

ارزیابی مکانیزم گسیختگی دیوارهای حائل مهار صفحه‌ای حاوی خرده لاستیک‌های بازیافتی با بکارگیری تکنیک PIV

متین جلالی مقدم^{۱*}، امیرعلی زاد^۱، نیما مهران‌نیا^۲

^۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
^۲ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۵ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۵ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

دیوار حائل
مکانیزم گسیختگی
مهار صفحه‌ای
خرده لاستیک
سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

چکیده: لاستیک خودروها مصالحی مصنوعی با ماندگاری بسیار بالایی هستند که تقریباً می‌توان آنها را در زمره مواد تجزیه‌ناپذیر به حساب آورد. انهدام سنتی حلقه لاستیک‌ها نظیر سوزاندن و دفن گسترده آنها سبب آلودگی‌های زیست محیطی جبران‌ناپذیری نظیر آزاد شدن فلزات سنگین آرسنیک، کروم، سرب، منگنز و نیکل و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود. امروزه از لاستیک‌های بازیافتی به عنوان مصالح جایگزین سبک در فعالیت‌های عمرانی همچون ساخت خاکریز دیوارهای حائل و بسترسازی جاده‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش، قابلیت پایداری و مکانیزم گسیختگی دیوار حائل تثبیت یافته با مسلح‌کننده‌های مکانیکی مهارهای صفحه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی بررسی گردیده و تاثیر شکل مربعی و دایره‌ای صفحات، چیدمان مسلح‌کننده‌ها و تاثیر افزودن خرده لاستیک‌ها تحت دو درصد وزنی ۱۰ و ۲۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مشاهده سطح لغزش بحرانی از تکنیک سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده است. بر این اساس، صفحات دایره‌ای در هر دو مقوله قابلیت باربری پاشنه بارگذاری و جایابی دیواره دارای عملکرد بهتری از صفحات مربعی بوده است. بیشترین افزایش قابلیت باربری در مخلوط ماسه-۱۰٪ وزنی خرده لاستیک بدست آمده است. افزایش درصد وزنی خرده لاستیک‌ها به ۲۰٪ سبب کاهش قابل توجه قابلیت باربری نسبت به خاکریز حاوی ۱۰٪ وزنی شده است. با این حال تغییر مکان‌های افقی دیواره در این مخلوط به میزان قابل توجهی کاهش یافته که این به سبب کاهش فشار جانبی وارده به مجموعه دیواره بوده است. با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک‌ها از شکل‌گیری گوه گسیختگی و به نوعی گسترش سطح لغزش دیواره کاسته شده بطوریکه گوه گسیختگی در مخلوط ماسه-۲۰٪ وزنی خرده لاستیک تشکیل نشده است.

Stingray و Duckbill, Manta Ray می‌باشد که فاقد هیچ گونه

عملیات حفاری و تزریق هستند [۶ و ۷].

عمده کاربری لاستیک‌های بازیافتی در کشور عزیزمان متاسفانه تنها به ساخت کفپوش پارک‌ها و زمین‌های چمن مصنوعی محدود گردیده است. از انواع کاربردهای لاستیک‌های فرسوده می‌توان به ساخت خاکریزهای با وزن سبک، خاکریزهای معمولی، دیوارهای حائل، پشت‌ریز پایه پل‌ها، عایق برای کاهش نفوذ یخبندان و لایه‌های زهکش برای جاده‌ها اشاره نمود [۸]. در حالت کلی لاستیک‌های فرسوده به شکل‌های تکه لاستیک^۱، چپیس لاستیک^۲، خرده لاستیک^۳ و سنباده لاستیک^۴ بازیافت می‌شوند تا به عنوان مصالح جایگزین بکار گرفته شوند [۹].

بر این اساس، محققینی در سال ۱۹۹۴ استفاده از خرده لاستیک‌ها با اندازه ظاهری ۵۰ میلی‌متر و کوچکتر را برای مقابله با وقوع تراکم غیرمجاز پیشنهاد دادند [۱۰]. محققینی در سال ۲۰۰۴ از بررسی مخلوط ماسه-تکه

۱- مقدمه

مهارهای صفحه‌ای از یک صفحه‌ی باربر مدفون شونده در خاک به همراه یک تاندون میلگردی یا کابلی برای انتقال بار سازه به خاک تشکیل می‌شوند. در کشورهای توسعه یافته از این مهارهای مکانیکی به شکل گسترده‌ای برای تقویت فونداسیون‌ها، پایداری دیوارهای حائل، تثبیت مخازن و سکوهای شناور دریایی، تثبیت خطوط لوله مدفون و مستغرق، ممانعت از بالا زدگی دکل‌های انتقال برق، دوختن کابل‌های کششی پل‌های معلق به زمین، پایداری سازه‌های دریایی در برابر تلاطم آب‌های آزاد و مهاربندی در بسیاری از کاربردهای مهندسی دیگر استفاده می‌شود [۱] و [۲]. امروزه از انواع مهارهای صفحه‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی، در خشکی و دریا استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به مهارهای صفحه‌ای افقی، مایل و قائم، مهارهای اصطکاکی، مهارهای اصطکاکی عمودی بارگذاری شونده، مهارهای صفحه‌ای مکشی دفن شونده و مهارهای دینامیکی نفوذ کننده اشاره نمود [۳-۵]. نسل جدید مهارهای مکانیکی، مهارهای صفحه‌ای

- 1 Tire Shreds
- 2 Tire Chips
- 3 Tire Crumbs
- 4 Tire Buffings

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: A.zad@iauctb.ac.ir

نشست صفحه بارگذاری طی اجرای بیش از سه لایه مخلوط رسیدند [۲۱] و [۲۲].

بر این اساس، اهداف اصلی مقاله حاضر ارائه نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام شده به منظور ارزیابی مواردی از قبیل تاثیر شکل مربعی و دایره‌ای صفحات مهار، ابعاد آنها، چیدمان مسلح‌کننده‌ها و اثر خرده‌های لاستیک‌های بازیافتی تحت درصدهای وزنی مختلف روی پایداری دیوار حائل و مکانیزم گسیختگی آن بوده است. به منظور مشاهده سطوح لغزش شکل گرفته در خاکریز و به عبارتی گوه گسیختگی دیواره از تکنیک سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)^۲ استفاده شده است [۲۳].

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و ساخت دیوارهای حائل از مقیاس کاهنده ابعاد ۱ به ۱۰ استفاده شده است [۲۶]. بر این اساس تمامی طول‌های موجود بر عدد ۱۰ تقسیم گردیده است. به این ترتیب، برای دیوار حائل به طول و ارتفاع ۳ متر، ابعاد دیواره به ۳۰ سانتیمتر تقلیل یافته است. برای رویه دیوارهای حائل دائمی عمدتاً از مقاطع بتنی پیش ساخته یا یکپارچه بتن‌ریزی شده استفاده می‌شود. محقق در سال ۲۰۰۳ با انجام آنالیز ابعادی، چهار نوع مصالح با ضخامت‌های معادل را به عنوان رویه بتنی ۳۰ سانتیمتری در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی معرفی نمود که در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۴]. E_m و t_m به ترتیب ضخامت و سختی مصالح معادل رویه بتنی ۳۰ سانتیمتری هستند. بر این اساس در تمامی آزمایش‌ها از ورق آلومینیومی با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر استفاده شده است.

