۱ ظرفیت باربری کششی مسلح‌کننده نه تنها افزایش نیافته، بلکه دچار کاهش شده است که این می‌تواند به‌سبب عدم بسیج‌شدگی و سفت‌شدگی خاک بالای صفحات باشد. از بررسی ۱۰ سانتی‌متر بیرون‌کشش اولیه، سریع‌ترین نرخ رشد ظرفیت باربری سه مسلح‌کننده دیگر به ترتیب مربوط به EMPLA-۴، EMPLA-۳ و EMPLA-۲ بوده است که این توالی به‌علت تأثیر مستقیم انحنای صفحات در تسریع بازشدگی صفحات و قفل شدن مسلح‌کننده در خاک بوده است. در سمت مقابل، از آنجایی که صفحات در EMPLA-۱ کاملاً صاف هستند، فرار ذرات خاک از روی صفحات در خلال بیرون‌کشش بسیار کم‌تر بوده است. به همین علت در بازه جابه‌جایی ۲۵ تا ۷۰ سانتی‌متری، EMPLA-۱ دارای بیشترین ظرفیت باربری در مقایسه با دیگر مسلح‌کننده‌ها شده است که این قضیه، قفل‌شدگی بهتر توده خاک در بالای صفحات این مهار را نسبت به دیگر مسلح‌کننده‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر این EMPLA-۲ نیز دارای رفتار مشابهی با EMPLA-۱ بوده و در بازه بیرون‌کشش ۴۸ تا ۷۰ سانتی‌متری به‌علت انحنای کم صفحات آن، فرار ذرات خاک کم بوده و نمودار آن منطبق بر نمودار EMPLA-۱ شده است. نمودار باربری EMPLA-۳ و EMPLA-۴ در بازه بیرون‌کشش ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر تقریباً مشابه یکدیگر بوده و به‌علت انحنای زیاد صفحات آن‌ها، فرار

انجام‌شده است. درنهایت از مقایسه نتایج آزمایش‌های این ۷ مهار و ارزیابی آن‌ها با یکدیگر، بهینه‌ترین مشخصات هندسی صفحات از قبیل بهترین انحنای (بالا یا پایین صفحه) و میزان زاویه انحنای انتخاب گردید و با اعمال مشخصات آن بر روی صفحات دایره‌ای و نواری شکل، مهارهای EMPLA-۸ و EMPLA-۹ ساخته‌شده و مورد آزمایش قرار گرفتند تا به این ترتیب تأثیر شکل صفحات در بازشدگی صفحات و ظرفیت باربری کششی مسلح‌کننده بررسی شود. با هدف حصول اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌ها، آزمایش اول سه مرتبه تکرار گردید که بازه تغییرات آن بسیار ناچیز و زیر ۵٪ بود.

۴- نتایج

۴-۱- صفحات با انحنای بالا

نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی EMPLA-۱ تا EMPLA-۴ در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مسلح‌کننده با صفحات بدون انحنای یعنی EMPLA-۱ دارای کم‌ترین ظرفیت باربری کششی در مقایسه با دیگر مسلح‌کننده‌ها بوده است. از آنجایی که صفحات این مسلح‌کننده فاقد هیچ‌گونه انحنایی نسبت به راستای قائم بوده، مسلح‌کننده به جابه‌جایی قائم بیشتری جهت بسیج خاک بالای خود و فشار وارد آوردن به صفحات برای باز شدن نیاز داشته است. همان‌گونه که از نمودار این مهار مشاهده می‌شود، بازشدگی صفحات در خاک در خلال آزمایش بسیار دیر اتفاق افتاده و پس از بیرون‌کشش ۲۵ سانتی‌متری یعنی در عمق ۴۵ سانتی‌متری، مهار در خاک فعال شده و بیش‌ترین ظرفیت باربری کششی در این عمق حاصل شده است. از تحلیل نمودار EMPLA-۲ مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین ظرفیت باربری کششی در این مهار اتفاق افتاده به‌طوری‌که توانسته متحمل ۲/۵ کیلونیوتن ظرفیت باربری کششی شود. علت وقوع این حداکثر ظرفیت باربری کششی را می‌توان به بازشدگی سریع صفحات طی جابه‌جایی کم‌تر از ۱۵ سانتی‌متری نسبت به EMPLA-۱ و به موازات آن کم بودن میزان فرار ذرات خاک از روی صفحات در مقایسه با دو مهار دیگر یعنی EMPLA-۳ و EMPLA-۴ دانست.



شکل ۵- نتایج بالآمدگی EMPLA-۱ تا EMPLA-۴

ظرفیت باربری EMPLA-۵ نسبت به EMPLA-۶ با وجود انحنای کم تر صفحات آن می‌تواند به علت سطح مقطع مؤثر بزرگ تر صفحات نسبت به سطح مقطع مؤثر صفحات EMPLA-۶ باشد (منظور از سطح مقطع مؤثر، سطح مقطع خالص صفحات در حالت باز شده می‌باشد). نکته قابل ذکر در مسلح کننده‌های با صفحات انحنادار در پایین آن است که هر چه بر میزان انحنای صفحات افزوده شد به موازات آن از سطح مقطع صفحات در حالت باز شده یا همان سطح مقطع مؤثر کاسته شد که این خود توانسته عامل تأثیرگذاری بر ظرفیت باربری کششی مسلح کننده‌ها شود.

