

مدل‌سازی فیزیکی ترانشه با دیوارهای حائل صلب مسلح‌شده با طبقه‌های مورب

سینا محمودپور، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
علی دهقان بنادکی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند،

ایران

ایمان گلپذیر، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

محمدعلی رمضانپور، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی،

رودهن، ایران

Email: A.Dehghanbanadaki@damavandiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

چکیده

طبقه‌های اتصالی (RS) به دیوار نقش به‌سزایی در کاهش فشار جانبی زمین بر دیوار حائل نگه‌دارنده ترانشه‌ها ایفا می‌کنند. تا کنون، تحقیقات انجام شده تنها حالت عمود بر دیوار طبقه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این مقاله، با مدل‌سازی فیزیکی، به بررسی نقش طبقه‌های مورب در کاهش فشار جانبی ساکن و متحرک بر دیوار حائل برای بهبود پایداری ترانشه‌ها پرداخته شده است. در این راستا، با ساخت یک سیستم، شامل جعبه مکعب مستطیل در آزمایشگاه و انجام چندین سری آزمایش، تغییرات فشار جانبی بر دیوار حائل در زمان زوج طبقه‌های مورب با اعمال سربار ارزیابی شده است. بر اساس نتایج، مشخص شد که اثر طبقه مورب رو به بالا (۷۰ درجه)، با افزایش مقدار سربار و عرض طبقه، در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار نسبت به طبقه قائم (۹۰ درجه) و مورب رو به پایین (۱۱۰ درجه) بیشتر بوده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر در زاویه طبقه عمود بر دیوار چه به سمت بالا و چه به سمت پایین اثر مثبت در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار، با ایجاد پراکندگی در سطح نیرو و تمرکز لنگر ناشی از آن، دارد؛ اما نقش آن زمانی که عرض طبقه کم باشد، ناچیز خواهد بود.

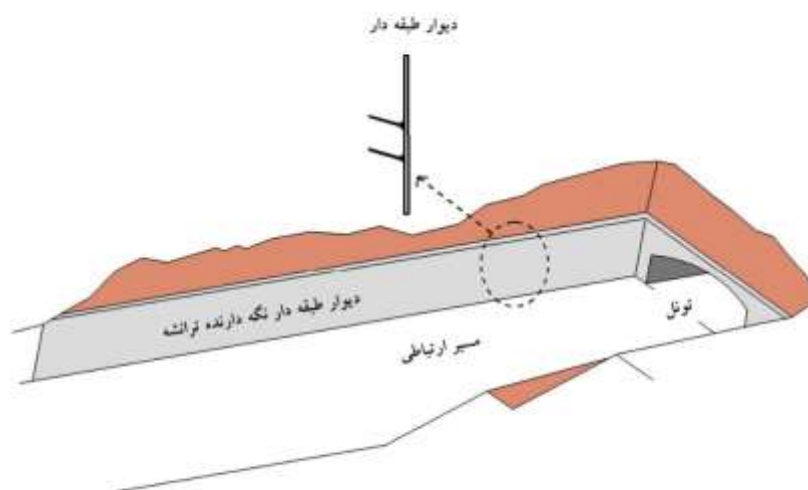
واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی فیزیکی، دیوار حائل صلب، فشار جانبی خاک، طبقه مورب.

۱. مقدمه

حرکت، لغزش و گسیختگی توده زمین شامل ترکیبات خاک و سنگ، اثرات تخریبی زیادی بر ابنیه و مستحذات بشری، اهم از ساختمان‌ها و بناهای مسکونی، راه‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی، تونل‌ها، خطوط آب و فاضلاب و انرژی و... می‌گذارد. این لغزش و گسستگی‌ها می‌توانند موجب خسارت و آسیب‌های فراوانی به سازه‌های پایین‌شیروانی‌ها و مسیرهای حمل و نقل مجاور ترانشه‌ها گردند و به طور کلی پایداری و ضرایب ایمنی را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و در نتیجه هزینه‌های هنگفت بازرسی، نگهداری، تعمیر و بازسازی را تحمیل کنند.

در راستای مهار، محافظت و پایدارسازی ترانشه‌ها، روش‌های گوناگونی ابداع شده است که می‌توانند

تأثیرات به‌سزایی در کنترل لغزش و ناپایداری شیروانی و کاهش خطرات ناشی از گسیختگی رویه ترانشه‌ها داشته باشند، که از جمله آنها می‌توان به تغییر هندسه و اصلاح شیب با خاکبرداری و یا خاکریزی، تراشیدن و برداشت رویه ناپایدار ترانشه‌های سنگی، تقویت و مسلح نمودن دامنه ترانشه با یکی از روش‌های پایداری و کنترل دیواره ترانشه و روش‌های ترکیبی اشاره نمود که می‌توانند موجب کاهش فشار جانبی ناشی از شیروانی‌ها و ترانشه‌های زمین گردند. در این بین، آنچه کمتر مورد توجه محققین بوده، اتصال طبقه‌های^۱ کاهنده بر دیوارهای نگه‌دارنده شیروانی‌ها و ترانشه‌ها می‌باشد که به علت ماهیت پیچیده و نبود شناخت دقیق از مکانیزم عملکردی آن نیاز به رفتارشناسی گسترده‌تری دارند. در شکل ۱، نمایی از به‌کارگیری این روش در دیوارهای نگه‌دارنده ترانشه نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایی از دیوار طبقه‌دار نگه‌دارنده ترانشه و شیروانی زمین

نگهداری از آن می‌باشند. وجود یک یا چند طبقه در پشت این دیوارها با ضخامت نازک و پهنای مشخص که در

دیوارهای حائل صلب در زمان وجود خاک‌برداری و فشار جانبی زمین، همواره یکی از روش‌های کنترل و

^۱ - Relief shelf/Relieving platform/Shelf

پشت دیوار در عملکرد آن در کاهش فشار جانبی مؤثر بوده است (مون و همکاران، ۲۰۱۳). هر چند، در این مقالات از فرضیه‌های غیرواقعی استفاده شده و به علت پیچیدگی و عوامل متغیر نقش آفرین، نتوانستند به خوبی مکانیزم رفتاری دیوار با طبقه را بیان نمایند. از سوی دیگر، محل قرارگیری طبقه در هر شرایطی نمی‌تواند موجب کاهش فشار جانبی زمین گردد (لیو، ۲۰۱۱). در زمینه عملکرد کاهنده طبقه‌ها چندین مطالعه در سال‌های گذشته توسط محققان مختلف صورت گرفته است (تساگرلی، ۱۹۶۹؛ چادوری و همکاران، ۱۹۷۳؛ یاکوولف، ۱۹۷۴، بانرجی، ۱۹۷۷؛ مون و همکاران، ۲۰۱۳؛ چوهان و داساکا، ۲۰۱۸).

در زمینه کاهش فشار جانبی توسط طبقه، بعد از وجود آن به شکل تک یا چندتایی که عاملی تعیین‌کننده بوده، می‌توان به پارامترهایی نظیر پهنا (عرض)، ضخامت و ارتفاع قرارگیری آن از کف دیوار اشاره نمود. این طبقه‌ها می‌توانند علاوه بر کاهش فشار جانبی، افزایش پایداری و ایمنی دیوار در راستای ارتفاع آن را نیز فراهم نمایند (چوهان و داساکا، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹). در تحقیقی که توسط این دو محقق در سال ۲۰۲۱ صورت گرفت، با انجام روش تحلیلی، مشخص شد که این طبقه‌ها می‌توانند تا ۳۰ درصد لنگر خمشی وارد بر دیوار را کاهش دهند (چوهان و داساکا، ۲۰۲۱). در تحقیقی دیگر، با انجام مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار پلکسیس دوبعدی، مشخص شد که در یک دیوار حائل، طبقه با عرض ۰/۵ متر، ضخامت ۰/۳ متر و ارتفاع ۶ متر، بیشترین کاهش را در فشار جانبی بر دیوار داشته است و در صورت اتصال طبقه در نسبت ارتفاع طبقه از خاکریز به ارتفاع دیوار (h_1/H) برابر ۰/۳ میزان فشار جانبی بر دیوار تا ۳۰ درصد کاهش یافته است (شهاتا، ۲۰۱۶). همچنین، مشخص شد که وجود چند طبقه در یک دیوار حائل با ارتفاع ۶/۶ متر می‌تواند با کاهش لنگر خمشی و نیروی برشی وارد بر

ارتفاع معینی از دیوار درون آن به صورت یکپارچه و با اتصال صلب تعریف می‌گردد، موجب کاهش قابل ملاحظه فشار جانبی بر دیوار می‌شود (خان و همکاران، ۲۰۱۶). این طبقه‌ها، به علت تغییر در نحوه توزیع فشار جانبی ناشی از خاکریز و شکست دیاگرام لنگر ناشی از آن، می‌توانند به عنوان یک کاهنده مؤثر در زمان اعمال فشار جانبی زمین عمل کنند. طبقه، به علت نحوه اجرا و نصب مناسب، تطبیق‌پذیری زیاد با خاکریز و اجرای یکپارچه با دیوار، حجم و عرض کم در خاکریزهای محدود و هزینه اقتصادی نسبتاً کم در مقایسه با سایر روش‌ها، می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی برای کاهش فشار جانبی بر دیوار محسوب شود (چوهان و همکاران، ۲۰۱۵؛ جیرب و همکاران، ۲۰۲۰؛ چوهان، ۲۰۲۱).