خاک بکار رفته در تمامی آزمایش‌ها ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی بوده است. ماسه مورد استفاده بر اساس طبقه بندی متحد، دانه‌بندی یکنواختی داشته و ماسه بد دانه بندی SP با اندازه موثر $D_{10} = 0/22mm$ ، ضریب یکنواختی $C_u = 1/36$ و ضریب انحناء $C_c = 1/18$ بوده است. منحنی دانه بندی خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مصالح معادل به منظور شبیه‌سازی رویه‌ای بتنی

به ضخامت ۳۰ سانتیمتر در آزمایشگاه

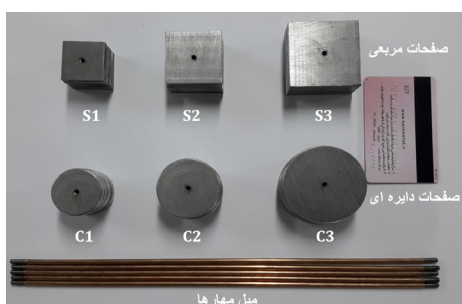
Table 1. Equivalent materials for simulating a 300 mm-thick concrete facing

جنس رویه	E_m (GPa)	t_m (mm)
فولاد	۲۱۰	۰/۶۴
آلومینیوم	۷۰	۰/۹
میکروبتن	۱۰	۱/۷۵
پلی پروپیلین	۰/۹	۳/۹

لاستیک، ۳۵٪ درصد وزنی را به عنوان درصد بهینه معرفی کرده و افزایش مقاومت برشی را با افزایش نسبت ظاهری تکه لاستیک‌ها در درصد وزنی معین ثابت کردند [۱۱]. قضاوی و سخی در سال ۲۰۰۵ و محقی دیگر در سال ۲۰۰۶ با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی مخلوط‌های ماسه-تکه لاستیک افزایش زاویه اصطکاک را تحت نسبت ظاهری بهینه، با افزایش درصد تکه لاستیک‌ها و افزایش تراکم مخلوط گزارش کردند [۱۲ و ۱۳]. مقدس تفرشی و نوروزی در سال ۲۰۱۲ افزایش ۲/۶۸ برابری ظرفیت باربری پاشنه بارگذاری مربعی را برای مخلوط خاک-تکه لاستیک تحت درصد بهینه ۵٪ نسبت به خاک تنها ثابت کردند [۱۴]. در یک پژوهش در سال ۲۰۱۴ طی افزودن خرده لاستیک به خاک منبسط شونده، کاهش قابل توجه پتانسیل تورم (آماس) ثابت گردید و تاثیر بهتر خرده لاستیک‌های درشت (۲ الی ۴/۷۵ میلی‌متر) نسبت به خرده لاستیک‌های ریز (۰/۷۵ الی ۲ میلی‌متر) نتیجه گرفته شد [۱۵]. محقی در سال ۲۰۱۵ کاهش ۴۳ درصدی درجه تخلخل را با افزودن ۴۰٪ وزنی چپس لاستیک به ماسه و افزایش زاویه اصطکاک داخلی را تا ۳۰٪ درصد وزنی چپس لاستیک نشان دادند [۱۶]. در همین سال، محقی با انجام آزمایش‌های سه محوری روی مخلوط ماسه-خرده لاستیک، افزایش تنش انحرافی، مدول یانگ و تغییر رفتار مخلوط را از حالت نرم به ترد طی افزودن سیمان با سه درصد وزنی ۱، ۳ و ۵٪ نشان دادند [۱۷]. پژوهشگرانی در سال ۲۰۱۶ از بررسی اندرکنش ذرات خرده لاستیک در مخلوط ماسه-خرده لاستیک سیمانی با استفاده از تکنیک اسکن تصاویر الکترونیکی مایکروگراف، تغییر شکل‌های چشمگیر خرده لاستیک‌ها را تحت بارگذاری، به هنگام حضور کم ذرات ماسه در مخلوط گزارش کردند. آنها نشان دادند برای مخلوط‌های با ماسه زیاد، ذرات خرده لاستیک دیگر برابر نبوده اما نقش مهمی در مقابله با کمانش (پیچش) ماسه ایفا می‌کنند [۱۸]. در سال ۲۰۱۷ محقی از آزمایش مخلوط‌های خرده شیشه بازیافتی-خرده لاستیک، کاهش پارامترهای مقاومت برشی، مدول یانگ و افزایش تراکم پذیری مخلوط را با افزایش درصد خرده لاستیک‌ها از ۱۰ تا ۴۰ درصد ثابت نمودند [۱۹]. با انجام آزمایش‌های فشاری محصور نشده و سه محوره توسط دو محقق در سال ۲۰۱۷ بر روی مخلوط خاک-خاکستر بادی-سنباده لاستیک-سیمان، کاهش مقاومت فشاری محصور نشده و سختی مخلوط خاک-خاکستر بادی با اضافه شدن سنباده لاستیک‌ها نشان داده شد. درصدهای بهینه معرفی شده در پژوهش آنها عبارت از ۳۵ تا ۵۰ درصد خاکستر بادی، ۵٪ سنباده لاستیک و ۲٪ سیمان در مخلوط بوده است [۲۰]. مقدس تفرشی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ اثر تسلیح چند لایه ژئوسل را در دو حالت خاک بکر و مخلوط حاوی ۸٪ وزنی تکه لاستیک در مقیاس واقعی بررسی کرده و به نتایجی از قبیل حصول باربری بیشتر و نشست کمتر صفحه بارگذاری طی تعویض خاک بین لایه‌های ژئوسل^۱ با مخلوط خاک-تکه لاستیک رسیده و به عدم افزایش باربری و عدم کاهش

به طور معمول در اکثر پروژه‌های ساخت دیوارهای حائل، فواصل افقی و عمودی مسلح‌کننده‌ها دارای حداقل و حداکثر اندازه ۱ الی ۳ متری از یکدیگر هستند. برای مسلح‌کننده‌هایی که بر روی آنها عمل پس‌کشیدگی^۱ انجام می‌شود، همچون کابل‌ها^۲ و مونوبارها^۳ (میخ‌هایی که پس از انجام تمهیدات خاص عملیات پس‌کشیدگی بر روی آنها تحت ضوابط دقیق آیین‌نامه‌ای انجام شده و در حالت فعال قفل می‌شوند)، فواصل افقی و عمودی در گستره بالای محدوده فوق‌الذکر قرار می‌گیرد. از آنجایی که عملیات پس‌کشیدگی روی این نوع از مهارهای صفحه‌ای انجام نمی‌شود، فواصل افقی و عمودی ۱/۵ متری برای آنها انتخاب گردید و با ضرب این عدد در مقیاس کاهنده ابعاد، مقدار ۱۵ سانتیمتر برای فواصل مرکز تا مرکز مسلح‌کننده‌ها در دیواره بدست آمد. در شکل ۲ سه آرایش رایج ۵ مهاره، لوزی و مربعی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

طول میل مهارهای بکار رفته برابر ۳۰ سانتیمتر بوده که مقیاس کوچک شده میل مهار ۳ متری طی اعمال ضریب کاهنده ۱ به ۱۰ در واقعیت بوده‌اند. همچنین قطر آنها برابر ۴ میلی‌متر می‌باشد که معادل میلگرد به قطر ۴ سانتیمتر (میلگرد نمره ۴۰) بوده است. در شکل ۳ میل مهارها به همراه ۶ نوع مختلف صفحات مهار نشان داده شده است.



