

## مطالعه تأثیر اجرای پله بر پایداری دیوار حائل خاک مسلح در مقیاس آزمایشگاهی

عباس عابدی، جهانگیر خزائی\*، حسین مؤیدی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ دی ۱۳۹۶  
بازنگری: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۷  
پذیرش: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۲۳ مرداد ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

ژئوگرید  
خاک مسلح  
دیوار حائل پله‌ای  
عرض پله  
تعداد پله

**چکیده:** اگر یک دیوار با ارتفاع بلند به چند دیوار با ارتفاع کوتاه‌تر تقسیم شود به آن دیوار پله‌ای (تراس‌بندی شده) اطلاق می‌شود. در دیوارهای خاک مسلح زمانی که اجرای دیوار با ارتفاع زیاد مورد نظر باشد به دلیل بالا رفتن هزینه‌ها بحث اجرای دیوار پله‌ای می‌تواند مفید واقع شود. بدین منظور مدلسازی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی دیوار خاک مسلح انجام شد تا عملکرد آن‌ها در هندسه‌های مختلف مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش تأثیر پارامترهای عرض پله (فاصله افقی پله‌ها) و تعداد پله‌ها بر عملکرد دیوار پله‌ای نسبت به دیوار قائم مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا جمعاً ۱۲ مدل دیوار در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و عملکرد آن‌ها تحت بارگذاری استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دیوار پله‌ای با افزایش عرض پله و افزایش تعداد پله‌ها تغییر شکل‌های افقی رویه دیوار و نشست پی نواری مستقر بر خاک بالادست دیوار، نسبت به دیوار قائم کاهش و ظرفیت باربری پی نواری افزایش می‌یابد. با افزایش عرض پله، تغییر مکان افقی رویه دیوار به‌خصوص در قسمت بالایی دیوار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ به طوری که مناسب‌ترین حالت برای اندرکنش دیوار بالایی و پایینی از لحاظ عملکرد در حالت خاص چهار لایه تسلیح و دیوار یک پله‌ای، برای شرایط نسبت عرض پله به ارتفاع دیوار برابر ۰/۳۵ می‌باشد.

### ۱- مقدمه

یکی از مزایای استفاده از خاک مسلح ژئوسینتیکی در کوله‌های پل، کاهش دست‌انداز ناشی از نشست‌های نامتقارن بین کوله‌ی پل و سطح راه می‌باشد [۶-۸].

اجرای دیوار پله‌ای در مقایسه با دیوار قائم یکپارچه باعث کاهش ضخامت دیوار، کاهش حجم خاک‌ریزی پشت دیوار و کاهش نشست خاک پشت دیوار می‌شود. علاوه بر مزایای ساختاری، دیوارهای پله‌ای نمای زیباتری را نشان می‌دهند. علاوه بر این، دیوار خاک مسلح گاهی لازم است در محلی ساخته شود که از نظر توپوگرافی در شرایط خوبی واقع نشده است. در چنین شرایطی اجرای دیوار حائل به شکل پله‌ای راه‌حل منطقی به نظر می‌رسد. علاوه بر این احداث دیوار خاک مسلح پله‌ای در کوله‌های پل با توجه به ارتفاع پایه‌های پل سبب کاهش حجم خاک‌ریزی، کاهش تملک اراضی اطراف پل و پایداری بیشتر سازه خاکی می‌شود [۹-۱۱].

در سال‌های اخیر تعداد زیادی دیوار حائل خاک مسلح در ارتفاع بیشتر از ۶ متر در مناطق مختلف جهان ساخته شده‌اند. یکی از پروژه‌های مستحکم دیوار خاک مسلح که به عنوان کوله‌های پل مورد استفاده قرار گرفت، دیوار به ارتفاع ۶ متر در کلرادو ایالات متحده می‌باشد. بعد از ساخت دیوار، یکسری بارهای آزمایشی برای شناسایی عملکرد سازه خاکی به دیوار اعمال شد که نتایج رضایت‌بخشی از عملکرد دیوار گزارش داده شد [۱۲]. برخی از این

خاک مصالحی است که به خوبی در مقابل فشار مقاومت می‌کند، اما قادر نیست در برابر نیروی کششی مقاومت چندانی از خود نشان دهد. مفهوم خاک مسلح برای اولین بار توسط معمار فرانسوی هنری ویدال<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۹ مطرح شد. از زمان شروع کارهای ویدال، دیوارهای حائل متعددی با استفاده از نظریه خاک مسلح در گوشه و کنار دنیا ساخته شده است [۱]. در ابتدا از تسمه‌های فلزی برای مسلح سازی خاک استفاده شد که این نوع مسلح کننده‌ها مقاومت کششی مناسبی دارند ولی تحت تأثیر خوردگی قرار دارند [۲]. در دهه‌های اخیر با پیشرفت علوم مهندسی پلیمر، از مسلح کننده‌های ژئوسینتیکی<sup>۲</sup> بیشتر استفاده می‌شود. به کار بردن مسلح کننده‌های ژئوسینتیکی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر سازه خاکی شده است. خاک‌های مسلح شده با مصالح ژئوسینتیکی در ساخت بسیاری از سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر دیوارهای حائل، خاک‌ریزها، شیب‌ها و پی‌های کم‌عمق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. در سال‌های اخیر استفاده از دیوارهای خاک مسلح برای نگهداری کوله‌های پل مورد استفاده قرار گرفته است [۴ و ۵].

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.khazaie@razi.ac.ir

1 Henri Vidal  
2 Geosynthetic

تحلیل رفتار دیوار حائل خاک مسلح پله‌ای با استفاده از روش اجزا محدود و روش تعادل حدی و مقایسه نتایج با آزمایش ساتریفیوژ پرداختند [۲۱]. در این مطالعه توافق مطلوب بین مدل اجزاء محدود و مدل ساتریفیوژ در تعیین موقعیت سطح شکست را گزارش دادند. واحدی فرد و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش تعادل حدی سازه‌های خاک مسلح شده‌ی ژئوسنتتیکی با رویه‌ی به صورت قوسی از دایره با تقعر رو به بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از رویه با قوس مقعر، مقاومت کششی موردنیاز مسلح کننده‌ها را تحت بار استاتیکی و شبه استاتیکی تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد و منجر به پایداری دیوار می‌شود، با افزایش تقعر رویه دیوار احتمال شکست دیوار بیشتر می‌شود [۲۲].

مطالعه پیشینه موضوع حاکی از آن است که تاکنون پژوهش قابل توجهی در مقیاس آزمایشگاهی در مورد مطالعه رفتار دیوار خاک مسلح در ساختار پله‌ای و مقایسه عملکرد آن با دیوار خاک مسلح قائم گزارش نشده است. البته باید توجه داشت که اندک مطالعات انجام شده در این خصوص، تأثیر مثبت دیوار پله‌ای بر روی رفتار دیوار حائل خاک مسلح را تأیید می‌کنند. بنابراین مطالعه و ارائه نتایج بر مبنای مدل‌های آزمایشگاهی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این پژوهش به بررسی و مطالعه تأثیر اجرای پله بر پایداری دیوار خاک مسلح در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

## ۲- مصالح، ابزار و چگونگی انجام آزمایش‌ها

### ۲-۱- خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده از نوع ماسه خشک بدانه‌بندی شده می‌باشد که شکل ۱ نمودار دانه‌بندی آن و جدول ۱ مشخصات آن را نشان می‌دهد. ضمناً زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی خاک از آزمایش برش مستقیم تعیین گردید.