سرعت باز شدن صفحات در EMPLA-۶ سریع تر از EMPLA-۵ بوده و مهار حدوداً با ۳ سانتی متر جابه‌جایی کم تر فعال شده است. در ۱۲ سانتی متر اولیه بیرون کشش مهار یعنی در زمان بازشدگی صفحات، ظرفیت باربری EMPLA-۶ از EMPLA-۵ بیشتر شده که این به علت سریع تر باز شدن صفحات در این مهار به سبب انحنای بیشتر صفحات و بسیج‌شدگی و سفت‌شدگی سریع تر خاک بالای آن بوده است. با پیشروی بیرون کشش، این EMPLA-۵ بوده که نرخ رشد ظرفیت باربری کششی آن از EMPLA-۶ بیشتر شده و در نهایت به ظرفیت باربری کششی بیشتری رسیده است.

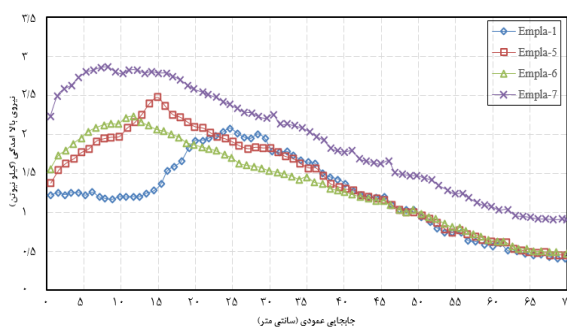
بیشترین ظرفیت باربری در این مسلح کننده‌ها، به EMPLA-۷ اختصاص یافته است. نکته قابل مشاهده در نمودار بار- جابه‌جایی این مهار، اختلاف باربری کششی بسیار زیاد آن با دیگر مسلح کننده‌ها در تمام مسیر آزمایش یعنی تمام اعماق بوده است. علت این اختلاف فاحش باربری را می‌توان در زاویه انحنای مناسب این مهار دانست که نه تنها منجر به بازشدگی بسیار سریع صفحات، تنها پس از ۶ سانتی متر بیرون کشش شده، بلکه مانع فرار آسان ذرات خاک از روی صفحات گردیده که این منجر به شکل‌گیری یک ستون خاک بسیار مقاومی بر روی صفحات باز شده، شده است. بازشدگی بسیار سریع صفحات این مسلح کننده نسبت به دیگر مسلح کننده‌ها عامل مهمی در بیشتر شدن ظرفیت باربری کششی مهار به سبب سریع تر فعال شدن مهار در عمق مدفون‌شدگی بیشتر و به دنبال آن وجود حجم خاک بیشتر در بالای صفحات بوده است.

ذرات خاک بیشتر بوده و به ظرفیت باربری کششی کم‌تری از دو مهار دیگر رسیده‌اند.

به منظور جمع‌بندی و درک بهتر نتایج آزمایش‌های این ۴ مهار، در جدول (۳) مواردی همچون سرعت قفل‌شدگی مهار، حداکثر ظرفیت باربری، عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز و شدت زوال ظرفیت باربری یا همان قابلیت فرار خاک از روی صفحات باز شده در خاک مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۴-۲- صفحات با انحنای پایین

نتایج آزمایش‌های بالآمدگی بر روی EMPLA-۵ تا EMPLA-۷ یعنی صفحات با انحنای پایین در شکل (۶) نشان داده شده که به منظور مقایسه بهتر آن‌ها، نمودار بیرون کشش EMPLA-۱ نیز به آن‌ها اضافه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود EMPLA-۱ در اینجا نیز کم‌ترین ظرفیت باربری را به خود اختصاص داده و علاوه بر این، بازشدگی صفحات این مسلح کننده و فعال شدن آن از دیگر مسلح کننده‌های این گروه دیرتر اتفاق افتاده است.



شکل ۶- نتایج بالآمدگی EMPLA-۱ و EMPLA-۵ تا EMPLA-۷

از تحلیل نتایج بیرون کشش EMPLA-۵ مشاهده می‌شود که سرعت بازشدگی صفحات به علت انحنای کم صفحات، از دو مسلح کننده دیگر یعنی EMPLA-۶ و EMPLA-۷ کندتر بوده و پس از بیرون کشش ۱۵ سانتی متری یعنی در عمق ۵۵ سانتی متری مسلح کننده فعال شده است. حداکثر ظرفیت باربری کششی EMPLA-۵ از هر دو مسلح کننده EMPLA-۱ و EMPLA-۶ به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۴ کیلونیوتن بیشتر شده است. علت افزایش

جدول ۳- جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های بیرون کشش بر روی EMPLA-۱ تا EMPLA-۴

EMPLAs	سرعت قفل‌شدگی مهار (فعال شدن)	ماکزیم نیروی بالآمدگی (KN)	عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز (cm)	قابلیت فرار ذرات خاک از روی صفحات (زوال نیرو)
EMPLA-۱	آهسته	۲/۰۷	۴۵-۲۵	بسیار کم
EMPLA-۲	سریع	۲/۴۹	۵۵-۱۵	کم
EMPLA-۳	سریع	۲/۱۸	۵۶-۱۴	زیاد
EMPLA-۴	بسیار سریع	۲/۲۷	۵۸-۱۲	بسیار زیاد

کاهش ظرفیت باربری کشتی این مسلح کننده‌ها در جریان روند بیرون‌کشش، از EMPLA-۱ کم‌تر شده و همان‌طور که در جابه‌جایی ۴۰ تا ۷۰ سانتی‌متری مشاهده می‌شود، نمودارهای EMPLA-۵ بالاتر از EMPLA-۱ رفته و بیشتر شده است. از مقایسه بازه ۲۵ تا ۷۰ سانتی‌متری هر چهار نمودار نتیجه‌گیری می‌شود که کم‌ترین شیب نمودار مربوط به EMPLA-۷ بوده که این به معنای ممانعت بهتر صفحات انحنای فرار از فرار خاک بالای صفحات در حین بیرون‌کشش است.