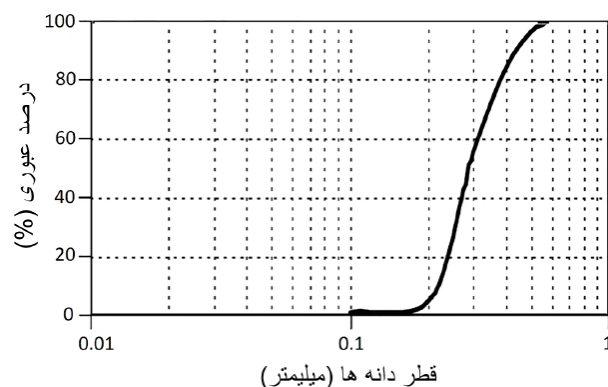
شکل ۳: مسلح‌کننده‌های مکانیکی مهار صفحه‌ای

Fig. 3. Mechanical plate anchor reinforcements

از ۲ نوع صفحه مهار با شکل‌های مربعی و دایره‌ای، هر کدام با ۳ مساحت مختلف استفاده شده است. اندازه صفحات دایره‌ای کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب معادل صفحات مربعی کوچک، متوسط و بزرگ هستند. در جدول ۲ مشخصات کامل مهارهای صفحه‌ای اشاره شده است.

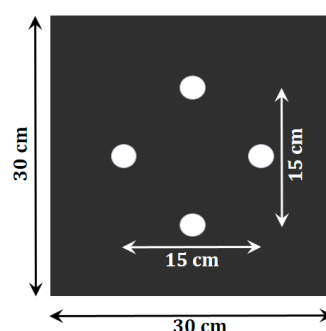
تمامی خرده لاستیک‌های بکار رفته برای افزودن به خاک الک شده و تنها خرده لاستیک‌های رد شده از الک نمره ۴ و باقی مانده روی الک نمره ۶ (قطر چشمه ۳/۳۵ میلی‌متر) مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵]. علت انتخاب این اندازه آن بوده که چندین محقق در بررسی‌های خود ثابت نمودند استفاده از خرده-لاستیک‌ها با اندازه ظاهری کوچکتر از این مقدار یا همان پودر لاستیک منجر به کاهش زیاد مقاومت خاک و به دنبال آن کاهش ظرفیت

- 1 Posttensioning
- 2 Strand
- 3 Mono Bars

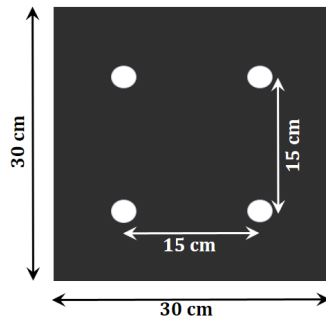


شکل ۱: منحنی دانه‌بندی خاک

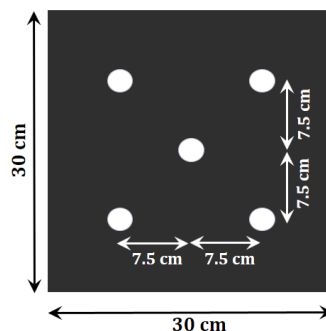
Fig. 1. Grain size distribution of backfill soil



الف: چیدمان لوزی



ب: چیدمان مربعی

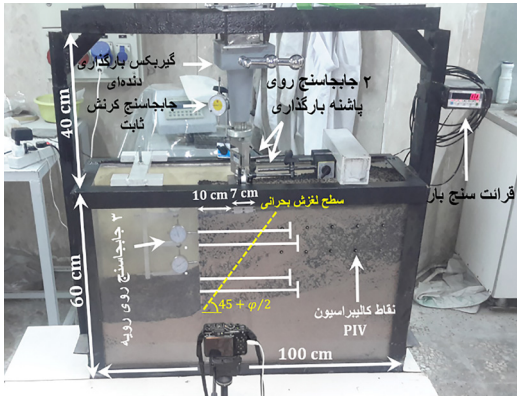


ج: چیدمان ۵ مهاره

شکل ۲: سه نوع چیدمان مسلح‌کننده‌ها در دیوار حائل

Fig. 2. Arrangement of plate anchors

شرایط کرنش مسطح بوده است. برای مشاهده یک سمت دیواره در خلال آزمایش‌ها و عکسبرداری از سطح آن، در یک وجه محفظه طلق شفاف (پلکسی گلس) با ضخامت مناسب ۳ سانتیمتر تعبیه گردیده است. این ضخامت به منظور حصول اطمینان از عدم تغییر شکل و شکم دادگی آن در جریان بارگذاری در آزمایش‌ها بوده است. در شکل ۵ محفظه آزمایش، سیستم بارگذاری و ابزارگذاری‌های انجام شده نشان داده است.



شکل ۵: محفظه آزمایش به همراه ابزارگذاری‌های انجام شده

Fig. 5. Test box with instrumentation

با استفاده از دوربین عکاسی کنون پاورشات G10 حاوی حسگر CCD و با قدرت عکسبرداری ۱۴/۷ مگاپیکسل، عکسبرداری از یک سمت دیواره در انتهای هر مرحله بارگذاری انجام شده و سپس تغییر مکان ذرات خاک با استفاده از تحلیل PIV میان تصاویر متوالی اندازه‌گیری شده است. دوربین بر روی سه پایه‌ای نصب گردیده و نسبت به سطح افق تراز شده است. نکته حائز اهمیت آن است که در خلال انجام هر آزمایش، دوربین در محل خود تا انتهای آزمایش ثابت باقی مانده است. پس از اندازه‌گیری در فضای تصویر، بردارهای جابجایی حاصل با استفاده از تبدیل فتوگرامتریک از فضای تصویر به فضای جسم منتقل شده‌اند. پارامترهای انتقال بر اساس مشخصات فنی دوربین، شرایط تصویر برداری و مشخصات پنجره مشاهده و با روش کانون‌یابی تعیین گردیده‌اند.

۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

در حالت کلی، روند ساخت دیواره‌ها در تمامی آزمایش‌ها یکسان و از مراحل خاکریزی، تراکم، نصب رویه و قرار دادن مسلح‌کننده‌ها در هر تراز ارتفاعی تشکیل شده است. بر این اساس، خاکریزی هر لایه از پایین محفظه صورت گرفته و تا رسیدن به محل استقرار رویه ادامه یافته است. با نصب رویه در مکان تعیین شده، نصب مسلح‌کننده‌ها و اتصال آنها به رویه انجام گردیده است. هر دو سمت میل مهارها رزوه بوده تا از یک سمت به صفحات مهار و از سمت دیگر توسط مهره از درون سوراخ‌های تعبیه شده به رویه

برابری می‌شود [۱۰ و ۱۵]. از سوی دیگر، از آنجایی که آزمایش‌های حاضر با استفاده از تکنیک سرعت سنجی تصویری ذرات انجام شده، استفاده از اندازه‌های بزرگتر از این مقدار نظیر چپیس لاستیک، سمباده لاستیک، تکه لاستیک و شکل‌های دیگر میسر نبوده است. در شکل ۴ نمونه‌ای از خرده لاستیک‌های الک شده نشان داده شده است. خرده لاستیک‌ها بصورت کاملاً خرد شده و آماده از کارخانه بازیافت لاستیک در شهرک صنعتی واقع در شهر ساوه تهیه گردیدند.