در بیش از نیم قرن اخیر، روش‌های مختلفی جهت مطالعه عملکرد طبقه‌های کاهنده فشار جانبی توسط محققان ابداع شده و روی ضریب کاهش فشار جانبی با تغییر در محل و پهنای طبقه، با استفاده از تئوری کولمب، تحقیق شده است. اما یکی از چالش‌ها در این زمینه، نبود پیش‌نویس‌های علمی محکم و اثبات شده بوده است (جومیکیز، ۱۹۶۳، چادوری و همکاران، ۱۹۷۳؛ باولز، ۱۹۹۷). در سال‌های بعد، یو و همکاران (۲۰۱۲) با انجام چند کار پژوهشی، با استفاده از تئوری سطح شکست و روش المان محدود، با بهره‌گیری از تئوری مور-کولمب و انجام آزمایش روی مدل فیزیکی، روی دیوار طبقه‌دار تحقیق نمودند. آنها ابتدا با برداشت خاکریز به شکل مرحله‌ای و با زاویه ۵۰ و ۹۰ درجه، به اجرای دیوار مبادرت نمودند. آنها همچنین در تحقیق آزمایشگاهی خود نشان دادند که وجود طبقه بر دیوار در مقایسه با دیوارهای کنسولی فاقد طبقه باعث کاهش چشمگیر فشار جانبی زمین شده است. در تحقیقی دیگر، در این روش مشخص شد که اثر پهنا و موقعیت قرارگیری طبقه در

در این تحقیق به زیر صفر رسید (لیو و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، فاروک (۲۰۱۴، ۲۰۱۵) با استفاده از روش المان محدود و به‌کارگیری نرم‌افزار عددی پلکسیس دوبعدی به بررسی اثرات سختی و محل قرارگیری طبقه بر میزان فشار جانبی خاک، جابجایی دیوار و میزان لنگر خمشی اعمالی بر آن در این نوع دیوارها پرداخت. چوهان و داساکا (۲۰۱۶a) به بررسی احتمال شکست یک دیوار واقعی با پنج طبقه در حیدرآباد هند، با بهره‌گیری از روش المان محدود و نرم‌افزار عددی FLAC-3D پرداختند و نشان دادند که اثرات ناشی از تنش کششی و فشاری در زیر این پنج طبقه موجب گسیختگی در آنها شده است. علت این موضوع آن بود که این عوامل در طراحی اولیه دیوار پیش‌بینی نشده بودند.

تا کنون متخصصین ژئوتکنیک و محققین مرتبط، زاویه اتصال طبقه به شکل صلب و یکپارچه را ۹۰ درجه فرض نموده و دادن زاویه مورب به طبقه جهت اتصال به دیوار مورد ارزیابی آنها قرار نگرفته است. همچنین، مدل‌سازی فیزیکی مقیاس کوچک درون آزمایشگاهی دیوار حائل طبقه‌دار یکی از روش‌هایی است که به علت ماهیت پیچیده رفتار طبقه در سیستم آزمایشگاهی کمتر بدان پرداخته شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده، می‌توان گفت که نقش طبقه در توزیع فشار جانبی و لنگر ناشی از آن در پشت دیوار حائل تا کنون به صورت دقیق و با بررسی سایر عوامل مؤثر در آن با مدل‌سازی فیزیکی تعیین نشده است. همچنین، سایر پارامترهای مرتبط نظیر پهنا و ارتفاع محل قرارگیری طبقه از کف دیوار و اثر تشدید کننده سربار در لبه دیوار در فشار جانبی وارد بر آن که در تحقیقات گذشته با مدل‌سازی فیزیکی پیرامون آنها کمتر پرداخته شده نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اثر تغییر زاویه اتصال طبقه با دیوار برای نخستین بار در این تحقیق بررسی شده است.

دیوار موجب کاهش حجم خاک‌برداری به میزان ۳۶ درصد، مقدار بتن مصرفی و میلگردهای مسلح‌کننده دیوارهای بتنی به ترتیب به مقدار ۲۷ و ۴۰ درصد گشته و باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی و مصرف مصالح سازه‌ای آن شود (چوهان و داساکا، ۲۰۲۱).

چوهان و داساکا (۲۰۲۲) به تحقیق در مورد گسیختگی دیوار حائل طبقه‌دار در کشور هند پرداختند و با تحلیل روابط ریاضی، اثرات زاویه اصطکاک داخلی خاکریز، نسبت پهنای طبقه (B) به ارتفاع دیوار (B/H) و (h/H)، که در آن h فاصله محل قرارگیری طبقه از سطح خاکریز می‌باشد، را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، مشخص شد که پارامترهایی نظیر وزن مخصوص، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی خاک و زبری دیوار با خاک در حداکثر کاهش لنگر خمشی وارد بر دیوار طبقه‌دار و فشار جانبی وارد بر آن مؤثر می‌باشند. حداکثر کاهش در لنگر خمشی و فشار جانبی خاک بر دیوار با تک طبقه به میزان ۵۰ درصد زمانی ایجاد می‌شود که نسبت h/H به ترتیب برابر ۰/۳ و ۰/۵ باشد و مقدار بهینه این نسبت با در نظرگیری سایر عوامل تأثیرگذار ۰/۵ بوده است. این محققین، در مقاله دیگری در سال ۲۰۱۶ نیز این گسیختگی را تشریح نموده و در آن ضمن اشاره به میزان کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار توسط طبقه‌ها (بین ۴۳ الی ۴۸ درصد)، علت گسیختگی را استفاده از بزرگی و توزیع نامناسب فشار جانبی زمین در طراحی محاسبات طبقه دیوار بیان نمودند (چوهان و همکاران، ۲۰۱۶b).

در تحقیقی دیگر که با مدل آزمایشگاهی روی یک سیستم دیوار طبقه‌دار با شمع^۱ با خاکریز قرار گرفت مشخص شد که توزیع فشار جانبی خاکریز با تابع نسبت ارتفاع قرارگیری طبقه و پهنای آن تحت بار سربار و وزن خاکریز بوده و با تغییر این نسبت، مقدار فشار جانبی نیز تغییر می‌یابد. همچنین، مقدار فشار جانبی در زیر طبقه

^۱ - Sheet pile wall

و نقل می‌باشد. سیستم ساخته شده دارای دو حالت اتصال طبقه مورب با زوایای ۷۰ درجه (رو به بالا) و ۱۱۰ درجه (رو به پایین) است. همچنین، سربار در دو حالت ۵ و ۱۰ کیلوپاسکال در فاصله نزدیک به میزان ۱۵ سانتی-متری و دور به دیوار در فاصله ۳۷/۵ سانتی متری از مرکز محل اعمال سربار تالبه دیوار و در ابعاد ۱۵×۴۴ سانتی متر اعمال شده است. بستر آزمایش‌های انجام شده یک جعبه از جنس فولاد که یک بعد آن جهت نمایش نحوه گسیختگی خاک از نوع شیشه پلکسی گلاس بوده، با طول ۱۵۰ سانتی متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر، ساخته شده است (شکل ۲). سیستم آزمایش، همراه با معرفی اجزای آن، در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت تطبیق یک دیوار به ارتفاع ۷ متر و ضخامت ۳۰ سانتی متر در واقعیت با مدل‌سازی با مقیاس ۱:۱۰ در آزمایشگاه، دیوار حائل آزمایش از جنس فولاد با ارتفاع ۷۰ سانتی متر و عرض ۵۹/۴۰ سانتی متر و با ضخامت ۱۰ میلی متر ساخته شد. در این دیوار، جهت اتصال طبقه‌های مورب در فواصل ۲۰ و ۴۰ سانتی متری از کف دیوار شرایط لازم جهت نصب با زوایای مشخص رو به بالا و پایین مهیا گشت. جهت ایجاد دوران کنترل شده دیوار حائل، تکیه‌گاهی به شکل لولا که به کف جعبه متصل شده در آن ایجاد گردید. یکی از چالش‌های این آزمایش، فرار خاک ماسه‌ای از جدار بین دیوار و بدنه جعبه آزمایش بود که جهت کنترل آن از درزگیرها و خاک-بندهای اسفنجی شکل از جنس پلاستیک و فوم مصنوعی استفاده شده است. جهت عملکرد بهینه طبقه‌های مورب زوج با عرض ۵ و ۱۵ سانتی متر می‌بایست اتصال آن‌ها به دیوار حائل به شکل صلب و گیردار انجام گیرد. در این راستا، از دو نبشی با بال مساوی با ابعاد ۴۰×۵۹۰×۵۹۰ و با ضخامت ۴ میلی متر در دو سمت طبقه مورب استفاده شد که اتصال آن به طبقه و دیوار به کمک پیچ انجام گردید. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، یک دیوار با طبقه‌های زوج مورب رو به بالا و

در این مقاله، برای اولین بار، به نقش طبقه‌های مورب رو به بالا (۷۰ درجه) و مورب رو به پایین (۱۱۰ درجه) در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار پرداخته و با مقایسه آن با حالت صاف (۹۰ درجه) جواب سؤالاتی که تا کنون و در تحقیقات پیشین پیرامون آنها پاسخ روشنی وجود نداشته، داده شده است. جهت رسیدن به این هدف، یک سری آزمایش با مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس درون آزمایشگاهی روی طبقه‌های مورب زوج با عرض ۵ و ۱۵ سانتی متر و در دو ارتفاع مشخص از کف دیوار و سطح خاکریز پشت آن و همچنین وجود سربار ناشی از ابنیه و مسیرهای احتمالی در لبه دیوار به میزان ۵ و ۱۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

هدف از این تحقیق، در محدوده درون آزمایشگاهی و جعبه مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس با ابعاد معین و تجهیزات اندازه‌گیری نیرو و تغییر مکان، بررسی و مقایسه اثر طبقه‌های مورب با صاف (قائم بر دیوار) در جهت استفاده بهینه طبقه در کاهش فشار جانبی زمین بر دیوار حائل بوده و یافتن جواب این سؤال که بهترین زاویه برای اتصال طبقه به دیوار کدام حالت می‌باشد، است.

