[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد دیوارهای حائل تثبیت یافته با مسلح‌کننده‌های مکانیکی مهار صفحه‌ای

متین جلالی مقدم*، امیرعلی زاد، نادر دستاران؛
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی،
نیما مهران‌نیا؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،
گروه مهندسی عمران،

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۸/۲۰ پذیرش ۹۷/۰۱/۲۲

چکیده

مهارهای صفحه‌ای یکی از انواع مسلح‌کننده‌های مکانیکی هستند که کاربردهای گسترده‌ای در فعالیت‌های ژئوتکنیکی ساحلی و فراساحلی مانند ساخت دیوارهای حائل مکانیکی، مقابله با بالازدگی فونداسیون‌ها، تثبیت توربین‌های باد و سکوهای شناور دریایی در برابر تلاطم آب دریا، و مهار خطوط لوله مدفون و مستغرق دارند. در این مقاله نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی دیوارهای حائل مهار صفحه‌ای با هدف بررسی عملکرد آن‌ها ارائه شده است. موارد بررسی شده بر قابلیت باربری پاشنه بارگذاری و تغییرمکان‌های افقی دیواره شامل ارزیابی تأثیر شکل مربعی و دایره‌ای صفحات مهاری، ابعاد آن‌ها در دو اندازهٔ مختلف، تحت سه چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره بوده است. به‌منظور مشاهده سطح لغزش بحرانی و میزان تأثیر موارد مذکور روی گوه گسیختگی از روش سرعت‌سنجی تصویری ذات (PIV) استفاده شده است. بر این اساس، بیش‌ترین قابلیت باربری دیواره و کم‌ترین جابه‌جایی افقی آن به‌ترتیب مربوط به چیدمان ۵ مهاره، لوزی و مربعی بوده است. چیدمان لوزی با وجود یک مسلح‌کننده کم‌تر اختلاف نسبتاً کمی با نتایج چیدمان ۵ مهاره داشته است. شکل دایره‌ای صفحات پایداری بیش‌تری را در دیواره فراهم آورده‌اند. بر طبق نتایج تحلیل PIV، کرنش ذرات در سطح لغزش بحرانی، در چیدمان‌های ۵ مهاره و لوزی کوچک‌تر از چیدمان مربعی

*نویسنده مسئول Matin.jalali.m@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

و در صفحات دایره‌ای کوچک‌تر از صفحات مربعی به‌دست آمده است. چیدمان مسلح‌کننده‌ها و ابعاد صفحات تأثیر چشم‌گیری بر عمق گوه گسیختگی در خاکریز دیواره داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: مهار صفحه‌ای، دیوار حائل، سرعت سنجی تصویری ذات (PIV)، ژئوتکنیک ساحلی و فراساحلی، مدل‌سازی آزمایشگاهی

مقدمه

دیوارهای حائل سازه‌های ژئوتکنیکی مقاوم در برابر فشارهای جانبی محرک و مقاومی هستند که به لحاظ مدت زمان بهره‌برداری به دو گروه سرویس‌دهی کوتاه مدت (موقت) مثل گودبرداری‌های شهری و بلند مدت (دائمی) مثل دیوارهای حائل مکانیکی تثبیت یافته تقسیم‌بندی می‌شوند. دیوارهای حائل به دو روش اصلی بالا به پایین و پایین به بالا اجرا می‌شوند که از مسلح‌کننده‌های به‌کار رفته در دیوارهای پایین به بالا می‌توان به مهارهای صفحه‌ای، ژئوگریدها و ژئوسل‌ها اشاره کرده و در دیوارهای بالا به پایین می‌توان مهارهای دوغابی و مارپیچ را نام برد. از زمره استفاده‌های صورت گرفته از مهارهای صفحه‌ای به‌عنوان مسلح‌کننده در دیوارهای حائل، می‌توان به دیوار حائل چندمنظوره در کشور چین با هدف ساخت خطوط راه آهن، عرشه پل و بزرگراه اشاره کرد [۱].

مهارهای صفحه‌ای، مسلح‌کننده‌های مکانیکی مدفون شونده‌ای هستند که یک یا چند صفحه باربر با یک میلگرد یا کابل برای انتقال بار به ناحیه ایمن خاک دارند [۲]. از انواع مهارهای صفحه‌ای به‌کار رفته در پروژه‌های خشکی و دریایی می‌توان به مهارهای صفحه‌ای افقی، مایل و قائم، مهارهای بتنی درجاریز، مهارهای چند صفحه‌ای، مهارهای صفحه ضربدری، مهارهای قفل دکل بازشونده، مهارهای مارپیچ، مهارهای کششی دفن‌شونده، مهارهای عمودی بارگذاری‌شونده (VLA)، مهارهای مکشی دفن‌شونده (SEPLA)، مهارهای دینامیکی دفن‌شونده (DEPLA) نظیر مهارهای امنی ماکس[1] و تورپدو[1] و مهارهای داکبیل[2] و مانتا ری[3] و استینجری[4] اشاره کرد [۲]، [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، [۷]، [۸]، [۹].

1. Omni-max

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

تا به امروز آزمایش‌های بیرون کشش گسترده‌ای روی مهارهای صفحه‌ایِ افقی، مایل و قائم با شکل‌های مختلف صفحات انجام شده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]، [۱۷]. سیلی و داس (۱۹۷۵) از بررسی مهارهای نواری افقی با نسبت‌های ظاهری $L/B \leq 5$ نشان دادند پیش از رسیدن مهار به عمق مدفون شدگی بحرانی، ظرفیت مهار با افزایش نسبت مدفون‌شدگی افزایش می‌یابد. مورای و گدس (۱۹۸۷) آزمایش بیرون‌کشش صفحات افقی نواری، دایره‌ای و مستطیلی با دو سطح صیقلی و زبر، اختلاف قابل توجه ظرفیت بیرون کشش مهارهای زبر و صیقلی را گزارش کردند. ایلمپاروتی و همکاران (۲۰۰۲) از بیرون کشش قائم صفحات دایره‌ایِ افقی اقدام به مقایسه مکانیزم‌های گسیختگی مشاهده شده و پاسخ بار–جابه‌جایی کردند. سینگ و راماسوامی (۲۰۰۸) تأثیر شکل مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و نواری صفحات را بر روی ظرفیت شکست بررسی کردند و به بزرگ‌تر بودن ظرفیت کششی نهایی صفحات مربعی و دایره‌ای از صفحات نواری و مستطیلی رسیدند. سانگ و همکاران (۲۰۰۹) از بیرون کشش صفحات مربعی تحت زوایای ۳۰ تا ۹۰ درجه در آزمایش‌های سانترفیوژ، تأثیر مسقیم ضریب بی‌بعد کننده هندسه مهار، زاویهٔ بارگذاری و لنگر نهایی را بر میزان افت مدفون شدگی مهار به هنگام قفل‌شدگی ثابت کرده و کاهش خطی افت مدفون شدگی مهار را با کاهش زاویهٔ بیرون کشش مهار گزارش کردند. کانسولی و همکاران (۲۰۱۲) از آزمایش بیرون کشش صفحات دایره‌ای در خاکریز سیمانی تثبیت شده–فیبری تسلیح یافته، به‌ترتیب افزایش ۲۰٪ و ٤۳,۵٪ ظرفیت بیرون کشش را برای عمق‌های مدفون‌شدگی ۱ و ۲ طی از اضافه کردن۰/۵٪ فیبر گزارش کردند. لیو و همکاران (۲۰۱۲) با به‌کارگیری تکنیک سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)[5] اقدام به بررسی تغییرشکل خاک و سطوح گسیختگی کرده و نشان دادند تراکم خاک و عمق مدفون شدگی مهار بیش‌ترین تأثیر و اندازه ذرات کم‌ترین تأثیر را بر تغییر شکل خاک و مقاومت بیرون کشش دارند. هان و