جدول ۲: مشخصات مهارهای صفحه‌ای

Table 2. Properties of anchor plates

صفحه مهار	نماد اختصاری	اندازه ضلع / شعاع صفحه (cm)	ضخامت صفحه (cm)	طول مهار (cm)	قطر میل مهار (cm)
مربعی کوچک	S1	۳	-	-	-
مربعی متوسط	S2	۴	-	-	-
مربعی بزرگ	S3	۵	-	-	-
دایره‌ای کوچک	C1	۱/۶۹	۰/۳	۳۰	۰/۴
دایره‌ای متوسط	C2	۲/۲۵	-	-	-
دایره‌ای بزرگ	C3	۲/۸۲	-	-	-



شکل ۴: الک کردن خرده لاستیک‌ها

Fig. 4. Sample of sieved RCR

به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش آنالیز ابعادی، برای ساخت دیوار حائل به ابعاد ۳۰ سانتیمتر، محفظه‌ای به طول ۱۰۰ سانتیمتر، عرض ۳۰ سانتیمتر و عمق ۶۰ سانتیمتر ساخته شده است. مقدار بیشتر طول و عمق محفظه با هدف جلوگیری از پیدایش اثرات مرزی بر نتایج آزمایش‌ها بوده و عرض ۳۰ سانتیمتری محفظه، برابر با طول دیواره، به منظور حصول اطمینان از برقراری کامل

جدول ۳: مشخصات آزمایش‌های انجام شده
Table 3. Details of performed tests

مهاری	چیدمان مسلح‌کننده‌ها	خاک (% خرده لاستیک)
C1	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪
C2	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪
C3	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪
S1	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪
S2	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪
S3	لوزی، مربعی، ۵ مهاره	بکر، ۱۰٪، ۲۰٪

۴- نتایج آزمایش‌ها

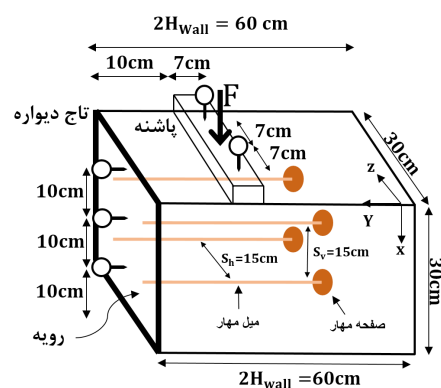
به سبب زیاد بودن تعداد آزمایش‌های انجام شده و به منظور ارائه تمامی داده‌های بدست آمده در مقاله حاضر، نتایج آزمایش‌ها به صورت نمودارهای میله‌ای برای ظرفیت باربری پاشنه بارگذاری و جایجایی‌های افقی دیواره، از منظر تاثیر صفحات مهار، آرایش مسلح‌کننده‌ها و اثر خرده لاستیک‌ها ارائه گردیده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. در تمامی نمودارها، Q معرف ظرفیت باربری پاشنه بارگذاری و δ_p معرف تغییر مکان افقی دیواره است.

۴-۱- تاثیر اندازه صفحات مهار و شکل آنها

در این بخش، چیدمان مهارهای صفحه‌ای و درصد وزنی خرده-لاستیک‌های اضافه شده به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده و شکل صفحات مهار و ابعاد آنها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. از مقایسه نمودارهای قابلیت باربری شکل ۷، بیشترین ظرفیت باربری برای هر سه نوع شرایط خاک بکر، خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک و خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک به ترتیب برای صفحات مهار بزرگ، متوسط و کوچک بوده است. با تغییر ابعاد صفحات از کوچک به متوسط، متوسط به بزرگ و کوچک به بزرگ، به ترتیب بطور میانگین یک افزایش ۶۵، ۲۵ و ۱۰۷ درصدی در قابلیت باربری پاشنه بارگذاری بدست آمده است. در صفحات کوچک، متوسط و بزرگ طی تغییر شکل صفحات از مربعی به دایره‌ای، به ترتیب بطور میانگین یک افزایش ۶/۸، ۷ و ۱/۴ درصدی در قابلیت باربری پاشنه بارگذاری حاصل گردیده است. از مجموع تمامی آزمایش‌ها، صفحات دایره‌ای در ۵۹ درصد آزمایش‌ها منجر به حصول باربری بیشتری نسبت به صفحات مربعی شده‌اند.

از مقایسه نمودارهای تغییر مکان‌های افقی دیواره مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه صفحات مهار با ابعاد کوچک کمترین ظرفیت باربری را ارائه کرده‌اند، بیشترین تغییر مکان‌های افقی دیواره نیز در این مسلح‌کننده‌ها اتفاق افتاده که عدم کارایی مناسب و مقاومت ناچیز آنها را در مقوله پایداری

اتصال داده شوند. سپس با خاکریزی لایه‌های پشت دیواره و رسیدن به تراز استقرار مسلح‌کننده‌های بالایی، نصب و اتصال آنها به رویه تکرار گردیده است. در نهایت با خاکریزی مجدد تا رسیدن به تاج دیواره، عملیات ساخت دیوار حائل پایان یافته است. نکته قابل توجه، ثابت نگهداشتن ضخامت هر لایه به میزان ۵ سانتیمتر و انجام تراکم به هر دو صورت کوبشی و ارتعاشی تا رسیدن به تراز ارتفاعی لایه مورد نظر به منظور برقراری شرایط تراکم ثابت در آزمایش‌ها با وزن مخصوص ثابت ۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. با هدف دستیابی به بالاترین دقت ممکن و ثابت بودن نرخ اعمال بار در تمامی آزمایش‌ها از شیوه بارگذاری کرنش ثابت استفاده شده است. برای رسیدن به این مهم، طی تمهیدات صورت گرفته بر روی شفت متحرک سیستم بارگذاری، جابجاسنجی نصب گردید تا طی آن بارگذاری به صورت کرنش ثابت و با اندازه یکسان ۳ میلیمتر در هر مرحله انجام شود. لازم به ذکر است که علت انتخاب نحوه بارگذاری کرنش ثابت در ازای حالت تنش ثابت، افزایش میزان دقت در آزمایش‌ها و حصول نتایج دقیق‌تر بوده است. هر آزمایش در ۷ مرحله انجام گردیده است. مرحله اول حالت فاقد اعمال بار بوده و عکس اول از سطح خاک گرفته شده است. با انجام بارگذاری طی جایجایی ثابت ۳ میلیمتر و قرائت بار وارده از روی نشانگر بار، قرائت نشست پاشنه بارگذاری از روی ۲ جابجاسنج روی آن و قرائت جایجایی‌های افقی دیواره از روی ۳ جابجاسنج جلوی آن، عکسبرداری از سطح خاک انجام شده و عکس دوم ذخیره گردیده است. این کار مجموعاً در ۷ مرحله تا رسیدن به نشست ۱/۸ سانتیمتری پاشنه بارگذاری ادامه یافته است. در شکل ۶ شماتیک دیوار حائل، پاشنه بارگذاری نواری، فاصله آن از تاج دیواره، مهارهای صفحه‌ای مدفون تحت چیدمان مربعی به انضمام تمامی جابجاسنج‌های مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ تمامی ۵۴ حالت آزمایش انجام شده اشاره گردیده است.

