

## مدل عددی دیوار خاک مسلح پشت به پشت با انواع تسمه‌های مسلح کننده

محمد متقی شهپیر<sup>۱</sup>، حسن شعبانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد رشته مهندسی معماری جهاد دانشگاهی واحد همدان

### چکیده

دیوار خاک مسلح پشت به پشت با نمای بلوک بتنی انعطاف‌پذیر، قادر به تحمل بارگذاری و تغییرشکل قابل‌ملاحظه‌ای به علت تعامل بین خاکریز و عناصر مسلح کننده است. این دیوارهای خاک مسلح به طور معمول برای خاک‌ریزهای نزدیک به پل‌ها استفاده می‌شوند. رفتار داخلی یک توده خاک مسلح بستگی به عواملی نظیر خاک، مسلح کننده و ارتباط بین آن‌ها دارد. برای طراحی دیوار خاک مسلح پارامترهای مهم عبارتند از زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان چسبندگی خاک، سختی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده و مدول الاستیک مسلح کننده. استفاده از پارامترهای حاصل از مطالعات آزمایشگاهی منجر به مدل‌سازی دقیق از رفتار دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت می‌شود. این مقاله با مدل‌سازی عددی دو بعدی به بررسی رفتار دیوار خاک مسلح پشت به پشت با یک نوع تسمه پلیمری و یک نوع تسمه فلزی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌پردازد. این مطالعه بر مبنای آنالیز جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده و نیروی کششی وارد بر مسلح کننده انجام شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تسمه پلیمری موجب تغییرشکل بیشتر دیوار می‌شود. همچنین نسبت عرض به ارتفاع دیوار خاک مسلح پشت به پشت، پارامتری مؤثر بر میزان جابجایی و تغییر شکل دیوار می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی عددی، دیوار خاک مسلح پشت به پشت، تسمه پلیمری، تسمه فلزی، ماکزیمم نیروی کششی

## ۱- مقدمه

خاک مصالحی است که به خوبی در مقابل فشار مقاومت می کند اما قادر نیست در برابر نیروی کششی مقاومت چندانی از خود نشان دهد. مفهوم خاک مسلح نخستین بار توسط معمار فرانسوی هنری ویدال در سال ۱۹۶۹ میلادی بیان شد. از زمان شروع کارهای ویدال، دیوارهای حائل متعددی با استفاده از نظریه خاک مسلح در گوشه و کنار دنیا ساخته شده است. خاک های مسلح شده در ساخت بسیاری از سازه های ژئوتکنیکی نظیر دیوارهای حائل، خاکریزها، شیب ها و پی های کم عمق مورد استفاده قرار می گیرند. دیوارهای خاک مسلح در گروه دیوارهای انعطاف پذیر قرار دارند که بخشهای اصلی آن عبارتند از :

(۱) خاکریز: عموماً خاک دانه ای

(۲) عناصر مسلح کننده: فلزی یا پلیمری

(۳) نما: عموماً بتنی

در خاک مسلح با استفاده از مسلح کننده که در داخل خاک قرار گرفته و ابتدای آن ها به عناصر نما متصل است، دیوار یا شیروانی مهار می شوند. در این روش، از یک سو تحمل فشار جانبی خاکریز توسط اجزای نما و از دیگر سو، اندرکنش آن با مسلح کننده ها باعث مهار خاک می شود. نسبت عرض به ارتفاع در دیوارهای خاک مسلح معمولاً بزرگ است و در نتیجه پدیده تمرکز تنش در پنجه دیوار دیده نمی شود. به همین دلیل برای بسترهای با ظرفیت باربری کم مناسب هستند. از طرف دیگر به دلیل آنکه درصد زیادی از حجم دیوار خاک مسلح را خاک تشکیل می دهد در نتیجه دیوار دارای انعطاف پذیری بالایی است که این مهم باعث بالا رفتن قابلیت شکل پذیری و مقاومت در برابر نشست های نامساوی می شود.

تحلیل عددی رفتار دیوارهای خاک مسلح شده یکطرفه با استفاده از انواع مختلف تسمه های پلیمری و فلزی نشان داد که استفاده از تسمه ژئوسینتیکی به علت انعطاف پذیری بالا باعث تغییر شکل بیشتر در دیوار خاک مسلح شده و در نتیجه این انعطاف پذیری و تغییر شکل منجر به افزایش پایداری دیوار می شود. بر اساس نتایج بدست آمده پارامترهای اصطکاک خاک، چسبندگی، سطح مشترک برشی و مدول الاستیک تسمه نقش موثری در رفتار دیوار دارند [۱].

