



ارزیابی آزمایشگاهی رفتار دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده به وسیله مهارهای صفحه‌ای

امیر نجفی‌زاده، امیرعلی زاد*، مریم یزدی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

کلمات کلیدی:

مطالعه آزمایشگاهی
دیوارهای حائل پشت به پشت
مهارهای صفحه‌ای
اندرکنش پی سطحی و دیوارهای حائل
پی سطحی
سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

خلاصه: اجرای دیوارهای حائل مهار شده با مهارهای صفحه‌ای یکی از متداول‌ترین روش‌های پایدارسازی خاکریزهاست. دیوارهای پشت به پشت خاک مسلح (BBMSEW) یکی از انواع دیوارهای خاک مسلح اصطلاحاً^۱ با هندسه پیچیده هستند که با توجه به کاربردشان کمتر مورد مطالعات تحقیقاتی قرار گرفته‌اند و تاکنون مطالعات جامعی در خصوص بررسی و تحلیل رفتار دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای تحت بار پی‌های سطحی و همچنین رفتار و اندرکنش دو دیوار با یکدیگر و تداخل اثر سطوح لغزشی دو دیوار و سطوح برشی خاک زیر پی سطحی صورت نگرفته است. از آنجا که اثر اندرکنش سطوح لغزشی خاک پشت دو دیوار پشت به پشت با یکدیگر و سطوح گسیختگی برشی خاک زیر پی سطحی به میزان زیاد بر ظرفیت باربری پی، پایداری و تغییر شکل دیوارهای مجاور اثرگذار است، لذا در این مقاله به وسیله مدل‌سازی فیزیکی اثر فاصله افقی دو دیوار و ابعاد صفحه بارگذاری (مدل پی سطحی) بر پایداری، ظرفیت باربری و مکانیزم گسیختگی خاک زیر صفحه بارگذاری و دیوارها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. به منظور مشاهده شکل، فرم و چگونگی تداخل منحنی‌های گسیختگی خاکریز پشت دیوارها از تکنیک سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که فاصله حدی اثرگذاری دو دیوار حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای برهم حدود ۲/۵ برابر ارتفاع دیوارهاست. همچنین ابعاد صفحه بارگذاری بر ظرفیت باربری و تداخل سطوح گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری و سطوح گسیختگی لغزشی دیوارها اثرگذار خواهد بود که نتایج نشان دهنده عرض موثر صفحه بارگذاری برابر با ارتفاع دیوارها هستند. در نتیجه در فواصل بزرگ‌تر از ۲/۵ برابر ارتفاع دیوارها با پی سطحی با عرض بزرگ‌تر از ارتفاع دیوارها، دیوارها می‌توانند بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش، جداگانه طراحی و تحلیل گردند.

۱- مقدمه

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 استفاده می‌شود [۲]. امروزه از انواع مهارهای صفحه‌ای در پروژه‌های اجرایی در خشکی و دریا استفاده می‌شود که از جمله می‌توان به مهارهای صفحه‌ای افقی، مایل و قائم، مهارهای اصطکاکی^۳، مهارهای اصطکاکی عمودی بارگذاری شونده^۴ و مهارهای صفحه‌ای مکشی دفن شونده^۵ اشاره نمود [۳]. همان گونه که ذکر شد، دیوارهای خاک مسلح از نوع پشت به پشت با

یکی از روش‌های پرکاربرد روش‌های پایدارسازی خاکریزها اجرای دیوارهای حائل مهار شده است. امروزه استفاده از دیوارهای حائل مهار شده با مهارهای صفحه‌ای^۱ با توجه به مسائل اقتصادی و سهولت اجرا مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. همچنین دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت (BBMSEW)^۲ یکی از انواع دیوارهای اصطلاحاً^۱ با هندسه پیچیده هستند که با توجه به کاربردشان در پایدارسازی خاکریزها کمتر مورد بررسی تحقیقاتی قرار گرفته‌اند [۱].

مهارهای صفحه‌ای از یک صفحه باربر مدفون شونده در خاک به همراه یک تاندون میلگردی یا کابلی برای انتقال بار سازه به خاک تشکیل می‌شوند.

- 1 Anchor Plate
- 2 Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.zad@iauct.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



فاصله S کمتر از ارتفاع دیوار باشد. همچنین سطوح شکست با تقلیل فاصله S به علت اندرکنش دیوارها به سمت دیوارها کشیده می‌شود که منجر به کاهش توده گوه لغزش می‌گردند. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد مقدار کشش حداکثر برای هر لایه تسلیح شده در بالای دیوار کمترین بوده و با عمق لایه افزایش پیدا می‌نماید. به طور کلی حداکثر کشش در لایه‌های تسلیح شده در یک سوم میانی دیوار مشاهده شد. مقدار کشش با حرکت به یک چهارم پایینی ارتفاع دیوار کاهش می‌یابد [۴].

در مطالعه هان و لشنسکی در سال ۲۰۱۰ محل و شکل گسیختگی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت مسلح شده با تسمه فلزی در نسبت‌های متفاوت فاصله دو دیوار به ارتفاع هر دیوار (W/H) مشخص شده است. بر اساس مطالعه این محققین، نماهای کرانی^۱ شدت تنش برشی در روش عددی را به دست آوردند که سطوح شکست گوه‌های گسیختگی دو دیوار، در نسبت‌های W/H بزرگ‌تر از ۲ با یکدیگر تداخل پیدا نمی‌کنند که این نتیجه‌گیری بر تحقیقات گذشته به وسیله هان و لشنسکی (۲۰۰۶) کاملاً منطبق است. همچنین مقایسه موقعیت و شکل گوه گسیختگی در نسبت‌های W/H با مشخصات مصالح خاکریز می‌تواند توضیح بدهد که چگونه سطح گسیختگی وارد ناحیه مسلح شده دیوار مقابل نمی‌شود. اگر چه برای $1/4 = W/H$ موقعیت و شکل سطوح گسیختگی منحرف شده و سطح گسیختگی در ناحیه مسلح کننده‌های دیوار مقابل تشکیل می‌شود [۵].

الشربینی، ابراهیم و عبدالسلام (۲۰۱۳) به مطالعه اثر فاصله دو دیوار و زاویه اصطکاک داخلی خاکریز پشت دیوارها بر روی تنش کششی حداکثر مسلح کننده‌ها (ژئوگرید) پرداختند. نتایج حاصله نشان دادند که دیوارهای پشت به پشت برای دو مصالح خاکریز بر روی یکدیگر اثر متفاوت می‌گذارند و ماکزیم تنش در یک سوم پایین ارتفاع دیوار، برای خاکریز با مصالح زاویه اصطکاک داخلی زیاد و دو سوم برای مصالح زاویه اصطکاک داخلی کم وجود می‌آید. لازم به ذکر است که ماکزیم تنش در بخش بالایی دیوار با نسبت $W/H = 1/4$ کمی بیشتر از دیوارهای $W/H = 2$ و $W/H = 3$ است. این نتیجه این گونه توضیح داده می‌شود که ماکزیم تنش مسلح کننده دیوار با نسبت $W/H = 1/4$ برای دو طرف دیوار پخش شده و با همپوشانی سطح گسیختگی در بخش بالایی تشکیل می‌شود و در نتیجه تنش‌های قسمت بالایی دیوار افزایش می‌یابد [۶].

همچنین تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه اثرات فاصله دو دیوار خاک مسلح پشت به پشت، تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک و اتصال مسلح

توجه به هندسه و شرایط بارگذاری در دسته دیوارهای با هندسه پیچیده قرار می‌گیرند و راهنمای FHWA-NHI-10-024 فصل ششم را به این نوع دیوارها اختصاص داده است که طراحی آن‌ها با دیوارهای متعارف، متفاوت است. بر اساس این آیین‌نامه طبق مطالعات صورت گرفته توسط الیاس و کریستوفر (۱۹۹۷)، الیاس و همکاران (۲۰۰۱) در صورتی که فاصله دو دیوار از مقدار $H \cdot \text{tg}(45 - (\phi/2))$ ارتفاع هر دیوار و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند بیشتر باشد، دو دیوار به اندازه کافی از یکدیگر فاصله دارند و بدون تداخل نواحی فعال و تسلیح شده می‌توانند تحلیل و طراحی گردند. این فاصله به عنوان فاصله موثر معرفی شده است [۱].

یکی از پارامترهای مهم در طراحی دیوارهای نگهبان پشت به پشت (خاک مسلح یا حائل)، تعیین زاویه، شکل، فرم و نحوه تشکیل گوه گسیختگی پشت دیوارهاست. در حقیقت هندسه گوه گسیختگی است که چگونگی اعمال فشار به پشت دیوار را تعیین می‌کند [۳].

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص بررسی اثر فاصله افقی دو دیوار خاک مسلح پشت به پشت و مقاومت برشی خاکریز پشت دیوارها بر روی زاویه سطوح گسیختگی خاک پشت دیوار (فشار رانشی پشت دیوار)، جابجایی افقی دیوارها و تنش کششی حداکثر مسلح کننده‌ها در دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت مسلح شده با تسمه‌های فلزی و یا ژئوگرید صورت گرفته است.

وون و کیم (۲۰۰۷) تغییرات فشار جانبی وارد بر پشت هر دیوار، جابجایی افقی هر دیوار و تنش کششی حداکثر مسلح کننده‌ها در دیوارهای پشت به پشت مسلح شده با لایه‌های یک سره ژئوگرید را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، ملاحظه گردید که وقتی که فاصله لبه تا لبه نواحی مسلح شده دیوارها (S) برابر ارتفاع دیوار باشد فشار جانبی پشت دیوارها تقریباً برابر فشار محرک محاسبه شده با استفاده از روش رانکین می‌باشد. مقدار فشار خاک در یک چهارم پایین دیوار افزایش پیدا کرده و به فشار خاک در حالت سکون می‌رسد و این به علت درگیر بودن دیوار در پای دیوار با فونداسیون زیر به صورت صلب می‌باشد (تعمیم اثر شرایط مرزی تابعی از مقاومت و سختی خاک فونداسیون در پای دیوار است). همچنین ملاحظه گردید که سطوح شکست گوه‌های گسیختگی دیوارهای پشت به پشت در فاصله S بزرگ‌تر از ارتفاع دیوار، هم‌دیگر را قطع نمی‌نمایند. این امر نشان می‌دهد که در دیوارهای پشت به پشت با S بزرگ‌تر و یا مساوی ارتفاع، مستقل از یکدیگر عمل کرده و همانند دیوارهای خودایستای تنها محاسبه می‌گردند. برخورد سطوح شکست از زمانی شروع می‌شود که

بود [۸].

جلالی مقدم و همکاران (۲۰۱۹) طی یک مطالعه (بر اساس مدل‌سازی آزمایشگاهی دیوار مهار شده با مهارهای صفحه‌ای) بیشترین بازدهی مهارهای صفحه‌ای را به شکل مربع و آرایش آن‌ها را در نمای روبروی دیوار به صورت لوزی گزارش کردند [۹].

سمیعی و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه آزمایشگاهی به وسیله میز لرزان بر روی دیوار خاک مسلح پشت به پشت به بررسی تأثیر طول همپوشانی مسلح کننده‌ها (L_R) و ترتیب و آرایش اتصال دیوارهای روبرو بر توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده‌ها و مکانیزم انتشار نواحی گسیختگی برشی پرداختند. همچنین مسلح کننده‌ها به طور کامل ابزاربندی شده و تکنیک سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) برای شناسایی نواحی برشی در بدنه مدل‌ها استفاده شد. بر اساس نتایج PIV، سطح گسیختگی در مدل‌ها به عنوان ترکیبی از سطح مقعر و صفحه مایل در مدل‌ها تعیین شد. نتایج نشان دادند که هندسه سطح گسیختگی، تحت تأثیر تغییر طول همپوشانی مسلح کننده‌ها (L_R) قرار نگرفته است، اما به ترتیب اتصال به دیوارها بستگی دارد. همچنین مشخص شد که اگر چه استفاده از مسلح کننده‌های همپوشان به جای اتصال مستقیم دو دیوار باعث توسعه بیشتر نواحی گسیختگی برشی می‌شود، اما می‌تواند راه حل مناسبی در کاهش نیروهای بسیج شده در دیوارها باشد [۱۰].

با توجه به موارد یاد شده مطالعات صورت گرفته به بررسی رفتار دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت و اندرکنش آن‌ها بر یکدیگر با توجه به فاصله، ارتفاع دو دیوار، اتصال مسلح کننده‌ها، مقاومت برشی خاک و ... محدود شده است و در خصوص رفتار دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای تحت بار پی‌های سطحی و رفتار و اندرکنش دو دیوار با یکدیگر و تداخل رفتار سطوح لغزشی دو دیوار و سطوح لغزشی گسیختگی برشی خاک زیر پی سطحی (بارگذاری اعمال شده به خاکریز پشت دیوارها) مطالعات گسترده‌ای در دسترس نیست.

بر این اساس، اهداف مقاله حاضر ارائه نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده به منظور ارزیابی مواردی از قبیل اثر فاصله افقی دو دیوار و ابعاد پی مستقر بر خاکریز دو دیوار حائل پشت به پشت بر پایداری دیوار و مکانیزم، شکل و فرم گوه گسیختگی آن‌ها بوده است که به منظور مشاهده سطوح لغزش شکل گرفته در خاکریز و به عبارتی گوه گسیختگی دیوارها از تکنیک سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده است.