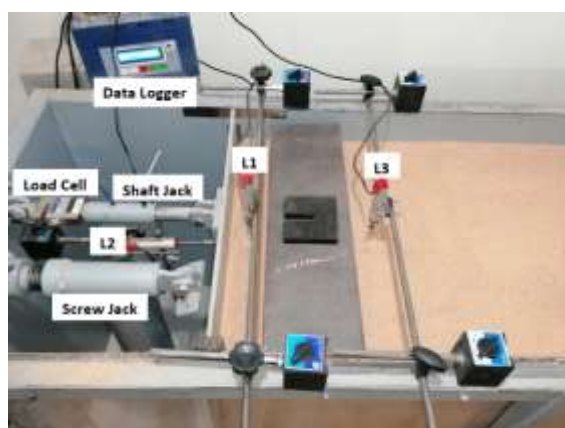
۲. روش آزمایش

۲-۱. دستگاه و تجهیزات مدل‌سازی فیزیکی

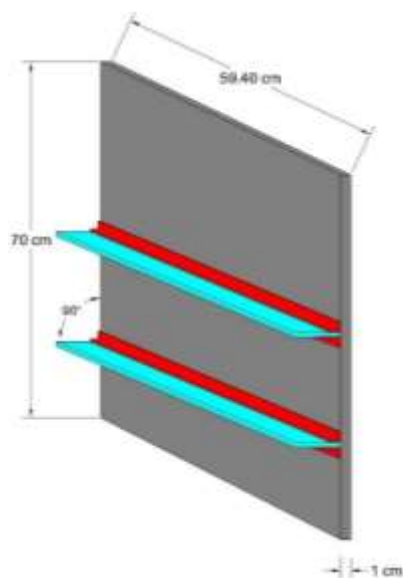
در پژوهش حاضر، جهت انجام آزمایش‌ها از یک سیستم ساخته شده در آزمایشگاه استفاده شده است. این سیستم دارای جعبه مکعب مستطیل همراه با مدل‌سازی دیوار حائل صلب و طبقه‌های مورب با زاویه مشخص زوج و تجهیزات متصل سنجش نیرو و جابجایی دیوار و خاکریز پشت آن می‌باشد. سیستم تعریف شده در این تحقیق بر اساس یک هدف‌گذاری مشخص ایجاد گردیده است. هدف اصلی از این سری آزمایش‌ها بررسی و مقایسه تأثیر طبقه‌های دارای زاویه مورب نسبت به عمود متصل به دیوار حائل صلب در کاهش فشار جانبی تحت بار خاک و سربار روی آن همانند ابنیه و شریان‌های ارتباطی حمل

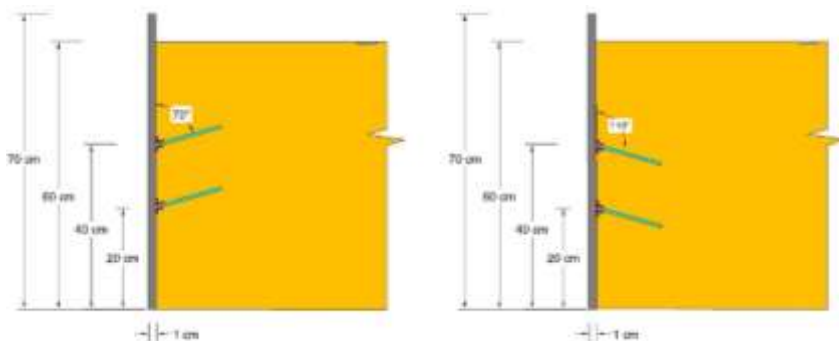
از یک نیروسنج (لود سل) متصل به جک شفتی نگه‌دارنده دیوار استفاده گردید. برای کنترل جابجایی دیوار حائل با دقت یک صدم میلی‌متر، یک جک پیچی ابتکاری ساخته شد که در زمان اعمال فشار جانبی، وقتی که جک شفتی آزادانه به دیوار اجازه دوران می‌دهد، وارد عمل می‌گردد.

پایین با اتصال صلب جهت انجام آزمایش‌ها مدل‌سازی شده است. جهت ثبت جابجایی ناشی از نشست خاکریز پشت دیوار از دو خط‌کش دیجیتال در فواصل ۴ و ۲۶/۵ سانتی‌متری از دیوار و جهت ثبت جابجایی ناشی از دوران دیوار حائل از یک خط‌کش دیجیتال در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری از کف بهره‌برده شد. همچنین، جهت اندازه‌گیری لنگر حاصل از فشار جانبی خاکریز بر دیوار حائل



شکل ۲. نمایی از دیوار، جعبه و سیستم مدل ساخته شده





شکل ۳. شماتیک دیوار نگه‌دارنده ترانشه و شیروانی زمین با طبقه مورب



شکل ۴. نمایی از طبقه‌های ساخته شده در آزمایشگاه

۲-۲. مشخصات مصالح

۱-۲-۲. خاکریز

جنس خاکریز پشت دیوار از نوع دانه‌ای، غیرچسبنده، با تراکم ۵۰ درصد و با مشخصات ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ خشک تعریف گردید. این نوع ماسه که از جمله خاک‌های شناخته شده و مورد استفاده در تحقیقات پیشین است (صدرکریمی و همکاران، ۲۰۰۸)، دارای دانه‌بندی ریزدانه یکنواخت سیلیکاتی به شکل شکسته به رنگ زرد-طلایی می‌باشد.

این نوع خاک دارای چگالی دانه ۲/۶۵۸ و ضریب یکنواختی ۲/۵۸ بوده و مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (ASTM D 2487-10, 2000) ماسه بددانه-بندی شده (SP) نامیده می‌شود. جهت حصول پارامترهای مقاومت برشی مانند زاویه اصطکاک داخلی و میزان چسبندگی خاکریز با تراکم نسبی ۵۰ درصد، یک سری آزمایش برش مستقیم انجام و پارامترهای ذکر شده تعیین گردید. مشخصات این ماسه، نظیر خصوصیات مقاومت برشی و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱

مقدار	واحد	مشخصات
۱۵/۳۰	kN/m ³	وزن مخصوص

۲/۶۵۸ ^(۱)	-	چگالی خاکدانه ها
۲/۵۸ ^(۱)	-	ضریب یکنواختی
۰/۹۷ ^(۱)	-	ضریب انحنای
۵۰	%	تراکم نسبی
۰/۹۴۳ ^(۱)	-	نسبت تخلخل حداکثر
۰/۶۰۳ ^(۱)	-	نسبت تخلخل حداقل
۳۹ ^(۲)	°	زاویه اصطکاک داخلی
۰	kPa	چسبندگی

۱- بر اساس نتایج تحقیقات پیشین (حقیقت، ۲۰۰۱)

۲- بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم در تحقیق حاضر

۲-۲-۲. طبقه مورب کاهنده فشار

بود، استفاده شد. هدف از این کار، ایجاد دیوار با طبقه های زوج مورب با عرض های ۵ و ۱۵ سانتی متری و با اتصال صلب و یکپارچه جهت اطمینان از عملکرد بهینه طبقه ها بوده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آلیاژ مورد استفاده در ساخت دیوار حائل و طبقه های متصل به آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جنس طبقه های مورب از نوع ورق با جنس فولاد می باشد. در دو سمت این طبقه ها از نبشی با بال مساوی با ابعاد ۴۰×۵۹۰×۵۹۰ میلی متر و با ضخامت ۴ میلی متر که با اتصال پیچی سه گانه به طبقه و دیوار متصل گردیده و وزن مخصوص تقریبی آن ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی دیوار و طبقات

مقدار	واحد	مشخصات
۷۶/۹۸	kN/m ³	وزن مخصوص
۲۰۰	GPa	مدول یانگ
۰/۳	-	نسبت پواسون
۳۲	W/m-K	رسانایی حرارتی
۲۴	10 ⁻⁶ /K	انبساط حرارتی

۲-۳. قوانین مقیاس

و واقعیت، رابطه بین هر کمیت فیزیکی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$V_p = \lambda_v V_m \quad (1)$$

که، V_p کمیت مورد نظر در مقیاس واقعی، V_m کمیت در مقیاس مدل و λ_v ضریب مقیاس کمیت مورد نظر می باشد. در هر آزمایش، اولویت با مقیاس نمودن کمیت های مهمتر می باشد، زیرا نمی توان تمام پارامترهای مدل را به گونه ای مقیاس نمود که در تمام جنبه ها شبیه مدل واقعی باشند.

اساس ساخت مدل های فیزیکی در این است که بتوانند در مقیاسی کوچکتر از مدل واقعی به جواب پرسش های یک تحقیق به شکل دقیق تر و سریع تر، در عین صرف هزینه اقتصادی کمتر، دست یابند. در این راستا، ابتدا می بایست تلاش نمود شرایطی مشابه بین مدل آزمایشگاهی و سازه واقعی ایجاد شود. روابط تشابه با ارضای معادلات بر اساس شرایط مرزی به دست می آید. در مقیاس مدل

$$\lambda = \lambda_1^{0.5} \quad (2)$$

بر اساس قوانین تشابه و معادلات اساسی آنها، ضرایب مقیاس کمیت‌های وابسته تعیین می‌شوند. در این تحقیق، ضرایب مقیاس هندسی برابر ۱۰ تعریف گشته و ضرایب مقیاس هر کمیت مطابق با آن انتخاب شده است (جدول ۳). در این راستا، کمیت‌هایی مانند جرم مخصوص، نفوذپذیری، طول و نسبت تخلخل خاک نسبت به حالت واقعی قابلیت کنترل و تغییر داشته و با تعریف بهینه آنها امکان حصول پارامترهای دیگر از روابط فیزیکی برآورده شده است.