سازه خاک مسلح شده با صفحات ژئوسینتیکی می تواند مقاومت کششی مورد نیاز را تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۲]. تحلیل عددی دیوارهای خاک مسلح توسط تسمه های فولادی با روش تفاضل محدود نشان داد که استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب برآورد معقول تری از خواص خاک ارائه می دهد [۳]. بررسی عملکرد خاک مسلح با مسلح کننده های مورب و نمای شیب دار در ۱۴ مدل دیوار در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که شیب دار کردن نما به سمت خاکریز، تغییر شکل نما را کاهش می دهد. به علاوه استفاده از تسمه های مسلح کننده به صورت مورب، باعث کاهش بیشتر تغییر شکل افقی می شود [۴].

دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت از نظر عملکرد همانند دیوارهای خاک مسلح معمولی (یکطرفه) می باشند که عموماً برای نگهداری کوله پل ها و خاکریزهای راه آهن مورد استفاده قرار می گیرند. تفاوت دیوار خاک مسلح پشت به پشت با دیوار یکطرفه در هندسه آن ها می باشد به طوری که دیوار پشت به پشت در دو سمت دارای عناصر مسلح کننده و نما هستند.

بررسی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت با صفحات ژئوسینتیکی توسط روش تفاضل محدود برای نسبت های مختلف عرض به ارتفاع دیوار نشان می دهد که فاصله دو دیوار مقابل یکدیگر پارامتر کلیدی مورد استفاده برای تعیین روش های تحلیلی است [۵]. مطالعه پایداری دیوار های خاک مسلح پشت به پشت با صفحات ژئوسینتیکی توسط روش تفاضل محدود نشان داد اگر فاصله دیوار به نسبت ارتفاع بیش از یک باشد، هر یک از دیوارهای پشتی رفتار مستقلی از خود نشان می دهند. طبق نتایج، نیروی کششی در مسلح کننده های ژئوسینتیکی با کاهش فاصله بین دیوارها کاهش می یابد [۶]. تجزیه و

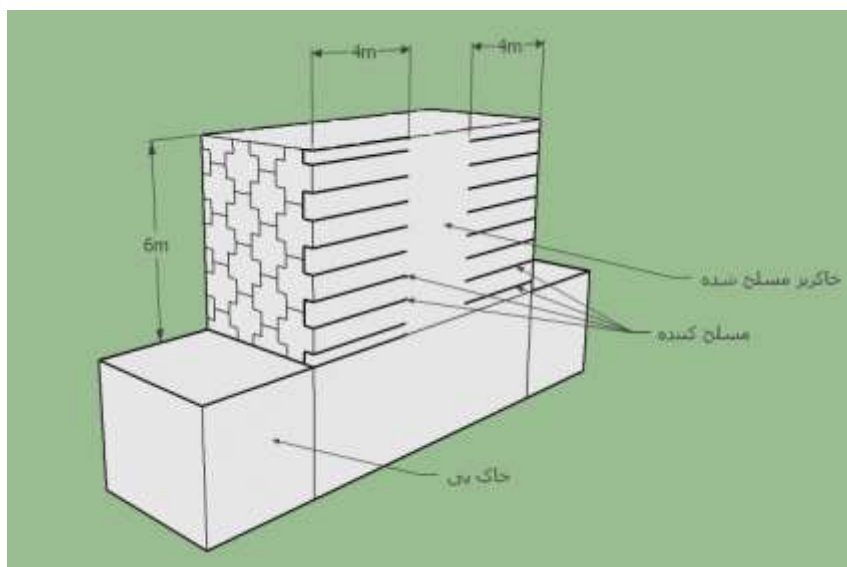
تحلیل دیوار خاک مسلح پشت به پشت با ژئوسینتتیک توسط روش المان محدود<sup>۱</sup> نشان داد که فاصله دو دیوار با فشار سربار مؤثر بر دیوار مسلح شده ارتباط معکوس دارد [۷]. بررسی عددی پایداری سازی خاک ریزهای راه آهن با استفاده از سیستم خاک مسلح پشت به پشت در ۶ خاکریز ۱۰ متری با شیب ۱:۱ در آزمایشگاه نشان داد که سیستم پشت به پشت می تواند بارگذاری شکست خاکریز را تا ۳۵٪ افزایش دهد [۸].

مطالعات پیشین نشان دادند که روشهای عددی برای تحلیل رفتار دیوارهای خاک مسلح یکطرفه و پشت به پشت با مسلح کننده های فلزی و ژئوسینتتیکی (صفحه ای و تسمه ای) مناسب می باشند. این تحقیق قصد دارد با مدل سازی عددی دوبعدی به روش تفاضل محدود به بررسی رفتار دیوار خاک مسلح پشت به پشت با انواع تسمه فلزی و پلیمری بپردازد.