1. torpedo
2. Duckbill
3. Manta Ray
4. Stingray
5.. Particle Image Velocimetry

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

همکاران (۲۰۱٦) رفتار مهارهای صفحه‌ای را در بیرون کشش قائم ثابت با استفاده از آزمایش‌های سانترفیوژ و تکنیک PIV ارزیابی کرده و ثابت کردند در صورتی‌که جابه‌جایی مهار در زمان اعمال بار ثابت از ٤۰٪ جابه‌جایی در گسیختگی یکنواخت تجاوز نکند بار ثابت را می‌توان به‌صورت نامحدود به مهار وارد کرد. شکل‌گیری یک حفره در کف مهار در سطوح بار ثابت زیاد و عدم شکل‌گیری آن در سطوح بار ثابت کم در پژوهش آن‌ها گزارش شد.

گودین و همکاران در سال‌های ۲۰۰٦، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ و کسیدی و همکاران (۲۰۱۲) با انجام آزمایش‌های سانترفیوژ و به‌کارگیری تکنیک PIV پژوهش‌های جامعی را بر روی عملکرد مهارهای SEPLA و مکانیزم رفتاری باله قفل شونده انجام دادند و به نتایجی از قبیل افت عملکرد SEPLA بلافاصله پس از بازیابی صندوقه مکشی به‌علت کاهش مقاومت خاک مجاور مهار، تأثیر مثبت باله قفل شونده روی مسیر مهار تنها در زمان حضور بار خارج از محور، معرفی یک روند طراحی بهینه با هدف کاهش افت مدفون‌شدگی مهار در زمان قفل شدن، امکان نصب مهار در خاک‌های سخت، و اثبات افت عمق مدفون شدگی مهار از ۰/۲ تا ۱/۵ برابر ارتفاع آن برای بارگذاری‌های با شیب بین ٤۰ تا ۹۰ درجه نسبت به افق، رسیدند [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۱].

تا کنون تست‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای به‌منظور بررسی عملکرد مهارهای DEPLA انجام گرفته است [۲۲]، [۲۳]، [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷]. حسین و همکاران (۲۰۱۳) با مدل‌سازی‌های عددی و مقایسهٔ نتایج با تست‌های سانترفیوژ پیشین، روی دو نوع مختلف مهارهای تورپدو، یک دستورالعمل عددی جامعی با هدف شبیه‌سازی روند نصب دینامیکی مهار، گیرش مجدد خاک مجاور مهار پس از نصب و بیرون کشش یکنواخت آن‌ها ارائه کردند. راندولف، بلک، لافلین، گودین، ونگ و ریچاردسون تحت یک کمپین پژوهشی جامع، با انجام مدل‌سازی‌های عددی و تست‌های سانترفیوژ و میدانی به بررسی کامل مهارهای DEPLA اقدام کرده و نتایج خود را در چندین مقاله منتشر کردند. آن‌ها نشان دادند افت عمق مدفون شدگی مهار در شرایط واقعی بسیار بیش‌تر از نتایج تست‌های سانترفیوژ بوده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

است، پایان مرحلهٔ قفل شدن مهار مصادف با حداکثر ظرفیت مهار است، مهارهای دینامیکی راکتی‌شکل یا همان مهارهای تورپدو رفتاری مشابه مهارهای نصب شونده دارد و قفل‌شدگی و پاسخ بیرون کشش آن‌ها با مهارهای دینامیکی دفن شوندهٔ یک‌سان است.

مهارهای صفحه‌ای، مسلح‌کننده‌های جای‌گذاری شونده‌ای در ساخت دیوارهای حائل هستند که به‌علت مدفون شدن صفحه انتهایی در ناحیهٔ مقاوم خاک ظرفیت بیرون کشش بالایی در مقایسه با دیگر مسلح‌کننده‌های به‌کار رفته در دیوارهای حائل مکانیکی تثبیت یافته نظیر ژئوسل‌ها، ژئوگریدها و تسمه‌های فلزی دارند. در این مقاله نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی دیوارهای حایل مهارهای صفحه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی گزارش شده است. موارد بررسی شده عبارت از شکل صفحات مهاری، ابعاد آن‌ها، و چیدمان مسلح‌کننده‌ها روی پایداری دیواره بوده است. به‌منظور مشاهده سطح لغزش بحرانی از تکنیک PIV استفاده شده است. PIV که یک روش پردازش تصویری است و ابتدا در شاخه سیالات و مشاهده مسیر جریان ذرات گاز و سیال استفاده شده، به‌وسیلهٔ وایت و همکاران (۲۰۰۳) برای استفاده در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی کاربردی شد و تا به‌حال گزارش‌های کمی از استفاده آن در مشاهده گوه گسیختگی دیوارهای حائل مشاهده شده است [۲۸]، [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳].

مصالح آزمایش

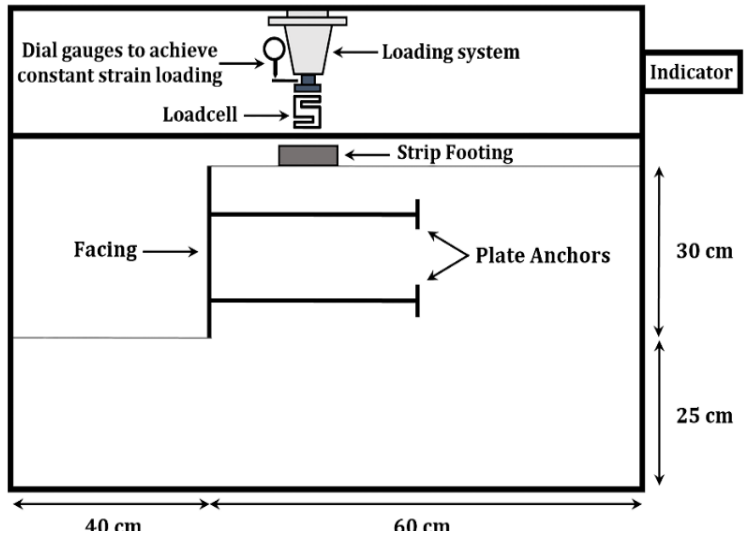
۱. محفظه آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، از ضریب کاهنده ابعاد ۱/۱۰ استفاده شده است. بر این اساس، تمام طول‌های حاضر در آزمایش بر عدد ۱۰ تقسیم شده‌اند. از این‌رو، برای دیوار حائلی به‌طول و ارتفاع ۳ متر، ابعاد دیواره ۳۰ سانتی‌متر برای مدل‌سازی آزمایشگاهی تقلیل یافته است.