در جدول (۴) سرعت قفل‌شدگی مهار، حداکثر ظرفیت باربری، عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز و شدت زوال ظرفیت باربری یا همان قابلیت فرار خاک از روی صفحات باز شده در خاک جمع‌بندی شده است.

از مقایسه ۱۰ سانتی‌متر بیرون‌کشش ابتدایی هر چهار مسلح کننده، ارتباط مستقیمی میان زاویه انحنای صفحات با شیب نمودارها مشاهده نمی‌شود به‌طوری‌که با افزایش زاویه انحنای صفحات، شیب رشد نمودارهای باربری هر سه مهار EMPLA-۵ تا EMPLA-۷ تغییر قابل توجهی نیافته و مشابه یکدیگر هستند. همان‌گونه که در قسمت (۴-۱) اشاره شد، در نمودار EMPLA-۱ ظرفیت باربری کشتی مسلح کننده در ۱۰ سانتی‌متر اولیه نه تنها افزایش نیافته بلکه دچار یک کاهش نسبی شده است که این می‌تواند به سبب عدم بسیج‌شدگی و سفت شدن خاک بالای صفحات باشد.

برخلاف روند فرار ذرات خاک از روی صفحات با انحنای بالا، به‌علت انحنای پایین صفحات در EMPLA-۵ تا EMPLA-۷، فرار ذرات خاک از روی صفحات بسیار کم‌تر شده که به‌دنبال آن نرخ

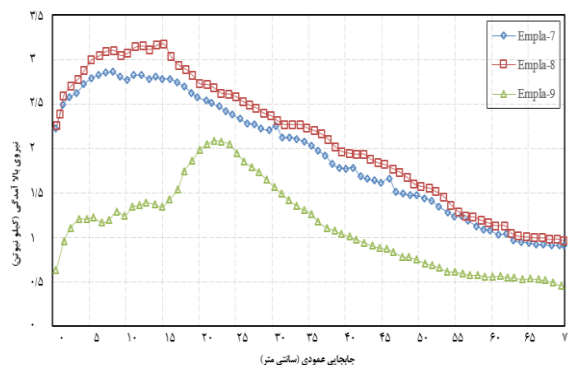
جدول ۴- جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی EMPLA-۱ و EMPLA-۵ تا EMPLA-۷

EMPLAs	سرعت بازشدگی صفحات	ماکزیمم نیروی بالآمدگی (KN)	عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز (cm)	قابلیت فرار ذرات خاک از روی صفحات (زوال نیرو)
EMPLA-۱	آهسته	۲/۰۷	۴۵-۲۵	کم
EMPLA-۵	سریع	۲/۴۶	۵۵-۱۵	کم
EMPLA-۶	بسیار سریع	۲/۲۲	۵۸-۱۲	کم
EMPLA-۷	بسیار سریع	۲/۸۶	۶۲-۸	بسیار کم

جدول ۵- جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش بر روی EMPLA-۷ تا EMPLA-۹

EMPLAs	سرعت بازشدگی صفحات	ماکزیمم نیروی بالآمدگی (KN)	عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز (cm)	قابلیت فرار ذرات خاک از روی صفحات (زوال نیرو)
EMPLA-۷	بسیار سریع	۲/۸۶	۶۲-۸	بسیار کم
EMPLA-۸	بسیار سریع	۳/۱۶	۵۶-۱۴	بسیار کم
EMPLA-۹	بسیار کند	۲/۰۹	۴۸-۲۲	بسیار زیاد

نشان داده شده است که به‌منظور مقایسه و تفسیر بهتر، نتایج بیرون‌کشش EMPLA-۷ نیز در آن گنجانده شده است.



شکل ۷- نتایج بالآمدگی EMPLA-۷ تا EMPLA-۹

۳-۴- صفحات با اشکال مختلف

از تحلیل نتایج بیرون‌کشش تمامی هفت EMPLAs مشاهده گردید که EMPLA-۷ با اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به دیگر مسلح کننده‌ها، دارای بیشترین ظرفیت باربری کشتی، بیشترین نسبت مفید مدفون‌شدگی به‌علت سرعت بالای بازشدگی صفحات در همان ابتدای آزمایش و کم‌ترین نرخ کاهش ظرفیت باربری کشتی در خلال بیرون‌کشش به‌علت بسیج‌شدگی بسیار مناسب توده خاک در بالای صفحات بوده است. بر این اساس، خصوصیات صفحات EMPLA-۷ یعنی انحنای ۴۵ درجه‌ای پایین صفحات بر روی صفحات دو مسلح کننده دیگر با شکل‌های دایره‌ای و مستطیلی (نوار) طراحی و ساخته گردید و به‌ترتیب EMPLA-۸ و EMPLA-۹ نام‌گذاری شدند (جدول (۱)). نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشش انجام‌شده بر روی این دو مسلح کننده در شکل (۷)