## ۲- مصالح و هندسه مدل

### ۲-۱- خاک

شکل ۱ مدل دیوار خاک مسلح پشت به پشت را نشان می دهد. این سیستم از دو نوع خاک تحت عناوین خاکریز مسلح شده و خاک پی تشکیل شده که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. هندسه دیوار خاک مسلح پشت به پشت

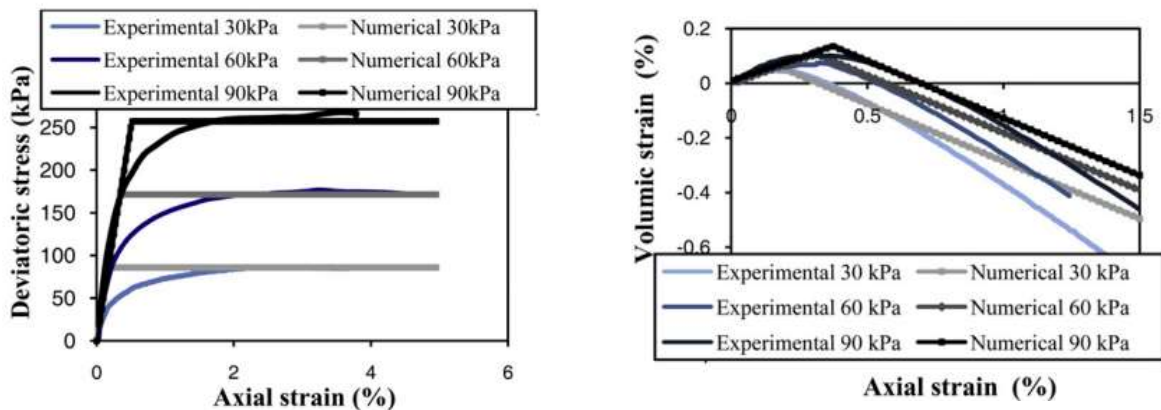
جدول ۱. مشخصات خاک پی و خاکریز پشت دیوار

پارامتر	E (MPa)	$\nu$	$(\text{Kg/m}^3)\gamma$	$(^\circ)\phi$	$(^\circ)\psi$	C (kPa)
خاکریز مسلح شده	۵۰	۰/۳	۱۵۸۰	۳۶	۶	۰
خاک پی	۲۰۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	-	-	-

مدل رفتاری خاکریز مسلح شده، موهر کولمب و مدل رفتاری خاک پی، الاستیک فرض شده اند. برای خاکریز مسلح شده، مدل رفتاری توسط پارامترهای الاستیک ( $E$ : مدول یانگ،  $\nu$ : نسبت پواسون) و پارامترهای پلاستیک ( $\phi$ ): زاویه اصطکاک داخلی،  $c$ : چسبندگی،  $\psi$ : زاویه اتساع خاک) تعریف می‌شوند. شکل ۲ کالیبراسیون مدل عددی توسط آزمایش های سه محوری تحت تنش های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد [۱].

تنش انحرافی درمقابل فشار محوری

فشارحجمی نسبت به فشارمحوری



شکل ۲. کالیبراسیون مدل‌های عددی بر روی آزمایش های سه محوری [۱]

## ۲-۲- نمای بتنی

برای مدل‌سازی نمای بتنی از المان تیر<sup>۲</sup> با مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است (جدول ۲).

جدول ۲. مشخصات نمای بتنی

پارامتر	$E$ (MPa)	$\nu$	$\gamma$ ( $Kg/m^3$ )
نمای بتنی	۱۵۰۰۰	۰/۲	۲۵۰۰

## ۲-۳- سطح مشترک بین نمای بتنی و خاک

پارامتر سطح مشترک در قسمتی که نمای بتنی و خاک با هم در تماس هستند تعریف شده و مدل رفتاری موهرکولمب برای آن در نظر گرفته می‌شود. سختی برشی و سختی نرمال استفاده شده در سطح مشترک بر اساس پیشنهاد دستورالعمل آموزشی شرکت نرم افزار (**Itasca**) تعیین شده و میزان زاویه اصطکاک داخلی برای آن ۰/۶۷ برابر زاویه اصطکاک خاک می‌باشد (جدول ۳).

<sup>۱</sup>- Beam



## جدول ۳. مشخصات سطح مشترک نمای بتنی و خاک

پارامتر	سختی قائم (MPa)	سختی برشی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی بین نمای بتنی و خاک (°)
سطح مشترک بین خاک و نمای بتنی	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۴

## ۴-۲- مسلح کننده

در این تحقیق از دو نوع مسلح کننده تسمه ای که یک نوع آن پلیمری و نوع دیگر آن فلزی می باشند استفاده شده است. المان استریپ<sup>۳</sup> گزینه مناسبی برای شبیه سازی تسمه های مسلح کننده نازک، صاف و گسسته می باشد. المان استریپ توانایی عملکرد در فشار و کشش را دارد و علاوه بر آن توسط این المان می توان مقاومت کششی تسمه های مسلح کننده را نمایش داد. مشخصات تسمه های مسلح کننده در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده اند.