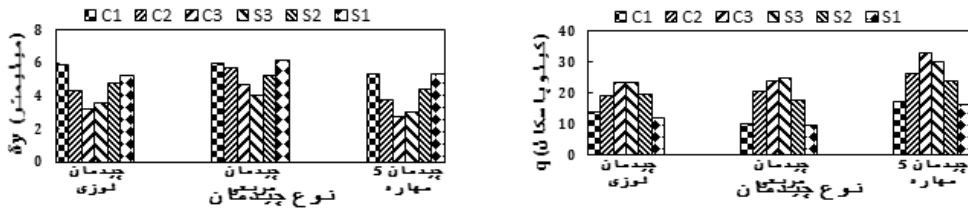


شکل ۶: شماتیک دیوار حائل

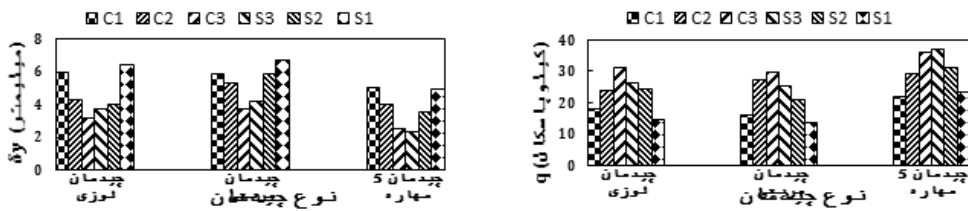
Fig. 6. Schematic diagram of retaining wall

به ترتیب بطور میانگین یک کاهش ۳، ۵ و ۱/۷ درصدی در تغییرمکان‌های افقی دیواره بدست آمده است. از مجموع تمامی آزمایش‌ها، صفحات دایره‌ای در ۵۵ درصد آزمایش‌ها منجر به وقوع تغییرمکان‌های کمتر دیواره نسبت به صفحات مربعی شده‌اند. بر اساس درصدهای حاصل از مقایسه نتایج، تفاوت شکل مربعی و دایره‌ای صفحات با یکدیگر مشاهده شده و می‌توان شکل دایره‌ای را بهتر از شکل مربعی در هر دو مقوله مورد اشاره انتخاب نمود.

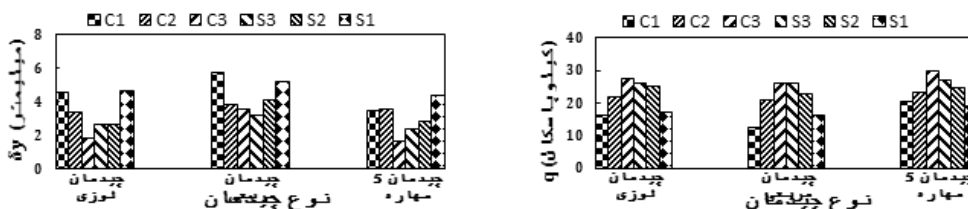
دیواره نشان می‌دهد. با تغییر ابعاد صفحات از کوچک به متوسط، متوسط به بزرگ و کوچک به بزرگ، به ترتیب بطور میانگین یک کاهش ۱۷، ۲۵ و ۳۸ درصدی در جابجایی‌های افقی دیواره حاصل گردیده که این نشان دهنده دوختن مناسب گوه گسیختگی به ناحیه مقاوم پشت آن در صفحات مهارى متوسط و بزرگ و مقاومت مناسب آنها در مقابله با وقوع جابجایی‌های غیرمجاز است. مشابه مورد اشاره شده در مقوله ظرفیت باربری، با تغییر شکل صفحات از مربعی به دایره‌ای در صفحات کوچک، متوسط و بزرگ،



الف) خاک بکر



ب) خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک



ج) خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک

شکل ۷: تغییرات نشست پاشنه بارگذاری در برابر قابلیت باربری و تغییرمکان افقی دیواره بر اساس شکل صفحات مهارى:

الف) خاک بکر ب) خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک ج) خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک

Fig. 7. Comparisons of settlement of toe of the wall against the footing bearing capacity and the wall horizontal displacement based of plate anchor's shape for a) soil b) soil with 10% RCR c) soil with 20% of RCR

و در مقابل، آرایش یا چیدمان مسلح‌کننده‌ها به عنوان متغیر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. بر طبق نمودارهای ارائه شده در شکل ۸، از مقایسه نمودارهای ظرفیت

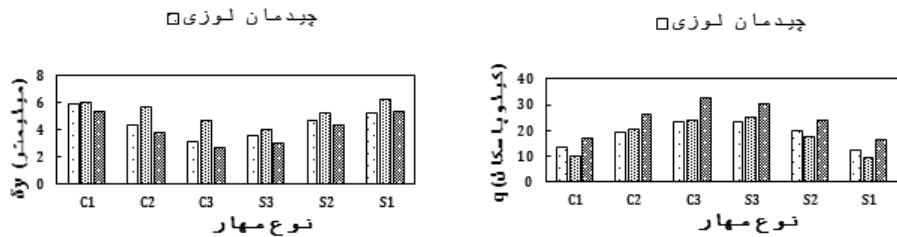
۴-۲- تاثیر آرایش مسلح‌کننده‌ها بر خلاف توضیحات اشاره شده در بالا، در این بخش شکل و ابعاد صفحات مهارى و درصد وزنی خرده لاستیک‌ها به عنوان پارامترهای ثابت

بر این اساس پارامتر غالب در آزمایش‌ها از شکل صفحات مهار، اندازه آنها و چیدمان مسلح‌کننده‌ها به مقدار خرده-لاستیک موجود در خاکریز تغییر یافته است.

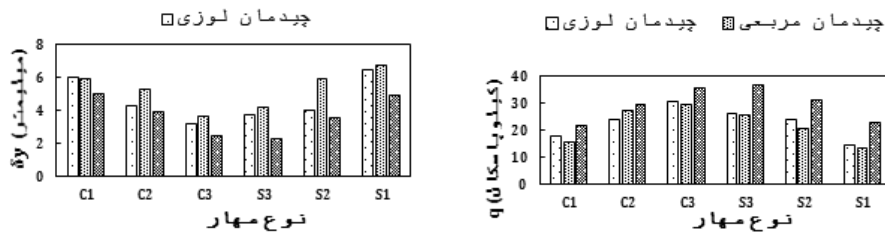
بر اساس نمودارهای تغییرمکان‌های افقی دیواره، علاوه بر حصول کمترین میزان باربری در چیدمان مربعی، بیشترین تغییرمکان‌های افقی دیواره نیز در این چیدمان اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر قفل‌شدگی مسلح‌کننده‌ها در چیدمان مربعی بسیار کمتر از دو چیدمان دیگر بوده و با انجام عملیات بارگذاری در تاج دیواره گوه گسیختگی با مقاومت کمتری از جانب مسلح‌کننده‌ها تشکیل گردیده است. با تغییر چیدمان از مربعی به لوزی، لوزی به ۵ مهاره و مربعی به ۵ مهاره، به ترتیب بطور میانگین یک کاهش ۱۵/۷، ۱۰ و ۲۱ درصدی در تغییرمکان‌های افقی دیواره اتفاق افتاده است. از مقایسه درصدها، اختلاف قابل توجهه جابجایی دیواره در چیدمان مربعی از دو چیدمان دیگر و به عبارتی نامناسب بودن آن قابل نتیجه‌گیری است.