کننده‌ها بر روی زاویه گسیختگی خاک با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری (نرم‌افزار دو بعدی PLAXIS) نمودند. تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که در یک دیوار مشخص (از لحاظ ارتفاع و نوع)، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، زاویه گسیختگی خاک افزایش می‌یابد. این امر در کلیه حالات دیواره پل‌های تک، ۲ خطه، ۳ خطه و حالت‌های متصل و غیرمتصل صادق است. علاوه بر این در یک دیوار با ارتفاع خاک ثابت، برای دیواره پل‌های تک، ۲ خطه و ۳ خطه، با افزایش فاصله دیوارها، نسبت زاویه گسیختگی خاک کاهش می‌یابد. همچنین در دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت زاویه گسیختگی دو دیوار با توجه به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک داخلی خاکریز می‌تواند با یکدیگر تقاطع داشته که در صورت تقاطع، دو صفحه گسیختگی دو دیوار پشت به پشت رفتار آن‌ها بر یکدیگر اثر گذار بوده و باید به صورت هم‌زمان طراحی و بررسی گردند. ضمناً زاویه صفحات گسیختگی از محل تقاطع تغییر نموده و افزایش می‌نمایند. در دیوارهای پشت به پشت در صورت غیرمتقاطع بودن صفحات گسیختگی دو دیوار، هر یک به صورت منفرد و مستقل عملکرده و تأثیری بر یکدیگر ندارند و می‌توانند به صورت مستقل تحلیل و طراحی گردند [۷].

جبری و بن مبارک (۲۰۱۷) مطالعه و مدل‌سازی به روش المان محدود (FEM) را برای تجزیه و تحلیل رفتار دیوار خاک مسلح پشت به پشت مسلح شده با ژئوسنتتیک تحت تنش‌های سیکلی هارمونیک چرخشی برگزیدند. برای بررسی پاسخ لرزه‌ای، مدل‌سازی‌های عددی در حالت کرنش مسطح و با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی PLAXIS انجام شد. نتایج از نظر جابجایی افقی دیواره‌ها و بارهای کششی بر روی مسلح کننده‌ها (تنش حداکثر مسلح کننده‌ها) در پایان بارگذاری هارمونیک سیکلی ارزیابی شدند. نتایج مطالعه نشان داد اگر فاصله بین دیوارها به طور قابل توجهی کاهش یابد (مورد $W/H = 1.4$)، جابجایی بیشینه افقی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش شدید جابجایی دیوار، به اندرکنش بین دیوارهای بسیار نزدیک نسبت داده شد ($S = 0m$). کاهش جابجایی ناشی از فاصله نزدیک نشان می‌دهد که اگر فاصله بین دو دیوار به شدت کاهش یابد، این دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت را می‌توان با یک ضریب اطمینان بالاتر برای پایداری خارجی طراحی کرد. همچنین دیده شد که برای تمام مقادیر W/H تحت شرایط دینامیکی مورد مطالعه، توزیع تنش کششی حداکثر مسلح کننده‌ها عملاً خطی است. این نتیجه با آنچه که در مطالعات پیشین برای ساختار دیوار خاک مسلح^۱ با هندسه ساده با یک طرف، ارائه شده بود، مشابه

جدول ۱. فاکتورهای مقیاس گذاری مورد استفاده مدل سازی فیزیکی

Table 1. Used scaling factors in physical modelling

کمیت	رابطه کلی	شتاب 1g (آزمایشگاه)
طول	n_l	1 / 10
چگالی جرمی	n_p	1
سختی	n_G	1 / 10 ^{0.5}
تنش	$n_p n_g n_l$	1 / 10
نیرو	$n_p n_g n_l^3$	1 / 10 ³
کرنش	$n_p n_g n_l/n_G$	1 / 10 ^{0.5}
جابجایی	$n_p n_g n_l^2/n_G$	1 / 10 ^{1.5}

۲- مدل سازی آزمایشگاهی

۲-۱- مدل دیوارها

برای انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و ساخت دیوارهای حائل از مقیاس کاهنده ابعاد ۱ به ۱۰ استفاده شده است. بر این اساس تمامی طول‌های موجود بر عدد ۱۰ تقسیم گردیده است. بنابراین برای دیواری به طول و ارتفاع ۵ متر، ابعاد دیوار به ۵۰ سانتی متر تقلیل یافته است. برای مدل سازی دیوارهای حائل که عمدتاً^۱ از مقاطع فولادی یا بتنی پیش ساخته و یا یکپارچه بتن ریزی شده استفاده می‌شود، بر اساس یک مطالعه در سال ۲۰۰۳ و با انجام تحلیل ابعادی، چهار نوع مصالح با ضخامت‌های معادل به عنوان مدل دیوار حائل بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متری در مدل سازی‌های آزمایشگاهی معرفی شده که در این مطالعه در تمامی آزمایش‌ها از ورق آلومینیومی با ضخامت ۰/۹ میلی متر استفاده شده است. همچنین فاکتورهای مقیاس گذاری پارامترهای مطالعه پیش رو در مدل سازی فیزیکی انجام شده به شرح جدول یک خواهند بود [۱۱].

۲-۲- خاک مورد آزمایش

در کلیه آزمایش‌ها از ماسه خشک منطقه صوفیان در استان آذربایجان شرقی استفاده شده است که با توجه به مطالعات گذشته برای استفاده از سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) مناسب تشخیص داده شده است (جنس ذرات تشکیل دهنده این خاک به گونه‌ای است که دانه‌های خاک با تابش نور، طیف‌های متفاوت رنگی (هر چند به هم نزدیک)، بازتاب می‌دهند

که باعث تمایز دانه‌ها در تصاویر گرفته شده می‌شوند [۹]. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این خاک در جدول ۲ و منحنی دانه بندی آن در شکل یک ارائه شده است.

۲-۳- ابعاد و آرایش میل مهارها و مهارهای صفحه‌ای

به طور معمول در اکثر پروژه‌های ساخت دیوارهای حائل، مهارها دارای فواصل افقی و عمودی حداقل و حداکثر یک الی ۳ متری از یکدیگر هستند. البته برای مهار کننده‌هایی که بر روی آن‌ها عمل پس کشیدگی انجام می‌شود، همچون کابل‌ها^۱ و مونوبارها^۲ (میخ‌هایی که پس از انجام تمهیدات خاص عملیات پس کشیدگی بر روی آن‌ها تحت ضوابط دقیق آیین‌نامه‌ای انجام شده و در حالت فعال نگهداشته می‌شوند)، فواصل افقی و عمودی در گستره بالای محدوده یاد شده قرار می‌گیرد [۱۲]. از آنجایی که عملیات پس کشیدگی روی این نوع از مهارهای صفحه‌ای انجام نمی‌شود و با در نظر گرفتن آرایش لوزی که بر اساس مطالعه جلالی مقدم و همکاران به عنوان بهترین آرایش مهار کننده‌ها تشخیص داده شده است [۹]، فاصله مورب حدود ۲ متری برای مهارها و فواصل افقی و عمودی ۳ متری برای آن‌ها انتخاب گردید و با ضرب این عدد در مقیاس کاهنده ابعاد، مقدار ۳۰ سانتی متر برای فواصل مرکز تا مرکز مهار کننده‌ها در دیوارها به دست آمد. در شکل ۲ آرایش لوزی شکل ۴ مهار در مقطع دیوار مورد استفاده در این مقاله، به صورت شماتیک نشان داده شده است.

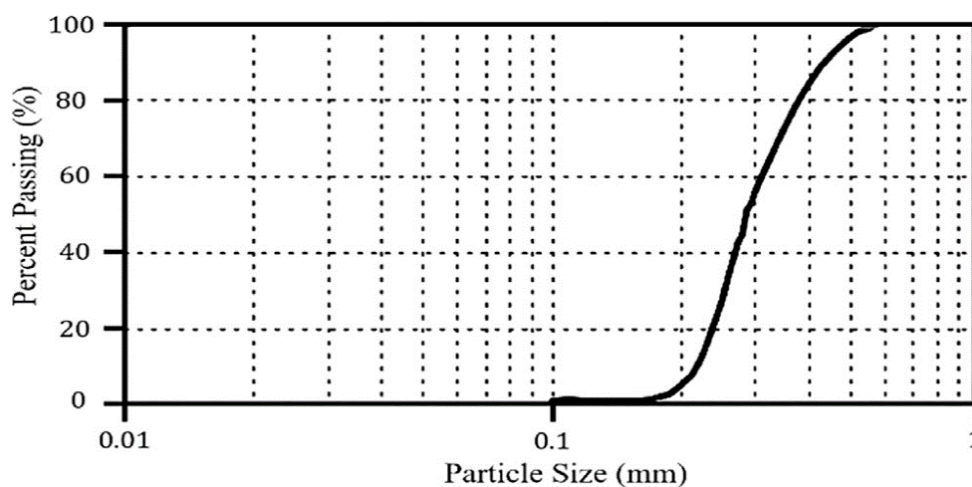
1 Strands

2 Mono Bars

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد آزمایش

Table 2. Physical & mechanical properties of tested soil

مقدار	واحد	نماد	پارامتر
SP		-	رده‌بندی بر اساس USCS
۱/۴۱	-	Cu	ضریب یکنواختی
۱/۰۷	-	Cc	ضریب انحناء
۰/۲۲	mm	D ₁₀	قطر موثر دانه‌ها
۰/۲۹	mm	D ₅₀	قطر میانگین دانه‌ها
۱۷/۷۱	kN/m ³	γ _d -max	حداکثر دانسیته خشک
۱۴/۱۸	kN/m ³	γ _d -min	حداقل دانسیته خشک
۳۰	degree	φ	زاویه اصطکاک داخلی
۲/۶۵	-	G _s	چگالی ویژه



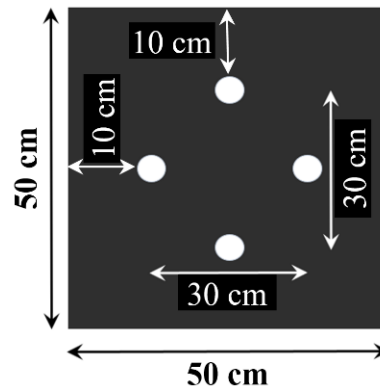
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده

Fig. 1. Soil particle size distribution graph

در این مقاله از نوع مربعی بوده است که با توجه به اعمال ضریب کاهنده ۱ به ۱۰ ابعاد واقعی بعد ۵۰ سانتی متری به بعد ۵ سانتی متر مدل شده است. در شکل ۳ نمونه میل مهار مورد استفاده به همراه نمونه صفحات مهاری مورد استفاده نشان داده شده‌اند.

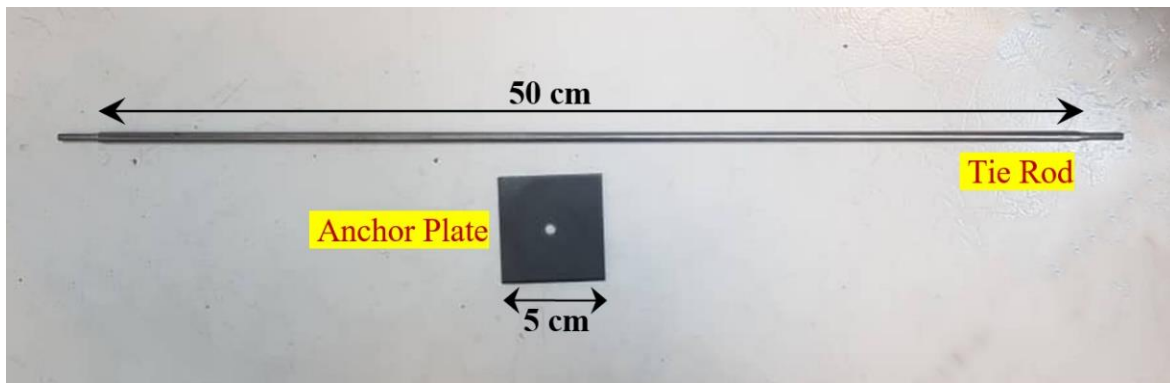
طول میل مهارهای^۱ به کار رفته برابر ۵۰ سانتی متر بوده که مقیاس کوچک شده میل مهار ۵ متری طی اعمال ضریب کاهنده ۱ به ۱۰ در واقعیت بوده‌اند. همچنین قطر آن‌ها برابر ۴ میلی متر می‌باشد که معادل میلگرد به قطر ۴ سانتی متر (میلگرد نمره ۴۰) بوده است. مهار صفحه‌ای مورد استفاده