جمله می‌توان به حصول بیشترین قابلیت ظرفیت باربری، حصول کم‌ترین جابه‌جایی (بیرون‌کشش) مورد نیاز به منظور قفل و فعال شدن مسلح کننده در زمان نصب آن، کم‌ترین پتانسیل زوال ظرفیت باربری تحت یک نیروی کششی ثابت در طول عمر طراحی مسلح کننده و در نهایت قابلیت جذب انرژی آن‌ها تحت اثر بارهای سیکلی و تکرارشونده نظیر بار تلاطم امواج دریا در تثبیت و دوختن سازه‌های دریایی به بستر دریا اشاره نمود.

ذکر این نکته ضروری است که میزان تراکم خاک بالای صفحات تأثیر بسزایی بر روی ظرفیت بیرون کشش مسلح کننده خواهد داشت و از پارامترهای با اثرگذاری زیاد در ظرفیت باربری محسوب می‌شود. مطالعاتی با انجام مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی طی آزمایش بیرون کشش پی‌های مربعی با نسبت مدفون‌شدگی ۲ در دو خاک نیمه متراکم و متراکم انجام شد و ثابت نمودند که افزایش تراکم خاک، تأثیر بسیار زیادی روی ضریب شکست و ظرفیت بالآمدگی خالص نهایی دارد و با افزایش درجه تراکم خاک بالای صفحات تا ۸۵٪ تراکم، سطوح گسیختگی از حالت موازی با میل مهار (برش خوردگی جانبی) خارج شده و تحت یک زاویه تقریبی ۴۵ درجه به سطح خاک می‌رسند و افزایش درجه تراکم خاک بالای صفحات منجر به بزرگ‌شدگی قابل‌توجهی گوه گسیختگی (گسیختگی برشی) به‌علت افزایش وزن خاک مؤثر در ظرفیت باربری و نیز افزایش مقاومت اصطکاکی در سطوح لغزش به‌علت طولانی‌تر شدن این سطوح می‌شود (Kulhawy و همکاران، ۱۹۸۷).

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نوع جدیدی از مهارهای مکانیکی به نام Expandable Mechanical Plate Anchors با قابلیت بسته بودن صفحات در زمان نصب و سپس باز شدن آن‌ها در خاک، معرفی شده و به روش تست‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفتند. موارد موردبررسی عبارت از ارزیابی مکانیسم بازشدگی صفحات در داخل خاک و ارتباط مستقیم آن با ظرفیت باربری نهایی مسلح کننده، تأثیر شکستگی‌های روی صفحات و زوایای مختلف آن‌ها روی روند قفل‌شدگی یا همان فعال شدن مسلح کننده در خاک، تعیین شکل هندسی بهینه صفحات و درنهایت ارزیابی قابلیت حفظ ظرفیت باربری نهایی (پتانسیل کاهش نیرو) تحت یک بیرون کشش ثابت بوده است. نتایج حاصل‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- شدت انحنای صفحات تأثیر زیادی بر سرعت قفل‌شدگی و فعال شدن مسلح کننده‌ها دارد. در صفحات با انحنای بالا، افزایش زاویه انحنای صفحات تأثیر مثبتی بر ظرفیت باربری نهایی به‌علت افزایش سرعت بازشدگی صفحات و افزایش عمق مدفون‌شدگی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ظرفیت باربری کششی به EMPLA-۸ یعنی صفحات دایره‌ای شکل اختصاص یافته است و EMPLA-۷ ظرفیت باربری کششی کم‌تری را به خود اختصاص داده است.

نکته قابل توجه از مقایسه نمودارهای بیرون‌کشش این دو مهار، شباهت زیاد مکانیسم رفتاری آن‌ها است، به‌طوری‌که روند بازشدگی صفحات کاملاً مشابه هم بوده و هر دو مسلح کننده در بازه جابه‌جایی ۷ تا ۱۲ سانتی‌متری فعال شده‌اند. اختلاف ظرفیت باربری کششی در محل پیک نمودارها ۰/۳ کیلونیوتن بوده و EMPLA-۸ یعنی صفحات دایره‌ای شکل دارای باربری بیشتری از EMPLA-۷ یعنی صفحات مربعی شکل شده‌اند. از مقایسه ۱۰ سانتی‌متری ابتدایی بیرون‌کشش می‌توان سرعت بازشدگی یکسان صفحات در هر دو مسلح کننده را نتیجه گرفت. بیش‌ترین جابه‌جایی موردنیاز بابت فعال شدن مسلح کننده مربوط به EMPLA-۹ بوده، به‌طوری‌که بازشدگی صفحات پس از ۲۳ سانتی‌متر و در عمق کم‌تر از ۵۰ سانتی‌متری اتفاق افتاده است. علاوه بر این، EMPLA-۹ دارای کم‌ترین ظرفیت باربری کششی شده و اختلاف در محل پیک نمودار این مسلح کننده با پیک بالاترین نمودار به ۱/۰۸ کیلونیوتن رسیده که اختلاف قابل‌توجهی است. بر این اساس بهترین عملکرد به ترتیب مربوط به EMPLA-۸ و EMPLA-۷ بوده و کم‌ترین مربوط به EMPLA-۹ بوده است. علت دیر باز شدن صفحات در EMPLA-۹ را می‌توان به افزایش بیش از اندازه یک ضلع صفحه و تأثیر منفی آن بر مکانیسم بازشدگی و قفل‌شدگی صفحات و به تأخیر افتادن روند فعال شدن مسلح کننده در خاک بیان کرد. همچنین، بسیج خاک بالای صفحات به‌علت کم شدن یک بعد نسبت به بعد دیگر صفحات به‌درستی اتفاق نیفتاده است، که این به‌علت فرار راحت ذرات خاک از روی صفحات تحت کشش بوده است.