باربری برای هر سه نوع شرایط خاک بکر، خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک و خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک، بیشترین قابلیت باربری دیواره به ترتیب برای چیدمان ۵ مهاره (به لحاظ داشتن یک مسلح‌کننده بیشتر)، چیدمان لوزی و در نهایت چیدمان مربعی بوده است. با تغییر چیدمان از مربعی به لوزی، لوزی به ۵ مهاره و مربعی به ۵ مهاره، به ترتیب بطور میانگین یک افزایش ۱۰/۷، ۳۰/۶ و ۵۱/۴ درصدی در قابلیت باربری پاشنه حاصل گردیده است.

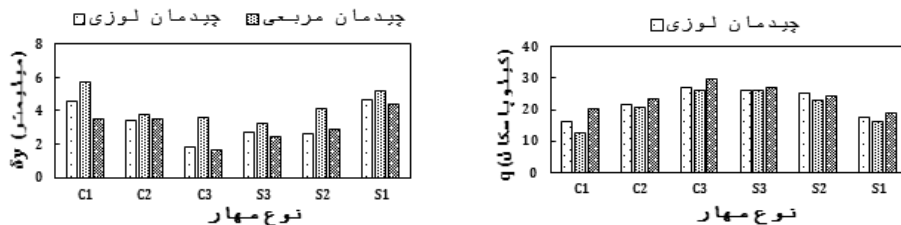
نکته قابل توجه در اینجا آن است که با افزایش مقدار خرده لاستیک موجود از شرایط خاک بکر به ۱۰٪ وزنی و از ۱۰٪ به ۲۰٪ وزنی، اختلاف باربری آزمایش‌ها برای هر مهار کاهش یافته است. این شرایط را می‌توان در نمودارهای باربری خاکریز حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک مشاهده نمود. مطابق آنچه که به هنگام انجام آزمایش‌های حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک مشاهده گردید، میزان خرده لاستیک‌های موجود در خاکریز بسیار زیاد بوده و



الف) خاک بکر



ب) خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک



ج) خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک

شکل ۸: تغییرات نشست پاشنه بارگذاری در برابر قابلیت باربری و در برابر تغییرمکان افقی دیواره بر اساس چیدمان مسلح‌کننده‌ها:

الف) خاک بکر ب) خاک حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک ج) خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک

Fig. 8. Comparisons of settlement of toe of the wall against the footing bearing capacity and the wall horizontal displacement based of plate anchor's arrangements for a) soil b) soil with 10% RCR c) soil with 20% of RCR

۴-۳- تاثیر افزودن خرده لاستیک

از مقایسه نمودارهای ستونی شکل ۸ برای سه خاکریز مختلف یعنی خاک فاقد خرده لاستیک، خاک حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک و خاک حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک، مشاهده می‌شود که خرده لاستیک‌ها بر روی نتایج بسیار تاثیرگذار بوده و علاوه بر افزایش ظرفیت باربری پاشنه بارگذاری یا همان قابلیت تحمل دیواره، سبب کاهش تغییرمکان‌های افقی شده است. در خاکریز حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک، ظرفیت باربری و تغییرمکان‌های افقی نسبت به خاک بکر به ترتیب دچار افزایش و کاهش قابل توجهی گردیده است. در خاکریز حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک، ظرفیت باربری نسبت به خاک بکر افزایش یافته ولی نسبت به خاکریز حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک در اکثر آزمایش‌ها کاهش یافته است. به عبارت دیگر، بیشترین ظرفیت باربری بدست آمده به ترتیب برای خاکریز حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک، خاکریز حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک و خاک بکر بوده است. سیر صعودی درصد وزنی خرده لاستیک‌ها در خاکریز (خاک بکر به مخلوط ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک، مخلوط ۱۰٪ وزنی به مخلوط ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک و خاک بکر به مخلوط ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک)، به ترتیب بطور میانگین منجر به یک افزایش ۲۶ درصدی، کاهش ۸/۲ درصدی و افزایش ۱۴/۵ درصدی در قابلیت باربری پاشنه شده که این نشان دهنده توقف سیر صعودی قابلیت باربری دیواره طی افزایش درصد وزنی خرده لاستیک‌ها از ۱۰ به ۲۰ درصد است.

در سمت مقابل، با افزایش درصد وزنی خرده لاستیک‌ها تغییر مکان‌های افقی دیواره دچار کاهش قابل توجهی شده‌اند به طوری که سیر صعودی درصد وزنی خرده لاستیک‌ها در خاکریز (خاک بکر به مخلوط ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک، مخلوط ۱۰٪ وزنی به مخلوط ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک و خاک بکر به مخلوط ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک)، به ترتیب بطور میانگین منجر به یک کاهش ۵/۵، ۲۱/۳۵ و ۲۴/۲ درصدی در جابجایی‌های افقی دیواره شده است. علت این کاهش قابل توجه را می‌توان به قابلیت جذب بار (نیرو) خرده- لاستیک‌ها دانست.

مطابق آنچه که به هنگام انجام آزمایش‌ها مشاهده گردید، با اضافه شدن خرده لاستیک‌ها به خاک، پراکندگی دانه‌های لاستیک در هر آزمایش یکسان نبوده و تجمع یافتگی توده‌ای آنها به شکلی غیر یکنواخت در قسمت‌های مختلف خاکریز با افزایش درصد وزنی آنها اتفاق افتاد که این موضوع توانسته عامل موثری در پراکندگی اندک نتایج بوده باشد. از قرائت دو کرنش سنج روی پاشنه بارگذاری، نشست پاشنه در خاک فاقد خرده لاستیک یکنواخت بوده ولی با اضافه شدن خرده لاستیک‌ها نشست آن از شرایط متقارن خارج گردیده و با افزایش درصد وزنی آنها در خاکریز، اختلاف قرائت‌ها نیز بیشتر شده است. بیشترین مقدار نشست نامتقارن پاشنه بارگذاری مربوط به خاکریز حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک بوده است.

۴-۴- تحلیل‌های سرعت سنجی تصویری ذرات-PIV

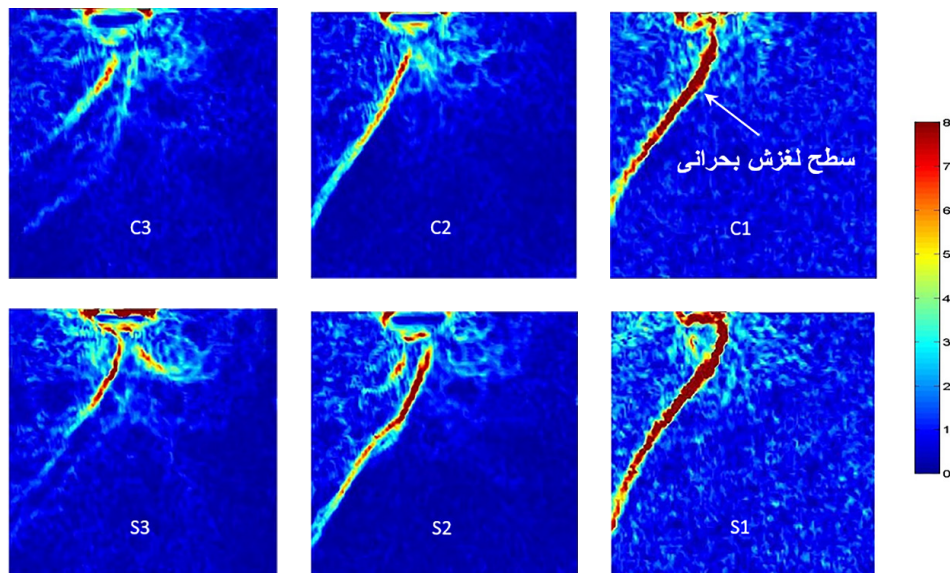
نتایج حاصل از پردازش تصاویر از سه منظر شکل و اندازه صفحات مهاری، چیدمان مسلح‌کننده‌ها و اثر خرده لاستیک‌ها بر روی میزان شکل گیری گوه گسیختگی یا همان سطح لغزش بحرانی مورد مقایسه قرار گرفته است.