1 Tie Rod



شکل ۲. چیدمان لوزی مهار کننده‌ها در نمای روبروی دیوار حائل

Fig. 2. Front view of anchors arrangement in retaining wall



شکل ۳. نمونه میل‌مهار و صفحه مهاری مورد استفاده

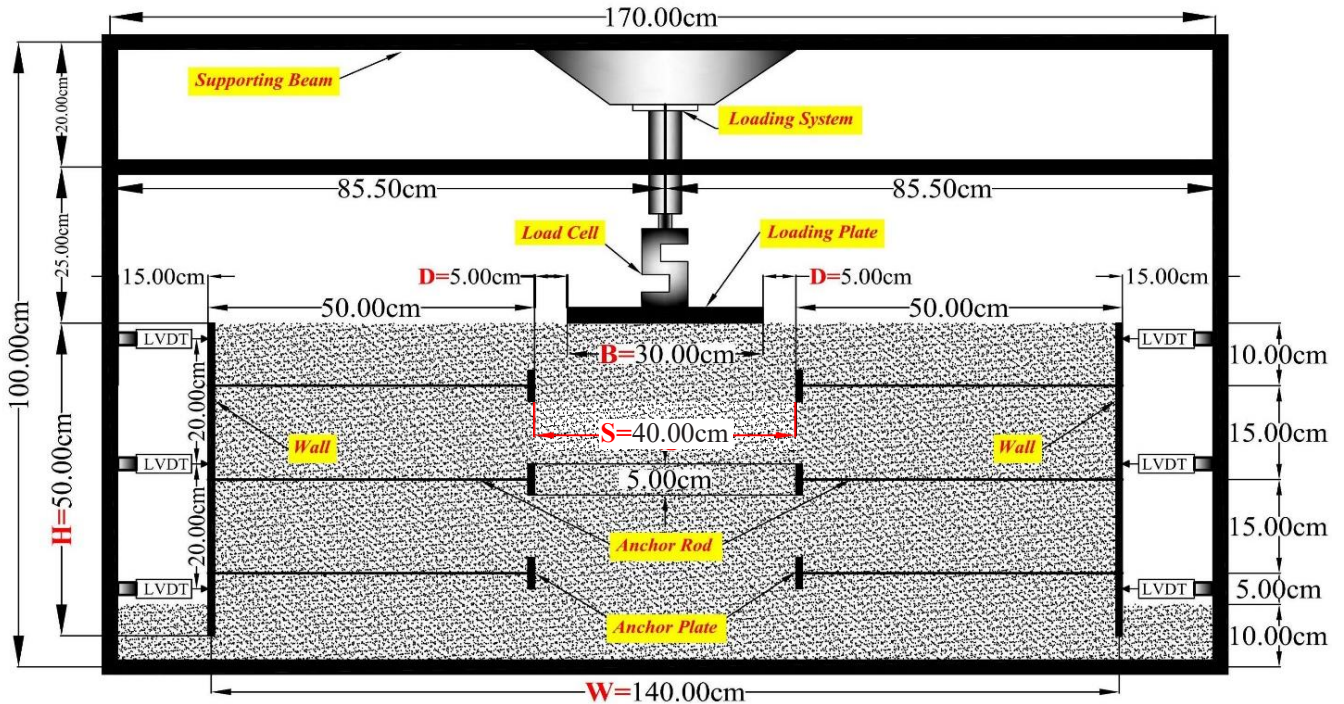
Fig. 3. Used sample tie rod and anchor plate

حصول اطمینان از عدم تغییر شکل و شکم دادگی آن در جریان بارگذاری در آزمایش‌ها بوده است. با هدف دست‌یابی به بالاترین دقت ممکن و ثابت بودن نرخ اعمال بار در تمامی آزمایش‌ها از شیوه بارگذاری کرنش کنترل استفاده شده است. برای رسیدن به این مهم، طی تمهیدات صورت گرفته بر روی شفت متحرک سیستم بارگذاری، جابجاسنجی دیجیتالی خطی^۲ (LVDT) نصب گردید تا طی آن بارگذاری به صورت کرنش کنترل و با گام یکسان در هر مرحله انجام شود و سعی شده است سرعت بارگذاری در حدود یک میلی‌متر بر دقیقه ثابت نگاه داشته شود. لازم به ذکر است که علت انتخاب نحوه بارگذاری کرنش کنترل نسبت به حالت تنش کنترل، افزایش میزان دقت در آزمایش‌ها و

2 Linear Variable Displacement Transducer

۲-۴- جعبه آزمایش، سیستم بارگذاری و اندازه‌گیری به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش مربوط به تحلیل ابعادی، برای ساخت دیوار حائلی به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، جعبه‌ای فلزی به طول ۱۷۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و عمق ۸۰ سانتی‌متر ساخته شده است، مقدار بیشتر طول و عمق محفظه با هدف جلوگیری از اثرات مرزی بر نتایج آزمایش‌ها بوده و عرض ۵۰ سانتی‌متری محفظه، برابر با طول دیواره، به منظور حصول اطمینان از برقراری کامل شرایط کرنش مسطح بوده است. برای مشاهده یک سمت دیواره در خلال آزمایش‌ها و عکس‌برداری از سطح آن، در یک وجه محفظه طلق شفاف^۱ با ضخامت مناسب ۳ سانتی‌متر تعبیه گردیده است. این ضخامت به منظور

1 Plexiglass



شکل ۴. شکل شماتیک دستگاه مدل سازی فیزیکی

Fig. 4. Schematic shape of physical modelling apparatus

حائز اهمیت آن است که در خلال انجام هر آزمایش، دوربین در محل خود تا انتهای آزمایش ثابت باقی بماند. پس از اندازه گیری در فضای تصویر، بردارهای جابجایی حاصل با استفاده از تبدیل فتوگرامتریک از فضای تصویر به فضای جسم منتقل شده اند.

۳- نحوه انجام آزمایش ها

در حالت کلی، روند ساخت دیوارها در تمامی آزمایش ها یکسان و از مراحل خاکریزی، تراکم، نصب رویه^۴ و قرار دادن مهارها 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 ها ادامه یافته است. با قرار دادن ورق های آلومینیومی در مکان تعیین شده، نصب و اتصال مهارکننده ها به آنها انجام گرفته است. هر دو سمت میل مهارها رزوه بوده تا از یک سمت به صفحات مهار و از سمت دیگر توسط مهره از درون سوراخ های تعبیه شده به رویه ها اتصال داده شوند. سپس با خاکریزی لایه های پشت دیوارها و رسیدن به تراز استقرار مهار کننده های بالایی، نصب و اتصال آنها به

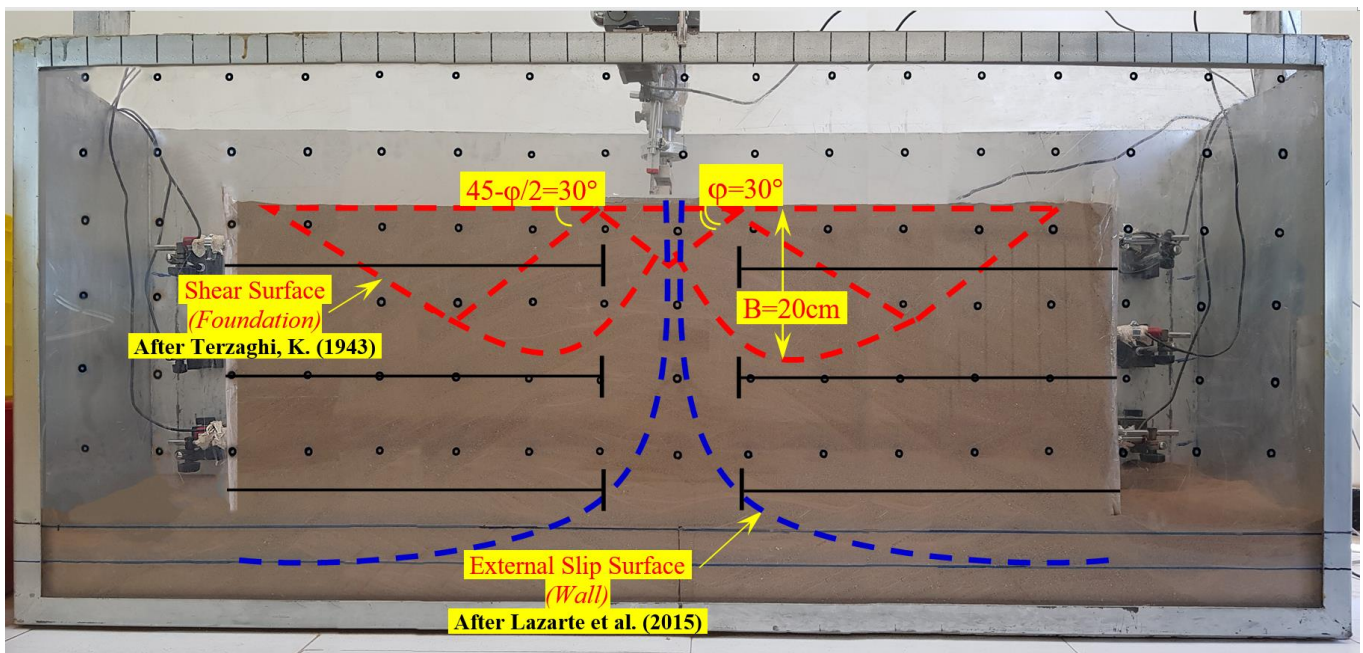
حصول نتایج دقیق تر بوده است. همچنین از یک سلول بارگذاری^۱ به منظور ثبت مقادیر نیروی وارده در مراحل بارگذاری، بهره گرفته شده است. کلیه داده ها اعم از بار و جابجایی صفحه بارگذاری^۲ توسط سیستم دیجیتالی ثبت داده^۳ برداشت و ذخیره شده اند. همچنین به منظور برداشت مقادیر تغییر شکل دیوارها، سه جابجایی سنج دیجیتالی (LVDT) در ارتفاع دیوارها نصب شده اند. در شکل ۴ محفظه آزمایش، سیستم بارگذاری و ابزارگذاری های انجام شده به همراه ابعاد و جانمایی هر یک نشان داده شده اند.

۲-۵- سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

با استفاده از دوربین گوشی Galaxy S8 حاوی حسگر CCD و با قدرت عکس برداری ۱۰ مگاپیکسل، عکس برداری از دیوارها در انتهای هر مرحله بارگذاری انجام شده و سپس تغییر مکان ذرات خاک با استفاده از تحلیل PIV میان تصاویر متوالی اندازه گیری شده است. دوربین بر روی سه پایه ای نصب گردیده و نسبت به سطح افق تراز ثابت شده است. نکته

- 1 Load Cell
- 2 Loading Plate
- 3 Data Logger

4 Facing



شکل ۵. تصویر دستگاه مدل‌سازی فیزیکی و جانمایی تقریبی سطوح لغزشی گوه خاکریز دیوارها [۱۱] و سطوح گسیختگی برشی خاک [۱۲]. زیر صفحه بارگذاری

Fig. 5. Physical modelling apparatus & wall sliding surfaces & loading plate shear fracture surfaces

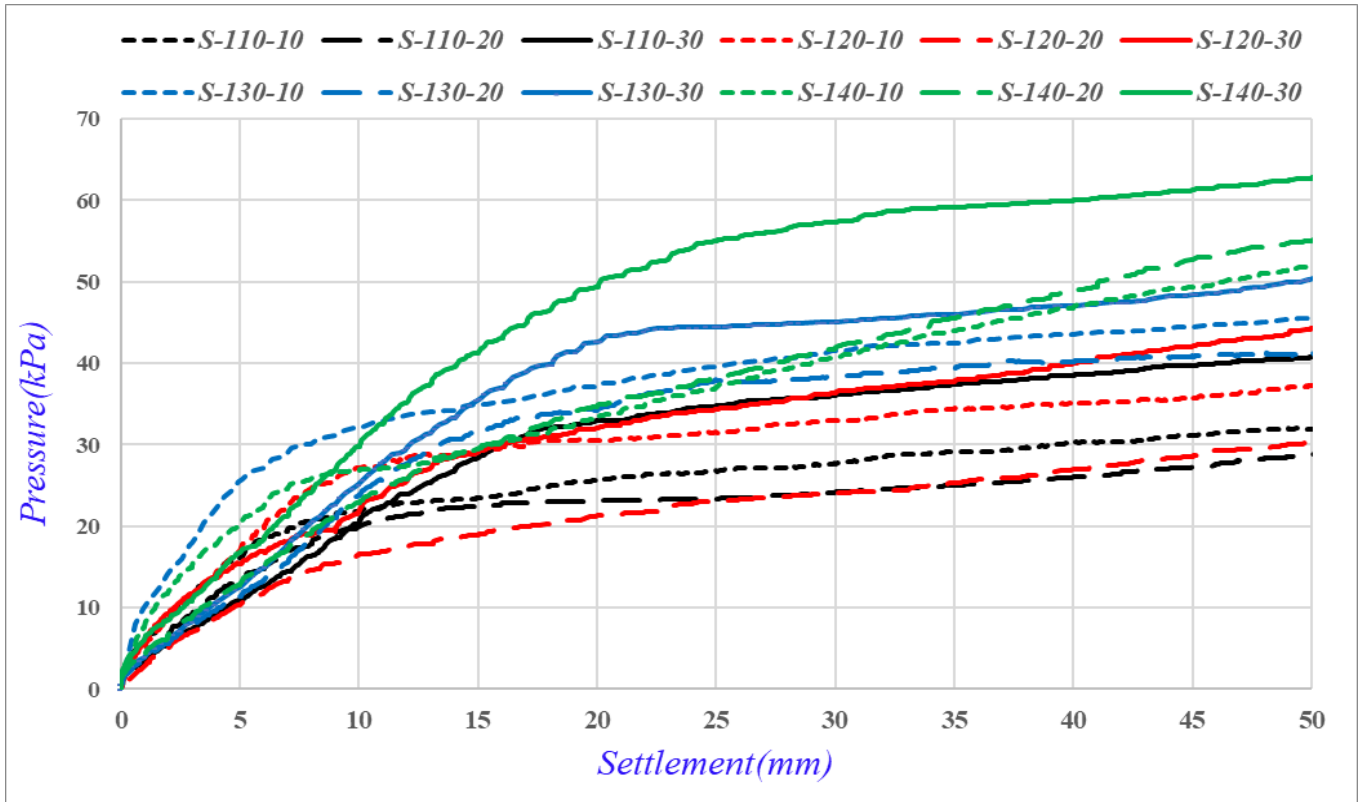
همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است به نظر می‌رسد دو مکانیزم گسیختگی در تحلیل رفتار مکانیکی سیستم مرکب از دو دیوار حائل پشت به پشت بارگذاری شده با یک پی سطحی می‌بایست مدنظر قرار گیرد: اولاً تداخل و برهم نهی آثار سطوح گسیختگی برشی پی از هر طرف با دیوار مجاور و تشکیل یک سطح لغزشی مرکب در سمت هر دیوار و ثانیاً تداخل و برهم نهی این دو سطوح لغزشی مرکب تشکیل شده با یکدیگر. این دو مکانیزم به تفصیل در بخش تحلیل PIV مورد بحث قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است که عوامل متعددی بر شکل، فرم و چگونگی تشکیل سطوح لغزشی مرکب اثر گذارند که در مطالعه پیش‌رو تنها به اثر دو عامل فاصله دیوارها و عرض پی سطحی پرداخته شده است.