دیوارها به صورت پله‌ای ساخته شده‌اند. دیواری به ارتفاع ۴۶ متر در فرودگاه بین‌المللی سیاتل تاکوما واشنگتن برای توسعه باند فرود ساخته شده که برای تسلیح خاک از تسمه‌های فولادی استفاده شد. ابزار دقیق نصب شده در دیوار عملکرد خوب دیوار را گزارش می‌دهند [۱۳]. داو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ دیوار ژئوسینتیکی پله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه پارامترهای مقاومت کششی مسلح کننده‌ها، سختی و طول مسلح کننده‌ها، تعداد پله و... با استفاده از دو نوع تحلیل معادلات حدی و مکانیک پیوسته مورد مطالعه قرار گرفتند که هر دو تحلیل نتایج مشابه و قابل قبولی داشتند [۱۴]. یو<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از تحلیل‌های اجزا محدود، دیوار پله‌ای با دو عرض مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در تحقیقات آن‌ها پله بالایی دیوار به عنوان یک سربار معادل برای پله پایینی جایگزین شد که شدت این سربار به فاصله افقی بین پله‌های دیوار بستگی دارد [۱۶]. همچنین یو و کیم<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۶ طی تحقیق دیگری با استفاده از نتایج حاصل از روش اجزا محدود نشان دادند که طراحی بر اساس آیین‌نامه مدیریت بزرگراه‌های فدرال<sup>۴</sup> نتایج نسبتاً محافظه‌کارانه‌ای نسبت به طراحی به روش انجمن ملی بناهای بتنی<sup>۵</sup> دارد [۱۷]. یو و همکاران در سال ۲۰۰۴ عملکرد دیوار حائل خاک مسلح پله‌ای در مقیاس کامل به ارتفاع ۵/۶ متر را مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. در سال ۲۰۰۸ باز همان دیوار را تحت اعمال یک سربار مورد بررسی قرار دادند و نتایج با نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مقایسه شد [۱۹]. یانگ<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی عملکرد پس از ساخت دیوار خاک مسلح پله‌ای به ارتفاع ۱۷ متر در مقیاس کامل پرداختند [۲۰]. نتایج نشان داد که در لایه پایینی فشار جانبی خاک پس از پایان ساخت کاهش یافته و اگر لایه بالایی را به دو بخش تقسیم شود در بخش بالایی فشار جانبی کاهش و در بخش پایینی فشار جانبی افزایش می‌یابد. محمد و همکاران در سال ۲۰۱۴ به

### جدول ۱. مشخصات خاک

Table 1. Characteristics Soil

چسبندگی خاک	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi^\circ$ )	ضریب انحنای ( $C_u$ )	ضریب یکتواختی ( $C_p$ )	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $gr/cm^3$ )	وزن مخصوص خشک حداقل ( $gr/cm^3$ )	وزن مخصوص خشک ( $gr/cm^3$ )
صفر	۳۷	۱/۹۲	۳/۵۶	۱/۷۸	۱/۵۶	۱/۶۵

1 Dov

2 Yoo

3 Kim

4 Federal Highway Administration

5 National Concrete Masonry Association

6 Yang

### ۲-۳- جعبه آزمایش

برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی از یک جعبه به ارتفاع ۰/۵ متر، طول ۱/۵ متر و عرض ۰/۵ متر استفاده شد. به منظور مشاهده تغییر شکل توده‌ی خاک در طول ساخت و بارگذاری یک‌طرفه جعبه مورد نظر، از پلکسی‌گلس شفاف به ضخامت ۰/۰۱ متر استفاده شد. به منظور جلوگیری از تغییر شکل جانبی جداره‌ها در هنگام ساخت مدل یا بارگذاری آن، از سخت‌شونده‌های فولادی در طرفین جداره‌ها استفاده شد. برای به حداقل رساندن اصطکاک بین جداره فلزی و خاک از یک صفحه پلاستیکی شفاف استفاده شد. استفاده از این روش در پژوهش‌های گذشته نشان داده است که زاویه اصطکاک بین جداره‌ها و خاک را به کمتر از ۵ درجه کاهش می‌دهد [۲۳].

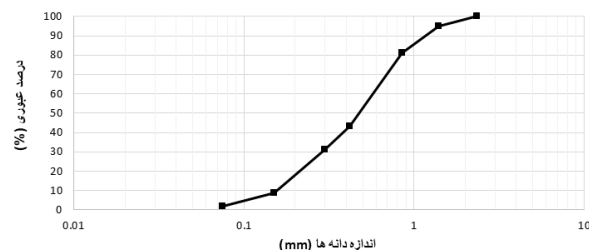
### ۲-۴- ابعاد دیوار

بدیهی است که هر چه ارتفاع مدل بیشتر باشد، نتایج به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در این پژوهش دیوار حائل خاک مسلح دارای ارتفاع ۰/۴ متر، طول ۰/۸ متر و عرض ۰/۴۹ متر می‌باشد. از این ابعاد در پژوهش‌های گذشته نیز استفاده شده است [۲۴-۲۶]. با توجه به اینکه در کف جعبه از یک صفحه صاف فولادی استفاده شده است، بنابراین تمام دیوارهای خاک مسلح بر روی یک بستر صلب ساخته شده و آزمایش‌ها انجام شده است. شکل ۳ تصویر جعبه آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳. جعبه آزمایش

Fig. 3. Test box



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای

Fig. 1. Sandy soil grain size distribution curve

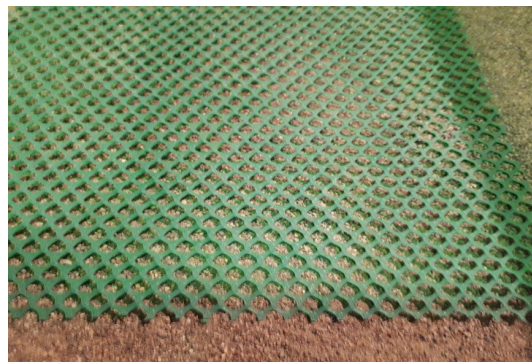
### ۲-۲- تسلیح‌کننده

در این تحقیق برای تسلیح خاک از ژئوگرید به عنوان مسلح‌کننده استفاده شده است. مشخصات ژئوگرید مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۲ تصویری از ژئوگرید مدنظر را نشان می‌دهد. در دیوار قائم طول لایه‌های تسلیح بر اساس آیین‌نامه مدیریت بزرگراه‌های فدرال برابر  $0.7H$  در نظر گرفته شد. در مدل‌های پله‌ای به همان میزان که عرض پله افزایش می‌یابد به طول لایه‌های تسلیح پایین افزوده می‌شود، به طوری که انتهای لایه‌های تسلیح در یک راستا قرار می‌گیرند [۱۸ و ۱۹]. در تمامی مدل‌ها فاصله بین لایه‌های تسلیح ۱۰۰ میلی‌متر لحاظ شد.