در مسائل مربوط به اندرکنش خاک-سازه، سه کمیت جرم مخصوص (ρ)، طول (l) و کرنش (ε) به عنوان پارامترهای اصلی و مستقل در نظر گرفته شده و سایر کمیت‌ها بر اساس آن‌ها تعیین خواهند شد (یای، ۱۹۸۹). در مدل فیزیکی $1g$ ، سه ضریب مقیاس شامل ضریب مقیاس طول (λ_l)، ضریب مقیاس جرم مخصوص (λ_ρ) و ضریب مقیاس کرنش (λ_ε) وجود دارد. ضریب مقیاس جرم مخصوص برابر یک می‌باشد ($\lambda_\rho = 1$) و با فرض اینکه خاکریز در حین آزمایش در سطوح کوچک قرار داشته و مدول برشی اولیه ماسه (G_0) آن با مجذور سرعت موج برشی (V_s) متناسب باشد، بین ضرایب مقیاس طول و کرنش رابطه زیر برقرار است:

جدول ۳. ضرایب مقیاس در آزمایش سیستم $1g$

ردیف	کمیت	ضریب مقیاس کلی (در حالت $\lambda_\rho = 1$ و $\lambda_\varepsilon = \lambda_l^{0.5}$)	ضریب مقیاس تحقیق حاضر
۱	طول، l	λ	۱۰
۲	جرم مخصوص، ρ	۱	۱
۳	کرنش، ε	$\lambda^{0.5}$	۳/۱۶
۴	تنش، σ	λ	۱۰
۵	نسبت تخلخل خاک، e	۱	۱
۶	تغییر مکان، u	$\lambda^{0.5}$	۳/۱۶
۷	سرعت، \dot{u}	$\lambda^{0.75}$	۵/۶۲
۸	شتاب، \ddot{u}	۱	۱
۹	زمان، t	$\lambda^{0.75}$	۵/۶۲
۱۰	نیرو در واحد طول دیوار، F	λ^2	۱۰۰
۱۱	سختی، E	$\lambda^{0.5}$	۳/۱۶
۱۲	فرکانس، f	$\lambda^{-0.5}$	۰/۳۱

۲-۴. ساخت مدل و ابزارگذاری

طبقه‌های مورب زوج کاهنده فشار با اتصال هر زوج طبقه با عرض ۵ و ۱۵ سانتی‌متر و دو ارتفاع مشخص ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری از کف دیوار حائل روی آن ایجاد شده است. طبقه‌های مورب با زوایای ۷۰ درجه (رو به بالا) و

۱۱۰ درجه (رو به پایین) که جهت اتصال از دو نبشی متصل به خود بهره گرفته‌اند، مورد آزمایش قرار گرفتند. برای ریختن خاک به پشت دیوار حائل از یک مخزن ابتکاری ساخته شده در درون آزمایشگاه به عنوان ماسه-پاش به شکل خشک و با سیکل بارش منظم در لایه‌های

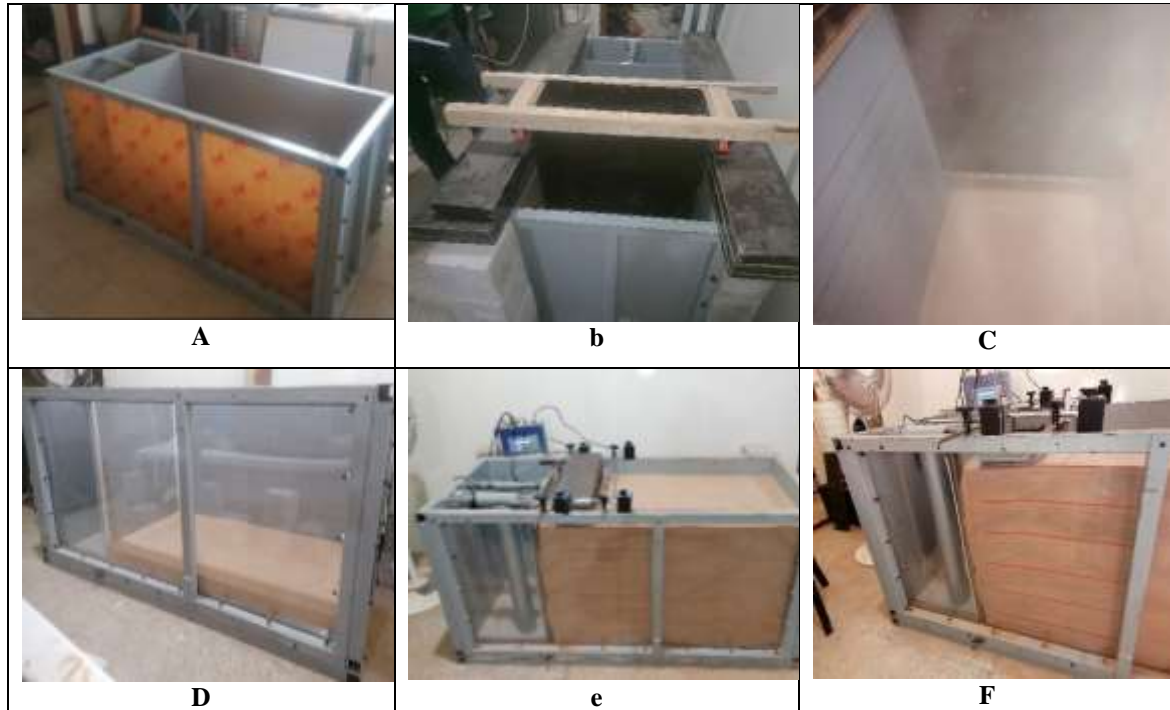
جداره‌ها به حداقل ممکن برسد. از یک دیتا لاگر نمایشگردار با توان قرائت یک نیرو و سه جابجایی جهت برآیند و نمایش مقادیر حاصل از سنجش نیرو و جابجایی‌ها استفاده شد.

۲-۵. روش کار

در این مقاله، در ابتدا به بررسی دیوار حائل صلب بدون طبقه پرداخته شده و سپس در دو مدل یکی طبقه‌های زوج عمود بر دیوار و دیگری طبقه‌های زوج مورب بر دیوار، در کل نتایج حدود ۲۰ آزمایش اثر کاهنده فشار ناشی از طبقه‌ها با محل قرارگیری مشخص در سه حالت بدون سربار و با سربار ۵ و ۱۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. در روند انجام آزمایش‌ها سعی بر این نکته بوده تا گام‌های جابجایی ناشی از دوران دیوار حائل به مقدار حداقل ممکن و با دقت یک میلی‌متری کنترل گردد و همزمان میزان نیروی ناشی از فشار جانبی خاکریز و نشست سطح آن ثبت شود. دیوار حائلی به ارتفاع ۷ متر در واقعیت بر اساس ضریب مقیاس ۱۰ (مقیاس تحقیق حاضر) مدل شد. همچنین، مقیاس وزن مخصوص و نسبت تخلخل خاک نیز برابر یک بوده و مقدار آن‌ها در مقیاس واقعی و مقیاس مدل یکسان است. جهت اعمال سربار بر دیوار حائل از وزنه‌هایی از جنس فولاد سخت به میزان ۳۳ و ۶۶ کیلوگرم به ابعاد ۴۴ در ۱۵ سانتی‌متر در فاصله نزدیک (۱۵ سانتی‌متری) و دور (فاصله ۳۷/۵ سانتی‌متری) از لبه دیوار حائل بر آن اعمال شده که به ترتیب معادل سربار واقعی ۵ و ۱۰ کیلوپاسکالی در مقیاس یک است. در شکل ۵، روند کلی آزمایش به ترتیب اجرای آن نشان داده شده است.

مشخص جهت حصول تراکم نسبی ۵۰ درصد بهره برده شده است. لایه‌بندی خاکریز پشت دیوار تا مرحله نصب طبقه مورب با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کف دیوار ادامه یافته و پس از نصب طبقه تا رسیدن به محل نصب طبقه مورب بعدی در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری از کف دیوار متراکم گردیده و تا ارتفاع نهایی ۶۰ سانتی‌متری ریزش ماسه پایان یافته است.

جهت درج میزان لنگر ناشی از فشار جانبی خاک بر دیوار حائل از یک نیروسنج (لودسل) و جهت درج میزان جابجایی‌ها از سه خطکش اهمی دیجیتال جهت سنجش جابجایی ناشی از دوران دیوار حائل و جابجایی ناشی از نشست خاکریز در دو نقطه نزدیک و دور از دیوار استفاده شد. نحوه جانمایی و مکان نصب خطکش‌ها و نیروسنج در شکل ۲ نشان داده شده است. ظرفیت و دقت سنجش خطکش‌ها به ترتیب ۵۰ میلی‌متر و ۰/۰۱ میلی‌متر و نیروسنج ۲۵۰ کیلوگرم و ۲۰ گرم بوده و بر اساس تئوری-های مرسوم فشار جانبی خاک انتخاب شدند. مکان قرارگیری خطکش پشت دیوار در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری و خطکش‌های سنجش نشست خاکریز در فاصله ۴ و ۲۶/۵ سانتی‌متری از لبه دیوار بوده و جهت سنجش دقیق، نیروسنج درون جک شفتی در ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری جلوی دیوار حائل قرار داده شده است. بر اساس سیستم تعریف شده و ابعاد مدل ساخته شده، نیروسنج می‌تواند لنگرهای اعمالی بر دیوار را سنجش نماید. یکی از چالش‌های مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس، جلوگیری از اثر جداره‌های جعبه سیستم ساخته شده بر میزان نیروی ناشی از فشار جانبی و تأثیر آن بر میزان نشست خاکریز و دوران دیوار حائل می‌باشد. بر این اساس، نیروسنج و خطکش‌های اهمی دیجیتال در وسط مدل (در روی صفحه تقارن طولی) قرار داده شده تا حد امکان اثر



f= ابزارگذاری e= ریزش لایه به لایه ماسه d= ماسه پاشی c= ماسه پاش ساخته شده b= جعبه آزمایش ساخته شده a= گسیختگی خاک