## جدول ۴. مشخصات مسلح کننده

مسلح کننده	تسمه پلیمری (GS 50)	تسمه فلزی (Metallic)
		
مدل رفتاری	الاستیک خطی	الاستیک خطی
مدول الاستیک تسمه (GPa)	۲/۵	۲۱۰
پهنای (m)	۰/۱	۰/۰۵
ضخامت (mm)	۳	۴
محدودیت گسیختگی کششی تسمه (kN)	۱۰۰	۱۰۰
محدودیت گسیختگی فشاری تسمه (N)	۰/۰	۱۰۰
محدودیت کرنش کششی تسمه (%)	۱۲	۱۰

strip -۱

## ۲-۵- سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده

رفتار برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده توسط یک گسیختگی برشی غیرخطی که بر اساس فشار سربار تغییر می کند تعریف می شود. پارامترهایی که برای سطح مشترک مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از  $f^*$  و  $k_b$  که به صورت زیر محاسبه می گردند:

- $f^*$ : ضریب اصطکاک ظاهری که به صورت زیر محاسبه می شود

$$f^* = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{v0}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

- $k_b$ : سختی برشی بین خاک و مسلح کننده

$$k_b = \frac{T_{\max}/L}{U^*} \quad (\text{رابطه ۲})$$

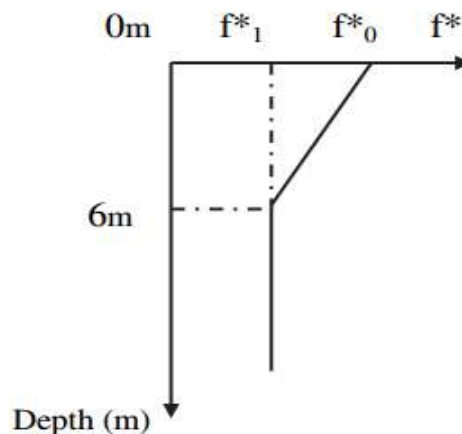
$T_{\max}$ : حداکثر تنش برشی اعمال شده توسط مسلح کننده

$\sigma_{v0}$ : تنش عمودی اعمال شده بر روی مسلح کننده

$T_{\max}$ : حداکثر نیروی کششی بر روی مسلح کننده

$L$ : طول مسلح کننده

$U^*$ : جابجایی نسبی بین خاک و مسلح کننده در بسیج شدن نیروها در آزمایش بیرون کشش<sup>۴</sup> برای یک دیوار با عرض ۱ متر شکل ۳ تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری توده خاک بر حسب ارتفاع دیوار را نشان می دهد.



شکل ۳. تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری در توده خاک

آقای عبدالوهاب و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱] مقادیر  $f^*$  و  $k_b$  مربوط به تعیین سطح مشترک خاک و مسلح کننده را در یک مدل عددی و بر اساس کالیبراسیون آزمایش بیرون کشش انجام شده در آزمایشگاه بدست آوردند (جدول ۵).

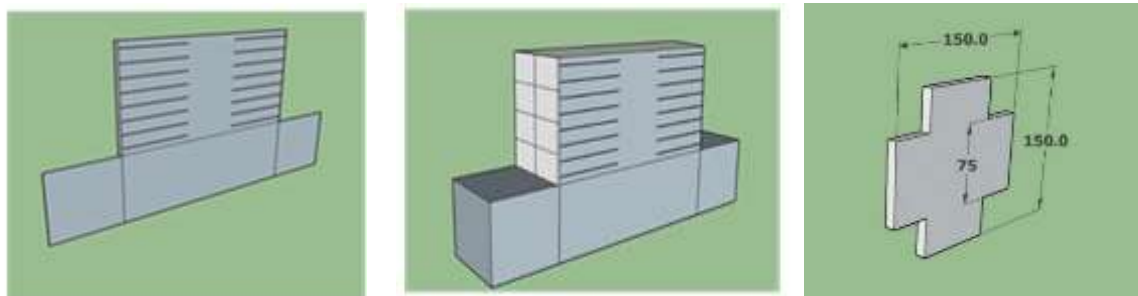
<sup>۴</sup>pullout

## جدول ۵. مشخصات سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده [۱]

پارامتر	تسمه پلیمری	تسمه فلزی
مدل رفتاری	موهر کولمب	موهر کولمب
$f^*0$ ضریب اصطکاک ظاهری اولیه در سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده	۱/۲	۱/۵
$f^*1$ حداقل ضریب اصطکاک ظاهری در سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده	۰/۶	۰/۷۲۷
$kb(MN/m^2/m)$ سختی برشی در سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده	۰/۲۲	۱/۶