برای ساخت دیوارهای حائل از محفظه‌ای به‌طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ٦۰ سانتی‌متر استفاده شده است. مقدار بیش‌تر طول و عمق محفظه با هدف جلوگیری از اثرات مرزی است و عرض ۳۰ سانتی‌متری محفظه، برابر با طول دیواره، به‌منظور حصول

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

اطمینان از برقراری کامل شرایط کرنش مسطح بوده است. برای مشاهده سطح خاک در یک سمت دیواره و عکس‌برداری از آن در جریان آزمایش‌ها، از پلکسی‌گلس با ضخامت مناسب ۳۰ میلی‌متر برای یک وجه محفظه استفاده شده است. این ضخامت از پلکسی گلس به‌منظور حصول اطمینان از عدم تغییرشکل و شکم‌دادگی آن در جریان بارگذاری بوده است. علاوه بر این در وجه پشتی دیواره یعنی سطح خاک در تماس با وجه فلزیِ درونِ محفظه، یک ورق پلاستیکیِ پلی اتیلن به ضخامت ناچیز ۱/۵ میلی‌متر به وجه فلزی چسبانده شد تا اصطکاک خاک و وجه فلزی محفظه به حداقل مقدار ممکن رسانده شود. توگنون و همکاران (۱۹۹۹) از قرار دادن ورق پلاستیک پلی‌اتیلن روی وجوه محفظه آزمایش، کاهش زاویهٔ اصطکاک میان وجوه و خاک را به کم‌تر از ۵ درجه ثابت کردند [۳۸]. در شکل ۱ تصویر شماتیک محفظه آزمایش، پاشنه بارگذاری نواری و سیستم بارگذاری نشان داده شده است.



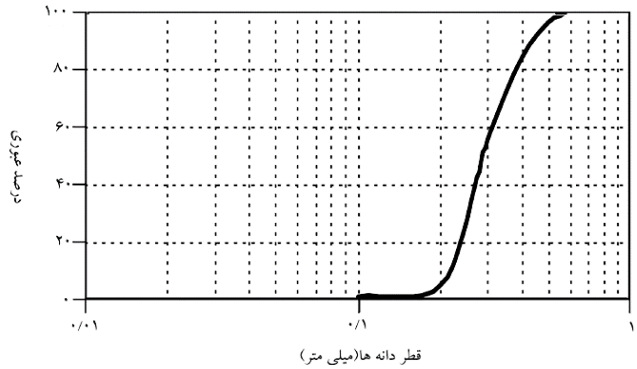
شکل ۱. شماتیک دیوار حائل

۲. خاک مصرفی

خاک به‌کار رفته در تمامی آزمایش‌ها ماسه خشک منطقه صوفیان استان آذربایجان شرقی- ایران بوده است. ماسه استفاده شده بر اساس طبقه‌بندی متحد دارای دانه‌بندی یکنواختی است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

و ماسه بد دانه‌بندی SP با اندازهٔ مؤثر D_{10} =۰/۲۲mm، D_{50}=۰/۲۸mm ضریب یکنواختی C_u = ۱/۳٦، ضریب انحناء C_c = ۱/۱۸ و γ = ۱٦/٦۷ kN/m^3 بوده است. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. گسترهٔ اندازه ذرات خاک

۳. پاشنه بارگذاری

به‌منظور برقراری کامل شرایط کرنش مسطح و جلوگیری از وقوع هر گونه اصطکاک میان پاشنه بارگذاری با وجوه کناری محفظه آزمایش، طول پاشنه به اندازهٔ یک میلی‌متر کوچک‌تر از عرض ۳۰ سانتی‌متری محفظه آزمایش انتخاب شد. بر این اساس، پاشنه بارگذاری به طول ۲۹/۹ سانتی‌متر، عرض ۷ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر بوده است. با هدف حصول کم‌ترین اصطکاک ممکن بین سطح زیرین پاشنه بارگذاری و خاک، وجوه پاشنه کاملاً صیقل داده شد.

٤. مسلح‌کننده‌ها

طول و قطر میل مهارهای به‌کار رفته به‌ترتیب برابر ۳۰ سانتی‌متر و ۰/٤ سانتی‌متر است که حاصل از اعمال مقیاس ابعادی ۱/۱۰ در میل مهار ۳ متری به قطر ٤ سانتی‌متر بوده است. دو طرف میل‌مهارها به‌منظور اتصال به صفحات مهاری از یک سمت و رویه دیواره از سمت دیگر رزوه شده‌اند. از چهار صفحه مهار مربعی و دایره‌ای شکلِ کاملاً صیقلی با دو مساحت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

مختلف استفاده شده است. در شکل ۳ صفحات مهاری صیقل داده شده به‌همراه میل‌مهارها نشان داده شده است.

شکل ۳. صفحات مهاری و میل مهارها

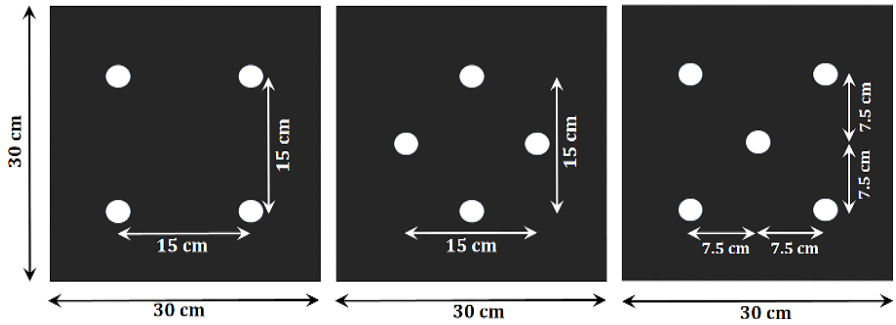
بر اساس ظرفیت باربری مورد نیاز از مسلح‌کننده‌های مکانیکی مهار صفحه‌ای، صفحات در اندازه‌های مختلفی طراحی شده و به‌کار گرفته می‌شود. در این پژوهش، صفحات مربعی شکل با دو اندازه متداول ۳۰۰ و ٤۰۰ میلی‌متر در مقیاس واقعی انتخاب شد که طی اعمال مقیاس ابعادی ۱/۱۰ به آن، اندازهٔ ضلع ۳۰ و ٤۰ میلی‌متری نتیجه‌گیری شد. ضخامت صفحات مهاری در کارهای محققان گذشته بسیار متغیر بوده است و گسترهٔ متنوعی داشته است. بر این اساس، ضخامت صفحات مهاری به‌اندازه‌ای انتخاب شد تا صفحات انعطاف‌پذیر (نرم) نبوده و کاملاً صلب باشند تا از تأثیرگذاری به‌عنوان یک پارامتر دخیل بر نتایج آزمایش خارج شود (ضخامت ۳ میلی‌متر). بعد از انجام هر آزمایش نیز صفحات مهاری بررسی شدند، بررسی‌ها نشان داد که هیچ‌گونه تغییرشکل یا اعوجاجی به‌علت ضخامت مناسب آن‌ها مشاهده نشد و صفحات با توجه به مقیاس آزمایشگاهی مدل‌ها صلب بوده‌اند. شایان ذکر است، عمدتاً در صنعت ساخت مهارهای مکانیکی و به‌ویژه مهارهای صفحه‌ای، ضخامت صفحات مهاری در گسترهٔ ۲۰ الی حداکثر ٤۰ سانتی‌متر (به‌منظور لحاظ مقوله خوردگی) قرار دارند. بنابراین انتخاب ضخامت ۳ میلی‌متری به‌عنوان ضخامت مقیاس شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

آزمایشگاهی، منطقی و رضایت بخش بوده است. مساحت صفحات مربعی کوچک و متوسط به‌ترتیب معادل مساحت صفحات دایره‌ای کوچک و متوسط هستند که البته اندازهٔ صفحات انتخابی نیز، ابعادی متداول در مقیاس واقعی هستند. در جدول ۱ مشخصات کامل مهارهای صفحه‌ای اشاره شده است. علت انتخاب این ابعاد از صفحات، گسترهٔ متداول این اندازه‌ها در مقیاس‌های واقعی بوده است.