در شکل ۹ تصاویر تحلیلی PIV برای ۶ آزمایش انجام شده با مهارهای صفحه‌ای مختلف، برای آرایش ۵ مهاره در خاک بکر نشان داده شده است. ستون موجود در سمت راست تصاویر معرف بازه یا محدوده کرنش‌های تعریف شده در PIV است. از مقایسه این تصاویر با گستره کرنش‌ها مشاهده می‌شود که گوه گسیختگی در هر دو صفحات مربعی و دایره‌ای با ابعاد کوچک، به طور کامل تشکیل گردیده و کرنش‌های موجود در سطوح لغزش آنها حاوی بیشترین میزان است. در صفحات مهاری مربعی و دایره‌ای با ابعاد متوسط، شکل گیری گوه گسیختگی کامل نبوده و به عبارت دیگر سطح لغزش بحرانی در عمقی از خاکریز دیواره و با فاصله کمی از رویه مستهلک گردیده است. در این مسلح‌کننده‌ها، کرنش‌های موجود در سطح لغزش گستره پایینی را به خود اختصاص داده و کرنش‌های کوچکی در سطح لغزش بحرانی اتفاق افتاده است. در صفحات مهاری مربعی و دایره‌ای با ابعاد بزرگ، گوه گسیختگی تشکیل نشده و تنها سطوح لغزش ناچیزی در عمق خاکریز ایجاد شده که با طی مسیری کوتاه در زیر پاشنه بارگذاری محو شده است. به لحاظ شکل صفحات مهاری، مشاهده می‌شود که در سطوح لغزش مربوط به صفحات دایره‌ای کرنش‌های کوچکتری نسبت به صفحات مربعی اتفاق افتاده است. به منظور ارزیابی میزان تاثیرگذاری چیدمان مسلح‌کننده‌ها، در شکل ۱۰ به ترتیب تصاویر تحلیلی برای چیدمان‌های مربعی، لوزی و ۵ مهاره، تنها برای مهار C2 در خاک بکر نشان داده شده است.

در تایید نتایج ارائه شده در رابطه با تغییرمکان‌های افقی دیواره که در ارتباط مستقیم با میزان شکل گیری سطح لغزش است، گوه گسیختگی در هر دو چیدمان مربعی و دایره‌ای کامل بوده ولی اندازه کرنش‌های ذرات در سطح لغزش چیدمان لوزی به مراتب کمتر از چیدمان مربعی بوده که این ثابت کننده وقوع جابجایی‌های کمتر در این چیدمان نسبت به چیدمان مربعی است. مطابق توضیحات پیشین، گوه گسیختگی در چیدمان ۵ مهاره به صورت ناقص بوده و کرنش‌های موجود در سطح لغزش بحرانی در عمق خاکریز به کمترین میزان خود رسیده است. برای ارزیابی میزان تاثیر خرده لاستیک‌ها بر روی گوه گسیختگی، در شکل ۱۱ تحلیل‌های PIV برای سه خاکریز مختلف یعنی خاک بکر، خاک حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک و خاک حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک، تنها برای چیدمان ۵ مهاره و مسلح‌کننده C2 نشان داده شده است. با افزودن خرده لاستیک‌ها، تجمع یافتگی و انباشت توده‌ای آنها به صورت کاملاً تصادفی در خاکریز دیواره به مراتب مشاهده گردید که با فاصله زمانی اندکی پس از عملیات بارگذاری، فرار ذرات خاک در بین آنها و در سطح مشترک با پلکسی گلس اتفاق افتاده است. پس از استخراج نتایج از تحلیل‌های PIV، کرنش‌های بزرگ کاملاً

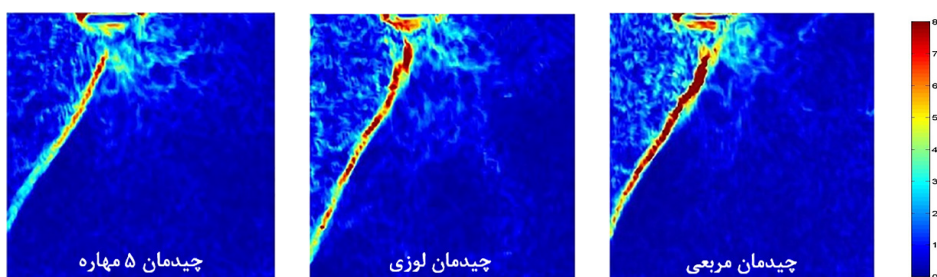
است. در خاک حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک از آنجایی که تجمع یافتگی خرده لاستیک‌ها در سطح پلکسی گلس و در محل لغزش به صورت اتفاقی کمتر بوده، از این رو گوه گسیختگی با واقعیت بیشتری در مقایسه با داده‌های قرائت شده حاصل گردیده و همان گونه که مشاهده می‌شود در این حالت تشکیل نشده است.

غیر واقعی به صورت پراکنده در سطح دیواره مشاهده گردید که نمونه‌هایی از آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با این توضیح، میزان کرنش‌های اتفاق افتاده در سطح لغزش خاکریز حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک غیرحقیقی بوده چرا که این کرنش‌ها ناشی از تغییر مکان اضافی و فرار ذرات خاک از محل‌های تجمع یافته خرده لاستیک‌ها، حتی پس از اتمام مرحله بارگذاری



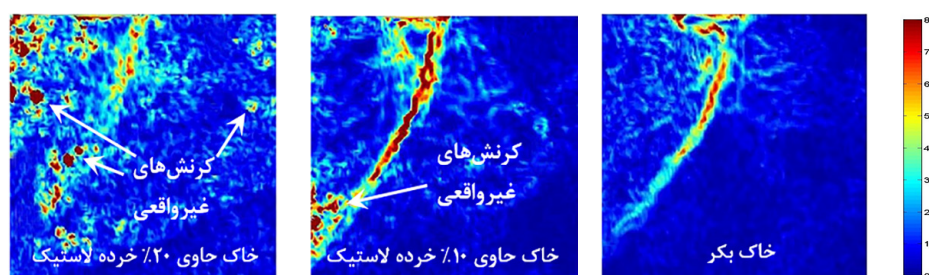
شکل ۹: تصاویر تحلیلی PIV برای ۶ نوع مسلح‌کننده، چیدمان ۵ مهاره، خاک بکر