## ۲-۶- هندسه

ارتفاع دیوار مورد مطالعه ۶ متر است. در دو سمت دیوار از نمای صلیبی شکل بتنی و ۱۶ عدد مسلح کننده (تسمه ای فلزی یا پلیمری) به طول ۴ متر (سه‌م هر سمت دیوار ۸ مسلح کننده) استفاده شده است (شکل ۴). در هر سمت دیوار از ۴ قطعه بتنی در راستای قائم و ۲ قطعه بتنی در راستای عرضی با ابعاد  $1/5 \times 1/5$  متر استفاده شده که هر قطعه بتنی در ۴ نقطه به تسمه‌های مسلح کننده متصل می‌باشد. برای ساده سازی در هندسه مدل، شکل سه بعدی تبدیل به دو بعدی شده و قطعات صلیبی شکل به صورت مستطیل هایی با ابعاد  $1/5 \times 1/5$  متر مدل شده اند (شکل ۴).



الف) هندسه صلیبی نمای بتنی (ب) هندسه ساده سازی شده نمای بتنی (ج) هندسه دو بعدی دیوار

شکل ۴. نمایش دیوار خاک مسلح پشت به پشت سه بعدی بوسیله یک مدل دوبعدی

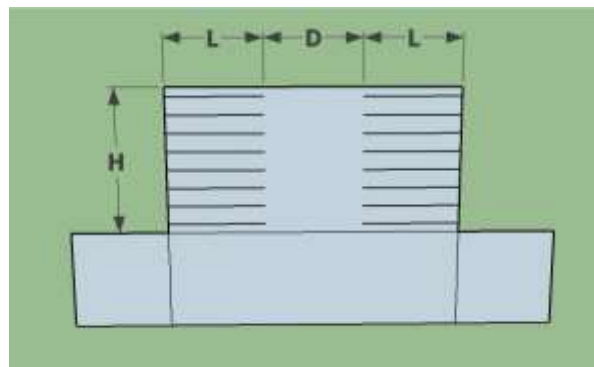
به منظور بالا بردن دقت مدل سازی، خاکریز مسلح شده در لایه هایی با ارتفاع  $0/375$  متر و در هشت گام به شرح زیر مدل سازی می‌شود:

- گام اول: نصب اولین نمای بتنی، سپس خاکریزی مرحله اول و دوم و قرار دادن اولین تسمه مسلح کننده در بین این دو لایه خاک
- گام دوم: خاکریزی مرحله سوم و چهارم و قرار دادن دومین تسمه مسلح کننده در بین این دو لایه خاک

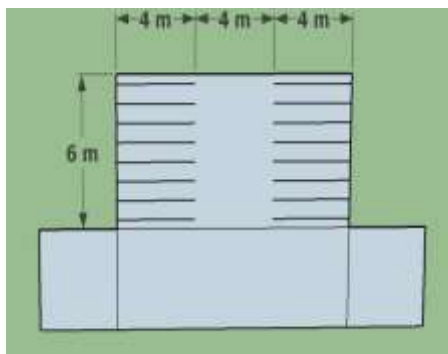
- گام سوم: نصب دومین نمای بتنی، سپس خاکریزی مرحله پنجم و ششم و قرار دادن سومین تسمه مسلح کننده در بین این دو لایه خاک.  
این مراحل تا گام هشتم برای کل دیوار تا ارتفاع ۶ متر تکرار می‌شوند.

### ۳- نتایج و تحلیل

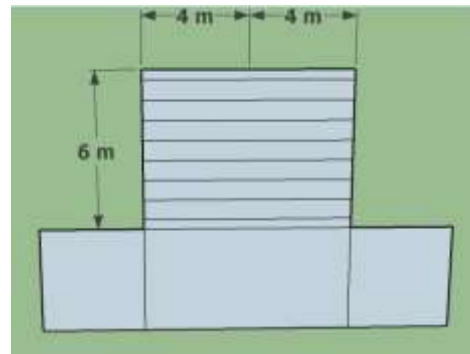
در این بخش رفتار دیوار خاک مسلح پشت به پشت با دو حالت مختلف نسبت های عرض به ارتفاع ( $W/H$ ) برای دو نوع تسمه مسلح کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارتفاع دیوار ( $H$ ) و طول مسلح کننده ( $L$ ) به ترتیب ۶ متر و ۴ متر ثابت فرض شده اند. پارامترهای متغیر مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از: عرض دیوار ( $W$ ) و فاصله بین مسلح کننده ها از همدیگر ( $D$ ) (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵. هندسه دیوار خاک مسلح پشت به پشت



ب)  $W/H=2$



الف)  $W/H=1/33$

شکل ۶. هندسه دیوار خاک مسلح پشت به پشت در دو نسبت مختلف عرض ( $W$ ) به ارتفاع ( $H$ ) دیوار