۴- نتایج آزمایش‌ها

همان گونه که ذکر شد، مقادیر فشار اعمالی صفحه بارگذاری در فواصل زمانی یک ثانیه برای کلیه آزمایش‌ها ثبت گردیده است که در شکل ۶ کلیه نمودارهای فشار-نشست صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف و فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای ارائه شده‌اند.

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 نگه داشتن 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 حدود ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب بوده است.

هر آزمایش در ۵۰ مرحله انجام گردیده است. مرحله اول حالت فاقد اعمال بار بوده و عکس اول از سطح خاک گرفته شده است. با انجام بارگذاری طی جابجایی ثابت یک میلی‌متر و ثبت پیوسته بار وارده، نشست صفحه بارگذاری و جابجایی‌های افقی دیوارها توسط دیتالاگر، عکس‌برداری از توده خاک انجام شده و عکس دوم ذخیره گردیده است. این کار مجموعاً در ۵۰ مرحله تا رسیدن به نشست ۵ سانتی‌متری صفحه بارگذاری ادامه یافته است. در شکل ۵ نمای کلی دستگاه مدل‌سازی به همراه جانمایی و وضعیت تقریبی سطوح گوه لغزشی خاکریز پشت دیوارها [۱۲] و سطوح گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری [۱۳] به عرض ۲۰ سانتی‌متر و فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری دو دیوار پشت به پشت، نشان داده شده‌اند.



شکل ۶. نمودار فشار-نشست صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف و فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای

Fig. 6. Loading plate pressure-settlement graphs with different width & walls displacement

برشی کلی^۳ و منحنی II معمولی برای وقوع شکست برشی موضعی^۴ است. همچنین، منحنی III مربوط به بسیاری از خاک‌های اصطلاحاً "چسبنده-اصطکاکی"^۵ (c - φ) است که بین دو مورد فوق، حد متوسط حالت گسیختگی برشی را نشان می‌دهند. همه منحنی رفتارهای مکانیکی دیگر در نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه به گسیختگی برشی پانچ^۶ مربوط می‌شود [۱۵].

بررسی نمودارهای فشار-نشست ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که در اکثر حالات منحنی رفتاری شبیه به حالات I، II و III هستند و تنها نمودارهای مربوط به آزمایش‌های S-۱۴۰-۲۰ و S-۱۳۰-۱۰ و خصوصاً S-۱۴۰-۱۰ بر اساس توضیحات ارائه شده شبیه به منحنی رفتاری پی سطحی در گسیختگی برشی پانچ هستند که این موضوع در بخش مربوط به تحلیل PIV بحث خواهد شد.

۴-۱- ظرفیت باربری

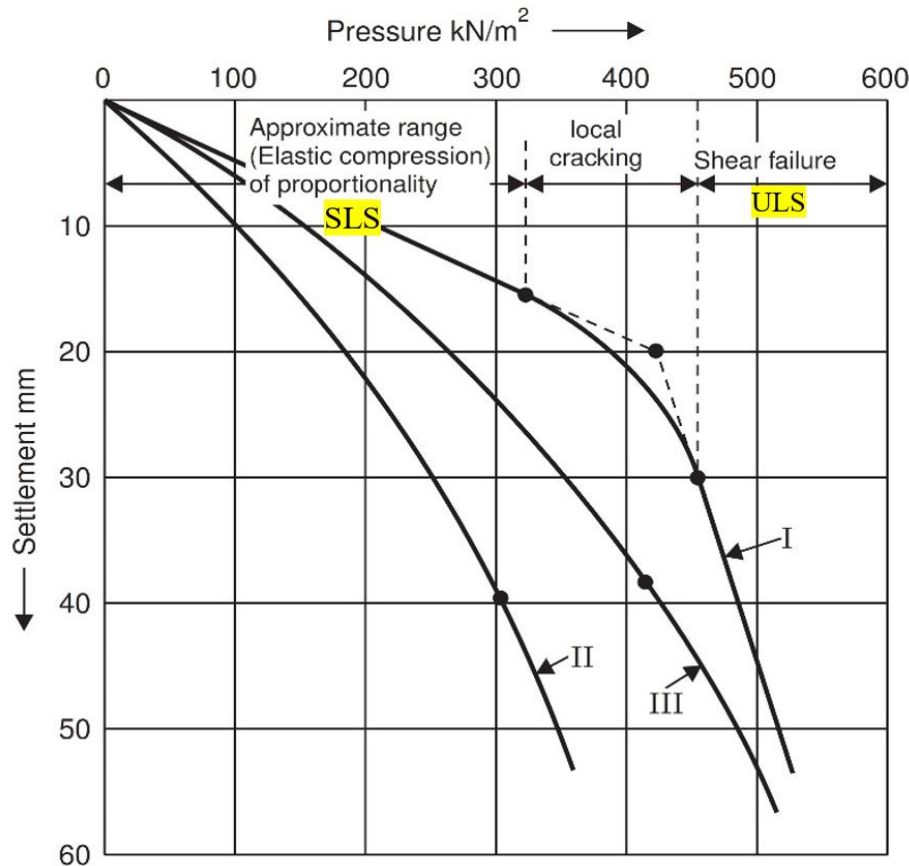
دو مدل نظری مختلف حالات حدی بهره‌برداری^۱ و حدی نهایی^۲ برای طراحی از جمله طراحی ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. در طراحی بر اساس معیار حالت حدی بهره‌برداری، یک رفتار الاستیک خطی از خاک در نظر گرفته می‌شود که برای تجزیه و تحلیل الاستیک، طراحی روسازی و... کاربرد دارد. در مقابل، در طراحی بر اساس معیار حالت نهایی، رفتار الاستوپلاستیک خاک در نظر گرفته می‌شود که برای تجزیه و تحلیل پلاستیک، طراحی لرزه ای و... استفاده می‌شود [۱۴].

این موضوع در خصوص پی‌های سطحی صلب با مدل آزمایش بارگذاری صفحه در شکل ۷ توضیح داده شده است [۱۵].

منحنی‌های معمول نشان داده شده در شکل ۷ مربوط به ۳ مکانیسم گسیختگی برشی خاک زیر پی است. منحنی I معمولی برای شکست

- 3 General Shear Failure
- 4 Local Shear Failure
- 5 Cohesive-Frictional
- 6 Punch Shear Failure

- 1 Serviceability Limit State (SLS)
- 2 Ultimate Limit State (ULS)



شکل ۷. نمودارهای عمومی نتایج آزمایش بارگذاری صفحه (مدل پی سطحی صلب) [۱۵].

Fig.7. Typical Load-settlement curve from Plate Load Test (Model of rigid shallow foundation) [15]

کاربردی این پارامتر محاسبه مدول واکنش بستر (K_s) برای پی‌های سطحی است [۱۶].

ذکر این نکته ضروریست که از آنجا که یکی از اهداف مطالعه حاضر شناسایی شکل، فرم و مکانیزم منحنی‌های لغزش گوه گسیختگی پشت دیوارهاست، لذا افزایش بار بر روی صفحه بارگذاری تا اطمینان از حصول رفتار پلاستیک خاک زیر صفحه و پشت دیوارها و لغزش کامل گوه‌های گسیختگی می‌بایست ادامه یابد. همانگونه که ذکر شد این بارگذاری تا اطمینان از حصول گسیختگی خاک زیر صفحه بارگذاری یعنی نشست ۵ سانتی‌متر ادامه یافته و گزارش گردیده است.

بر اساس موارد ذکر شده، مقادیر ظرفیت باربری و تنش تسلیم صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف و فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای از نمودارهای لگاریتمی استخراج و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

با توجه به موارد مذکور، از آنجا که یافتن مقادیر ظرفیت باربری (Q_u) و تنش تسلیم (Q_y) از اهمیت خاصی برخوردارند و هر چند یافتن ظرفیت باربری به عنوان مقداری که با تثبیت شیب منحنی فشار-نشست به دست می‌آید پیچیدگی چندانی ندارد (در این مطالعه نشست ۵ سانتی‌متر به منظور اطمینان از تثبیت شیب سخت شوندگی منحنی فشار-نشست برای یافتن مقادیر ظرفیت باربری در نظر گرفته شده است)، لکن قابل مشاهده است که تعیین نقطه تسلیم چندان آسان نیست.

برای غلبه بر این مشکل، آیین نامه ۷۰۰۱ NAVFAC روش دیگری برای ترسیم منحنی فشار-نشست ارائه داده است. با توجه به این آیین‌نامه، یک نمودار لگاریتمی فشار-نشست ترسیم می‌شود. چنین گرافی دو خط مستقیم خواهد داشت که تقاطع آن‌ها به عنوان نقطه تسلیم در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، فشار متناظر نقطه مربوطه به عنوان فشار متناظر نقطه تسلیم یا تنش تسلیم در نظر گرفته می‌شود. البته یکی از مهم‌ترین جنبه‌های

جدول ۳. مقادیر ظرفیت باربری و تنش تسلیم صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف و فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای

Table 3. Loading plate bearing capacity & yield pressure with different width & walls displacement of back-to-back anchored retaining walls

علامت اختصاری آزمایش	فاصله دو دیوار (W)	عرض صفحه بارگذاری (B)	تنش تسلیم (Q _y)	ظرفیت باربری (Q _u)
-	سانتی‌متر	سانتی‌متر	کیلوپاسکال	کیلوپاسکال
S-110-10	۱۱۰	۱۰	۲۳/۸۶	۳۱/۹۶
S-110-20	۱۱۰	۲۰	۲۱/۰۹	۲۸/۸۴
S-110-30	۱۱۰	۳۰	۳۱/۹۹	۴۰/۸۴
S-120-10	۱۲۰	۱۰	۲۱/۳۸	۳۷/۲۱
S-120-20	۱۲۰	۲۰	۱۴/۸۱	۳۰/۳۰
S-120-30	۱۲۰	۳۰	۲۶/۴۹	۴۴/۲۹
S-130-10	۱۳۰	۱۰	۲۶/۲۷	۴۵/۵۳
S-130-20	۱۳۰	۲۰	۲۹/۲۷	۴۱/۴۲
S-130-30	۱۳۰	۳۰	۴۲/۶۵	۵۰/۴۰
S-140-10	۱۴۰	۱۰	۲۶/۹۹	۵۷/۷۶
S-140-20	۱۴۰	۲۰	۳۳/۳۵	۵۵/۰۷
S-140-30	۱۴۰	۳۰	۵۳/۶۸	۶۲/۷۱

۴-۲- تاثیر فاصله دیوارها

۳۰ سانتی‌متر ملاحظه می‌شود افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری فاصله دو دیوار در مقایسه با فاصله اولیه ۱۱۰ سانتی‌متری، تنش تسلیم را به ترتیب ۱۷٪ کاهش، ۳۳٪ افزایش و ۶۸٪ افزایش و ظرفیت باربری را به ترتیب ۸٪، ۲۳٪ و ۵۴٪ افزایش خواهد داد.

این مقادیر نشان می‌دهند که در فاصله ۱۲۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متری دو دیوار با افزایش ناگهانی تنش تسلیم و ظرفیت باربری روبرو هستیم. لذا بر اساس مفاهیم ذکر شده در خصوص اندرکنش و برهم نهی آثار دو دیوار در فواصل نزدیک، می‌توان نتیجه گرفت که فاصله موثر دو دیوار که در فواصل بیشتر از آن دو دیوار اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی یکدیگر ندارند، حدود ۱۲۵ سانتی‌متر معادل ۲/۵ برابر ارتفاع آن‌هاست.

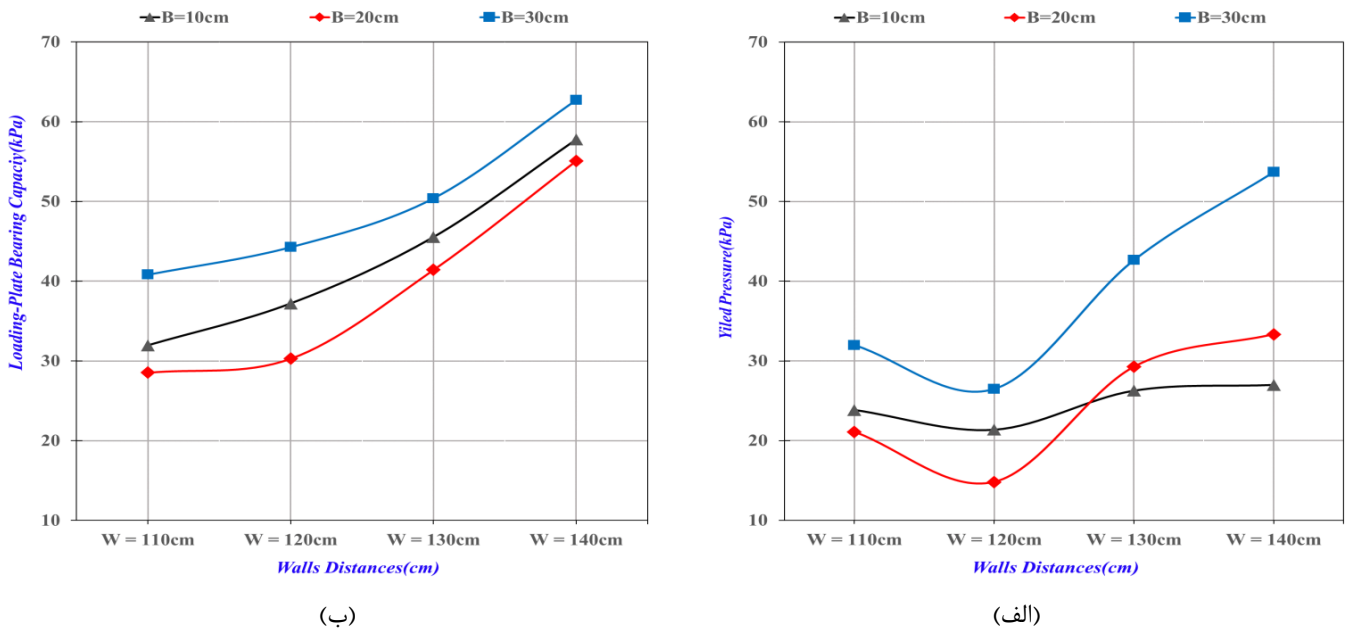
البته دیگر پارامتر وابسته مهم، پارامتر D یا فاصله لبه پی از مهارهای صفحه‌ای دیوار مجاور (نشان داده شده در شکل ۴) است که طبعاً با افزایش D برای یک پی با عرض ثابت شاهد افزایش مقدار هر دو پارامتر تنش تسلیم و ظرفیت باربری خواهیم بود. اثر افزایش این پارامتر بر تداخل رفتار دیوار و پی مجاور به تفصیل در بخش ۴-۴ بررسی خواهد شد.