جدول ۱. مشخصات مهارهای صفحه‌ای

شکل صفحه مهار	نماد	ضلع/قطر صفحه	مساحت صفحه	ضخامت	طول میل مهار	قطر میل مهار
مربعی کوچک	S1	۳۰	۹۰۰	۳	۳۰۰	٤
مربعی متوسط	S2	٤۰	۱٦۰۰	۳	۳۰۰	٤
دایره‌ای کوچک	C1	۳۳/۸	۹۰۰	۳	۳۰۰	٤
دایره‌ای متوسط	C2	٤٥/۱	۱٦۰۰	۳	۳۰۰	٤



شکل ٤. چیدمان مسلح‌کننده‌ها: ٥-مهاره، لوزی و مربعی (از راست به چپ)

٥. چیدمان مسلح‌کننده‌ها

فواصل افقی و عمودی مسلح‌کننده‌های غیرفعال (پس کشیده نشده) مثل میخ‌های دوغابی و مارپیچ و مسلح‌کننده‌های فعال نظیر مهارهای دوغابی و مارپیچ در بازه ۱ تا حداکثر ۳ متر گزارش شده است [۳٤]، [۳٥]، [۳٦]. از آن‌جاکه این عمل روی این نوع از مهارهای صفحه‌ای انجام نمی‌شود، فواصل افقی و عمودی ۱/٥ متری برای آن‌ها انتخاب شد که با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

ضرب آن در ضریب کاهنده مقیاس ۱/۱۰، مقدار ۱۵ سانتی‌متر برای فواصل مرکز تا مرکز مسلح‌کننده‌ها در دیواره به‌دست آمد. بر این اساس سه چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره که چیدمان‌های رایج در دیوارهای حائل هستند انتخاب شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل مشاهده می شود، فاصله افقی صفحات مهاری از وجوه طولی محفظه به‌میزان ۷/۵ سانتی‌متر است و اندازه‌ای مناسب و کافی به‌منظور ممانعت از اثرگذاری شرایط مرزی هستند. نکته قابل توجه دیگر در این رابطه، گسیختگی بلوکی خاک‌های ماسه‌ای است که تحت بیرون کشش این مسلح‌کننده‌ها، سطوح گسیختگی به موازات میل مهار و از لبه‌های صفحه مهار بوده است و فرار ذرات خاک از روی صفحات در جابه‌جایی‌های بزرگ اتفاق می‌افتد.

٦. رویه

برای رویه دیوارهای حائل دائمی عمدتاً از مقاطع بتنی پیش ساخته یا یک‌پارچه بتن‌ریزی شده با ضخامت رایج ۳۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. وود (۲۰۰۳) با انجام آنالیز ابعادی، چهار نوع مصالح با ضخامت‌های مختلف را به‌عنوان رویه بتنی ۳۰ سانتی‌متری در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی معرفی کرد (جدول ۲) [۳۷]. بر این اساس از ورق آلومینیومی با ضخامت ۰/۹ میلیمتر در آزمایش‌ها استفاده شد.

جدول۲. مصالح معادل برای شبیه‌سازی رویه بتنی۳۰ سانتی‌متری [۳۷]

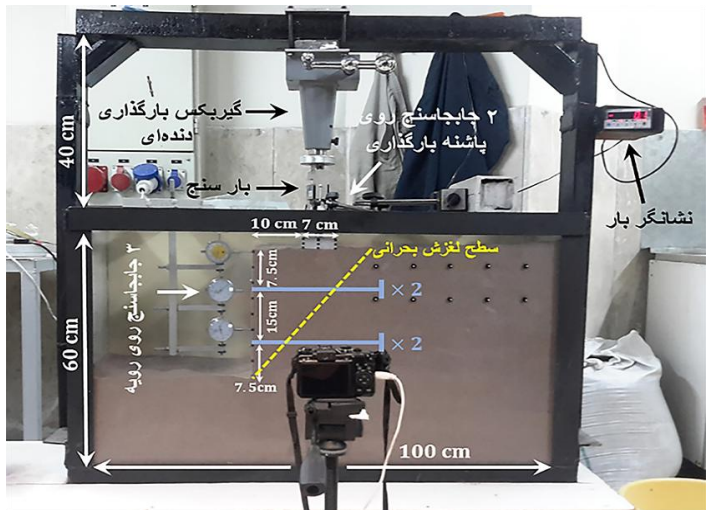
جنس رویه		
فولاد	۲۱۰	۰/٦٤
آلومینیوم	۷۰	۰/۹
میکروبتن	۱۰	۱/۷۵
پلی پروپیلن	۰/۹	۳/۹

۷. روند آزمایش

در حالت کلی، نحوهٔ انجام آزمایش در تمامی مدل‌سازی‌ها یک‌سان است و از خاکریزی بارشی از ارتفاع ثابت، تراکم کوبشی طی ضربه زدن به وجوه کناری محفظه تا رسیدن به تراز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

اتفاعی مورد نظر در هر لایه، جای‌گذاری رویه و نصب مسلح‌کننده‌ها تشکیل شده است. میزان بار اعمالی به‌وسیلهٔ مجموعهٔ کالیبره شده لودسل با ظرفیت باربری ۲ تن و ایندیکِیتور با دقت اندازه‌گیری ۱ گرم، نشست پاشنه بارگذاری از طریق دو کرنش سنج عمودی نصب شده با فاصلهٔ یک‌سان ۷ سانتی‌متر از مرکز آن، و حرکت افقی دیواره از طریق سه کرنش سنج افقی نصب شده با فواصل یک‌سان ۱۰ سانتی‌متر در جلوی رویه قرائت و ثبت شده است. به‌منظور دست‌یابی به دقت مناسب در بارگذاری، با نصب یک کرنش سنج بر روی شفت متحرک سیستم بارگذاری، از روش بارگذاری کرنش ثابت با میزان جابه‌جایی ۳ میلی‌متر در هر مرحله بارگذاری، تحت سرعت ثابت استفاده شده است. تمامی شش کرنش سنج استفاده شده دارای دقت ۰/۰۱ میلی‌متر بوده‌اند. هر آزمایش در ۹ مرحله انجام شده است که مرحلهٔ اول فاقد اعمال بار است و عکس اول از سطح خاک گرفته شده است. مقدار بار وارده، میزان نشست پاشنه بارگذاری و جابه‌جایی‌های افقی دیواره در هر مرحله بارگذاری ثبت شده و پس از عکس‌برداری از سطح خاک، آزمایش ادامه یافته است. تعداد دفعات بارگذاری ۸ مرتبه و تا رسیدن به نشست نهایی ۲/٤ سانتی‌متر که ۳۵ درصد عرض پاشنه بارگذاری نواری است، ادامه یافته است. تصویر دیوار حائل، پاشنه بارگذاری، کرنش سنج‌ها و مسلح‌کننده‌های مدفون در خاکریز در شکل ۵ نشان داده شده و روند آزمایش‌ها در جدول ۳ اشاره شده است.