### جدول ۲. مشخصات ژئوگرید

Table 2. Characteristics Geogrid

حداکثر مقاومت کششی (kN/m)	نوع مواد اولیه	وزن هر متر مربع (gr)	اندازه چشمه (mm)
۷/۶۸	پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE)	۷۳۰	۶×۸



شکل ۲. ژئوگرید

Fig. 2. Geogrid

## ۲-۵- رویه دیوار

در این تحقیق چندین نوع رویه مختلف امتحان شد. در ابتدا آجر نما در ابعاد کوچک برش زده شد و با استفاده از دوغاب گچ آجرچینی و به عنوان رویه استفاده گردید، اما صلیبیت زیاد دیوار هنگام بارگذاری مانع ایجاد تغییر شکل در دیوار شد. در مرحله بعد از بلوک‌های چوبی به عنوان رویه دیوار استفاده شد که سبکی بیش از حد آن‌ها باعث می‌شد تا دیوار بدون بارگذاری و در حین ساخت مدل گسیخته شود. سپس از بلوک‌های بتنی سبک استفاده گردید (مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بلوک‌ها از نوع سبک انتخاب شد) که در آزمایش‌ها نتایج مناسبی مشاهده شد. بنابراین برای مدل‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی دیوار حائل انعطاف‌پذیر از بلوک‌های بتنی سبک به ابعاد  $0.05 \times 0.05 \times 0.05$  متر با وزن مخصوص  $1/4 \text{ gr/cm}^3$  استفاده شد. در ساخت دیوار پله‌ای، برای اجرای دیوار بالایی، ابتدا یک ردیف بلوک به ابعاد  $0.05 \times 0.05 \times 0.05$  متر بر روی خاک قرار داده می‌شود. به منظور همپوشانی دیوارها، نصف ارتفاع بلوک‌های ردیف اول در زیر خاک قرار می‌گیرد. سپس برای جبران ارتفاع مدفون شده و ثابت نگه داشتن ارتفاع دیوار پله‌ای با دیوار قائم، از یک ردیف بلوک‌های نیمه به ابعاد  $0.05 \times 0.05 \times 0.25$  متر در دیوار بالایی استفاده شد. این بلوک‌ها برای شبیه‌سازی بلوک‌های مورد استفاده در دیوارهای خاک مسلح با رویه‌ی بلوک بتنی به کار برده شده است. استفاده از بلوک‌های بتنی به عنوان رویه دیوار در پژوهش‌های گذشته هم مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴].

## ۲-۶- اتصال بین ژئوگرید و بلوک‌ها

در این پژوهش مشابه تحقیقات ایسیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ حالت اتصال بین ژئوگرید و بلوک‌ها، مطابق شکل ۴ به صورت اتصال اصطکاکی مدل شده است [۲۴]. اهمیت استفاده از اتصال ژئوگرید و بلوک‌ها به طور گسترده‌ای در دیوار حائل خاک مسلح شناخته شده است. اتصال اصطکاکی که در این پژوهش آزمایشگاهی مدل شد به این صورت است که ابتدا یک تکه ژئوگرید به طول  $0.3$  متر و هم‌عرض با لایه‌ی ژئوگریدی که قرار است در خاک قرار بگیرد برش زده شده، سپس یک ردیف از چشمه ژئوگرید را برش زده و پس از آن، ردیف برش خورده در داخل انتهای جلویی لایه ژئوگرید قرار می‌گیرد، به طوری که ژئوگرید در بین دو بلوک می‌تواند حرکت کند.

## ۲-۷- چگونگی ساخت و روش آماده‌سازی مدل‌های آزمایشگاهی

یکی از نکات قابل‌توجه در ساخت مدل‌های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی نحوه ریزش ماسه و رعایت یکنواختی مدل و پیوستگی در ریزش ماسه است. بدین منظور از دستگاه بارش ماسه که بر روی ریلی سوار شده است تا با حرکت رفت و برگشتی لایه‌های یکنواختی از ماسه با تراکم یکسان ایجاد شود. شکل ۵ تصویر دستگاه استفاده شده برای بارش ماسه را نشان می‌دهد. ماسه مد نظر از صفحه بارش با قطر منافذ  $0.1$  متر و فاصله

$0.2$  متر از یکدیگر عبور می‌کند. با سعی و خطا ارتفاع ریزش ماسه جهت دست‌یابی به تراکم نسبی ثابت ۴۵ درصد و وزن مخصوص  $1/65 \text{ gr/cm}^3$  برابر  $0.5$  متر برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی به دست آمد. پس از هر مرحله ریزش ماسه با اندازه‌گیری ارتفاع ریزش در صورت لزوم دستگاه بارش ماسه نیز به ارتفاع بالاتر انتقال داده می‌شود.

بعد از اتمام خاک‌ریزی تا تراز مشخص شده برای هر لایه، خاک موردنظر صاف و هموار شده و در ترازهای موردنظر مسلح‌کننده‌ها در موقعیت خود قرار گرفته و سپس عمل خاک‌ریزی تا ارتفاع کامل به همین صورت ادامه داده می‌شود. به منظور اطمینان از یکنواختی وزن مخصوص ماسه‌ی ریخته شده به درون جعبه آزمایش، چند ظرف نمونه‌گیر با حجم مشخص در موقعیت‌های مختلف محفظه تعبیه شده و وزن مخصوص ماسه جای گرفته در هر ظرف تعیین گردید. در پژوهش‌های گذشته برای در نظر گرفتن اثر مقیاس در مدل آزمایشگاهی از دانسیته نسبی متوسط استفاده شده است [۲۷]. ایسیا و همکاران به‌منظور بررسی عملکرد دیوار خاک مسلح در معرض بار استاتیکی از دانسیته نسبی ۷۰ درصد استفاده کردند [۲۴]. الیف و همکاران برای بررسی اثر طول مسلح‌کننده‌ها بر روی عملکرد پی نواری قرار گرفته بر روی خاک ماسه‌ای از دانسیته نسبی ۴۶ درصد استفاده کردند [۲۸]. احمدی و حاجی‌علیلوی‌بناب از دانسیته نسبی ۲۹ درصد به منظور تأثیر مسلح‌سازی خاک در ظرفیت باربری پی نواری در نزدیکی دیوار حائل استفاده کردند [۲۵]. از این‌رو به منظور لحاظ کردن اثر مقیاس، با توجه به مطالعات گذشته و در نظر گرفتن سه پارامتر ابعاد نمونه آزمایش، اندازه دانه‌های خاک و تراکم نسبی، در این پژوهش از تراکم نسبی ۴۵ درصد برای نمونه خاک استفاده شده است.