در این بخش برای عرض صفحه بارگذاری ثابت و فواصل مختلف دیوار، ظرفیت باربری و تنش تسلیم، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸-الف مقادیر تنش تسلیم و در شکل ۸-ب مقادیر ظرفیت باربری بر حسب کیلوپاسکال برای فواصل مختلف دیوارها نشان داده شده‌اند.

مقایسه نمودارهای فشار-نشست صفحه بارگذاری با عرض ۱۰ سانتی‌متر نشان می‌دهند که با افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری فاصله دو دیوار نسبت به فاصله اولیه ۱۱۰ سانتی‌متری، تنش تسلیم، به ترتیب ۱۰٪ کاهش، ۱۰٪ افزایش و ۱۳٪ افزایش و ظرفیت باربری، به ترتیب ۱۶٪، ۴۲٪ و ۸۱٪ افزایش داشته‌اند.

همچنین نمودارهای فشار-نشست صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر حاکی از این مطلبند که افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری فاصله دو دیوار نسبت به فاصله اولیه ۱۱۰ سانتی‌متری، به ترتیب منجر به ۳۰٪ کاهش، ۳۹٪ افزایش و ۵۸٪ افزایش تنش تسلیم و نیز منجر به به ترتیب ۴۵٪، ۹۳٪ و ۹۳٪ افزایش ظرفیت باربری می‌شوند.

با مقایسه نمودارهای فشار-نشست برای صفحه بارگذاری با عرض



شکل ۸. مقادیر تنش تسلیم و ظرفیت باربری صفحه‌های بارگذاری در فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای

Fig. 8. Loading plates yield pressure & bearing capacity with different walls displacement

افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری عرض صفحه بارگذاری نسبت به عرض اولیه ۱۰ سانتی‌متری، تنش تسلیم، به ترتیب ۳۱٪ کاهش، ۲۴٪ افزایش و ظرفیت باربری، به ترتیب ۱۹٪ کاهش و ۲۰٪ افزایش داشته‌اند و همانگونه که در تفسیر نمودارهای مربوط به فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری دو دیوار تشریح شد، انطباق سطوح لغزشی دیوارها و گسیختگی برشی صفحه بارگذاری (شکل ۵) سبب پایین بودن تنش تسلیم صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر نسبت به عرض‌های ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر گردیده است.

مقایسه نمودارهای فشار-نشست صفحه‌های بارگذاری در فاصله ۱۳۰ سانتی‌متری دو دیوار حاکی از آن است که با افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری عرض صفحه بارگذاری نسبت به عرض اولیه ۱۰ سانتی‌متری، برای تنش تسلیم، به ترتیب ۱۱٪ و ۶۲٪ افزایش و برای ظرفیت باربری، به ترتیب ۹٪ کاهش و ۱۱٪ افزایش رخ داده است. ملاحظه می‌شود که در این فاصله به دلیل کاهش شدید تداخل و برهم نهی آثار دو دیوار برای صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر مقدار ظرفیت باربری تقریباً برابر با ظرفیت باربری صفحه بارگذاری با عرض ۱۰ سانتی‌متر است. البته در این خصوص با توجه به فعال شدن کامل سطوح گسیختگی دوباره شاهد کاهش این مقدار برای صفحه با عرض ۲۰ سانتی‌متر هستیم.

۴-۳- تاثیر عرض صفحه بارگذاری (پی سطحی)

در این بخش برای فاصله ثابت دو دیوار پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای و عرض‌های مختلف پی، تنش تسلیم و ظرفیت باربری، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۹-الف مقادیر تنش تسلیم و در شکل ۹-ب مقادیر ظرفیت باربری برحسب میلی‌متر برای فواصل مختلف دیوارها نشان داده شده‌اند.

بررسی رفتار باربری صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف نشان می‌دهند که در فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری دو دیوار، افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری عرض صفحه بارگذاری نسبت به عرض اولیه ۱۰ سانتی‌متری، در خصوص تنش تسلیم، به ترتیب منجر به ۱۲٪ کاهش و ۳۴٪ افزایش و در خصوص ظرفیت باربری، به ترتیب منجر به ۱۱٪ کاهش و ۲۸٪ افزایش می‌شوند. نکته حائز اهمیت مربوط به صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر که کمترین مقدار تنش تسلیم را به خود اختصاص داده است. با توجه به سطوح لغزشی دیوارها و سطوح گسیختگی برشی صفحه بارگذاری (شکل ۵)، انطباق و نتیجتاً بیشترین تداخل آثار برای صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر، مشهود است که البته این موضوع در بخش ۴-۴ به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت.

ملاحظه می‌شود که برای فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری دو دیوار، با

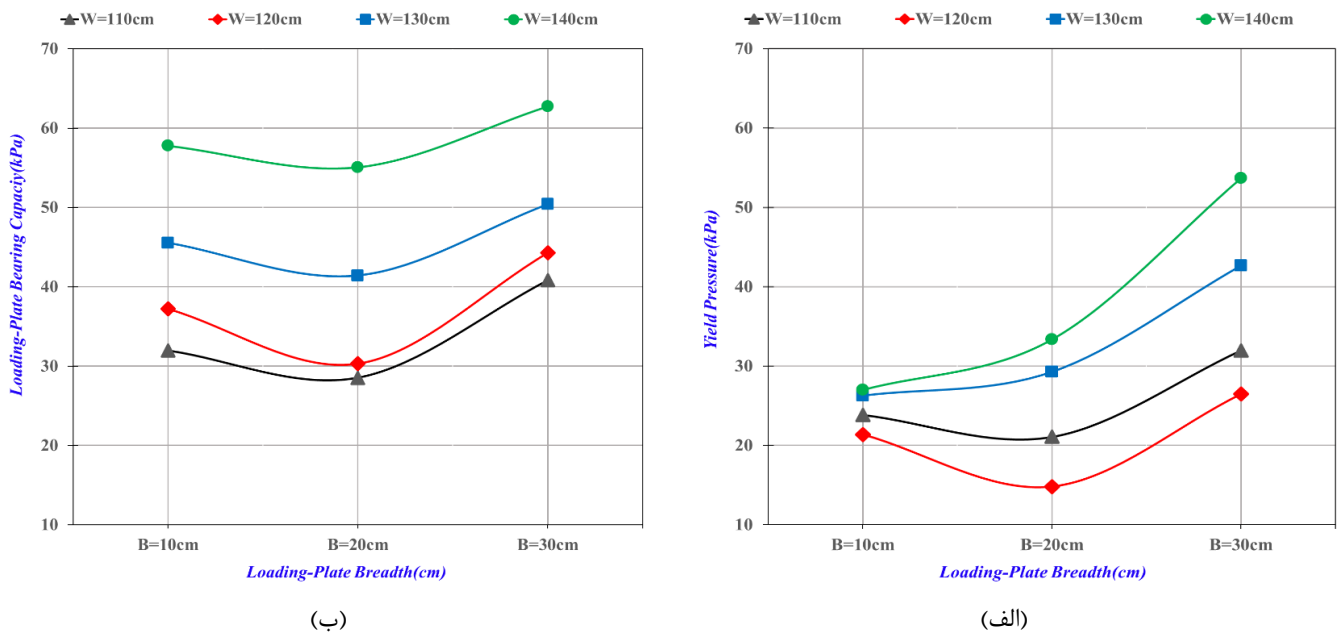


Fig. 9. Loading plates yield pressure & bearing capacity with different width

شکل ۹. مقادیر تنش تسلیم و ظرفیت باری صفحه‌های بارگذاری با ابعاد مختلف بر روی دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای

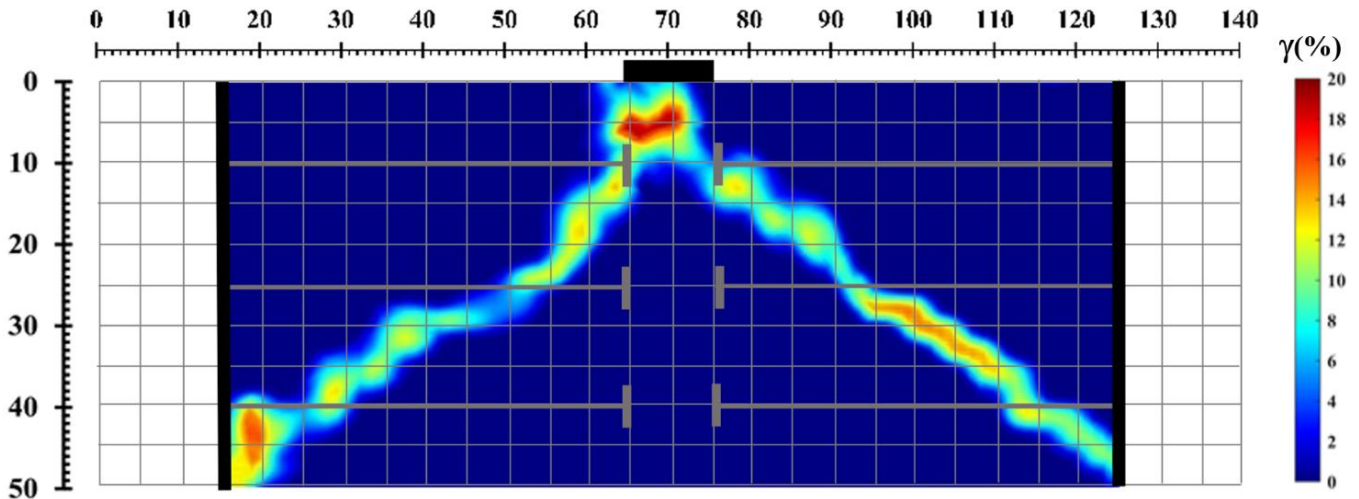
می‌شود و حرکت هر کدام از این نواحی دنبال می‌شود. این کار با ثبت شدت نداشت ناحیه‌ای معین در اولین تصویر که بعداً با شدت نگاشت‌های تمامی نواحی در منطقه جستجو در تصویر دوم (به کمک محاسبه با تابع همبستگی میانگین) مقایسه می‌شود، انجام خواهد یافت. زمانی که تطابق مناسبی در حرکت میان تصاویر اول و دوم یافته شد، آن‌گاه این کار برای هر ناحیه در تصویر اول تکرار می‌شود. در انتهای تحلیل PIV حرکت هر ناحیه از تصویر اول به تصویر دوم به دست می‌آید [۱۷].

به علاوه با دانستن موقعیت شبکه علائم در دو تصویر، می‌توانیم هر یک از حرکات در فضای تصویر را به یک حرکت فیزیکی کمی در فضای هدف تبدیل کرد. به محض آن که بردارهای تغییر مکان به دست آمدند، میدان‌های کرنش حجمی و برشی در مدل خاک را نیز می‌توان به دست آورد. در ادامه نتایج حاصل از پردازش تصاویر متوالی گرفته شده در فواصل نشست یک میلی‌متر صفحه بارگذاری در شکل‌های ۱۰ تا ۲۱ ارائه شده است [۱۷]. در ادامه بر اساس دو مکانیزم گسیختگی ذکر شده در بخش ۳ به تحلیل نمای کرانی PIV کرنش‌های گوه گسیختگی پرداخته خواهد شد.

همچنین بررسی نمودارهای فشار- نشست صفحه‌های بارگذاری در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری دو دیوار نشان می‌دهد که افزایش‌های ۱۰ سانتی‌متری عرض صفحه بارگذاری نسبت به عرض اولیه ۱۰ سانتی‌متری، به ترتیب ۷٪ کاهش و ۳۳٪ افزایش تنش تسلیم و به ترتیب ۵٪ کاهش و ۹٪ افزایش ظرفیت باربری را به همراه داشته‌اند. ذکر این نکته ضروری است که در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری دو دیوار برخلاف سایر فواصل دیوارها کمترین تنش تسلیم مربوط به صفحه بارگذاری با عرض ۱۰ سانتی‌متر بوده که به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در این حالت، فاصله دیوارهای پشت به پشت، نسبتاً زیاد است گوه‌های لغزشی دو دیوار حتی در صورت تداخل با سطوح گسیختگی برشی زیر صفحه بارگذاری، بر یکدیگر اثرگذار نیستند. در خصوص ظرفیت باربری و رفتارهای اندرکنشی دو دیوار و صفحه بارگذاری در بخش ۴-۴ به تفصیل بحث خواهد شد.