شکل ۵. دیوار حائل ساخته شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

جدول ۳. روند آزمایش‌ها

مهار صفحه‌ای	چیدمان مسلح‌کننده‌ها
C1	لوزی، مربعی، ۵ مهاره
C2	لوزی، مربعی، ۵ مهاره
S1	لوزی، مربعی، ۵ مهاره
S2	لوزی، مربعی، ۵ مهاره

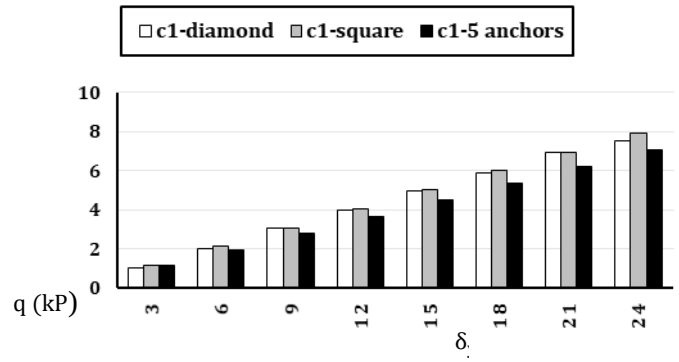
نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

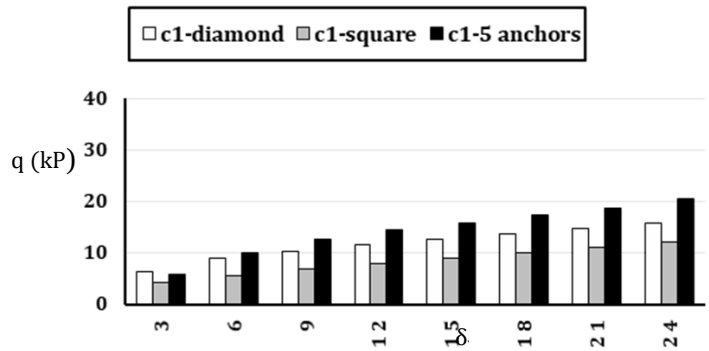
۱. تأثیر صفحات مهاری

نمودارهای نشست ثابت و یکنواخت پاشنه (δ_y) در برابر قابلیت باربری (q) و در برابر تغییرمکان‌های افقی دیواره (δ_x) در شکل ٦ نشان داده شده است. با افزایش ابعاد صفحات مهاری، قابلیت باربری پاشنه و تغییرمکان‌های افقی دیواره به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته است. از مقایسه گام آخر بارگذاری در هر سه چیدمان، با تغییر صفحات از C1 به C2 و S1 به S2 به‌طور مشترک یک افزایش 63% در قابلیت باربری دیواره برای هر یک از شکل‌ها به‌دست آمده است. از مقایسه نمودارهای تغییرمکان افقی دیواره مشاهده می‌شود افزایش ابعاد صفحات مهاری سبب کاهش قابل توجه جابه‌جایی دیواره شده به‌طوری‌که در هر سه چیدمان، تغییر صفحات از C1 به C2 و S1 به S2 به‌ترتیب به‌طور میانگین سبب کاهش ٢٤ % و ٢٨ % در جابه‌جایی دیواره شده است.

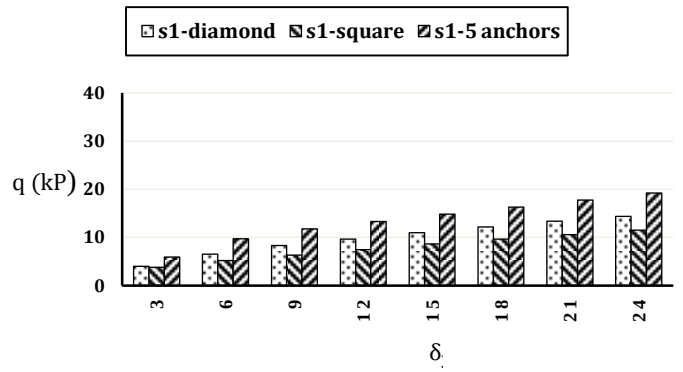
به لحاظ تأثیر شکل صفحات مهاری، مشاهده شد که در بیش از نیمی از گام‌های بارگذاری‌ها در مجموع تمامی آزمایش‌ها، قابلیت باربری دیواره در صفحات دایره‌ای از صفحات مربعی بیش‌تری بوده است که برای مثال می‌توان به بیش‌تر بودن ٩/٨%، ٥/٤% و ٦/٢% باربری صفحات C1 از S1 در گام آخر بارگذاری، به‌ترتیب در سه چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره اشاره کردد. با وجود حصول باربری بیش‌تر دیواره در صفحات دایره‌ای، اختلاف ناچیزی میان جابه‌جایی دیواره در این صفحات و صفحات لوزی وجود داشته

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

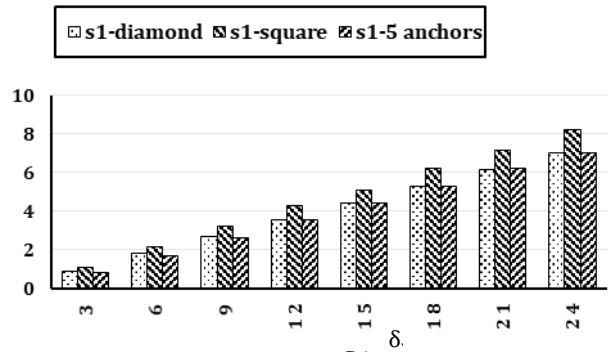




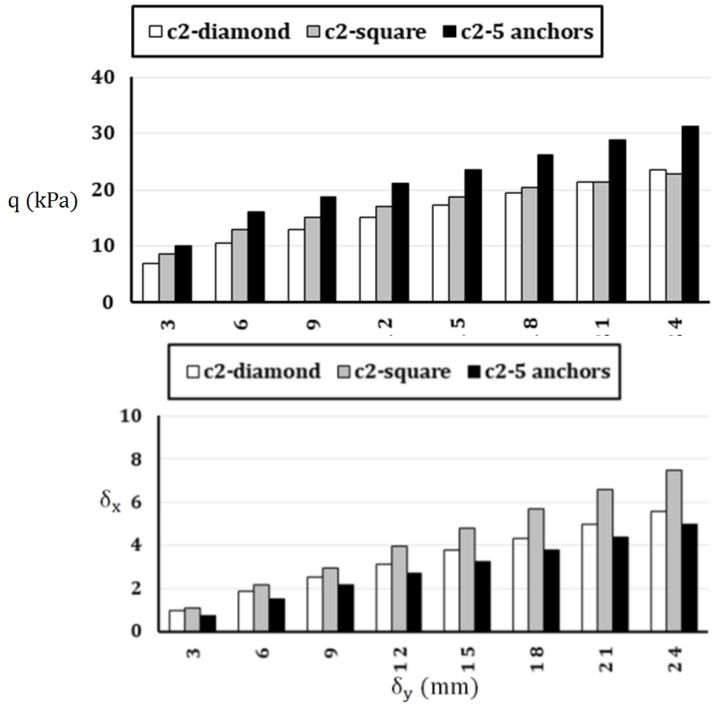
مسلح‌کننده C1 تحت سه چیدمان مختلف



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

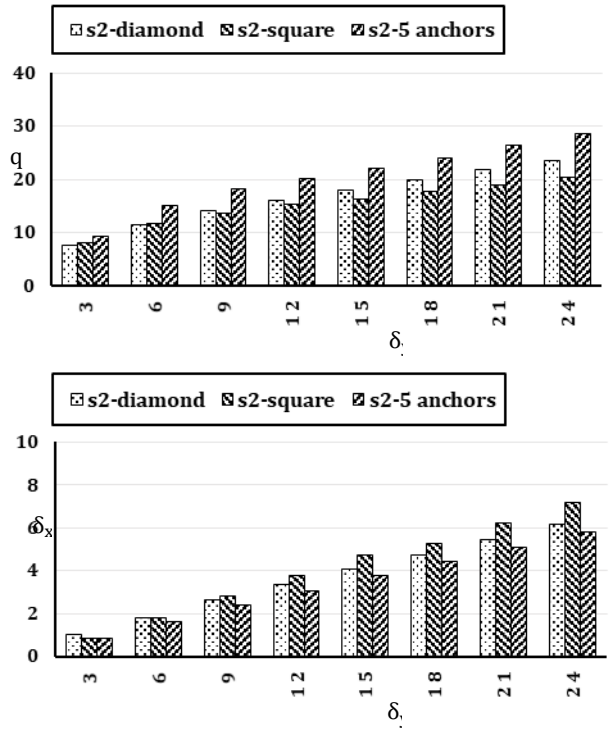


مسلح‌کننده S1 تحت سه چیدمان مختلف



مسلح‌کننده C2 تحت سه چیدمان مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]