نحوه قرارگیری ردیف برش خورده در داخل انتهای جلویی لایه تسلیح



حالت اتصال بین ژئوگرید و بلوک‌ها

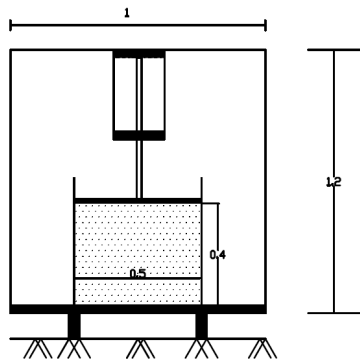
شکل ۴. نحوه اتصال بین ژئوگرید و بلوک‌ها

Fig. 4. geogrid and blocks Connection



شکل ۵. دستگاه بارش ماسه

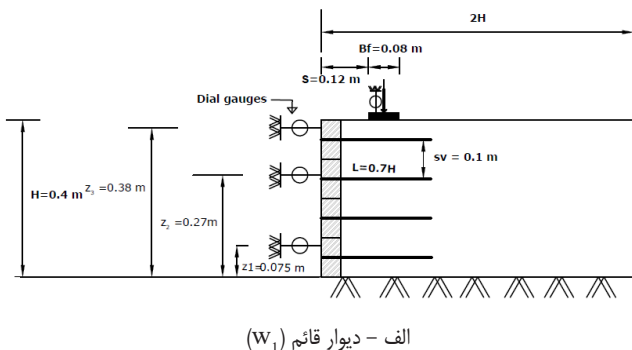
Fig. 5. Sand Pluviation Device



شکل ۶. شماتیک مدل آزمایشگاهی (ابعاد به متر)

Fig. 6. Schematic of the laboratory model

در شکل ۷-الف، ب و پ، مقطع عرضی مدل‌های ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی به صورت شماتیک نشان داده شده است. در تمامی مدل‌ها فاصله لبه‌ی پی از رویه دیوار ثابت و برابر  $S=0.12$  متر می‌باشد.  $L$  طول مسلح کننده‌ها،  $B_f$  عرض پی نواری،  $H$  ارتفاع کلی دیوار،  $D$  عرض پله،  $S_p$  فاصله قائم مسلح کننده‌ها از هم است.



الف - دیوار قائم ( $W_1$ )

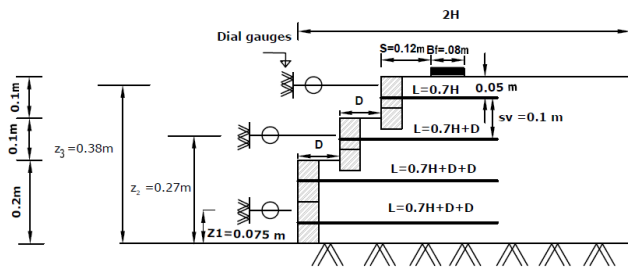
شالوده نواری صلب در این تحقیق به صورت یک صفحه فولادی به ضخامت  $0.02$  متر، عرض  $0.08$  متر و طول  $0.49$  متر در نظر گرفته شده است. در تمام مدل‌های آزمایشگاهی فاصله لبه‌ی پی از سطح دیوار، ثابت و برابر  $0.12$  متر بوده است تا صفحه مورد نظر (شالوده) همواره در ناحیه‌ی گوه گسیختگی رانکین قرار گیرد. این فاصله در تحقیقات ایسیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز استفاده شده است [۲۴]. همچنین برای اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی رویه دیوار، سه گیج اندازه‌گیری تغییر شکل (ساعت اندازه‌گیری) که به ترتیب در فاصله  $0.075$ ،  $0.27$  و  $0.38$  متر از پاشنه دیوار قرار داده شد. علاوه بر این، یک عدد گیج اندازه‌گیری تغییر شکل (ساعت اندازه‌گیری) برای اندازه‌گیری میزان نشست پی نواری بر روی پی نواری استفاده شده است.

اعمال بار به صورت کنترل تنش<sup>۱</sup> توسط سیستم جک پنوماتیکی<sup>۲</sup> که به وسیله نیروی باد (فشار هوا) عمل می‌کند صورت گرفت. برای تأمین فشار هوا از یک کمپرسور هوا که به جک پنوماتیکی متصل گردید استفاده شد. بین جک پنوماتیکی و کمپرسور، یک رگلاتور و شیر کنترل وضعیت قرار دارد. بدین ترتیب در هر مرحله، بار استاتیکی به پی نواری وارد و نشست و تغییر شکل جانبی دیوار اندازه‌گیری شد. در هر مرحله اعمال بار، فشار هوا توسط شیر رگلاتور به اندازه  $10$  کیلوپاسکال افزایش داده می‌شود. سپس با ثابت شدن عقربه گیج‌های تغییر شکل نصب شده بر روی پی نواری و جلوی دیوار، باربرداری انجام می‌شود و به این روش بارگذاری و باربرداری تا گسیختگی کامل دیوار خاک مسلح ادامه یافته است. در شکل ۶ سیستم بارگذاری و جعبه آزمایش بصورت شماتیک نشان داده شده است.

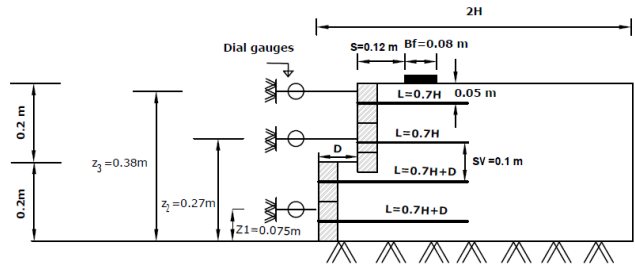
### ۳- برنامه مدل سازی در مقیاس آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور مدل سازی در مقیاس آزمایشگاهی، ۱۲ نمونه تهیه و بارگذاری شد. در این مدل‌ها پارامترهایی از قبیل فاصله افقی بین پله‌ها (عرض پله) و تعداد پله‌ها بعنوان متغیر تعریف شد و نتایج حاصل مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۳ برنامه مدل‌های ساخته شده نشان داده شده است.

- 1 Stress control
- 2 Pneumatic cylinder



پ - دیوار دو پله‌ای ( $W_9$  تا  $W_{12}$ )



ب - دیوار یک پله‌ای ( $W_2$  تا  $W_8$ )

شکل ۷. مقطع عرضی مدل‌های ساخته‌شده در آزمایشگاه

Fig. 7. Cross-section of laboratory-made models

جدول ۳. برنامه مدل‌های ساخته شده

Table 3. Made models program

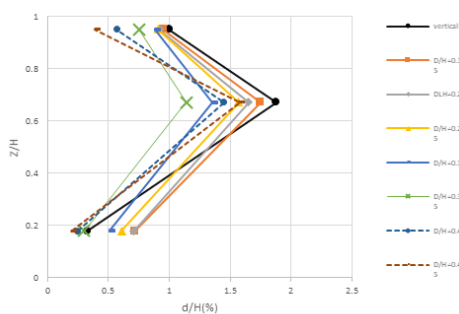
طول لایه‌های ژئوگرید	عرض پله (D)	تعداد لایه‌های تسلیح	برحسب متر ارتفاع کل دیوار (H)	نوع دیوار	معرفی دیوار
$0.7H$	-	۴	$0.4$	قائم	$W_1$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.15H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_2$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.2H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_3$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.25H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_4$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.3H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_5$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.35H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_6$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.4H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_7$
$0.7H$ و $0.7H+D$	$0.45H$	۴	$0.4$	یک پله‌ای	$W_8$
$0.7H$ و $0.7H+D$ و $0.7H+D+D$	$0.15H$	۴	$0.4$	دو پله‌ای	$W_9$
$0.7H$ و $0.7H+D$ و $0.7H+D+D$	$0.2H$	۴	$0.4$	دو پله‌ای	$W_{10}$
$0.7H$ و $0.7H+D$ و $0.7H+D+D$	$0.25H$	۴	$0.4$	دو پله‌ای	$W_{11}$
$0.7H$ و $0.7H+D$ و $0.7H+D+D$	$0.3H$	۴	$0.4$	دو پله‌ای	$W_{12}$

محدوده قبل از گسیختگی است.