### ۳-۱- تسمه پلیمری

الف) جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده

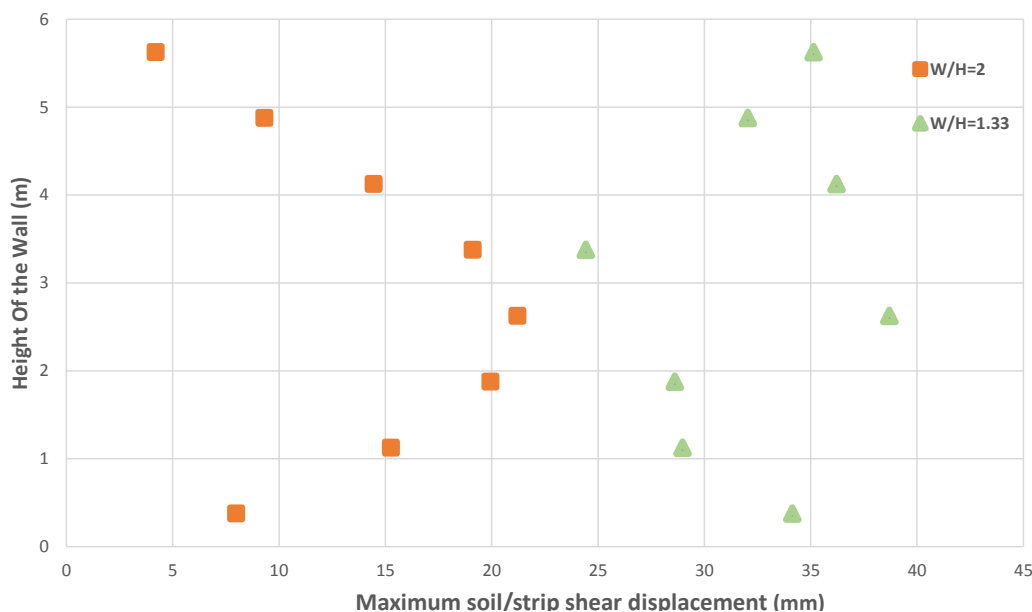
در آنالیز عددی دیوار خاک مسلح پشت به پشت با تسمه پلیمری، مشاهده می‌شود که در نسبت  $W/H=2$  مقدار جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده از پایین دیوار شروع به افزایش کرده و در میانه دیوار به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن با افزایش ارتفاع دیوار از مقدار آن کاسته می‌شود.



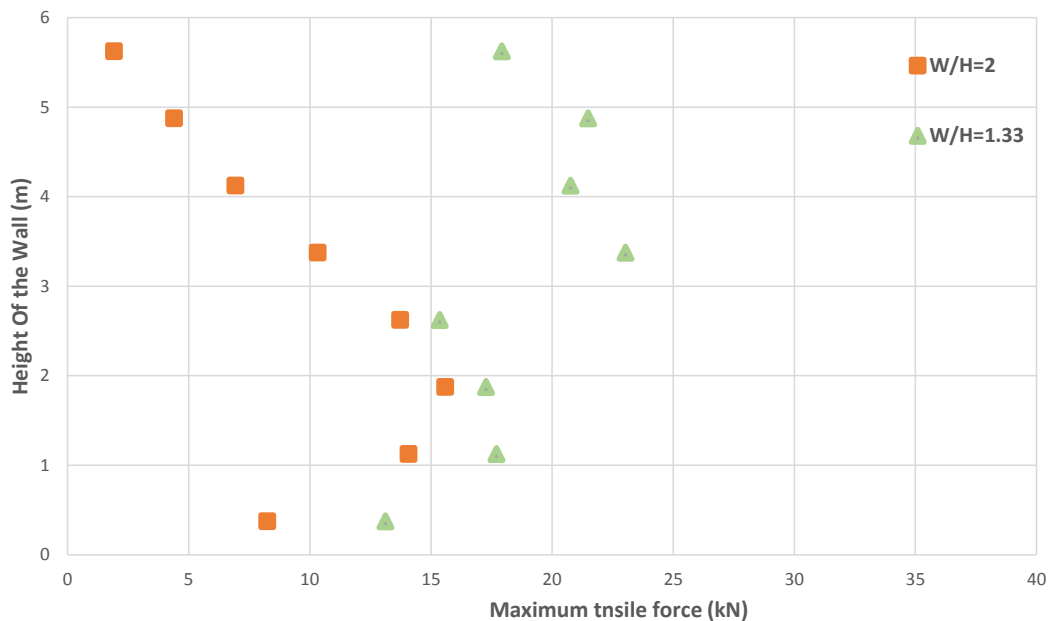
بیشترین مقدار جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده در تسمه‌های سوم و چهارم و کمترین مقدار آن مربوط به تسمه‌های اول و هشتم در پایین و بالای دیوار اتفاق می‌دهد. اختلاف بین میانگین بیشترین و کمترین مقدار جابجایی برشی تقریباً برابر با ۱۴/۵ میلیمتر می‌باشد. حال این روند تغییرات برای  $W/H=1/33$  نسبت به حالت قبل کاملاً متفاوت می‌شود بطوریکه از الگوی ثابتی پیروی نمی‌کند و دائماً در ارتفاع دیوار دارای نوسانات پی در پی می‌باشد (شکل ۷-الف).