شکل ٦. نمودارهای نشست اعمالی پاشنه بارگذاری در برابر قابلیت باربری دیواره ($\delta_x - q$) و نشست اعمالی پاشنه بارگذاری در برابر تغییرمکان‌های افقی دیواره ($\delta_x - \delta_y$)

به‌طوری‌که در مجموع تمامی گام‌های بارگذاری‌ها، جابه‌جای‌های افقی اتفاق افتاده در دیواره در هر دو نوع صفحه یعنی مربعی ودایره‌ای مشابه بوده است که این نشان‌دهندهٔ قفل‌شدگی و مقاومت بیش‌تر صفحات دایره‌ای نسبت به صفحات مربعی در خاک حتی با قابلیت تحمل بار بیش‌تر بوده است.

بر این اساس در هر دو مقوله قابلیت باربری دیواره و تغییرمکان افقی آن، صفحات دایره‌ای دارای عملکرد بهتری نسبت به صفحات مربعی بوده‌اند.

۲. تأثیر چیدمان مسلح‌کننده‌ها

مطابق شکل ٦، بیش‌ترین قابلیت باربری پاشنه بارگذاری مربوط به چیدمان ۵ مهاره است که این به‌علت داشتن یک مسلح‌کننده بیش‌تر نسبت به دو چیدمان دیگر بوده است. پس از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

آن چیدمان لوزی باربری بیش‌تری را به‌دست آورده و چیدمان مربعی حاوی کم‌ترین قابلیت باربری بوده است. از مقایسه هر چهار مسلح‌کننده مشاهده می‌شود، حتی به هنگام کوچک‌تر بودن ظرفیت باربری چیدمان لوزی از چیدمان مربعی در گام‌های ابتدایی، ظرفیت باربری در این چیدمان در گام‌های پایانی از چیدمان مربعی فراتر رفته و بیش‌تر شده است که این عملکرد بهتر مسلح‌کننده‌ها در چیدمان لوزی را به‌خصوص در هنگام قفل شدگی بیش‌تر آن‌ها نشان می‌دهد. از مقایسهٔ گام آخر بارگذاری در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود با تغییر چیدمان مسلح‌کننده‌ها از مربعی به لوزی، لوزی به ۵ مهاره، و مربعی به ۵ مهاره به‌ترتیب به‌طور میانگین یک افزایش باربری ۲۷/۵%، ۳۱%، و ٦٧/٥% برای صفحات کوچک و ۹/۲%، ۲۷%، و ۳۸% برای صفحات متوسط به‌دست آمده است. از مقایسه درصدها، کاهش تأثیر تغییر چیدمان مسلح‌کننده‌ها بر قابلیت باربری دیواره با افزایش ابعاد صفحات مهاری قابل نتیجه‌گیری است.

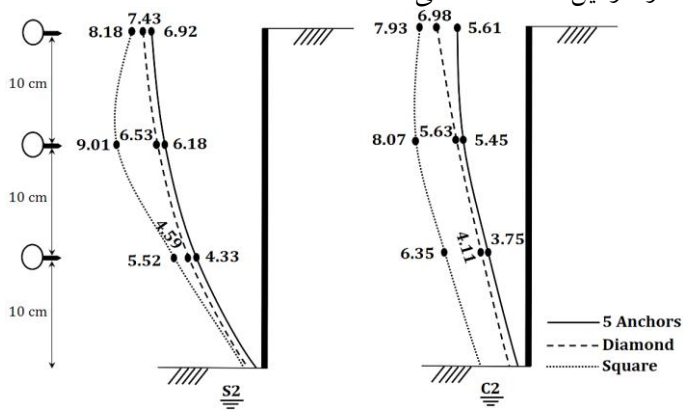
کم‌ترین تغییرمکان‌های افقی دیواره مربوط به چیدمان ۵ مهاره بوده است. پس از آن، چیدمان لوزی شرایط بهتری را برای دیواره فراهم آورده به‌طوری‌که جابه‌جایی این چیدمان با وجود یک مسلح‌کننده کم‌تر به جابه‌جایی در چیدمان ۵ مهاره نزدیک بوده است. جابه‌جایی‌های دیواره در چیدمان مربعی بسیار بیش‌تر از دو چیدمان دیگر به‌دست آمده که نداشتن کارایی مناسب آن را در تحمل بار اعمالی و پایداری مناسب دیواره ثابت می‌کند. از مقایسهٔ گام آخر بارگذاری در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود با تغییر چیدمان مسلح‌کننده‌ها از مربعی به لوزی، لوزی به ۵ مهاره، و مربعی به ۵ مهاره به‌ترتیب به‌طور میانگین یک کاهش جابه‌جایی ۹%، ۳%، و ۱۲% برای صفحات کوچک و ۱۹%، ۱۲%، و ۲٦% برای صفحات متوسط به‌دست آمده است. از مقایسه درصدها، افزایش تأثیر تغییر چیدمان مسلح‌کننده‌ها بر تغییر مکان دیواره با افزایش ابعاد صفحات مهاری قابل نتیجه‌گیری است.

۳. مکانیزم تغییرشکل دیواره

شماتیک تغییرشکل دیواره حاصل از جمع جداگانه سه جابه‌جاسنج موجود در ارتفاع دیواره برای مهارهای S2 و C2 در شکل ۷ نشان داده شده است. بیش‌ترین تغییرمکان‌ها در هر دو چیدمان ۵ مهاره و لوزی در تاج دیواره بوده است و با حرکت به سمت پایین دیواره

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

از مقدار آن کاسته شده است. چیدمان لوزی با وجود داشتن یک مسلح‌کننده کم‌تر اختلاف بسیار کمی با جابهجایی‌های چیدمان ۵ مهاره داشته است. در چیدمان مربعی به‌سبب بزرگ بودن چشمه غیرمسلح واقع در ارتفاع وسط دیواره، شکم‌دادگی دیواره بسیار زیاد بوده است و بیش‌ترین تغییرمکان در وسط دیوار اتفاق افتاده که نداشتن چیدمان و پراکندگی مناسب مسلح‌کننده‌ها را در این حالت نشان می‌دهد.