با افزایش عرض پله، جابه‌جایی جانبی دیوار به خصوص در بخش پایینی دیوار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. کاهش تغییر شکل افقی دیوار پله‌ای عمدتاً به دلیل مقاومت بیشتر لایه‌های تسلیح در ردیف بالایی دیوار می‌باشد. در مواردی که عرض پله کم است، تغییر مکان جانبی در دیوار پله‌ای و قائم تفاوت زیادی با هم ندارند. می‌توان در دیوارهای یک پله‌ای یک عرض مناسب تعریف کرد که در این مطالعه  $D/H = 0.35$  تقریباً عرض مناسب است. با افزایش عرض پله، دیوار بالایی و پایینی به‌طور مستقل عمل

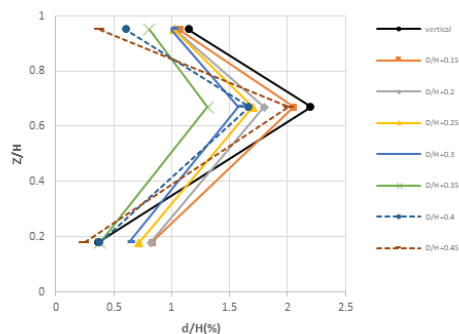
#### ۴- نتایج و بحث

۴-۱ تأثیر عرض پله دیوار بر تغییر شکل افقی دیوار  
به منظور بررسی عملکرد عرض پله بر تغییر شکل افقی دیوارهای پله‌ای، دیوار مدل شماره  $W_1$  تا  $W_8$  مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های ۸ و ۹ و نمودار  $Z/H$  ارتفاع قرارگیری گیج‌های تغییر شکل و  $H$  ارتفاع کلی دیوار) در مقابل  $d/H$  برحسب درصد ( $d$  تغییر مکان جانبی دیوار و  $H$  ارتفاع کلی دیوار) را در عرض‌های متفاوت دیوار تحت سربارهای مختلف نشان می‌دهند. هدف از انتخاب این سربارها صرفاً ارزیابی عملکرد دیوار در



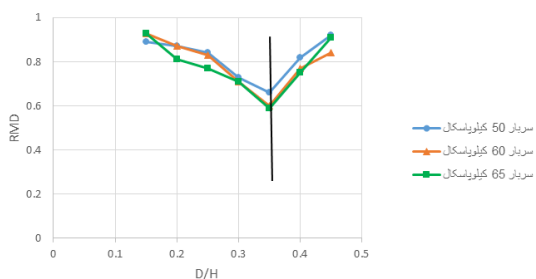
شکل ۹. تأثیر عرض پله بر تغییر شکل رویه در سربار ۰/۶۰ کیلوپاسکال در دیوار یک پله‌ای

Fig. 9. Influence of stair width on procedural deformation in 0.6 kPa overhead in one stair wall



شکل ۱۰. تأثیر عرض پله بر تغییر شکل رویه در سربار ۶۵ kPa در دیوار یک پله‌ای

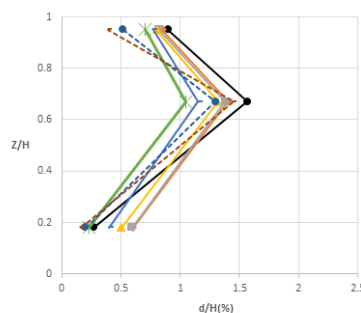
Fig. 10. Influence of stair width on procedural deformation in 65 kPa overhead in one stair wall



شکل ۱۱. نمودار نسبت تغییر شکل حداکثر رویه دیوارهای یک پله‌ای به دیوار مدل قائم در سربارهای مختلف

Fig. 11. Chart of the maximum deformation ratio of one-stair walls to vertical wall in different overheads

می‌کنند و دیوار بالایی با اعمال بار کوچک‌تر دچار گسیختگی می‌شود که مطابق شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ نمودارها به صورت خطچین نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، جابه‌جایی جانبی پایین دیوار در دیوار قائم کم‌تر از دیوارهای پله‌ای می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده چنین برداشت می‌شود که بر اساس آیین‌نامه انجمن ملی بناهای بتنی، دیوار بالایی به عنوان سرباری برای دیوار پایینی جایگزین می‌شود که مقدار این سربار بستگی به فاصله افقی بین پله‌ها (عرض پله) دارد. در سیستم پله‌ای عکس‌العمل دیوار بالایی و پایینی ممکن است به طور قابل‌توجهی باعث افزایش تغییر شکل افقی دیوار شود که این بستگی به عرض پله دارد. در ابتدا که عرض پله کم است، دیوار بالایی در لبه دیوار پایینی قرار گرفته و عکس‌العمل دیوار بالایی و پایینی زیاد شده و در نتیجه تغییر مکان جانبی دیوار پایینی افزایش می‌یابد (مثل این است که پی نواری لبه دیوار پایینی قرار گرفته) و با افزایش عرض پله فاصله دیوارها زیاد شده و عکس‌العمل بین دیوارها کمتر شده و در نتیجه تغییر مکان جانبی دیوار کاهش می‌یابد. جابه‌جایی جانبی پایین دیوارهای پله‌ای تقریباً کمتر از یک درصد ارتفاع دیوار می‌باشد که در مقایسه با بالای دیوار مقدار ناچیزی است. در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ دیوارهای پله‌ای که با عرضی بیشتر از عرض مناسب مدل‌سازی شده‌اند، تغییر شکل جانبی دیوار به صورت خطچین نمایش داده شده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نسبت تغییر شکل حداکثر رویه دیوار مدل‌های پله‌ای به مدل دیوار قائم (RMD) در مقابل عرض‌های مختلف دیوار یک پله‌ای و دو پله‌ای را در سربارهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست‌آمده در دیوار یک پله‌ای، در عرض مناسب ( $D/H = 0/35$ ) میزان تغییر شکل بیشینه رویه دیوار نسبت به دیوار قائم در سربارهای ۵۰، ۶۰ و ۶۵ کیلوپاسکال به ترتیب ۳۴ درصد، ۴۰ درصد و ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. برای دیوارهای دو پله‌ای در عرض  $D/H = 0/3$  تغییر شکل افقی بیشینه رویه دیوار نسبت به دیوار قائم در سربارهای ۵۰، ۶۰ و ۶۵ کیلوپاسکال به ترتیب ۶۵ درصد، ۶۶ درصد و ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.