Fig. 9. PIV results for six reinforcements with 5-anchor configuration



شکل ۱۰: تصاویر تحلیلی PIV برای ۳ نوع چیدمان مختلف، مهار C2، خاک بکر

Fig. 10. PIV results for three different reinforcements



شکل ۱۱: تصاویر تحلیلی PIV برای سه نوع خاکریز مختلف، مهار C3، چیدمان ۵ مهاره

Fig. 11. PIV results for three different reinforcements

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به تعداد ۵۴ مدل سازی آزمایشگاهی با هدف بررسی میزان پایداری دیوارهای حائل تثبیت یافته با مسلح کننده های مکانیکی مهار صفحه ای و ارزیابی تاثیر افزودن خرده لاستیک های بازیافتی به خاکریز آنها انجام شده است. در این راستا، به منظور مشاهده گوه گسیختگی و ارزیابی مکانیزم سطح لغزش از تکنیک پردازش تصویر PIV استفاده شده است. پارامترهای مورد ارزیابی شامل شکل مربعی و دایره ای صفحات مهاری، اندازه آنها، سه نوع چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره برای مسلح کننده ها و تعیین درصد بهینه از خرده لاستیک ها بوده است. نتایج حاصل گردیده عبارتند از:

۱. بیشترین قابلیت باربری پاشنه به ترتیب برای صفحات بزرگ، متوسط و کوچک بوده است. تغییر ابعاد صفحات از کوچک به متوسط، متوسط به بزرگ و کوچک به بزرگ، به ترتیب سبب افزایش ۶۵، ۲۵ و ۱۰۷ درصدی قابلیت باربری و کاهش ۱۷، ۲۵ و ۳۸ درصدی جابجایی های افقی دیواره شده است.
۲. با تغییر شکل صفحات از مربعی به دایره ای یک افزایش ۶/۸ و ۷ و ۱/۴ درصدی در قابلیت باربری و یک کاهش ۳، ۵ و ۱/۷ درصدی در تغییر مکان های افقی دیواره به ترتیب برای صفحات کوچک، متوسط و بزرگ حاصل گردیده است.
۳. بیشترین قابلیت باربری پاشنه به ترتیب مربوط به چیدمان ۵ مهاره، لوزی و مربعی بوده است. در چیدمان مربعی علاوه بر حصول کمترین قابلیت باربری، بیشترین جابجایی های دیواره نیز مربوط به این چیدمان بوده است.
۴. در چیدمان های مربعی، جابجاسنج واقع در ارتفاع وسط دیواره دچار تغییر مکان های زیادی نسبت به دو جابجاسنج بالایی و پایینی گردید که این به سبب بزرگ بودن چشمه فاقد مسلح کننده به مساحت ۳۰ سانتیمتر مربع در ارتفاع وسط دیواره بوده است.
۵. در خاکریز حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک، بیشترین افزایش ظرفیت باربری اتفاق افتاده است. در خاکریز حاوی ۲۰٪ وزنی خرده لاستیک، ظرفیت باربری نسبت به خاک بکر و خاکریز حاوی ۱۰٪ خرده لاستیک به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. کمترین جابجایی های افقی دیواره مربوط به خاکریز حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک بوده است.
۶. نشست پاشنه در خاک فاقد خرده لاستیک یکنواخت بوده ولی با حضور خرده لاستیک ها از حالت متقارن خارج گردیده بطوریکه بیشترین میزان عدم تقارن مربوط به خاکریز حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک بوده است.
۷. از نتایج تحلیل PIV، شکل گیری گوه گسیختگی در چیدمان های ۵ مهاره و لوزی به مراتب کمتر از چیدمان مربعی بوده و صفحات دایره ای بزرگ بهترین کارایی را در ممانعت از شکل گیری آن

داشته اند. هم چنین حضور خرده لاستیک ها به خصوص در ۲۰٪ وزنی، سبب کاهش قابل توجه گسترش سطح لغزش بحرانی در عمق خاکریز شده است.

۸. از لحاظ میزان کارایی، مقوله های اقتصادی و سرعت عملیات اجرایی می توان چیدمان لوزی و صفحات با شکل های مربعی به ابعاد ۵۰ سانتیمتر و یا دایره ای با قطر بیش از ۵۰ سانتیمتر را به همراه خاکریزی لایه های حاوی ۱۰٪ وزنی خرده لاستیک به عنوان گزینه ای مناسب در ساخت دیوارهای حائل مکانیکی تثبیت یافته، ترکیب با لاستیک های بازیافتی دانست. با این روش می توان از انهدام سنتی لاستیک های فرسوده جلوگیری نمود.

مراجع

- [1] R. Merifield, S. Sloan, The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8) (2006) 852-868.
- [2] B.M. Das, S.K. Shukla, *Earth anchors*, J. Ross Publishing, 2013.
- [3] M. Randolph, M. Cassidy, S. Gourvenec, C. Erbrich, Challenges of offshore geotechnical engineering, in: *Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, AA Balkema Publishers, 2005, pp. 123.
- [4] M. Randolph, S. Gourvenec, D. White, M. Cassidy, *Offshore geotechnical engineering*, Spon Press New York, 2011.
- [5] R.L. Copstead, D.D. Studier, 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. 35 p, 257 (1990).
- [6] D. Humphrey, *Civil engineering applications using tire derived aggregate (TDA)*, CIWMB, Sacramento, (2003).
- [7] A. Edinçliler, G. Baykal, A. Saygılı, Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction, *Waste Management*, 30(6) (2010) 1073-1080.
- [8] T.B. Edil, P.J. Bosscher, Engineering properties of tire chips and soil mixtures, *Geotechnical testing journal*, 17(4) (1994) 453-464.
- [9] J.G. Zornberg, A.R. Cabral, C. Viratjandr, Behaviour of tire shred sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2) (2004) 227-241.
- [10] M.F. Attom, The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands, *Environmental Geology*, 49(4) (2006) 497-503.

- [17] M.M. Disfani, H.-H. Tsang, A. Arulrajah, E. Yaghoubi, Shear and compression characteristics of recycled glass-tire mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6) (2017) 06017003.
- [18] P. Barman, B. Singh, Influence of Tyre Buffings and Cement on Strength Behaviour of Soil-Fly Ash Mixes, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(1) (2017) 10.
- [19] S.N. Moghaddas Tafreshi, N. Joz Darabi, G. Tavakoli Mehrjardi, A. Dawson, Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2016) 1-24.
- [20] D. White, W. Take, M. Bolton, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique*, 53(7) (2003) 619-631.
- [21] D.M. Wood, *Geotechnical modelling*, CRC Press, 2014.
- [11] M. Ghazavi, M.A. Sakhi, Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand, *International Journal of Geomechanics*, 5(1) (2005) 58-65.
- [12] S. Moghaddas Tafreshi, O. Khalaj, A. Dawson, Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation, *Geosynthetics International*, 20(3) (2013) 143-161.
- [13] A. Srivastava, S. Pandey, J. Rana, Use of shredded tyre waste in improving the geotechnical properties of expansive black cotton soil, *Geomechanics and Geoengineering*, 9(4) (2014) 303-311.
- [14] S. Bali Reddy, D. Pradeep Kumar, A. Murali Krishna, Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoengineering applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2) (2015) 06015007.
- [15] Z. Karabash, A.F. Cabalar, Effect of tire crumb and cement addition on triaxial shear behavior of sandy soils, *Geomechanics and Engineering*, 8(1) (2015) 1-15.
- [16] T. Zhang, G. Cai, S. Liu, W. Duan, Laboratory observation of engineering properties and deformation mechanisms of cemented rubber-sand mixtures, *Construction and Building Materials*, 120 (2016) 514-523.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Jalali Moghadam, A. Zad, N. Mehrannia, Failure Mechanism Evaluation of Plate Anchor Retaining Walls containing Crumb Rubbers by using PIV Technique, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 937-948.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12719.5254