### ب) نیروی کششی وارد بر تسمه پلیمری

تحلیل نیروی کششی وارد بر تسمه‌های پلیمری در دیوارخاک مسلح پشت به پشت در نسبت  $W/H=2$  نشان می‌دهد که نیروی کششی وارد بر تسمه مسلح کننده از پایین دیوار شروع به افزایش نموده و این افزایش تا ارتفاع ۲ متر ادامه دارد و به بیشترین مقدار خود می‌رسد. هرچه ارتفاع دیوار بیشتر می‌شود نیروی کششی وارد بر تسمه کاهش می‌یابد. بیشترین نیروی کششی وارد بر تسمه پلیمری، در تسمه‌های دوم و سوم و کمترین مقدار آن، در تسمه‌های هفتم و هشتم دیده می‌شود. اختلاف بین میانگین بیشترین و کمترین مقدار نیروی کششی در این حالت از نسبت عرض به ارتفاع، حدود ۱۱/۷۰ کیلونیوتن می‌باشد. برای حالت  $W/H=1/33$ ، نیروی کششی وارد بر تسمه همانند جابجایی برشی دارای نوسانات پی در پی و ناگهانی بوده و از روند خاصی تبعیت نمی‌کند (شکل ۷-ب).



### الف) تغییرات جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده



شکل ۷. نتایج مربوط به تسمه پلیمری  
(ب) تغییرات نیروی کششی

### ۳-۲- تسمه فلزی

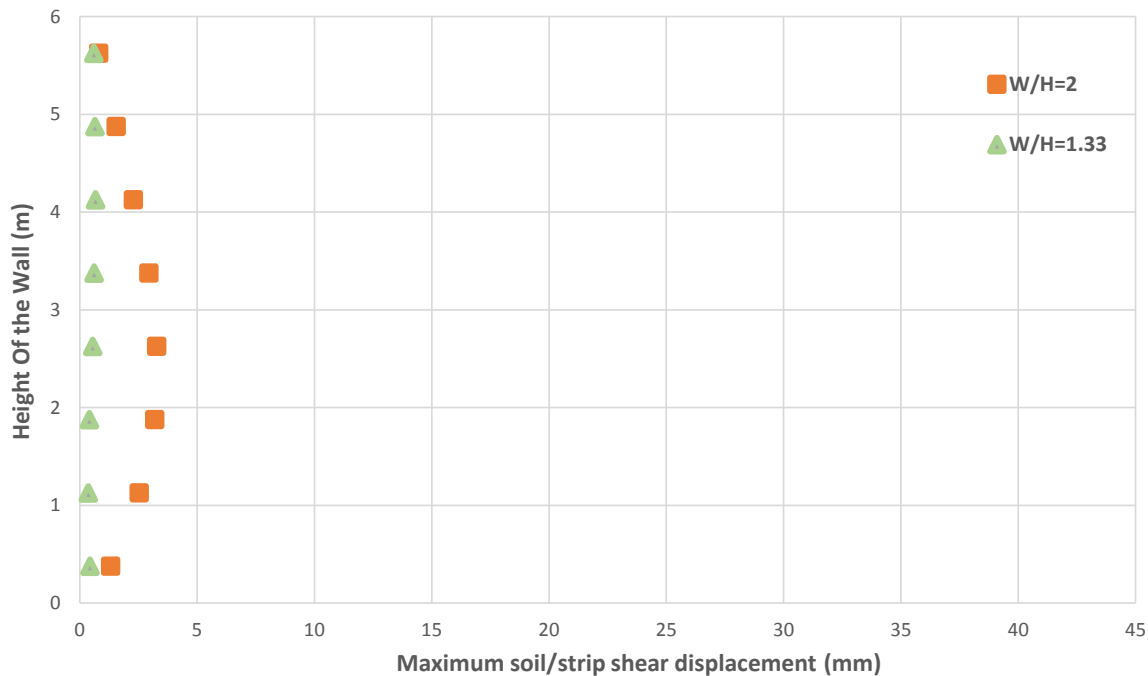
#### الف) جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده