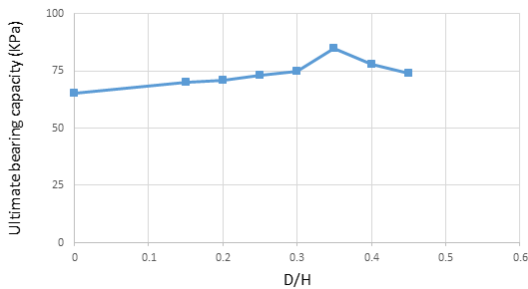
شکل ۸. تأثیر عرض پله بر تغییر شکل رویه در سربار ۰/۵۰ کیلوپاسکال در دیوار یک پله‌ای

Fig. 8. Influence of stair width on procedural deformation in 0.5 kPa overhead in one stair wall

1 Ratio of maximum displacement

#### ۴-۳- تأثیر عرض پله بر روی ظرفیت باربری پی نواری

در شکل ۱۴ ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر خاک بالادست در دیوار قائم و دیوارهای پله‌ای مقایسه شده است. برای شالوده‌ها با عمق کم، در حالت گسیختگی برشی کلی بار نهایی در نشست در حدود ۴ تا ۱۰ درصد عرض شالوده (B) رخ می‌دهد و در حالت گسیختگی برشی موضعی بار نهایی در نشست در حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد عرض شالوده (B) رخ می‌دهد [۲۹]. بنابراین با بررسی دقیق نمودارهای بار-نشست (خط قائم رسم شده در نمودار شکل ۱۳) می‌توان نشست ثابتی معادل  $0/218$  عرض شالوده (B) را معیار گسیختگی کامل خاک قرارداد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عرض پله، ظرفیت باربری پی نواری در دیوارهای پله‌ای نسبت به دیوار قائم افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در این پژوهش عرض  $D/H = 0/35$  در دیوار یک پله‌ای به عنوان عرض مناسب به دست آمده است. با افزایش عرض پله بیشتر از مقدار مناسب، عملکرد پله بالایی و پایین دیوار به صورت مستقل می‌باشد و در نتیجه ظرفیت باربری پی نواری کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت باربری پی نواری در دیوار یک پله‌ای با عرض مناسب معادل ۸۵ کیلوپاسکال نسبت به ظرفیت باربری نهایی پی نواری در دیوار قائم ۶۵ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود.

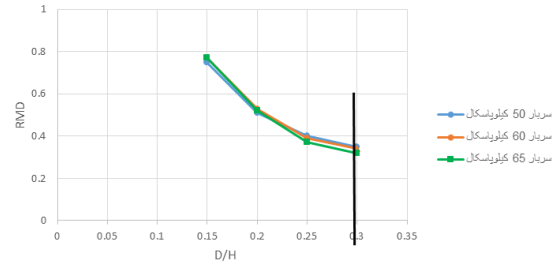


شکل ۱۴. نمودار ظرفیت باربری-عرض پله در دیوار یک پله‌ای

Fig. 14. Load bearing capacity chart-stair width in a stair wall

#### ۴-۴- تأثیر تعداد پله‌ها بر نشست پی نواری

به منظور بررسی تأثیر تعداد پله‌ها بر نشست پی نواری، دیوار قائم و دیوارهای پله‌ای با عرض‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نمودارهای بار در مقابل  $S/B$  بر حسب درصد را در دیوار قائم، دیوارهای یک پله‌ای و دو پله‌ای در عرض‌های مختلف نشان می‌دهند. در دیوار پله‌ای با افزایش تعداد پله‌ها نشست پی نواری کاهش یافته است. علت این موضوع آن است که در دیوار پله‌ای با افزایش تعداد پله‌ها، لایه‌های تسلیح در دیوارهای بالا و پایین بارهای قائم کوچک‌تری را در ناحیه بزرگ‌تری توزیع می‌کنند و در نتیجه نشست پی نواری کاهش می‌یابد. همچنین در دیوار یک پله‌ای افزایش ظرفیت باربری در عرض‌های  $0/15 H$ ،  $0/2 H$ ،  $0/25 H$  و  $0/3 H$  نسبت به دیوار قائم به ترتیب ۷، ۸،

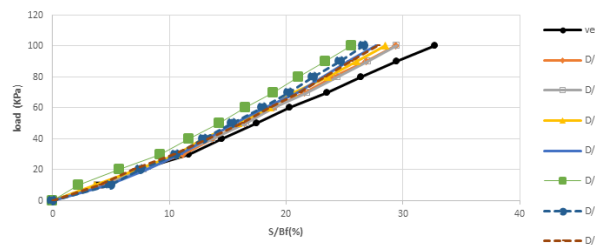


شکل ۱۲. نمودار نسبت تغییر شکل حداکثر رویه دیوارهای دو پله‌ای به دیوار مدل قائم در سربارهای مختلف

Fig. 12. Chart of the maximum deformation ratio of two-stair walls to vertical wall in different overheads

#### ۴-۲- تأثیر عرض پله بر نشست پی نواری

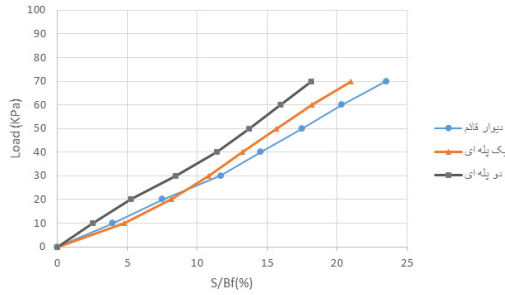
به منظور بررسی تأثیر عرض پله بر نشست پی نواری مستقر بر خاک بالادست، دیوارهای مدل شماره  $W_1$  تا  $W_8$  با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۱۳ نمودار بار در مقابل  $S/B$  بر حسب درصد (نسبت پی نواری،  $B$  عرض پی نواری) را در دیوار قائم و دیوارهای یک پله‌ای و در عرض‌های مختلف نشان می‌دهد. تمام نمودارها کاملاً حالت خطی به خود گرفته‌اند و روند افزایش نمودارها حاکی از عملکرد مسلح کننده‌ها و خاک را به صورت یکپارچه نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در دیوارهای یک پله‌ای با افزایش عرض پله نشست پی نواری نسبت به دیوار قائم کاهش یافته و با افزایش عرض پله بیشتر از عرض مناسب نشست پی نواری افزایش می‌یابد. این بدان علت است که با اجرای دیوار به صورت پله‌ای، حجم وسیعی از خاک پشت دیوار در برابر نیروهای وارده مقاومت کرده لذا کرنش‌های برشی ایجاد شده تا عمق زیادی از خاک نفوذ نموده‌اند و در نتیجه منجر به کاهش نشست پی نواری می‌شود. با افزایش عرض پله، نشست پی نواری کاهش می‌یابد و این به دلیل کوچک‌تر شدن بارهای اتصالی مسلح کننده‌ها می‌باشد.