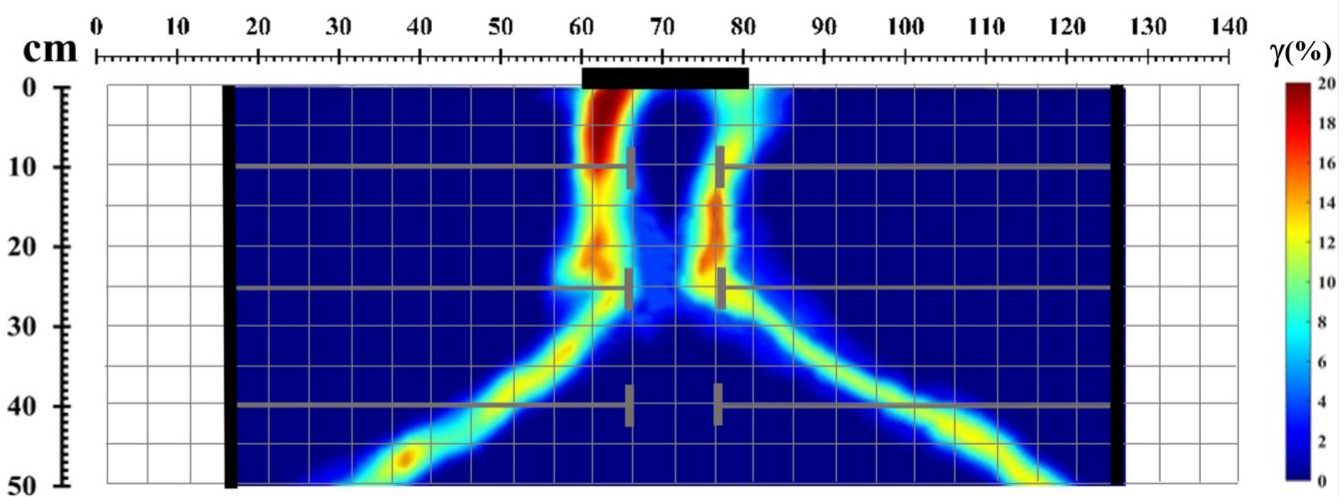
۴-۴ تحلیل‌های سرعت‌سنجی تصویری ذرات

ایده اصلی تحلیل PIV بر پایه مقایسه عکس‌های متوالی از مدل فیزیکی استوار است. هر تصویر به تعدادی مشخص از نواحی تقسیم‌بندی



شکل ۱۰. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۱۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۱۰ سانتی‌متر)

Fig. 10. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 10cm and walls distance 110cm)

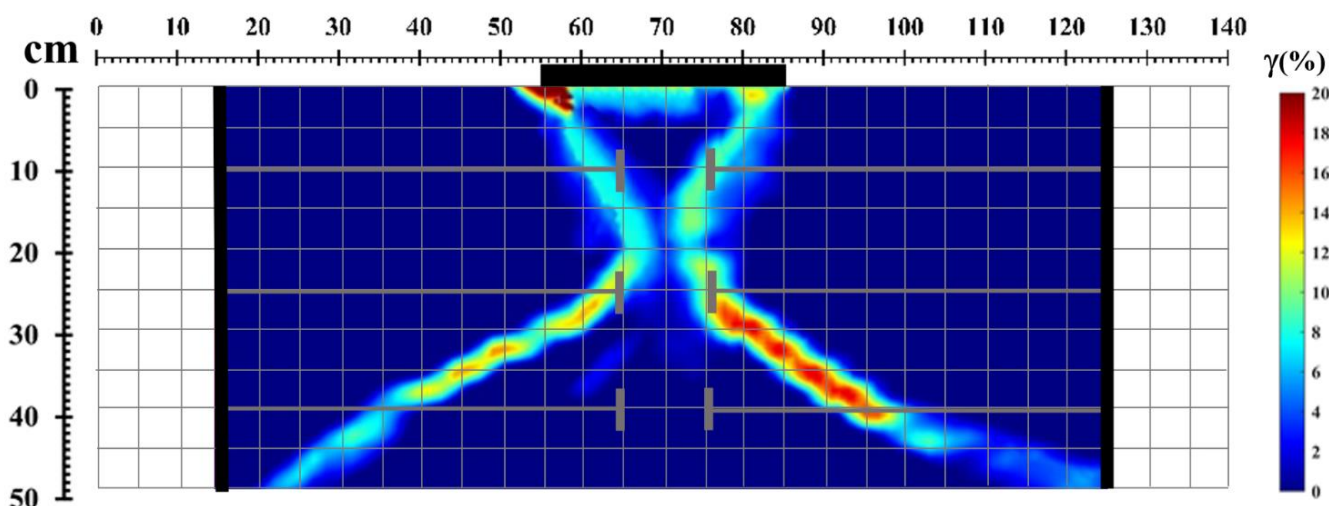


شکل ۱۱. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۲۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۱۰ سانتی‌متر)

Fig. 11. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 20cm and walls distance 110cm)

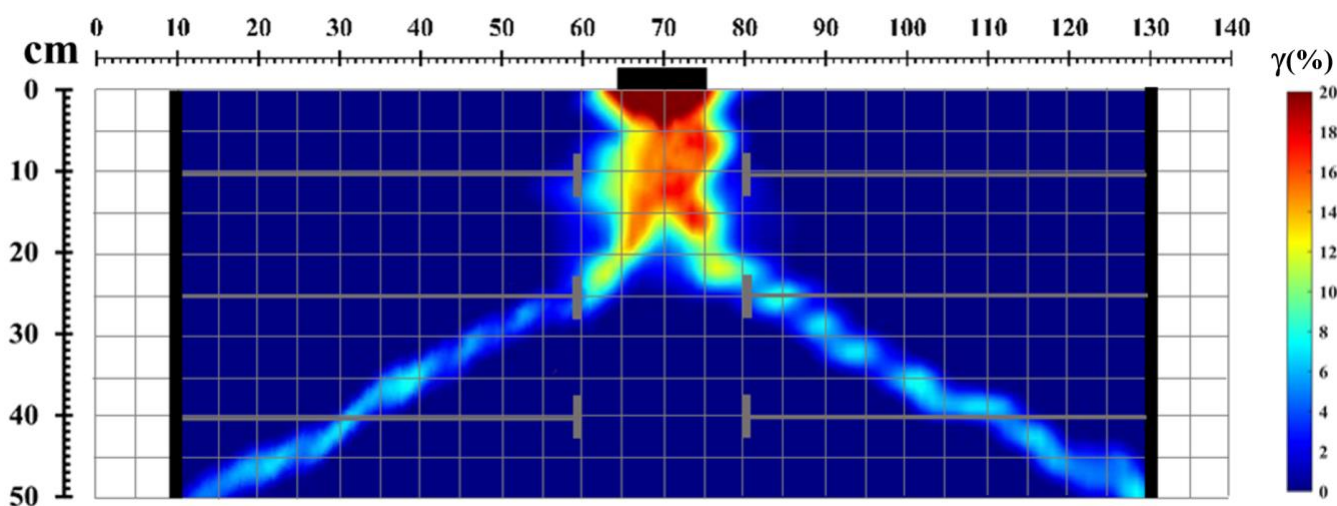
تشکیل سطوح لغزشی مرکب و تداخل و برهم نهی آن دو رخ می‌دهند و تنها تفاوت نسبت به آزمایش S-۱۱۰-۱۰ این نکته است که با توجه به عریض شدن صفحه بارگذاری تا ۲۰ سانتی‌متر، عمق نفوذ منحنی‌های گسیختگی برشی خاک زیر صفحه افزایش یافته است. مورد حائز اهمیت در خصوص آزمایش S-۱۱۰-۲۰ انطباق منحنی‌های گسیختگی خاک زیر صفحه و لغزشی دیوارهاست که سبب پایین بودن ظرفیت باربری صفحه با عرض ۲۰ سانتی‌متر نسبت به بقیه حالات است.

ملاحظه می‌شود که در آزمایش S-۱۱۰-۱۰، اولاً منحنی‌های گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری و دیوارها با یکدیگر ترکیب و تشکیل دو منحنی مرکب داده‌اند و ثانیاً دو منحنی لغزشی مرکب به علت عرض کم صفحه و فاصله کم لبه پی از دیوارها، با یکدیگر تداخل و برهم نهی آثار دارند که به وضوح در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در خصوص نمای کرانی کرنش برشی آزمایش S-۱۱۰-۲۰ نشان داده شده در شکل ۱۱ می‌توان گفت که همچنان هر دو مدل گسیختگی



شکل ۱۲. نمای کرانی PIV کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۳۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۱۰ سانتی‌متر)

Fig. 12. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 30cm and walls distance 110cm)

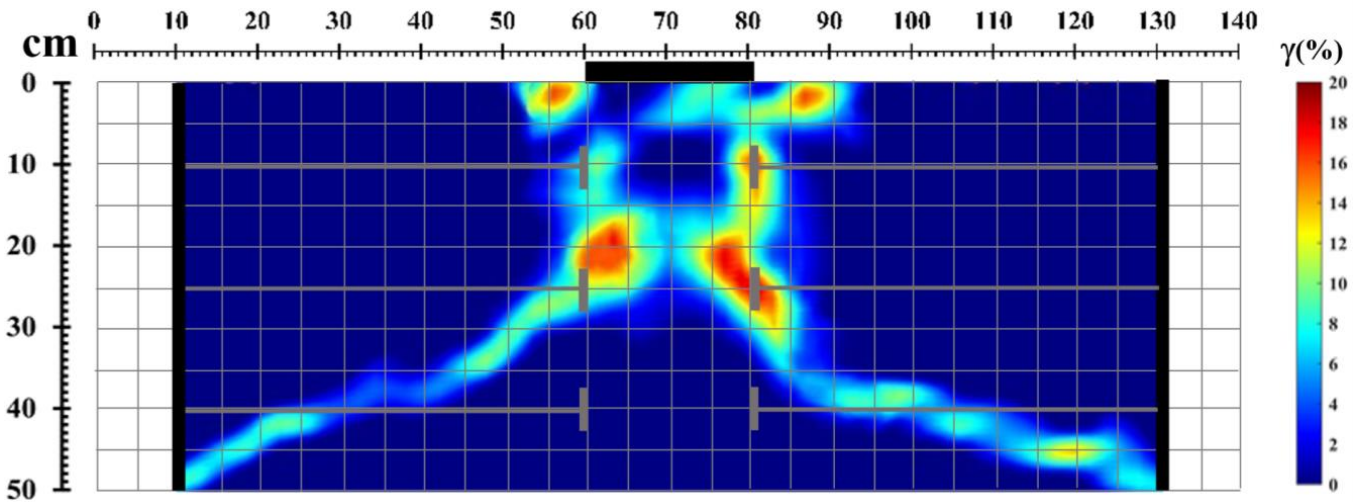


شکل ۱۳. نمای کرانی PIV کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۱۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۲۰ سانتی‌متر)

Fig. 13. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 10cm and walls distance 120cm)

شده که منجر به افزایش ظرفیت باربری صفحه بارگذاری نسبت به عرض ۲۰ سانتی‌متر می‌شود. همچنین بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت برای کلیه عرض‌های بزرگ‌تر یا مساوی ۵۰ سانتی‌متر (برابر با ارتفاع دیوارها) منحنی‌های مرکب بدون توجه به فاصله دیوارها حتی در صورت تشکیل، به هیچ عنوان تداخل و برهم نهی نخواهند داشت. این عرض، عرض موثر (B_{eff}) نام‌گذاری می‌شود.

بررسی نمای کرانش کرنش‌های برشی آزمایش S-۱۱۰-۳۰ نشان می‌دهد با افزایش عرض صفحه بارگذاری تا ۳۰ سانتی‌متر عمق نفوذ منحنی‌های گسیختگی برشی خاک زیر صفحه افزایش یافته ولی همچنان ترکیب آن‌ها با منحنی‌های لغزشی خاک پشت دو دیوار رخ می‌دهند. البته به وضوح در شکل ۱۲ قابل مشاهده است که از شدت برهم نهی و تداخل منحنی‌های مرکب تشکیل شده نسبت به آزمایش S-۱۱۰-۲۰ کاسته



شکل ۱۴. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی بر حسب درصد (عرض صفحه ۲۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۲۰ سانتی‌متر)

Fig. 14. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 20cm and walls distance 120cm)

شاهد تداخل و برهم نهی منحنی‌های گسیختگی زیر پی با منحنی‌های لغزشی دیوارها و تشکیل منحنی‌های لغزشی مرکب هستیم. البته کاملاً مشخص است که با توجه به عرض نسبتاً زیاد صفحه، تداخل منحنی‌های مرکب بسیار کمتر از آزمایش‌های S-۱۲۰-۱۰ و S-۱۲۰-۲۰ است.