شکل ۵. مراحل انجام آزمایش

جدول ۴. آزمایش‌های انجام شده در سیستم دیوار، خاکریز و طبقه

شماره	عنوان	عرض طبقه بالا (cm)	عرض طبقه پایین (cm)	سربار (kPa)	فاصله سربار از دیوار (cm)
TS-1	دیوار بدون طبقه	-	-	-	-
TS-2	دیوار بدون طبقه	-	-	5	15
TS-3	دیوار با زوج طبقه عمود بر دیوار	5	5	-	-
TS-4	دیوار با زوج طبقه مورب رو به بالا ۷۰ درجه	5	5	-	-
TS-5	دیوار با زوج طبقه مورب رو به پایین ۱۱۰ درجه	5	5	-	-
TS-6	دیوار با زوج طبقه عمود بر دیوار	5	5	5	15
TS-7	دیوار با زوج طبقه مورب رو به بالا ۷۰ درجه	5	5	5	15
TS-8	دیوار با زوج طبقه مورب رو به پایین ۱۱۰ درجه	5	5	5	15
TS-9	دیوار با زوج دابل طبقه عمود بر دیوار	5	5	10	15
TS-10	دیوار با زوج طبقه مورب رو به بالا ۷۰ درجه	5	5	10	15
TS-11	دیوار با زوج طبقه مورب رو به پایین ۱۱۰ درجه	5	5	10	15
TS-12	دیوار با زوج دابل طبقه عمود بر دیوار	15	15	5	15
TS-13	دیوار با زوج طبقه مورب رو به بالا ۷۰ درجه	15	15	5	15
TS-14	دیوار با زوج طبقه مورب رو به پایین ۱۱۰ درجه	15	15	5	15
TS-15	دیوار با زوج دابل طبقه عمود بر دیوار	15	15	10	15
TS-16	دیوار با زوج طبقه مورب رو به بالا ۷۰ درجه	15	15	10	15
TS-17	دیوار با زوج طبقه مورب رو به پایین ۱۱۰ درجه	15	15	10	15

۳. نتایج و بحث

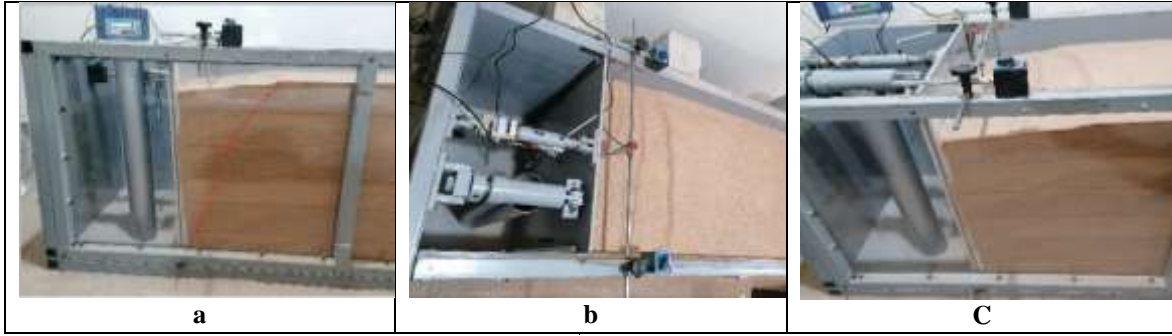
۳-۱. لنگر و جابجایی دیوار

۳-۱-۱. بدون طبقه

در این قسمت، روند کلی آزمایش و سنجش نیرو و جابجایی ناشی از دوران دیوار در آزمایش‌های انجام شده، ارائه گردیده است. از بررسی نمودارهای استخراجی می‌توان بیان نمود که رفتار دیوار با گام‌های دوران منظم به شکل یک نمودار سرسره‌ای است که بعد از تبدیل فشار جانبی خاک از حالت سکون به محرک دارای دامنه تغییرات تقریباً یکسانی در هر سه حالت بدون طبقه، با طبقه عمود و مورب بر دیوار حائل شده است. آنچه در این قسمت دارای اهمیت است میزان لنگر حول تکیه‌گاه لولایی دیوار حائل است. از این‌رو، جهت محاسبه مقدار لنگر، نیروی اعمالی بر جک شفتی (دارای نیروسنج) را در ارتفاع دیوار ضرب نموده تا بتوان به مقایسه تغییرات لنگر حاصل از فشار دیوار و نقش طبقه کاهنده آن پرداخت. در آزمایش‌های انجام شده دو مفهوم فشار جانبی ساکن و محرک تعریف شده است؛ به‌طوری که در حالت بدون دوران دیوار، فشار جانبی وارد بر آن برابر فشار ساکن بوده و با شروع جابجایی و رسیدن میزان دوران دیوار حول تکیه‌گاه لولایی انتهای آن به یک حدود مشخص (H ۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۱)، فشار وارد بر دیوار به حالت محرک درآمده و بعد از این مرحله با بیشتر شدن میزان دوران دیوار، دامنه تغییرات در فشار جانبی اعمالی بسیار ناچیز شده است. در جدول ۴، جزئیات آزمایش‌های انجام گرفته آمده است. روند انجام آزمایش‌ها بدین شکل بود که در ابتدا رفتار دیوار بدون طبقه تحت فشار جانبی خاک در آزمایش شماره TS-1 مورد بررسی قرار می‌گیرد تا جهت مقایسه عملکرد

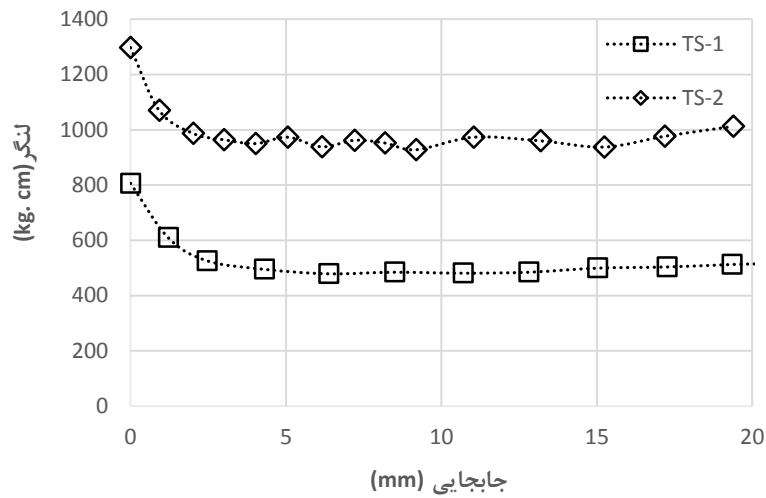
طبقه‌ها در حالت عمود و مورب بر دیوار حائل در آزمایش‌های بعدی مبنای مطالعات این تحقیق گردد (شکل‌های ۷ و ۸). تلاش شده روند انجام آزمایش‌ها یکسان صورت گیرد تا اثر عوامل خارجی و خطای ناشی از کار بر نتایج سیستم آزمایشگاهی به حداقل ممکن برسد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، میزان لنگر اعمالی بر دیوار در زمان بدون طبقه و در حالت سکون بیشترین مقدار خود بوده و برابر ۸۰۵/۷۰ کیلوگرم. سانتی‌متر شده است. در ادامه آزمایش‌ها این مقدار α نامیده می‌شود. نکته مهمی که در این آزمایش مشخص شد تطبیق رفتار و تبدیل حالت ساکن به محرک با فرمول تئوریک موجود در کتب مرجع می‌باشد، به‌طوری که اثبات شد با حدود جابجایی در دامنه بیان شده (۲/۴۶ میلی‌متر) دوران دیوار که معادل چهار هزارم ارتفاع خاکریز و دیوار (H ۰/۰۰۴) می‌باشد، دیوار از حالت ساکن به محرک تبدیل شده و بعد از این میزان دامنه تغییرات فشار جانبی ناچیز گردید. در شکل ۸، نمودار تبدیل فشار جانبی در سه حالت مقاوم، محرک و ساکن نشان داده شده است. بر این اساس، می‌توان رفتار دیوار حائل در آزمایش‌های انجام شده را با مفاهیم تئوریک موجود اثبات نمود. بدین شکل که با کاهش فشار جانبی و رسیدن فشار وارد بر دیوار به یک محدوده مشخص، رفتار آن از ساکن به محرک تبدیل شده است. همچنین، در شکل ۷، رفتار دیوار حائل بدون طبقه در زمان اعمال سربار ۵ کیلوپاسکال ترسیم شده است. این آزمایش اثر افزایش فشار جانبی با اعمال سربار را نشان داده است که اثبات نمود رفتار دیوار و روند تغییرات آن در حالت با و بدون سربار یکسان اما با مقادیر متفاوت و منطبق با میزان سربار اعمالی می‌باشد.