به‌منظور درک بهتر نتایج آزمایش‌های این ۳ مهار، در جدول (۵) مواردی همچون سرعت قفل‌شدگی مهار، حداکثر ظرفیت باربری، عمق فعال‌شدگی، مقدار جابه‌جایی موردنیاز و شدت زوال ظرفیت باربری یا همان قابلیت فرار خاک از روی صفحات باز شده در خاک مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

از جمع‌بندی تمامی بیرون‌کشش‌های انجام‌شده نتیجه گرفته می‌شود که برای مسلح کننده‌های با انحنای بالای صفحات، EMPLA-۲ یعنی انحنای ۱۵ درجه بهترین عملکرد را داشته و برای مسلح کننده‌های با انحنای پایین صفحات، EMPLA-۷ یعنی انحنای ۴۵ درجه دارای بیشترین عملکرد بوده است. از منظر تأثیر شکل صفحات، به ترتیب EMPLA-۸ یعنی شکل دایره‌ای و پس از آن EMPLA-۷ یعنی شکل مربعی بهترین عملکرد را داشته‌اند.

شایان‌ذکر است، عملکرد این مهارهای نوین را می‌توان از چند منظر در نظر گرفته و در طراحی و اجرا مدنظر قرار داد که از آن

نرم همچون خاک سواحل طی نفوذ یکنواخت آن‌ها با استفاده از جک‌های هیدرولیکی همانند الگوی نصب مهارهای عمودی دفن شونده می‌باشد.

- از کاربردهای EMPLAs می‌توان به تثبیت و پایدارسازی شیب‌ها، پی‌ها، دیوارهای نگه‌دارنده، حفاری‌ها، ترانشه‌ها، خطوط لوله، سازه‌های دریایی و جاده و راه‌آهن اشاره نمود.

- مدل‌سازی مکانیسم بازشدگی این مهارها در نرم‌افزارهای مکانیکی همراه با ارزیابی‌های آزمایشگاهی، در خاک‌های دیگری نظیر خاک‌های چسبنده در شرایط خشک و اشباع می‌تواند زمینه تحقیقاتی ارزشمندی برای محققین علاقه‌مند به شناخت بیشتر رفتار این نوع مهارهای مکانیکی نوین در آینده باشد.

۶- فهرست علائم

C_u	ضریب یکنواختی
C_c	ضریب انحنای
D_{10}	اندازه دانه مؤثر
D_{50}	اندازه دانه متوسط
e_{max}	حداکثر نسبت تخلخل
e_{min}	حداقل نسبت تخلخل
G_s	وزن مخصوص
E	مدول الاستیسیته
$\gamma_{d,max}$	حداکثر وزن مخصوص خشک
$\gamma_{d,min}$	حداقل وزن مخصوص خشک
ϕ	زاویه اصطکاک

۷- مراجع

- BLAKE A, O'LOUGHLIN C, "Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests", Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52, 1270-1282.
- BLAKE A, O'LOUGHLIN C, GAUDIN C, "Capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests", Canadian Geotechnical Journal, 2014, 52, 87-95.
- CASSIDY M, GAUDIN C, RANDOLPH M, WONG P, WANG D, TIAN Y, "A plasticity model to assess the keying of plate anchors", Géotechnique, 2012, 62, 825.
- Copstead RL, Studier DD, "An earth anchor system: installation and design guide", Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-257. Portland, OR: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1990, 35, 257.
- DAS BM, Shukla SK, "Earth anchors", Journal of Ross Publishing, 2013.
- Gaudin C, O'loughlin C, Randolph M, Cassidy M, Wang D, Tian Y, Hambleton J, Merifield R, "Advances in offshore and onshore anchoring solutions", Australian Geomechanics, 2014, 49, 59-72.
- Gaudin C, O'loughlin C, Randolph M, Lowmass A, "Influence of the installation process on the

مسلح کننده و در مقابل تأثیر مخربی به علت افزایش سهولت فرار توده خاک مؤثر روی صفحات دارد. بهینه‌ترین زاویه انحنای در این صفحات، ۱۵ درجه است.

- در صفحات با انحنای پایین، افزایش زاویه انحنای صفحات تأثیر مستقیمی بر افزایش ظرفیت باربری به علت افزایش سرعت بازشدگی صفحات، سرعت فعال شدن مسلح کننده و عمق مدفون-شدگی آن، و در نهایت کاهش قابلیت فرار ذرات خاک از روی صفحات دارد. زاویه ۴۵ درجه منجر به درگیری و گیرافتادگی مناسب توده خاک مؤثر در بالای صفحات می‌شود و بهینه‌ترین زاویه انحنای در این دسته‌بندی می‌باشد.