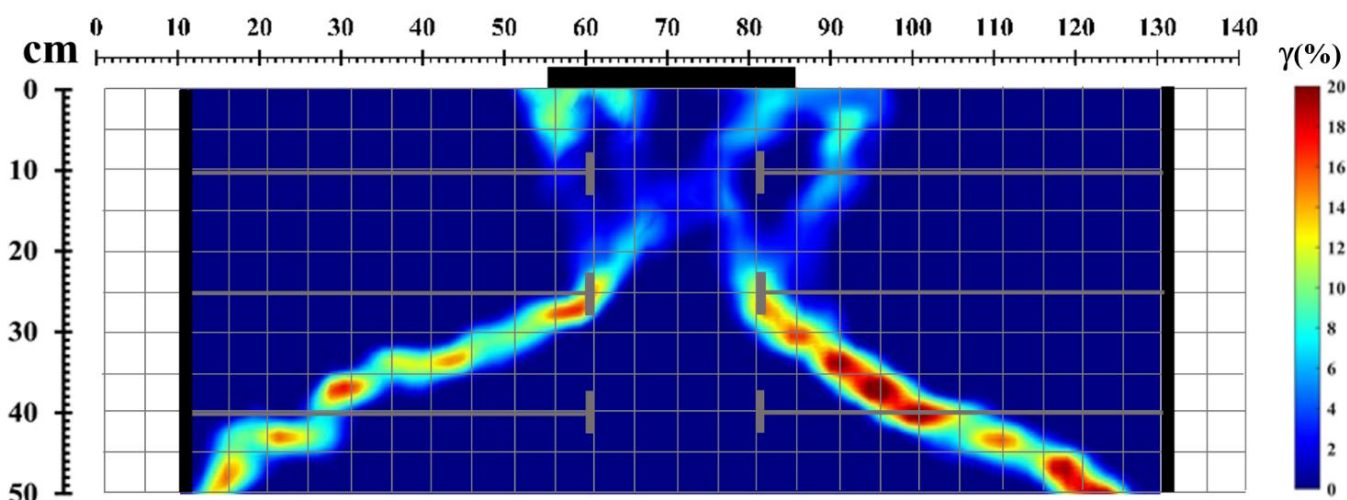
با افزایش فاصله دو دیوار به ۱۳۰ سانتی‌متر (شکل ۱۶) در آزمایش S-۱۳۰-۱۰ شاهد کاهش شدید تداخل و برهم نهی منحنی‌های گسیختگی زیر پی و لغزشی پشت دیوارها هستیم که منجر به تشکیل ناقص این منحنی‌ها و نرسیدن به پای دیوارها شده است. البته همچنان تداخل این منحنی‌های مرکب ناقص به دلیل عرض کم صفحه بارگذاری وجود دارد. نتیجتاً می‌توان گفت که برای عرض ۱۰ سانتی‌متری صفحه بارگذاری در فاصله‌های دو دیوار بزرگ‌تر از حدود ۱۲۵ سانتی‌متر دیوارهای حائل پشت به پشت رفتار اندرکنشی و تداخلی با یکدیگر نداشته و می‌توانند جداگانه تحلیل و طراحی شوند. این فاصله تحت عنوان فاصله موثر (W_{eff}) نام‌گذاری می‌شود.

نمای کرانی کرنش‌های برشی آزمایش S-۱۳۰-۲۰ در شکل ۱۷ نشان می‌دهد در فاصله ۱۳۰ سانتی‌متری دو دیوار همچنان برهم نهی و تداخل آثار منحنی‌های گسیختگی زیر صفحه بارگذاری و لغزشی پشت دیوارها وجود

نمای کرانی کرنش‌های برشی آزمایش S-۱۲۰-۱۰ نشان می‌دهد که ضمن آن که منحنی‌های گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری و دیوارها با یکدیگر ترکیب و تشکیل دو منحنی مرکب داده‌اند، همچنین دو منحنی لغزشی مرکب به علت عرض کم صفحه با یکدیگر تداخل و برهم نهی آثار دارند که به وضوح در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

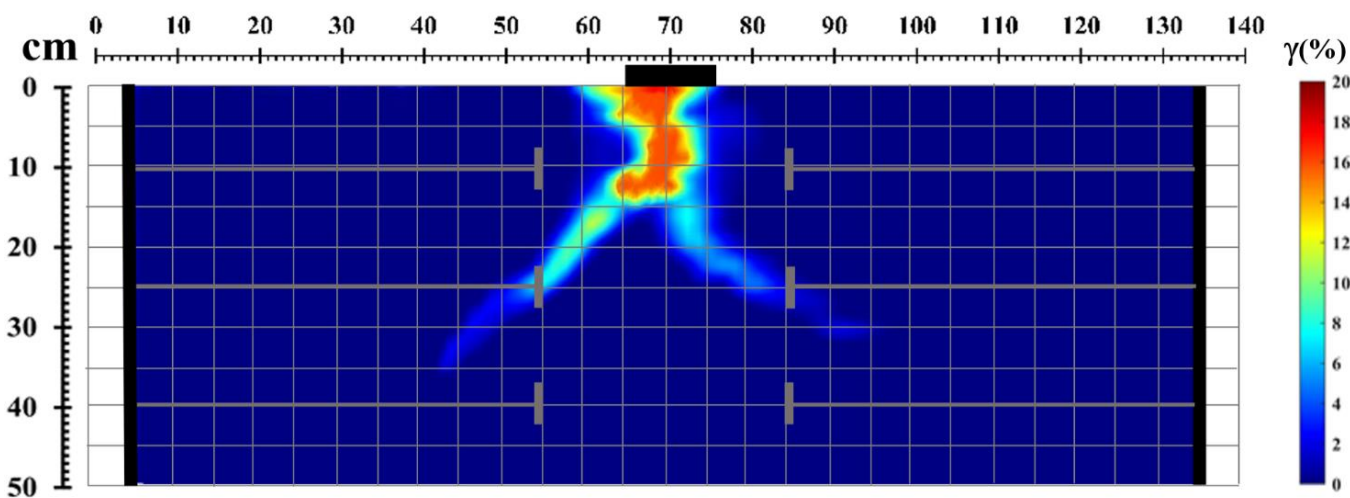
با عریض شدن صفحه بارگذاری در آزمایش S-۱۲۰-۲۰ (شکل ۱۴) نسبت به S-۱۲۰-۱۰ عمق منحنی‌های گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری افزایش می‌یابد لکن نکته حائز اهمیت در این آزمایش تطابق کامل منحنی‌های گسیختگی زیر پی با منحنی‌های لغزشی پشت دیوارها در هنگام تشکیل سطوح لغزشی مرکب است که باعث رخ دادن ظرفیت باربری بسیار پایین نسبت به بقیه حالات آزمایش‌ها شده است. البته همچنان با توجه به عرض کم پی و فاصله دو دیوار تداخل و برهم نهی آثار دو منحنی لغزشی مرکب قابل مشاهده است که می‌توان گفت عرض صفحه بارگذاری برابر ۲۰ سانتی‌متر به دلیل رخداد تطابق ذکر شده، بحرانی‌ترین حالت خواهد بود به عنوان عرض بحرانی (B_{cr}) نام‌گذاری می‌شود.

شکل ۱۵ مربوط به نمای کرانی کرنش‌های برشی آزمایش S-۱۲۰-۳۰ حاکی از آن است که با مجدداً با عریض تر شدن صفحه بارگذاری عمق منحنی گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری افزایش یافته و همچنان



شکل ۱۵. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۳۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۲۰ سانتی‌متر)

Fig. 15. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 30cm and walls distance 120cm)

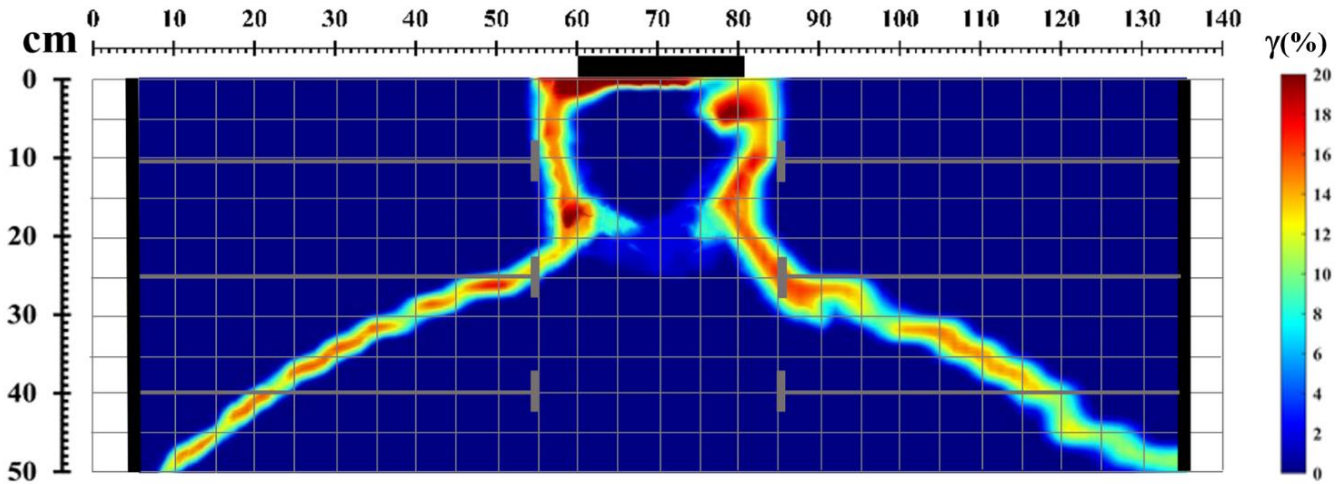


شکل ۱۶. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۱۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۳۰ سانتی‌متر)

Fig. 16. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 10cm and walls distance 130cm)

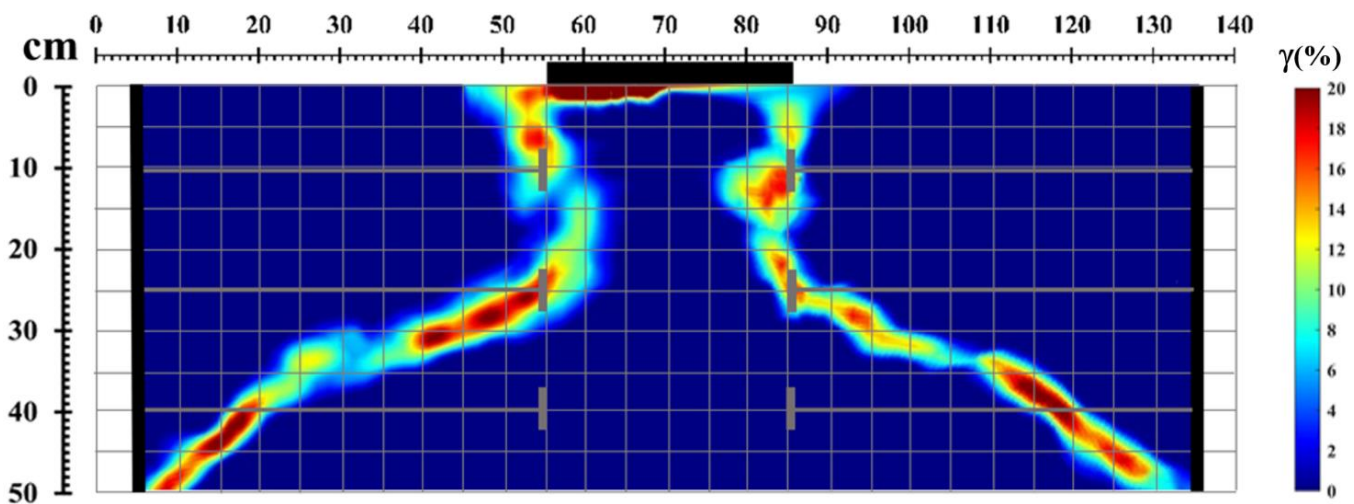
شکل ۱۸ مربوط به نمای کرانی کرنش‌های برشی آزمایش S-۱۳۰-۳۰ نشان می‌دهد که همچنان منحنی‌های گسیختگی زیر پی و لغزشی پشت دیوارها با هم تداخل و برهم نهی دارند که منجر به تشکیل دو منحنی لغزشی مرکب شده است، لکن به دلیل عرض زیاد صفحه بارگذاری با یکدیگر تداخل و اندرکنشی ندارند.

دارد که منجر به تشکیل دو منحنی لغزشی مرکب شده است. هر چند این منحنی‌های مرکب لغزشی با یکدیگر به دلیل عرض بیشتر صفحه بارگذاری نسبت به آزمایش S-۱۳۰-۲۰، همپوشانی و تداخل کمی دارند. البته با توجه به عریض تر شدن صفحه بارگذاری، افزایش عمق راس مثلث گوه گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری، مشهود است.



شکل ۱۷. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی بر حسب درصد (عرض صفحه ۲۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۳۰ سانتی‌متر)

Fig. 17. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 20cm and walls distance 130cm)



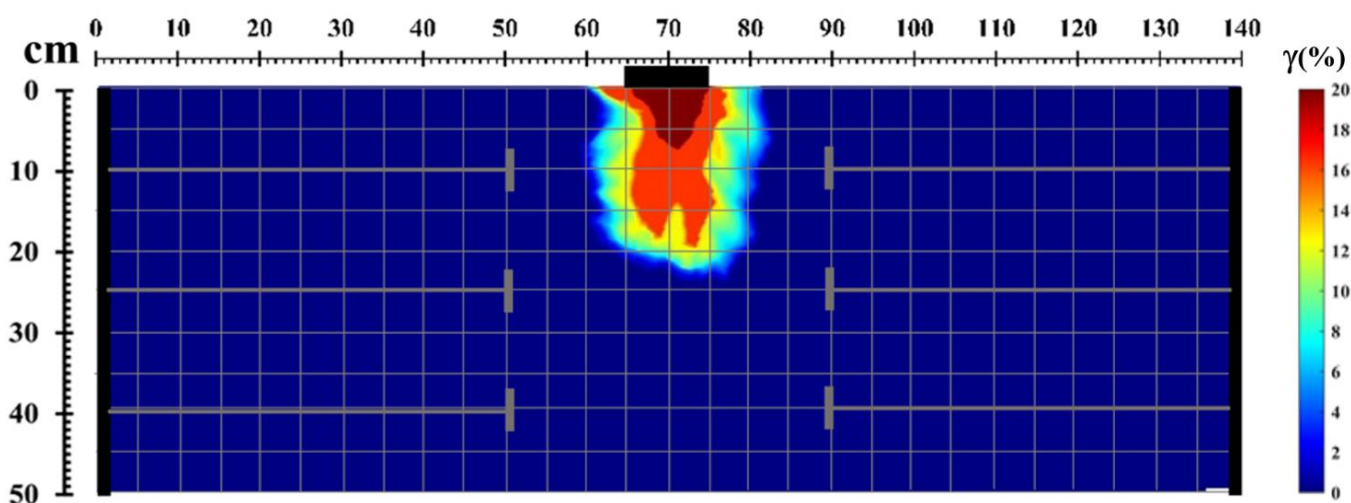
شکل ۱۸. نمای کرانی کرنش‌های برشی گوه گسیختگی بر حسب درصد (عرض صفحه ۳۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۳۰ سانتی‌متر)

Fig. 18. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 30cm and walls distance 130cm)

نمای کرانی کرنش‌های برشی، ارائه شده در شکل ۲۰ نشان می‌دهد که در آزمایش S-۱۴۰-۲۰ با توجه به افزایش فاصله دو دیوار و نتیجتاً لبه پی (D) از دیوارها، از شدت تداخل و برهم نهی منحنی‌های گسیختگی زیر پی با منحنی‌های لغزشی پشت دیوارها کاسته شده تا جایی که منحنی‌های مرکب لغزشی به طور کامل تشکیل نگردیده و به پای دیوارها نمی‌رسند. البته با توجه به عرض پی، همچنان تداخل منحنی‌های مرکب ناقص، مشهود است.