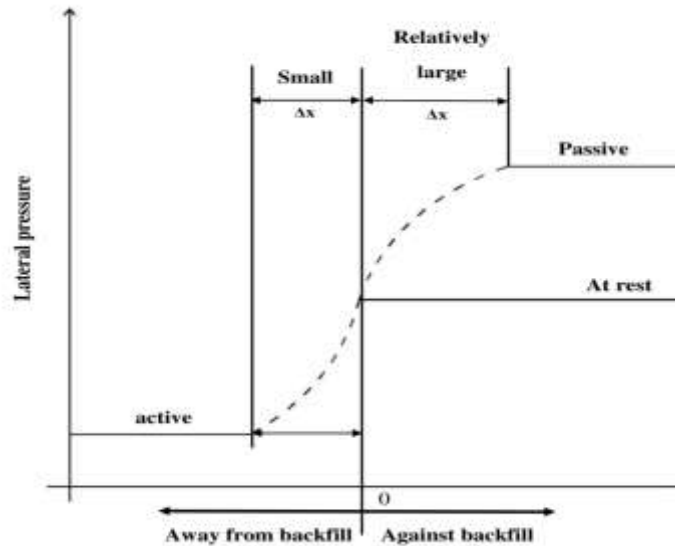


شکل ۶. نمایی از گسیختگی خاکریز با دیوار بدون طبقه و بدون سربار

گونه گسیختگی (a)، نمای گسیختگی (b)، میزان گسیختگی (c)



شکل ۷. تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در حالت بدون طبقه در آزمایش‌های TS-2 و TS-1

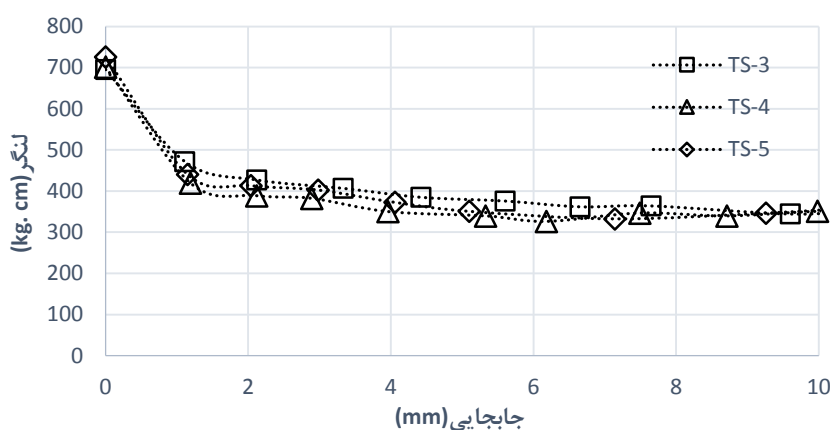


شکل ۸. مفهوم تئوریک تبدیل حالت ساکن به محرک دیوار حائل تحت فشار جانبی خاکریز

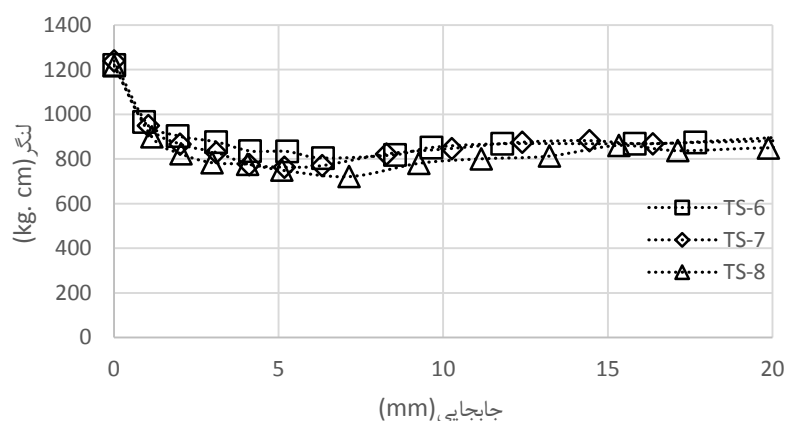
۳-۱-۲. زوج طبقه مورب ۵ سانتی متری

می‌باشند مشخص شد که تغییر در زاویه طبقه مورب چه به سمت بالا و چه به سمت پایین تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر فشار جانبی بر دیوار نداشته است؛ هر چند در حالت سربار ۱۰ کیلوپاسکال اثر طبقه مورب بالا بر کاهش فشار جانبی بیشتر شده است. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که اثر طبقه مورب با عرض کم در پراکندگی سطح نیرو و جلوگیری از تمرکز لنگر ناشی از آن نسبت به طبقه عمود بر دیوار ناچیز خواهد بود.

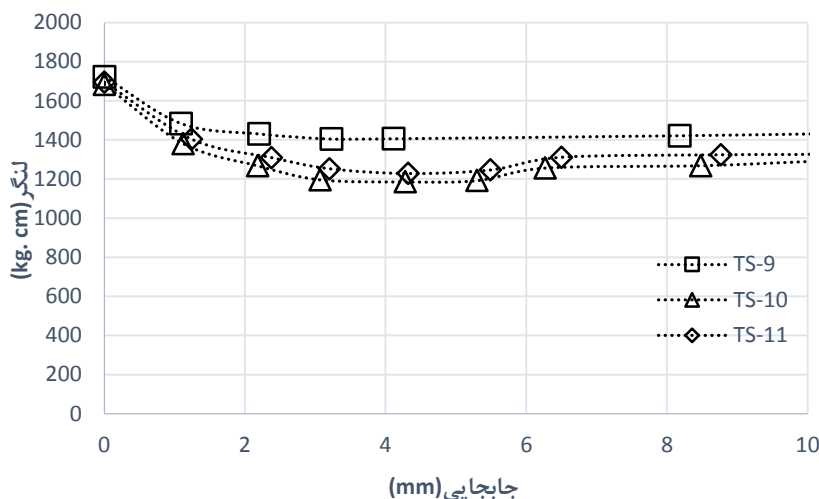
در این قسمت به بررسی اثر طبقه‌های مورب پرداخته می‌شود. شکل ۹، رفتار دیوار بدون سربار با زوج طبقه با عرض یکسان ۵ سانتی‌متری در سه حالت طبقه عمود بر دیوار (۹۰ درجه)، مورب رو به بالا (۷۰ درجه) و رو به پایین (۱۱۰ درجه) را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ روند شکل قبلی را این بار با اعمال سربار ۵ کیلوپاسکالی و شکل ۱۱ با اعمال سربار ۱۰ کیلوپاسکالی به نمایش گذاشته است. از مقایسه سه نمودار شکل‌های ۹ الی ۱۱ که منطبق با آزمایش‌های شماره TS-3 الی TS-11 جدول ۴



شکل ۹. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در زمان وجود طبقه زوج ۵ سانتی‌متری و بدون اعمال سربار در سه حالت طبقه قائم و مورب رو به بالا و پایین در آزمایش‌های شماره TS-3 الی TS-5 جدول ۴



شکل ۱۰. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در زمان وجود طبقه زوج ۵ سانتی‌متری و اعمال سربار ۵ کیلوپاسکالی در سه حالت طبقه قائم و مورب رو به بالا و پایین در آزمایش‌های شماره TS-6 الی TS-8 جدول ۴

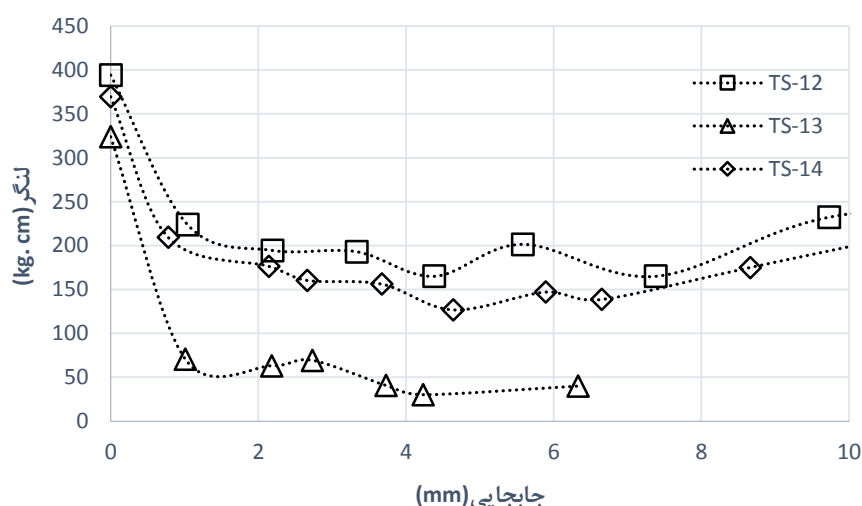


شکل ۱۱. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در زمان وجود طبقه زوج ۵ سانتی متری و اعمال سربار ۱۰ کیلوپاسکالی در سه حالت طبقه قائم و مورب رو به بالا و پایین در آزمایش‌های شماره TS-9 الی TS-11 جدول ۴

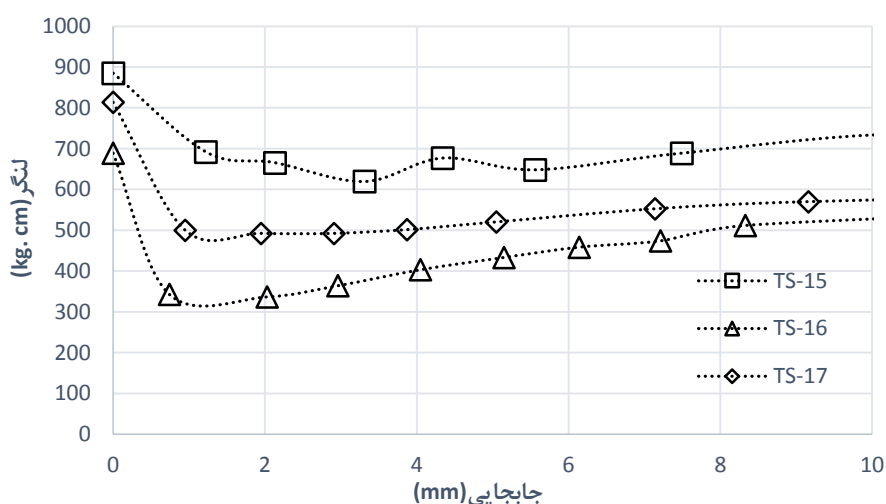
و ۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد، مشخص شد که در حالت طبقه مورب رو به بالا (۷۰ درجه) بیشترین کاهش در فشار جانبی بر دیوار ایجاد شده و بعد از آن اثر طبقه مورب رو به پایین (۱۱۰ درجه) از طبقه عمود بر دیوار حائل (۹۰ درجه) در کاهش فشار جانبی بیشتر بوده است. در مجموع، از مقایسه پنج نمودار اخیر مشخص شد که اثر طبقه مورب رو به بالا (۷۰ درجه) با افزایش مقدار سربار و عرض طبقه در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار نسبت به طبقه قائم (۹۰ درجه) و مورب رو به پایین (۱۱۰ درجه) بیشتر بوده است. این نتیجه که برای اولین بار در مطالعه حاضر به اثبات رسید مؤید این نکته است که تغییر در زاویه طبقه عمود بر دیوار چه به سمت بالا و چه به سمت پایین اثری مثبت در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار دارد. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که نقش طبقه مورب در پراکندگی نیروی ناشی از پوش فشار جانبی خاکریز نسبت به طبقه عمود بر آن بیشتر بوده و هر چه زاویه طبقه به سمت بالا باشد، نقش آن در عدم تمرکز لنگر بیشتر می‌گردد.