شکل ۱۳. نمودار بار-نشست پی نواری در دیوار یک پله‌ای

Fig. 13. Chart of the load-settlement strip foundation in one-stair wall

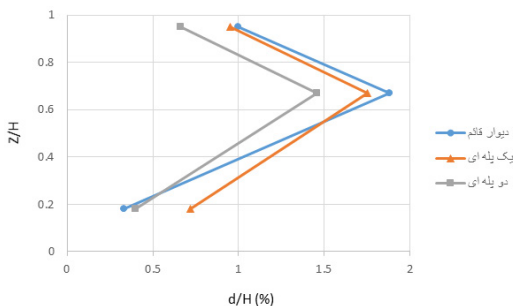




شکل ۱۸. نمودار بار-نشست پی نواری در دیوارهای پله‌ای با عرض  $D/H=0.3$

Fig. 18. Chart of the load-settlement strip foundation in stair walls with width  $D/H=0.30$

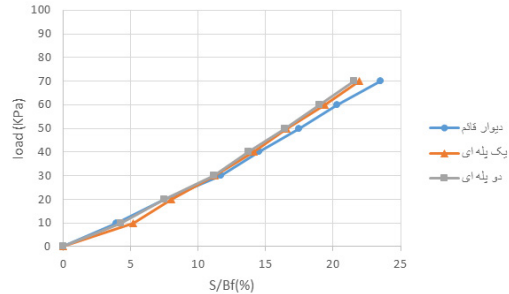
۴-۵- تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار به منظور بررسی تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار، دیوار قائم و دیوارهای پله‌ای با عرض‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این ارزیابی مدل‌های در مقیاس آزمایشگاهی تحت سربار نواری معادل ۶۰ کیلوپاسکال مورد قرار گرفتند. هدف از انتخاب این سربار، ارزیابی عملکرد دیوار در شرایط قبل از گسیختگی دیوارها می‌باشد. شکل‌های ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ نمودار  $Z/H$  در مقابل  $d/H$  برحسب درصد را در عرض‌های مختلف دیوار نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پله‌ها تغییر شکل افقی دیوار به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در مواردی که عرض پله دیوار کم است تغییر مکان جانبی رویه دیوار قائم و پله‌ای به هم نزدیک بوده و با افزایش عرض پله این اختلاف بیشتر نمایان‌گر می‌شود. علت کم شدن تغییر مکان جانبی دیوار با افزایش پله‌ها عمدتاً به دلیل کاهش حجم خاکریزی در دیوار بالایی و بیشتر شدن مقاومت مسلح کننده‌ها در دیوار بالایی و در نتیجه لایه‌های تسلیح در دیوار بالایی از گسترش سطح گسیختگی در خاکریز جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۹. نمودار تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار با عرض  $D/H=0.15$

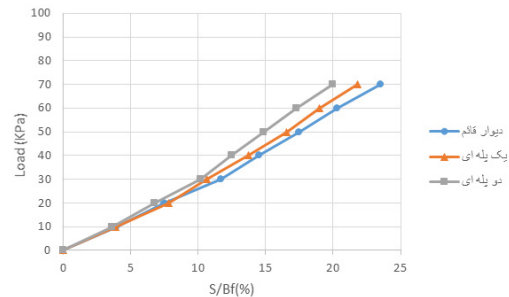
Fig. 19. Chart of the number stairs effect on the wall horizontal deformation with width  $D/H=0.15$

۱۲ و ۱۵ درصد و در دیوار دو پله‌ای افزایش ظرفیت باربری در عرض‌های  $0.15H$ ،  $0.2H$ ،  $0.25H$  و  $0.3H$  نسبت به دیوار قائم به ترتیب ۹، ۲۳، ۳۲ و ۳۶ درصد مشاهده می‌شود.



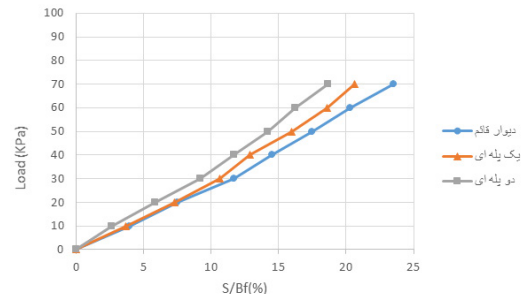
شکل ۱۵. نمودار بار-نشست پی نواری در دیوارهای پله‌ای با عرض  $D/H=0.15$

Fig. 15. Chart of the load-settlement strip foundation in stair walls with width  $D/H=0.15$



شکل ۱۶. نمودار بار-نشست پی نواری در دیوارهای پله‌ای با عرض  $D/H=0.2$

Fig. 16. Chart of the load-settlement strip foundation in stair walls with width  $D/H=0.20$



شکل ۱۷. نمودار بار-نشست پی نواری در دیوارهای پله‌ای با عرض  $D/H=0.25$

Fig. 17. Chart of the load-settlement strip foundation in stair walls with width  $D/H=0.25$

### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل سازی در مقیاس آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیر اجرای پله بر پایداری دیوار حائل خاک مسلح انجام گردید. نتایج به دست آمده در مورد رفتار دیوار حائل خاک مسلح در دیوار پله‌ای به شرح ذیل می‌باشد:

با توجه به این که در دیوارهای پله‌ای، دیوار بالایی بر روی دیوار پایینی ساخته می‌شود لذا دیوار پایینی بایستی از مقاومت بالایی برخوردار باشد. یکی از راهکارهای افزایش مقاومت دیوار پایینی، افزایش طول لایه‌های تسلیح در دیوار پایین می‌باشد.

عرض مناسب (فاصله عقب‌نشینی دیوارها)، در دیوار یک پله‌ای برای ایجاد عملکرد بهتر و ایجاد مقدار حداکثر ظرفیت باربری و کاهش تغییر مکان جانبی رویه دیوار در  $0.35/H$  ارتفاع کل دیوار ( $D/H = 0.35$ ) در مقیاس آزمایشگاهی این پژوهش به دست آمده است. با افزایش عرض پله به بیشتر از این مقدار اندرکنش دیوار بالایی و پایین افزایش می‌یابد به طوری که هر دیوار به طور مستقل عمل می‌کند و دیوار بالایی در بارهای کوچک‌تری گسیخته می‌شود.

نتایج حاکی از افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت باربری پی نواری در دیوار یک پله‌ای با عرض مناسب در مقایسه با دیوار قائم در مقیاس آزمایشگاهی مطابق مدل های این پژوهش می‌باشد.

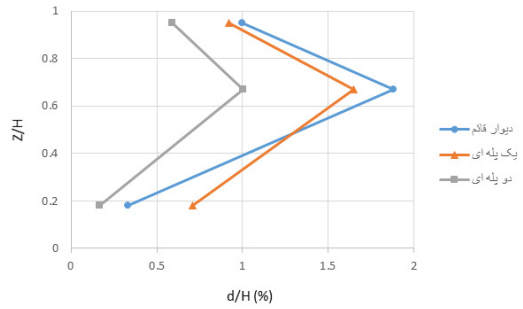
با توجه به نتایج آزمایشگاهی با افزایش عرض پله، تغییر شکل افقی رویه دیوار کاهش می‌یابد به طوری که در دیوار یک پله‌ای، در عرض مناسب ( $D/H = 0.35$ ) نسبت به دیوار قائم، تغییر شکل افقی بیشینه رویه دیوار به میزان ۴۰ درصد کاهش می‌یابد و در دیوار دو پله‌ای در عرض  $D/H = 0.3$  نسبت به دیوار قائم تغییر شکل افقی بیشینه دیوار به میزان ۶۵ درصد کاهش می‌یابد.

در دیوار پله‌ای با افزایش تعداد پله‌ها، لایه‌های تسلیح در دیوار بالا و پایینی بارهای قائم کوچک‌تری را در ناحیه بزرگ‌تری توزیع می‌کنند و در نتیجه نشست پی نواری کاهش می‌یابد.