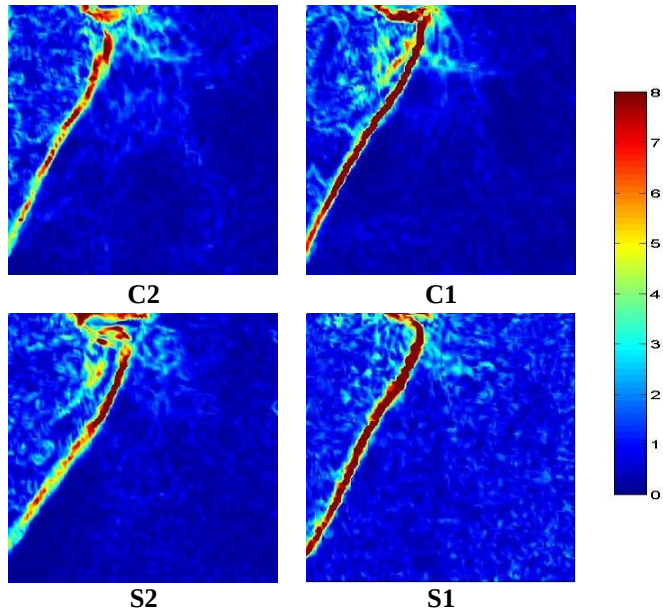


شکل ۷. شماتیک تغییرشکل دیواره (میلی‌متر)

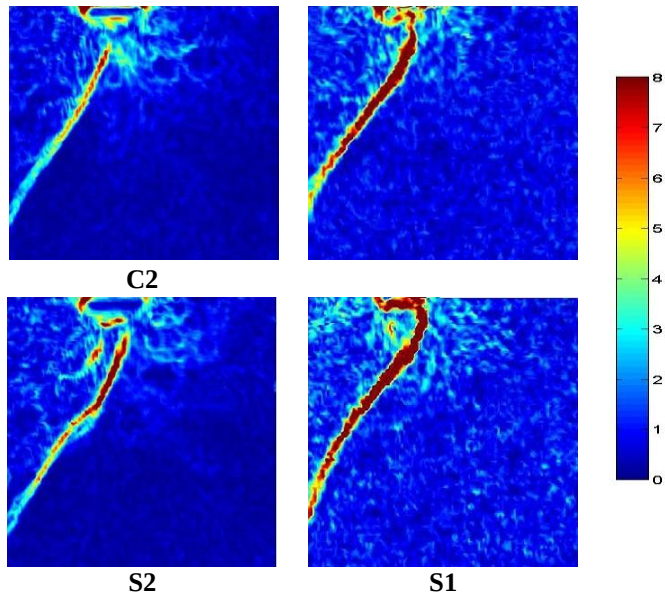
٤. نتایج PIV

نتایج حاصل از پردازش PIV روی ۹ تصویر عکس‌برداری شده، به‌ترتیب برای چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. ستون سمت راست تصاویر، معرف محدوده کرنش‌های ذرات خاک است. مشاهده می‌شود که در صفحات کوچک گوه گسیختگی به‌طور کامل در عمق خاکریز تشکیل شده و تا پشت رویه ادامه یافته و در سمت مقابل، در صفحات متوسط از شدت آن کاسته شده است. گسترهٔ کرنش‌های ایجاد شده در سطح لغزش بحرانی برای صفحات متوسط به میزان چشم‌گیری کوچک‌تر از کرنش‌های سطح لغزش در صفحات کوچک است. از مقایسه تصاویر هر سه چیدمان مشاهده می‌شود وقوع چنین شرایطی برای هر سه چیدمان، مشترک و مشابه است. در تأیید تفاسیر نمودارهای تغییر مکان افقی دیواره مبنی بر وقوع کم‌ترین جابه‌جایی‌ها به‌ترتیب در چیدمان ۵ مهاره، لوزی و مربعی، مشاهده می‌شود در چیدمان ۵ مهاره گوه گسیختگی برای مهارهای متوسط نسبتاً تشکیل نشده و سطح لغزش با فاصله اندکی از رویه در عمق خاکریز خاتمه یافته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

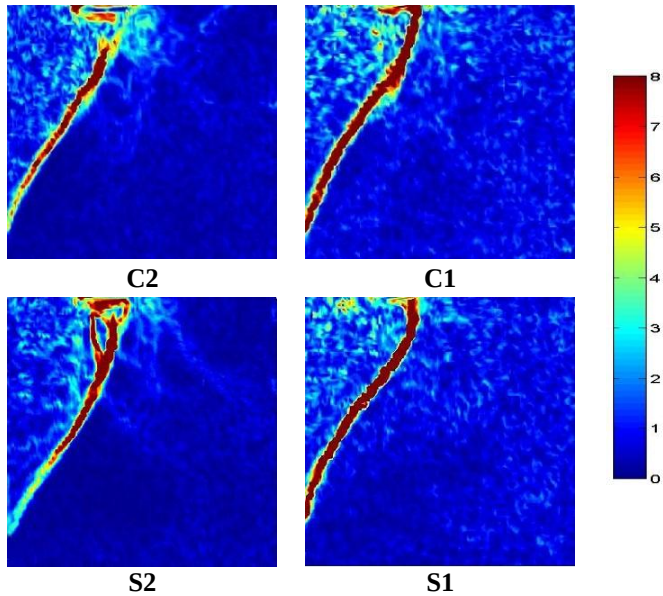


شکل ۸. نتایج PIV برای چیدمان لوزی



شکل ۹. نتایج PIV برای چیدمان مربعی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]



شکل ۱۰. نتایج PIV برای چیدمان ۵ مهاره

فاصله سطح لغزش از تاج دیواره در تمامی آزمایش‌ها یک‌سان و از لبهٔ بیرونی پاشنه (لبه دورتر از رویه) آغاز شده است. عمق گوه گسیختگی در چیدمان مربعی به مراتب کم‌تر از چیدمان لوزی است که این به‌سبب داشتن یک مسلح‌کننده بیش‌تر در پایین‌ترین ردیف از مسلح‌کننده‌ها نسبت به چیدمان لوزی بوده است. در سمت مقابل گسترهٔ کرنش‌های ذرات در سطح لغزش چیدمان لوزی، در وسط دیواره کم‌تر از چیدمان مربعی است که این به‌سبب حضور دو مسلح‌کننده در آن تراز ارتفاعی بوده است. در چیدمان ۵ مهاره عمق گوه گسیختگی کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام شده با هدف ارزیابی پایداری دیوارهای حائل تسلیح یافته با مسلح‌کننده‌های مکانیکی مهار صفحه‌ای ارائه شده است. موارد بررسی شده شامل شکل مربعی و دایره‌ای صفحات مهاری، اندازه آن‌ها و سه چیدمان لوزی، مربعی و ۵ مهاره بوده است. نتایج به‌دست آمده عبارتند از:

- بیش‌ترین قابلیت باربری دیواره مربوط به چیدمان ۵ مهاره به‌علت داشتن یک مسلح‌کننده بیش‌تر بوده است. پس از آن چیدمان لوزی سبب حصول باربری بیش‌تری نسبت به چیدمان مربعی شده است.
- صفحات دایره‌ای نسبت به صفحات مربعی شرایط پایدارتری را برای دیواره فراهم آورده و در بیش‌تر آزمایش‌ها منجر به قابلیت باربری بیش‌تر و جابه‌جایی کم‌تر دیواره شده‌اند.
- جابه‌جایی دیواره در چیدمان لوزی با وجود داشتن یک مسلح‌کننده کم‌تر اختلاف کمی با چیدمان ۵ مهاره داشته است. بیش‌ترین تغییرمکان دیواره مربوط به چیدمان مربعی بوده به‌طوری‌که شکم‌دادگی زیادی در ارتفاع وسط دیواره مشاهده شد که این به‌علت چیدمان نامناسب مسلح‌کننده‌ها در دیوار بوده است. از منظر اقتصادی و در نظر گرفتن سرعت اجرا در شرایط واقعی می‌توان چیدمان لوزی را گزینهٔ مناسبی در طراحی‌ها دانست.
- صفحات مهاری متوسط به‌ترتیب سبب افزایش و کاهش چشم‌گیر قابلیت باربری و جابه‌جایی‌های دیواره نسبت به صفحات کوچک شده‌اند. بر این اساس استفاده از صفحات مربعی به ابعاد ٤٠ تا ٥٠ سانتی‌متر یا صفحات دایره‌ای به قطر ٤٥ تا ٥٥ سانتی‌متر می‌توانند گزینهٔ مناسبی در دیواره‌های تا ارتفاع حداکثر ۵ متر باشند. برای دیوارهای با ارتفاع بیش از این مقدار می‌توان ابعاد صفحات را بزرگ‌تر کرده و یا فواصل افقی و عمودی مسلح‌کننده‌ها را کاهش داده که به‌علت عدم تحلیل آن‌ها در این پژوهش از ارائه پیشنهاد در جهت اطمینان پرهیز شده است.
- شکل‌گیری گوه گسیختگی و امتداد یافتگی سطح لغزش در چیدمان ۵ مهاره به مراتب کم‌تر از دو چیدمان دیگر بوده است. بیش‌ترین میزان کرنش‌های ذرات در سطح لغزش بحرانی مربوط به چیدمان مربعی بوده است. هم‌چنین، کرنش‌های ایجاد شده در سطح لغزش دیواره در صفحات دایره‌ای، کم‌تر از کرنش‌های ذرات در سطح لغزش دیواره در صفحات مربعی بوده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