- شکل دایره‌ای بهترین عملکرد را در حصول ظرفیت باربری حداکثری دارد. پس از آن، صفحه مهار مربعی گزینه مناسبی می‌باشد چراکه اختلاف نتایج این دو مهار با یکدیگر بسیار ناچیز است. صفحات مستطیلی شکل بدترین عملکرد را در تمامی موارد یعنی ظرفیت باربری حداکثری، سرعت بازشدگی و قفل‌شدگی و پتانسیل زوال نیروی کششی دارند و بر اساس نتایج بررسی‌های این پژوهش برای استفاده توصیه نمی‌شوند.

- افزایش عمق خاک سبب افزایش قابل توجه تراکم و نیز پارامترهای فیزیکی خاک نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک خواهد شد که این بهبود شرایط محیطی می‌تواند تأثیر بسزایی روی مکانیسم بازشدگی صفحات و سرعت قفل‌شدگی مهارها داشته و در نتیجه منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت باربری شود.

- از آنجایی که صفحات متحرک به صورت کاملاً بسته و موازی با میل مهار در خاک نفوذ می‌یابند، شدت دست‌خوردگی خاک در زمان نصب بسیار کم‌تر از روند نصب مهارهای دیگر همچون مهارهای مارپیچ و یا مهارهای با صفحات باز خواهد بود.

- لحاظ شکل بهینه صفحات و انحنای معرفی شده و نیز ایده نوین بازشدگی صفحات پس از نصب مسلح کننده طی یک بیرون کشش جزئی مسلح کننده، در ساخت مهارهای تک و چندصفحه‌ای و یا اعمال بر روی پیچ‌های مهارهای مارپیچ می‌تواند ایده مناسبی برای افزایش ظرفیت باربری مهارهای مدفون‌شونده نظیر مهارهای صفحه‌ای و کاهش گشتاور پیچشی موردنیاز برای نصب مسلح کننده‌های نفوذ یابنده در خاک نظیر میخ‌های پیچی خاک و مهارها و نیز افزایش ظرفیت باربری آن‌ها به سبب کاهش میزان دست‌خوردگی توده خاک مؤثر در باربری پیچ‌ها در هنگام نصب باشد.

- نکته حائز اهمیت در نحوه نصب مهارهای معرفی شده، امکان نصب آن‌ها در بستر آب‌های نیمه عمیق و عمیق توسط صندوق‌های مکش همچون الگوی نصب SEPLAs، قابلیت نصب آن‌ها در محیط‌های خشکی با استفاده از کوبش‌های متوالی همچون الگوی نصب Sheet piles و نیز امکان نصب آن‌ها در خاک‌های سست و

- Geoenvironmental Engineering, 2009, 135, 1475-1485.
- Tsuha CDHC, Aoki N, Rault G, Thorel L, Garnier J, "Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests", Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49, 1102-1114.
- Wang D, Merifield R, Gaudin C, "Uplift behaviour of helical anchors in clay", Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50, 575-584.
- Wang D, O'loughlin C, "Numerical study of pull-out capacities of dynamically embedded plate anchors", Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51, 1263-1272.
- performance of suction embedded plate anchors", Géotechnique, 2006, 56, 381-391.
- Gaudin C, Simkin M, White DJ, O'loughlin CD, "Experimental investigation into the influence of a keying flap on the keying behaviour of plate anchors", The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2010. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Gaudin C, Tian Y, Cassidy M, Randolph M, O'loughlin C, "Design and performance of suction embedded plate anchors", Proceedings of 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Oslo: CRC Press, 2015. 863-868.
- Han C, Wang D, Gaudin C, O'loughlin C, Cassidy M, "Behaviour of vertically loaded plate anchors under sustained uplift", Géotechnique, 2016, 66, 681-693.
- Hoek E, Kaiser PK, Bawden WF, "Support of underground excavations in hard rock", CRC Press, 2000.
- Hung CJ, Monsees J, Munfah N, Wisniewski J, "Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, New York, 2009.
- Kulhawy FH, Trautmann CH, Nicolaidis CN, "Spread foundations in uplift: experimental study", Foundations for Transmission Line Towers, 1987. ASCE, 96-109.
- Liu J, Liu M, Zhu Z, "Sand deformation around an uplift plate anchor", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 138, 728-737.
- Moghadam MJ, Zad A, Mehrannia N, Dastaran N, "Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018a, 10, 947-957.
- Moghadam MJ, Zad A, Mehrannia N, Dastaran N, "Experimental study of the influence of the shape and configuration of plate anchors on retaining walls", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2018b, 1-49.
- O'loughlin C, Blake A, Richardson M, Randolph M, Gaudin C, "Installation and capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through centrifuge tests", Ocean Engineering, 2014, 88, 204-213.
- O'loughlin C, Blake A, Gaudin C, "Towards a simple design procedure for dynamically embedded plate anchors", Géotechnique, 2016, 66, 741-753.
- O'loughlin C, White D, Stanier S, "Novel Anchoring Solutions for FLNG-Opportunities Driven by Scale", Offshore Technology Conference, 2015, Offshore Technology Conference.
- Randolph M, Gourvenec S, White D, Cassidy M, "Offshore geotechnical engineering", Spon Press New York, 2011.
- Shelton JT, "OMNI-Maxtrade anchor development and technology", OCEANS 2007, 2007, IEEE, 1-10.
- Song, Z, Hu Y, O'loughlin C, Randolph MF, "Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay", Journal of Geotechnical and

EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Determination of the New Generation of Mechanical Anchors for Using As a Geotechnical Supporting System

Nader Dastaran ^a, Matin Jalali Moghadam ^a, Amir Ali Zad ^{b,*}

^a Geotechnical Engineer, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

Received: 10 February 2019; **Accepted:** 05 February 2020

Keywords:

Expandable Mechanical Plate Anchor (EMPLA), Experimental modeling, Onshore and offshore geotechnics, Soil reinforcement, PLAXIS (3D).