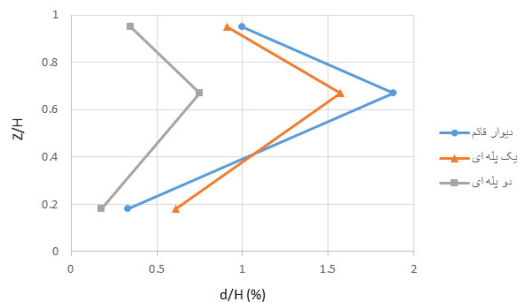
با افزایش عرض پله، تنش کششی در مسلح کننده‌ها در دیوار پایینی کاهش می‌یابد که باعث می‌شود تغییر شکل جانبی پایین دیوار کاهش یابد. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش تعداد پله‌ها بر کاهش تغییر شکل رویه‌ی دیوار و نشست پی نواری، نسبت به افزایش عرض پله تأثیر بیشتری دارد.

### مراجع

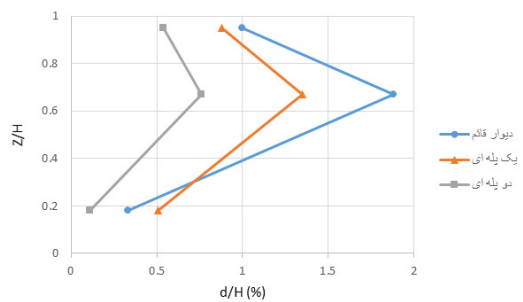
- [1] M. Darbin, Reinforced Earth for Construction of Freeways, Revue Generale des Routes et Aerodromes, (1970)
- [2] J.E. Nicks, Case Study: Condition Assessment of a 36-Year-Old Mechanically Stabilized Earth Wall in Virginia, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2016) 143-145



شکل ۲۰. نمودار تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار با عرض  $D/H = 0.20$



شکل ۲۱. نمودار تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار با عرض  $D/H = 0.25$



شکل ۲۲. نمودار تأثیر تعداد پله‌ها بر تغییر شکل‌های افقی دیوار با عرض  $D/H = 0.30$

- [16] M.R. Simac, Design Manual for Segmental Retaining Walls: Modular Concrete Block Retaining Wall Systems, Virginia, 1999.
- [17] C.a.S.B.K. Yoo, Design Approaches of Geosynthetic Reinforced Modular Block Wall in Tiered Configuration: A Comparative Study, Geosynthetics in Reinforcement and Hydraulic Applications, (2007) 1-10.
- [18] C. Yoo, and Hyuck-Sang Jung, Measured behavior of a geosynthetic-reinforced segmental retaining wall in a tiered configuration, Geotextiles and Geomembranes, 22(5) (2004) 359-376.
- [19] C. Yoo, and Sun-Bin Kim, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: full-scale load test and 3D finite element analysis, Geotextiles and Geomembranes, 26(6) (2008) 460-472.
- [20] G.-Q. Yang, et al, Post-construction performance of a two-tiered geogrid reinforced soil wall backfilled with soil-rock mixture, Geotextiles and Geomembranes, 42(2) (2014) 91-97.
- [21] S.B. Mohamed, Kuo-Hsin Yang, and Wen-Yi Hung., Finite element analyses of two-tier geosynthetic-reinforced soil walls: Comparison involving centrifuge tests and limit equilibrium results, Computers and Geotechnics, 61 (2014) 67-84.
- [22] F. Vahedifard, Shahriar Shahrokhbadi, and Dov Leshchinsky., Geosynthetic-reinforced soil structures with concave facing profile, Geotextiles and Geomembranes, 44(3) (2016) 358-365.
- [23] A.R.R.K.R. Tognon, and Richard WI Brachman., Evaluation of side wall friction for a buried pipe testing facility, Geotextiles and Geomembranes, 17(4) (1999) 193-212.
- [24] C. Xiao, Jie Han, and Zhen Zhang., Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading, Geotextiles and Geomembranes, 44(1) (2016) 81-94.
- [25] H.a.M.H.-B. Ahmadi, 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.
- [26] K.J.a.A.B.F. Fabian, Clay Geotextile interaction in large retaining wall models, Geotextiles and Geomembranes, 7(3) (1988) 179-201.
- [27] M.A.G. Sabermahani, and A. Fakher, Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls, Geotextiles and Geomembranes, 27(2) (2009) 121-136.
- [3] R.M. Koerner, Designing with geosynthetics, Xlibris Corporation, 2012.
- [4] N. Abu-Hejleh, T. Wang, J.G. Zornberg, Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting the Founders/Meadows Bridge and approaching roadway structures, in: Geo-Denver, ASCE, Denver, Colorado, 2000.
- [5] M. Saghebfar, et al., Performance monitoring of Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System (GRS-IBS) in Louisiana, Geotextiles and Geomembranes, 45(2) (2017) 34-47.
- [6] J.H. Huang, J. Parsons, R.L. Pierson, M., Refined numerical modeling of a laterally loaded drilled shaft in an MSE wall, Geotextiles and Geomembranes, 37 (2013) 61-73.
- [7] J.B.-S. Huang, S. Han, J. Rahman, M.S., Modeling of laterally loaded drilled shaft group in MSE wall, ICE Geotech. Eng. J., 167 (2014) 402-414.
- [8] K.Z. Lee, and Jonathan TH Wu., A synthesis of case histories on GRS bridge-supporting structures with flexible facing., Geotextiles and Geomembranes, 22(4) (2004) 181-204.
- [9] S.B. Mohamed, Kuo-Hsin Yang, and Wen-Yi Hung., Limit equilibrium analyses of geosynthetic-reinforced two-tiered walls: Calibration from centrifuge tests, Geotextiles and Geomembranes, 41 (2013) 1-16.
- [10] FHWA; Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Department of Transportation Federal Highway Administration Publication, 2009.
- [11] H. Liu, G. Yang, H.I. Ling, Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61-62 (2014) 1-12.
- [12] N. Abu-Hejleh, T. Wang, J.G. Zornberg, Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting the Founders/Meadows Bridge and approaching roadway structures, in: Geo-Denver, ASCE, Denver, Colorado, 2001.
- [13] A.W. Stuedlein, M. Bailey, D. Lindquist, J. Sankey, W.J. Neely, Design and Performance of a 46-m-High MSE Wall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(6) (2010)
- [14] D. Leshchinsky, and Jie Han., Geosynthetic reinforced multitiered walls, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(12) (2004) 1225-1235.
- [15] C.-S. Yoo, and Joo-Suk Kim, Behavior of Soil-Reinforced Retaining Walls in Tiered Arrangement, Journal of the Korean Geotechnical Society, 18(3) (2003) 61-72.

[29] B.M. Das, Principles of foundation engineering, Cengage Learning, Boston, USA, 2014.

[28] E. Cicek, Erol Guler, and Temel Yetimoglu, Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil, *Soils and Foundations*, 55(4) (2015) 661-677.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Abedi, J. Khazaei, H. Moayedi, Experimental Study on Performance of Multi-Tiered Reinforced Soil Retaining Walls s, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 713-724.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13915.5509