۳-۳-۱. زوج طبقه مورب ۱۵ سانتی متری

در نمودار شکل ۱۲، بر اساس آزمایش‌های شماره TS-12 الی TS-14 جدول ۴، به بررسی طبقه‌های زوج با عرض یکسان ۱۵ سانتی متری در سه حالت مورد نظر با سربار ۵ کیلوپاسکالی پرداخته می‌شود. در نمودار مربوط به آزمایش شماره TS-13، منحنی تغییرات طبقه مورب رو به بالا (۷۰ درجه) نسبت به دو منحنی دیگر کوتاه‌تر بوده است. علت این موضوع این است که جابجایی دیوار به علت درگیری زیاد طبقه در گوه خاکریز بعد از حدود ۷ میلی‌متر متوقف گردید که نشان از نقش افزایش عرض طبقه (۱۵ سانتی متر) و نحوه زاویه آن (۷۰ درجه) در جلوگیری از دوران دیوار و کنترل جابجایی آن دارد. به عبارت دیگر، در چنین حالتی میزان لنگر ناشی از پوش فشار به قدری کم می‌شود که توان جابجایی و حرکت دیوار بیش از مقدار بیان شده را از دست داده است. از مقایسه دو نمودار شکل‌های ۱۲ و ۱۳ در آزمایش‌های شماره TS-16 الی TS-18 جدول ۴ که تغییرات فشار جانبی در سه حالت مورد نظر و در دو مقدار با سربار ۵



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در زمان وجود طبقه زوج ۱۵ سانتی‌متری و اعمال سربار ۵ کیلوپاسکالی در سه حالت طبقه قائم و مورب رو به بالا و پایین در آزمایش‌های شماره TS-12 الی TS-14 جدول ۴



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر دوران دیوار در زمان وجود طبقه زوج ۱۵ سانتی‌متری و اعمال سربار ۱۰ کیلوپاسکالی در سه حالت طبقه قائم و مورب رو به بالا و پایین در آزمایش‌های شماره TS-15 الی TS-17 جدول ۴

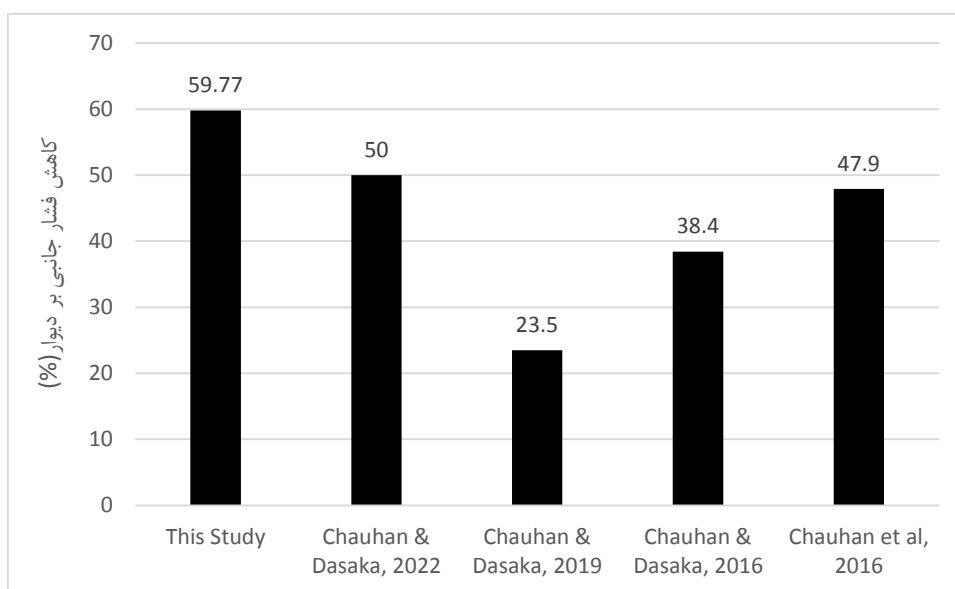
طبقه‌ها، میزان کاهش فشار جانبی بیشتر شده است. نکته- ای که می‌بایست ذکر شود این است که در تمامی آزمایش‌ها، قبل از اعمال سربار، مقدار حداکثر فشار جانبی در حالت سکون دیوار ثبت گردیده است. همانطور که در شکل ۶ مشخص شد، بیشترین مقدار فشار جانبی ساکن در حالت بدون طبقه برابر ۸۰۵/۷۰ کیلوگرم. سانتی‌متر بود (مربوط به آزمایش TS-1) و کمترین آن در حالت وجود دوبل طبقه با عرض یکسان

۲-۳. مقایسه با تحقیقات پیشین

جهت صحت‌سنجی نتایج و درستی روند انجام آزمایش- ها، در این بخش به مقایسه نقش طبقه در کاهش مقدار حداکثر فشار جانبی بر دیوار حائل صلب وقتی حالت ساکن بر آن حاکم است پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، با افزایش عرض و تعداد

۲۰۱۹). چوهان و داساکا (۲۰۱۶) در تحقیقی، با مدل‌سازی عددی یک دیوار به ارتفاع ۱۳ متر و دارای ۵ طبقه نشان دادند که طبقه‌های با عرض ۱/۵ متر بیشترین کاهش در فشار جانبی را به میزان ۳۸/۴۰ درصد داشته‌اند. این مدل‌سازی، با همین شرایط در تحقیقی دیگر، نشان داد که می‌تواند تا ۴۷/۹۰ درصد فشار جانبی بر دیوار را کاهش دهد (چوهان و همکاران، ۲۰۱۶).

۱۵ سانتی‌متر برابر ۳۲۴/۱۰ کیلوگرم. سانتی‌متر که معادل ۵۹/۷۷ درصد کاهش فشار جانبی بوده، ثبت گردیده است (شکل ۱۲). این در حالی است که نتایج مطالعات تحلیلی چوهان و داساکا (۲۰۲۲) روی دیوار با تک‌طبقه، حداکثر کاهش فشار جانبی را معادل ۵۰ درصد بیان نموده است. در مقایسه دیگر، نتایج یک مطالعه عددی دیوار با ارتفاع ۵/۴۰ متر و سه طبقه با عرض ۰/۶ متر، فشار جانبی را تا ۲۳/۵ درصد کاهش داده است (چوهان و همکاران،



شکل ۱۴. مقایسه میزان کاهش فشار جانبی در دیوار حائل طبقه‌دار در تحقیقات مختلف و مطالعه حاضر

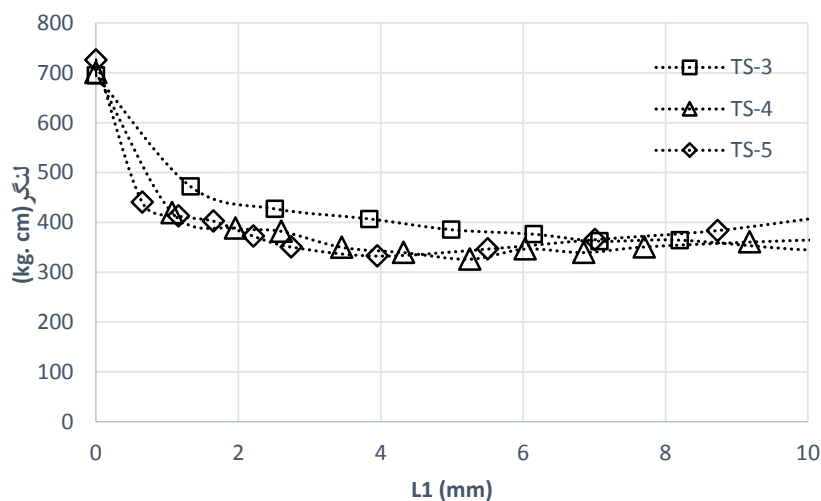
آزمایش‌های شماره TS-6 الی TS-8 در شکل ۱۶ ارائه شده است.