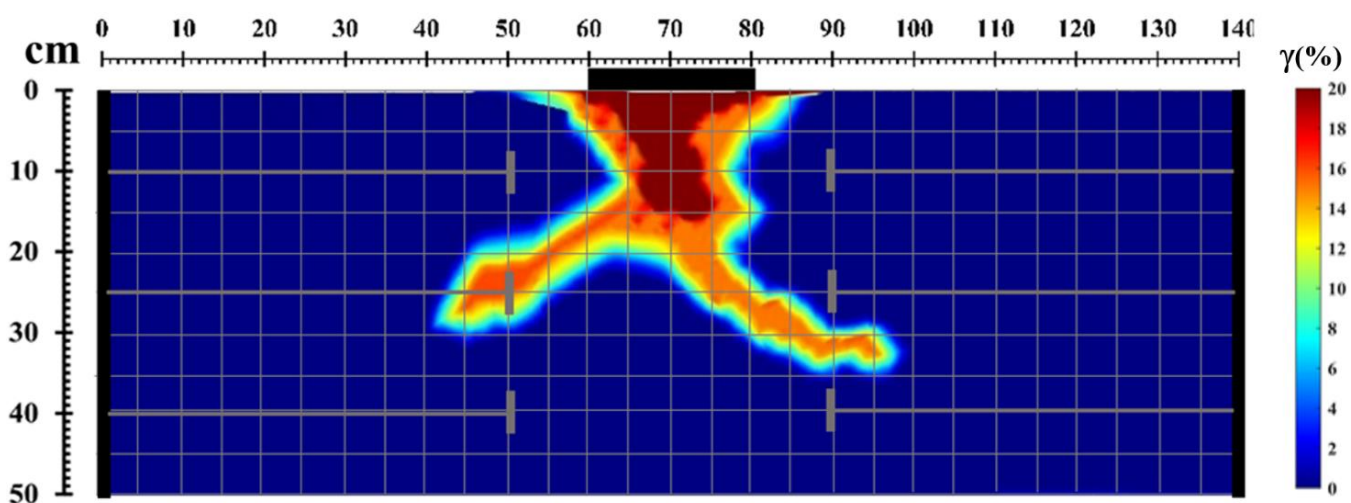
با افزایش فاصله دو دیوار به ۱۴۰ سانتی‌متر و در حقیقت فاصله مناسب لبه پی از دیوارها در آزمایش S-۱۴۰-۱۰ (شکل ۱۹)، شاهد بی‌اثر شدن رفتار اندرکنشی دو دیوار با صفحه بارگذاری هستیم به نحوی که منحنی‌های مرکب به هیچ عنوان تشکیل نمی‌شوند. همچنین نمای کرانی کرنش‌های برشی نشان می‌دهند که تنها منحنی‌های گسیختگی زیر صفحه بارگذاری به صورت گسیختگی برشی پانچ^۱ تشکیل شده‌اند.

1 Punch



شکل ۱۹. نمای کرانی PIV کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۱۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۴۰ سانتی‌متر)

Fig. 19. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 10cm and walls distance 140cm)

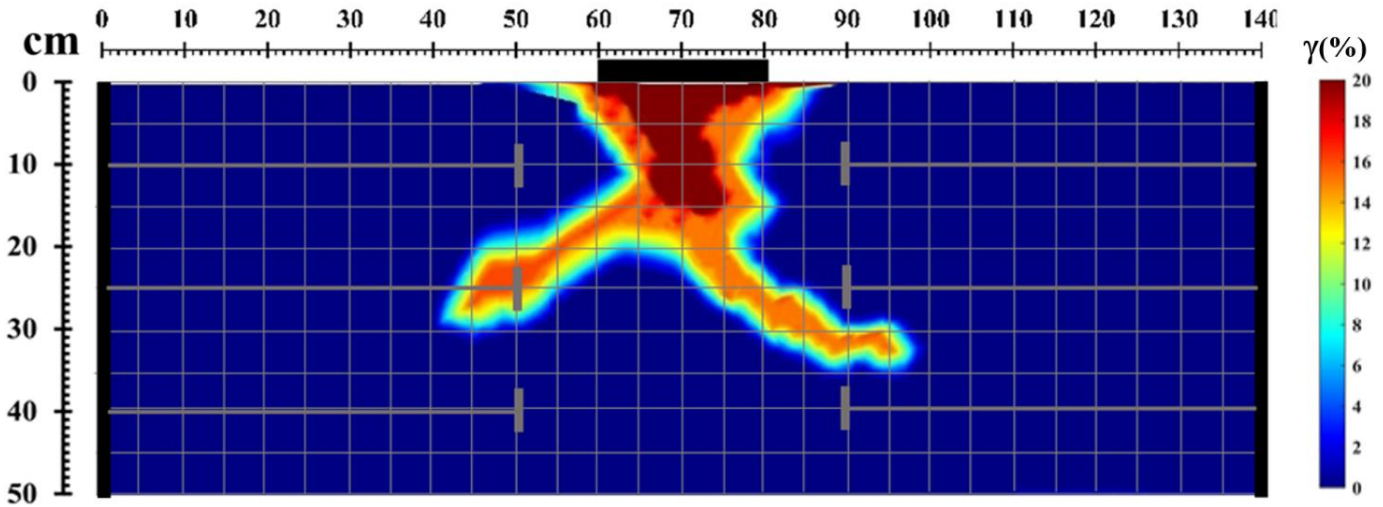


شکل ۲۰. نمای کرانی PIV کرنش‌های برشی گوه گسیختگی برحسب درصد (عرض صفحه ۲۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۴۰ سانتی‌متر)

Fig. 20. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 20cm and walls distance 110cm)

برهم نهی منحنی‌های گسیختگی زیر پی و لغزشی دیوارها هستیم، لکن با توجه به عرض زیاد پی و فاصله دیوارها منحنی‌های مرکب گسیختگی، به هیچ عنوان تداخل و اندرکنشی ندارند.

در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری دو دیوار پشت به پشت (شکل ۲۱) در آزمایش S-۱۴۰-۳۰ اگر چه به علت فاصله نه چندان کافی لبه صفحه بارگذاری از دیوارها (D) همچنان شاهد شکل‌گیری منحنی‌های مرکب حاصل تداخل و



شکل ۲۱. نمای کرانی PIV کرنش‌های برشی گوه گسیختگی بر حسب درصد (عرض صفحه ۳۰ سانتی‌متر و فاصله دیوارهای پشت به پشت ۱۴۰ سانتی‌متر)

Fig. 21. PIV contours of failure wedge shear strains in % (loading plate width 30cm and walls distance 140cm)

۵- نتیجه‌گیری

- ۱- مقایسه نمودارهای فشار- نشست صفحه‌های بارگذاری (مدل پی سطحی) با عرض ثابت در فواصل مختلف دیوارهای حائل پشت به پشت مهار شده با مهارهای صفحه‌ای نشان می‌دهند بیشترین تنش تسلیم و ظرفیت باربری در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری دو دیوار و کمترین مقدار آن‌ها به ترتیب در فواصل ۱۲۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری رخ داده است. همچنین نمودارهای مقایسه‌ای نشان می‌دهند که با افزایش فاصله دو دیوار از ۱۲۰ به ۱۳۰ سانتی‌متر جهش ناگهانی در مقادیر ظرفیت باربری رخ می‌دهد. لذا فاصله موثر دو دیوار بین این دو مقدار یعنی $W_{eff} = 2.5 * H$ برآورد می‌شود.
- ۲- همچنین بررسی PIV کرنش‌ها به وضوح نشان دهنده تطابق منحنی‌های گوه‌های لغزشی دو دیوار و گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری و نتیجتاً بر هم نهی آثار و در نهایت کاهش ظرفیت باربری در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری دو دیوار و همچنین عدم تداخل منحنی‌های گسیختگی مذکور در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری دو دیوار است که موید فاصله موثر $W_{eff} = 2.5 * H$ به دست آمده از نمودارهای ظرفیت باربری است.
- ۳- مقایسه نمودارهای فشار- نشست صفحه‌های بارگذاری (مدل پی سطحی) در فواصل ثابت دو دیوار نشان می‌دهند که بیشترین تنش تسلیم و ظرفیت باربری مربوط به صفحه بارگذاری با عرض ۳۰ سانتی‌متر و کمترین ظرفیت باربری در نشست‌های مذکور مربوط به صفحه بارگذاری با عرض

۲۰ سانتی‌متر بوده است. نمودارهای مقایسه‌ای نشان می‌دهند که با افزایش عرض صفحه بارگذاری از ۲۰ به ۳۰ سانتی‌متر جهش ناگهانی در مقادیر ظرفیت باربری رخ می‌دهد. لذا به نظر می‌رسد عرض بحرانی برای تطابق منحنی‌های گسیختگی زیر پی و لغزشی پشت دیوارها حدود $B_{cr} = 0.5 * H$ باشد.

۴- همچنین تفسیر نمای کرانی PIV آزمایش‌ها حاکی از آن است که انطباق عمق منحنی گسیختگی برشی خاک زیر صفحه بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر با عمق همپوشانی منحنی‌های گوه گسیختگی دو دیوار، عامل اصلی فروکاست ظرفیت باربری نسبت به دو حالت عرض صفحه ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر است که تایید کننده عرض بحرانی صفحه بارگذاری برابر با $B = 0.5 * H$ است.

۵- مقایسه و تفسیر نمای کرانی کرنش‌های برشی حاصل از تحلیل PIV آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای صفحات بارگذاری با عرض ۳۰ سانتی‌متر برهم نهی آثار و تداخل منحنی‌های گسیختگی مرکب بسیار کمتر از صفحات بارگذاری با عرض ۲۰ سانتی‌متر است که بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت عرض موثر صفحات بارگذاری حدود ۵۰ سانتی‌متر یعنی $B_{eff} = H$ خواهد بود. بدان معنا که برای عرض پی‌های سطحی بزرگ‌تر از این مقدار، دو منحنی مرکب لغزشی تشکیل شده در هیچ فاصله‌ای از دو دیوار تداخل و برهم نهی نخواهند داشت.

- (2017) 498-509.
- [9] M.J. Moghadam, A. Zad, N. Mehrannia, N. Dastaran, Experimental study on the performance of plate anchor retaining walls, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(3) (2019) 128-140.
- [10] A.A. Samee, M. Yazdandoust, A. Ghalandarzadeh, Effect of reinforcement arrangement on dynamic behaviour of back-to-back mechanically stabilised earth walls, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, (2021) 1-16.
- [11] D.M. Wood, *Geotechnical modelling*, CRC press, 2017.
- [12] C.A. Lazarte, H. Robinson, J.E. Gómez, A. Baxter, A. Cadden, R. Berg, *Soil nail walls reference manual*, 2015.
- [13] K. Terzaghi, *Theoretical soil mechanics*. johnwiley & sons, New York, (1943).
- [14] R. Katzenbach, S. Leppla, D. Choudhury, *Foundation systems for high-rise structures*, CRC press, 2016.
- [15] C. Venkatramaiah, *Geotechnical engineering*, New Age International, 1995.
- [16] D.M. NAVFAC, 7.01, *Soil Mechanics*, Naval Facilities Engineering Command, Department of the Navy, Washington, DC, (1986).
- [17] D. White, M. Randolph, B. Thompson, An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 5(3) (2005) 01-12.
- [1] R. Berg, B. Christopher, N. Samtani, *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes–Volume I*, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC, Publication No, FHWA-NHI-10-024 (FHWA GEC 011-Vol I), 2009.
- [2] B.M. Das, S.K. Shukla, *Earth anchors*, J. Ross Publishing, 2013.
- [3] H.D. Niroumand, K.A. Kassim, *Design and Construction of Soil Anchor Plates*, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [4] M.-S. Won, Y.-S. Kim, Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1) (2007) 10-22.
- [5] J. Han, D. Leshchinsky, Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(3) (2010) 262-267.
- [6] R. El-Sherbiny, E. Ibrahim, A. Salem, Stability of back-to-back mechanically stabilized earth walls, in: *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, 2013, pp. 555-565.
- [7] K. Taghizadeh, *FE Analysis of external & Internal Stability of Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth Walls*, Islamic Azad University Tehran, 2016.
- [8] S. Benmebarek, M. Djabri, *FE Analysis of Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth Walls Under Cyclic Harmonic Loading*, *Indian Geotechnical Journal*, 48(3)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Najafizadeh, A. A. Zad, M. Yazdi, *Experimental evaluation of back-to-back anchored walls by plate anchors*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 2353-2374.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19079.7059