1. Introduction

So far, various methods have been reported for estimating the tensile bearing capacities using laboratory tests, software modeling, and estimation theory (Das and Shukla, 2013; Moghadam et al., 2018; Randolph, 2011). In the present study, different aspects of the mechanical behavior of EMPLAs are evaluated during the performed pullouts using experimental tests and 3d numerical modeling. In addition, the effect of the properties of anchor plates such as their shape and curvature on locking speed of expandable plates in the soil, and activation of anchors, as well as the tensile bearing capacity and degradation intensity of reinforcement traction under a constant pullout speed are investigated. Additionally, to validate the results of physical modeling, the anchors with the best performance and the maximum tensile bearing capacity were selected as a representative of each group, modeled, and evaluated in the PLAXIS 3D V.2018 finite element software program. Based on the results, the circular-shaped mechanical anchor showed the maximum bearing capacity among the other anchors.

2. Experimental setup

2.1. Expandable mechanical plate anchors (EMPLAs)

To construct the anchor plates, 3 mm steel sheets were used due to the inadequate thickness of the 2 mm plates in the preliminary experimental tests. Depending on the required bearing capacity of the mechanical plate anchor reinforcements, plates with different dimensions were designed and implemented. Since EMPLAs were firstly introduced in this study, the area of the anchor plate was selected and proposed 625 cm² by considering the boundary conditions, i.e., chamber dimensions. Plate curvature was created on 1/3 of the length/radius of plates for square, circle, and rectangle geometries in order to evaluate the effectiveness of plate curvature and its angle with respect to the plate on expanding the speed of plates in the soil during the pullout test. In other words, since the curvature of the plates directly affects the required displacement rate, a quick expansion of the plates occurs in soil (activation of the anchor) and, subsequently increases the bearing capacity due to an increase in the optimal embedded depth. Fig. 1 shows the schematic of the proposed reinforcements for experimental tests.

* Corresponding Author

E-mail addresses: naderdastaran@yahoo.com (Nader Dastaran), matin.jalali.m@gmail.com (Matin Jalali Moghadam), a.zad@iauctb.ac.ir (Amir Ali Zad)

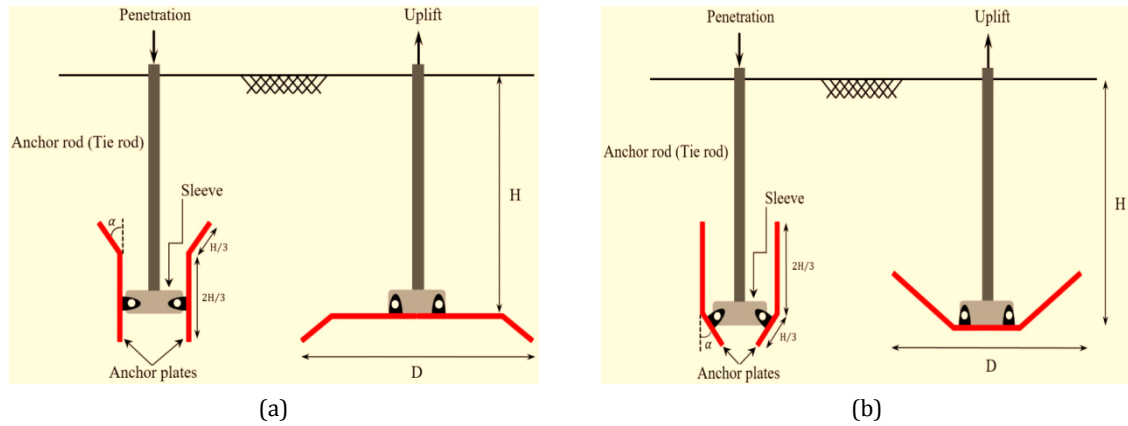


Fig. 1. Schematic cross-section of anchor plates with top and down curvatures: a) Expandable plates with top curvature, b) Expandable plates with down curvature

2.2. Test chamber and loading system

A frame was made in four corners of the chamber up to 2100 mm by 100×100 mm profiles to integrate the soil chamber with the loading system. The loading system applied in these experiments was a motor-gearbox type with a 1200 mm height screw. The engine power was 1.5 hp with 1420 rpm and gearbox power was 7.5kg. In order to read the force, the screw was coupled to tehload cell from the bottom and the load cell also was connected to the anchor rod. The vertical displacement of the anchor rod inside the soil was defined as 1 m. The system of data acquisition and recording included a digital ruler with a precision of 0.1 mm and a load cell with a 3-tons bearing capacity.

2.3. Soil

The backfill soil used in all experimental tests was sandy soil collected from Sufian in East Azerbaijan Province, Iran. According to the Unified Soil Classification System (USCS), the soil is poorly graded sand (SP).