منابع

1. Hua Z. K., Shen C. K., "Lateral earth pressure on retaining structure with anchor plates", Journal of geotechnical engineering, 113(3) (1987) 189-201.
2. Das B. M., Shukla S. K. "Earth anchors", J. Ross Publishing (2013).
3. Randolph M., Gourvenec S., "Offshore geotechnical engineering", CRC Press (2011).
4. Copstead R. L., Studier D. D., "An earth anchor system: installation and design guide" (1990).
5. Randolph M. F., Gaudin C., Gourvenec S. M., White D. J., Boylan N., Cassidy M. J., "Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments", Ocean Engineering, 38 (7) (2011) 818-834.
6. Gaudin C., O'Loughlin C. D., Randolph M. F., Cassidy M. J., Wang D., Tian Y., Merifield R. S., "Advances in offshore and onshore anchoring solutions", Australian Geomechanics, 49 (4) (2014) 59-72.
7. Shelton J. T., "OMNI-Maxtrade anchor development and technology", In OCEANS (2007) 1-10. IEEE.
8. O'Loughlin C. D., White D. J., Stanier S. A., "Novel Anchoring Solutions for FLNG-Opportunities Driven by Scale", In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference (2015).
9. An introduction to Manta ray and Stingray earth anchors (2014). Retrieved from www.earthanchor.com.
10. Das B. M., Seeley G. R., "Breakout resistance of shallow horizontal anchors", Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101 (9) (1975) 999-1003.
11. Murray E. J., Geddes J. D., "Uplift of anchor plates in sand", Journal of Geotechnical Engineering, 113 (3) (1987) 202-215.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

12. Ilamparuthi K., Dickin E. A., Muthukrisnaiah K., "Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand", Canadian Geotechnical Journal, 39 (3) (2002). 648-664.
13. Singh S. P., Ramaswamy S. V., "Effect of shape on holding capacity of plate anchors buried in soft soil", Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 3 (2) (2008) 145-154.
14. Song Z., Hu Y., O'Loughlin C., Randolph M. F., "Loss in anchor embedment during plate anchor keying in clay", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 135 (10) (2009) 1475-1485.
15. Consoli N. C., Thomé A., Girardello V., Ruver C. A., "Uplift behavior of plates embedded in fiber-reinforced cement stabilized backfill", Geotextiles and Geomembranes 35, (2012) 107-111.
16. Liu J., Liu M., Zhu Z., "Sand deformation around an uplift plate anchor", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138 (6) (2011) 728-737.
17. Han C., Wang D., Gaudin C., O'Loughlin C. D., Cassidy M. J., "Behaviour of vertically loaded plate anchors under sustained uplift", Géotechnique, 66 (8) (2016) 681-693.
18. Gaudin C., O'loughlin C. D., Randolph M. F., Lowmass A. C., "Influence of the installation process on the performance of suction embedded plate anchors", Géotechnique, 56 (6) (2006) 381-391.
19. Gaudin C., Simkin M., White D. J., O'Loughlin C. D., "Experimental investigation into the influence of a keying flap on the keying behaviour of plate anchors", In The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers (2010).
20. Gaudin C., Tian Y., Cassidy M. J., Randolph M. F., O'Loughlin C. D., "Design and performance of suction embedded plate anchors",

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

In Proceedings of 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Oslo: CRC Press (2015) 863-868.

21. Cassidy M. J., Gaudin C., Randolph M. F., Wong P. C., Wang D., Tian, Y., "A plasticity model to assess the keying of plate anchors", Géotechnique, 62 (9) (2012) 825.
22. Hossain M. S., Kim Y., Wang D., "Physical and numerical modelling of installation and pull-out of dynamically penetrating anchors in clay and silt", In ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V006T10A019-V006T10A019). American Society of Mechanical Engineers (2013).
23. O'Loughlin C. D., Blake A. P., Richardson M. D., Randolph M. F., Gaudin C., "Installation and capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through centrifuge tests", Ocean Engineering, 88, (2014) 204-213.
24. Blake A. P., O'Loughlin C. D., Gaudin C., "Capacity of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests", Canadian Geotechnical Journal, 52 (1) (2014) 87-95.
25. Wang D., O'Loughlin C. D., "Numerical study of pull-out capacities of dynamically embedded plate anchors", Canadian Geotechnical Journal, 51 (11) (2014) 1263-1272.
26. Blake A. P., O'Loughlin C. D., "Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests", Canadian Geotechnical Journal, 52(9) (2015) 1270-1282.
27. O'Loughlin C. D., Blake A. P., Gaudin C., "Towards a simple design procedure for dynamically embedded plate anchors", Géotechnique, 66 (9) (2016) 741-753.
28. Adrian R. J., "Twenty years of particle image velocimetry", Experiments in fluids, 39 (2) (2005) 159-169.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.2.6.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.2.213]

29. Keane R. D., Adrian R. J., "Theory of cross-correlation analysis of PIV images", Applied scientific research, 49 (3) (1992) 191-215.

30. White D. J., Take W. A., Bolton M. D., "Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis", In 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, No. 1, (2001) 997-1002.

31. White D. J., Take W. A., Bolton M. D., "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", Geotechnique, 53 (7) (2003) 619-632.

32. White D., RandolphM., Thompson B., "An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 5 (3) (2005) 01-12.

33. Ahmadi H., Hajialilue-Bonab M., "Experimental and analytical investigations on bearing capacity of strip footing in reinforced sand backfills and flexible retaining wall", Acta Geotechnica, 7 (4) (2012) 357-373.

34. Sabatini P. J., Pass D. G., Bachus R. C., Geotechnical engineering circular no. 4: ground anchors and anchored systems (No. FHWA-IF-99-015).

35. Lazarte C. A., Robinson H., Gómez J. E., Baxter A., Cadden A., Berg R., "Soil Nail Walls Reference Manual" (No. FHWA-NHI-14-007) (2015).

36. Perko H. A., "Helical piles: a practical guide to design and installation", John Wiley & Sons (2009).

37. Wood D. M., "Geotechnical modeling" (Vol. 1). CRC Press (2003).

38. Tognon AR, Rowe RK and Brachman RW, "Evaluation of side wall friction for a buried pipe testing facility", Geotextiles and Geomembranes 17 (1999) 193-212.