با مقایسه شکل ۱۰ با شکل‌های ۱۵ و ۱۶ که روند کاهش فشار جانبی در برابر نشست خاکریز را نشان می‌دهند، قابل بیان است که مکانیزم کاهش آن منطبق بر دوران دیوار می‌باشد، به طوری که میزان جابجایی دیوار رابطه مستقیمی با نشست خاکریز در لبه دیوار دارد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که ماهیت رفتاری نشست خاکریز دیوار طبقه‌دار در هر سه حالت (عمود، مورب رو به بالا

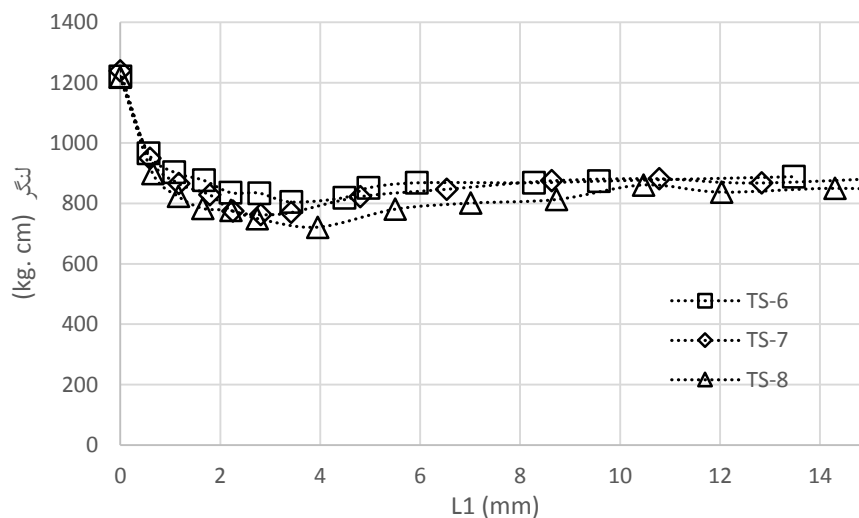
۳-۳. نشست نزدیک و دور خاکریز

یکی دیگر از پارامترهایی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت، میزان نشست خاکریز در لبه دیوار و پشت سربار اعمالی بود. بر این اساس، همزمان با دوران دیوار، میزان نشست خاکریز در دو نقطه نزدیک و دور از دیوار در فواصل به ترتیب ۴ و ۲۶/۵۰ سانتی‌متری آن با دو خط‌کش اهمی دیجیتال اندازه‌گیری شد. به عنوان نمونه، نشست نقطه نزدیک دیوار در سه حالت آزمایش‌های شماره TS-3 الی TS-5 در شکل ۱۵ و سه حالت

و پایین بر دیوار) به علت وجود پارامترهایی مانند نحوه انجام آزمایش، میزان تراکم و شرایط زوایای نزدیک به هم طبقات با عرض کم بر هم منطبق بوده و مقدار جابجایی ناشی از دوران دیوار با مقدار جابجایی ناشی از نشست خاکریز در مجاورت لبه دیوار بسیار به هم نزدیک شده است.



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر نشست خاکریز لبه دیوار (L1) در زمان وجود طبقه زوج ۵ سانتی متری در آزمایش‌های شماره TS-3 الی TS-5



شکل ۱۶. مقایسه تغییرات فشار جانبی در برابر نشست خاکریز لبه دیوار (L1) در زمان وجود طبقه زوج ۵ سانتی متری در آزمایش‌های شماره TS-6 الی TS-8

۴. نتیجه گیری

- تغییرات فشار جانبی در دیوار با طبقه به عرض ۱۵ سانتی‌متر در سه حالت قرارگیری به شکل قائم، مورب روبه بالا و مورب رو به پایین در دو مقدار سربار نزدیک به ۵ کیلوپاسکال و سربار نزدیک به ۱۰ کیلوپاسکال نشان داد که در حالت طبقه مورب رو به بالا بیشترین کاهش در فشار جانبی بر دیوار ایجاد شده و بعد از آن اثر طبقه مورب رو به پایین از حالت طبقه قائم در کاهش فشار جانبی بیشتر بوده است. به طوری که طبقه رو به بالا در حدود ۲۰ درصد لنگر وارد بر دیوار را نسبت به طبقه قائم کاهش داده است.
- در مجموع، اثر طبقه مورب رو به بالا، با افزایش مقدار سربار و عرض طبقه، در کاهش فشار جانبی وارد بر دیوار از طبقه قائم و مورب رو به پایین بیشتر می‌باشد.

در این تحقیق، با انجام یک سری آزمایش، به بررسی نقش طبقات بر کاهش فشار جانبی خاک در دیوار حائل صلب پرداخته شد. با به‌کارگیری طبقات در سه حالت قائم (۹۰ درجه)، مورب رو به بالا (۷۰ درجه) و مورب رو به پایین (۱۱۰ درجه) درون مدل فیزیکی ساخته شده مقیاس کوچک نتایج زیر حاصل گردید:

- تغییرات فشار جانبی در دیوار با طبقه به عرض ۵ سانتی‌متر در سه حالت قرارگیری مذکور و در سه مقدار بدون سربار، با سربار نزدیک به ۵ کیلوپاسکال و سربار نزدیک به ۱۰ کیلوپاسکال، نشان داد که تغییر در زاویه طبقه مورب چه به سمت بالا و چه به سمت پایین تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تغییر فشار جانبی بر دیوار نداشته است. هرچند در حالت سربار ۱۰ کیلوپاسکال، اثر طبقه مورب رو به بالا بر کاهش فشار جانبی حدود ۵ درصد بیشتر شده است.

۵. مراجع

- Banerjee, SP. 1977. "Soil behaviour and pressure on retaining structures with relief shelves". Indian Highw, pp 21-34
- Bowles, JE. 1997. "Foundation analysis and design" 5th edn. McGraw-Hill, Singapore.
- Chaudhuri, P.R, Garg, A.K, Rao, M.V.B, Sharma, R.N, Satija, P.D. 1973. "Design of retaining wall with relieving shelves". IndianRoad Cong J 35(2):289-325.
- Chauhan, V. B. 2017. "Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves". Dissertation, IIT, Bombay, Mumbai, India.
- Chauhan, V. B. 2021. "Limit analysis of the retaining wall with relief shelves under static surcharge loading using FEM". Sadhana, 46: 135. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01662-9>
- Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2016. "Behaviour of rigid retaining wall with relief shelves with cohesive backfill". Proc. 5th Int. Conf. on Forensic Geotech. Eng., Bangalore, India, pp. 350-357.
- Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2018. "Performance of a rigid retaining wall with relief shelves". J. Perform. Constr. Facil., 32(3): 04018021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001161](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001161)
- Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2019. "Forensic investigation of a rigid retaining wall with relief shelves using static force analysis". Proc. 16th Asian Reg. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Taipei, Taiwan, pp. 1-4.
- Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2021. "Behavior of rigid retaining walls with relief shelves: an analytical approach". Geotech. Geol. Eng., 39(5): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01913-w>
- Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2022. "Active earth pressure on retaining wall with a relief shelf: A novel analytical method". Innov. Infrastruct. Solut., 7: 99.
- Chauhan, V. B., Dasaka, S. M. and Khan, R. 2015. "Numerical study on the behavior of a rigid retaining wall with two relief shelves". Proc. 50th Indian Geotech. Conf., Pune, India, pp. 236-241.

- Chauhan, V. B., Khan, R. and Dasaka, S. M. 2016a. "Reduction of lateral earth pressure acting on non-yielding retaining wall using relief shelves". Proc. Ind. Geotech. Conf., Chennai, India.
- Chauhan, V. B., Dasaka, S. M. and Gade, V. K. 2016b. "Investigation of failure of a rigid retaining wall with relief shelves". The 15th Asian Region. Conf. on Soil Mech. Geotech. Eng., Japanese Geotechnical Society Special Publication.
- Djireb, S., Mabrouki, A., Benmeddour, D. and Mellas, M. 2020. "Investigation of active earth pressures and failure mechanism of retaining walls with a relief shelf". *Innov. Infrastruct. Solut.* 5: 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00299-7>.
- Farouk, H. 2014. "Finite element analysis for the retaining wall with relief shelves". In: Brandl H, Adam D (eds) XV DanubeEuropean conference on geotechnical engineering (DECGE2014), 9–11 September. Austria, Paper No, Vienna, p 52
- Haghighat, S. 2001 "Investigation of total stress and lateral strains ratio effects on undrained behavior of saturated sandy soils by stress path triaxial tests". M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran. (In Persian).
- Iai, S. 1989. "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field". *Soils Found.*, 29: 105-118.
- Jumikis, AR. 1964. "Mechanics of soils: fundamentals for advanced study". Van Nostrand, Princeton
- Khan, R., Chauhan, V. B. and Dasaka, S. M. 2016. "Reduction of lateral earth pressure on retaining wall using relief shelf: A numerical study". Proc. Int. Conf. Soil Environ., Bangalore, India, Paper No. 117.
- Liu G, Hu R, Pan X, Liu Y. 2011. "Model tests on earth pressure of upper part wall of sheet pile wall with relieving platform". *Rock Soil Mech* 32(2):103–110
- Liu G, Hu R, Pan X, Liu Y. 2013. "Model tests on mechanical behaviors of sheet pile wall with relieving platform". *Chin J Geotech Engg* 35(1):94–99
- Moon, I., Kim, B., Yoo, W. and Park, Y. 2013. "Model test for measurement of lateral earth pressure on retaining wall with the relieving platform using Jumoonjin sand". *J. Korea Acad. Ind. Cooper Soc.*, 14(11): 5923-5929.
- 1- Sadrekarimi A., Ghalandarzadeh A., Sadrekarimi J. 2008. "Static and dynamic behavior of hunchbacked gravity quay walls". <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.05.004>.
- Shehata, H. F. 2016. "Retaining walls with relief shelves". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 1(1): 4. <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0007-x>
- Tsagareli, Z. V. 1969. "New methods of lightweight wall construction". Strojizdat, Moscow.
- Yakovlev, P. I. 1974. "Experimental investigations of earth pressure on walls with two relieving platforms in the case of breaking loads on the backfill". *Soil Mech. Found. Eng.*, 11(3): 151-155.
- Yoo, W, Kim, B., Moon, I. and Park, Y. 2012. "Comparison of the lateral earth pressure on the retaining wall with the relieving platform by model test and numerical analysis". *J. Korea Acad. Ind. Cooper Soc.*, 13(5): 2382–2389. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.2382>