3. Test methodology

The same procedure was applied for all anchors, which included the installation of the anchor rod to the sleeve, threading the anchor plates to the sleeve, penetration of the reinforcement into the soil up to 700 mm depth by 1mm/sec constant speed, and pullout of the reinforcement by the same size and speed.

4. Results and discussion

4.1. Plates with top curvatures

The results of uplift tests on EMPLAs 1 to 4 are shown in Fig. 2.

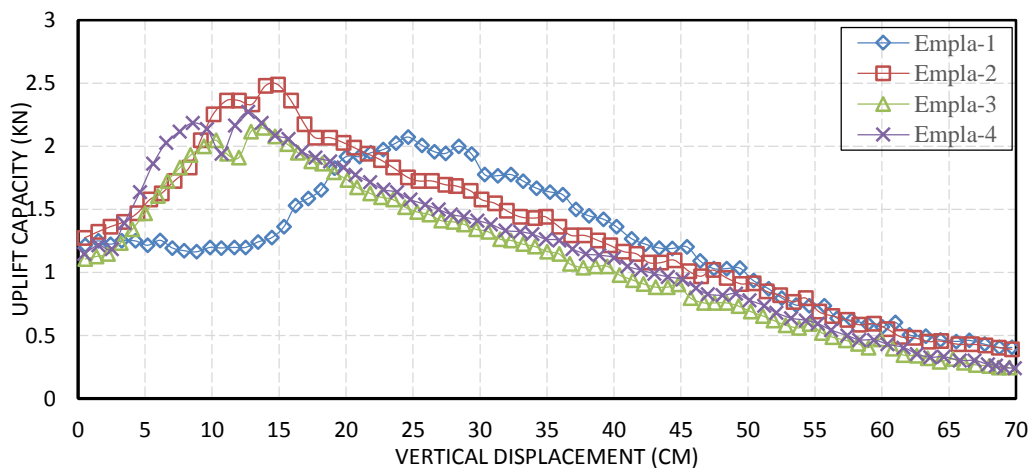


Fig. 2. Uplift results of EMPLAs 1 to 4

4.2. Plates with down curvatures

The results of uplift tests performed on EMPLAs 5 to 7 (plates with down curvature) are shown in Fig. 3.

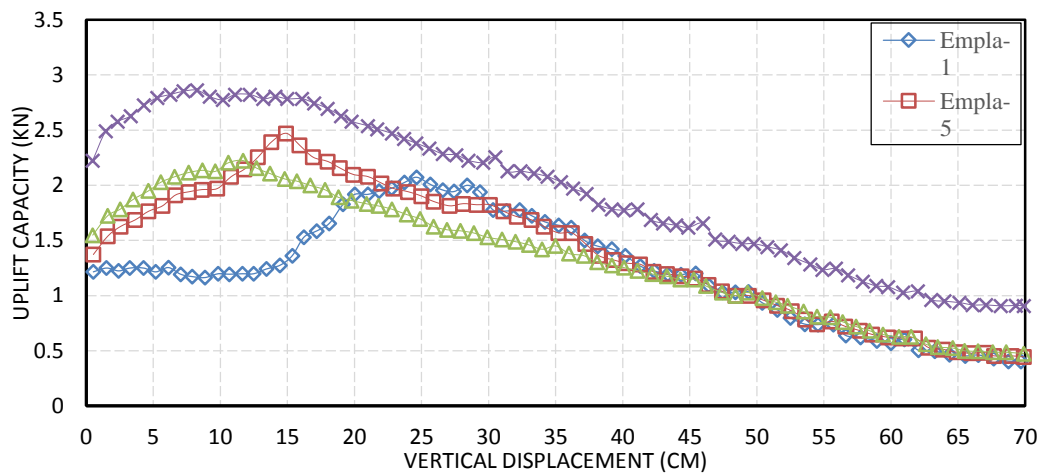


Fig. 3. Uplift results of EMPLAs 1 and 5 to 7

5. Conclusion

The main results of this study can be outlined as follows:

- The curvature of the plates has a great influence on the locking speed and activation of the reinforcements. In the plates with top curvature, an increase in the curvature of the plates has a positive effect on final bearing capacity due to an increase in the speed of plate expansion and embedded depth of reinforcement. In comparison, it has a negative and destructive effect on final bearing capacity due to an increase in the escape of effective soil mass over the plates. So, based on the experimental test results, the most optimal angle of curvature is 15°.
- In the plates with down curvature, an increase in curvature of the plate directly affects the increase in bearing capacity due to an increase in the expansion speed of plates, activation speed of reinforcement and its embedded depth, and a decrease in the escape of soil particles over the plates. The most optimal angle of curvature in laboratory tests for these anchors is 45°, which results in a decrease in the escape of the soil over the plates.
- Circular, square, and rectangular anchors presented the maximum to minimum bearing capacity, in the order of their appearance. The rectangular-shaped anchors showed the worst performance in bearing capacity, expansion and locking speed, and degradation potential in comparison to the other two shapes; therefore, they are not suggested to use.

6. References

- DAS BM, Shukla SK, "Earth anchors", Journal of Ross Publishing, 2013.
- Moghadam MJ, Zad A, Mehrannia N, Dastaran N, "Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018a, 10, 947-957.
- Randolph M, Gourvenec S, White D, Cassidy M, "Offshore geotechnical engineering", Spon Press New York, 2011.