تحلیل دیوارخاک مسلح پشت به پشت برای تسمه فلزی در حالت  $W/H=2$  نشان می‌دهد که جابجایی های برشی بین خاک و مسلح کننده ها از ابتدای دیوار شروع به افزایش کرده تا اینکه در میانه های دیوار به ماکزیمم میزان خود می رسد و بعد از آن با افزایش ارتفاع دیوار کاهش پیدا می کند. بیشترین مقدار جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده در تسمه سوم و چهارم و کمترین مقدار آن در تسمه های اول و هشتم رخ می‌دهد. اختلاف بین میانگین بیشترین و کمترین مقدار جابجایی برشی برای این نسبت برابر با  $2/2$  میلیمتر می‌باشد. برای نسبت عرض به دیوار  $W/H=1/33$  روند تغییرات جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده فلزی دارای روند مشخصی می‌باشد و نسبت به تسمه پلیمری کاملاً متفاوت می‌باشد. رفتار این نوع دیوار با نسبت عرض به ارتفاع برابر با  $1/33$  مشابه دیوار با نسبت ۲ می‌باشد اما مقدار جابجایی آن کمتر می‌باشد (شکل ۸-الف).

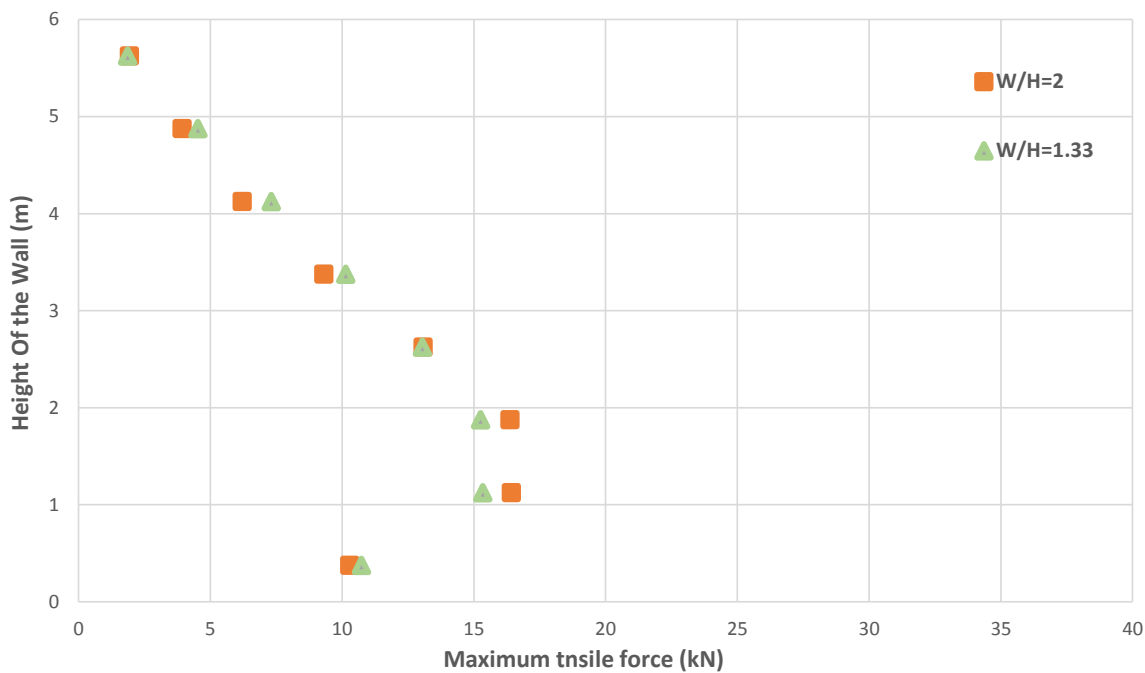
#### ب) نیروی کششی وارد بر تسمه فلزی

نتایج حاصل از آنالیز دیوار خاک مسلح پشت به پشت با تسمه فلزی برای هر دو حالت ۲ و  $W/H=1/33$  نشان می‌دهد ماکزیمم نیروی کششی در ۲ متر ابتدایی دیوار رخ داده و سپس روند کاهشی طی می کند تا به کمترین مقدار خود می رسد. بیشترین مقدار نیروی کششی در تسمه های دوم و سوم و کمترین مقدار آن در تسمه های هفتم و هشتم رخ می‌دهد. روند تغییرات نیروی کششی وارد بر مسلح کننده و همچنین محلی که بیشترین نیروی کششی بر مسلح کننده ها وارد می‌شود برای هر دو حالت مختلف از نسبت عرض به ارتفاع دیوار مشابه می‌باشد اما از نظر مقدار متفاوت می‌باشد. میانگین اختلاف بین

کمترین و بیشترین مقدار نیروی کششی وارد بر تسمه فلزی در نسبت  $W/H=2$  برابر  $13/45$  کیلونیوتن و در نسبت  $W/H=1/33$  برابر با  $12/1$  کیلو نیوتن می‌باشد (شکل ۸-ب).



الف) تغییرات جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده



ب) تغییرات نیروی کششی

شکل ۸. نتایج مربوط به تسمه فلزی

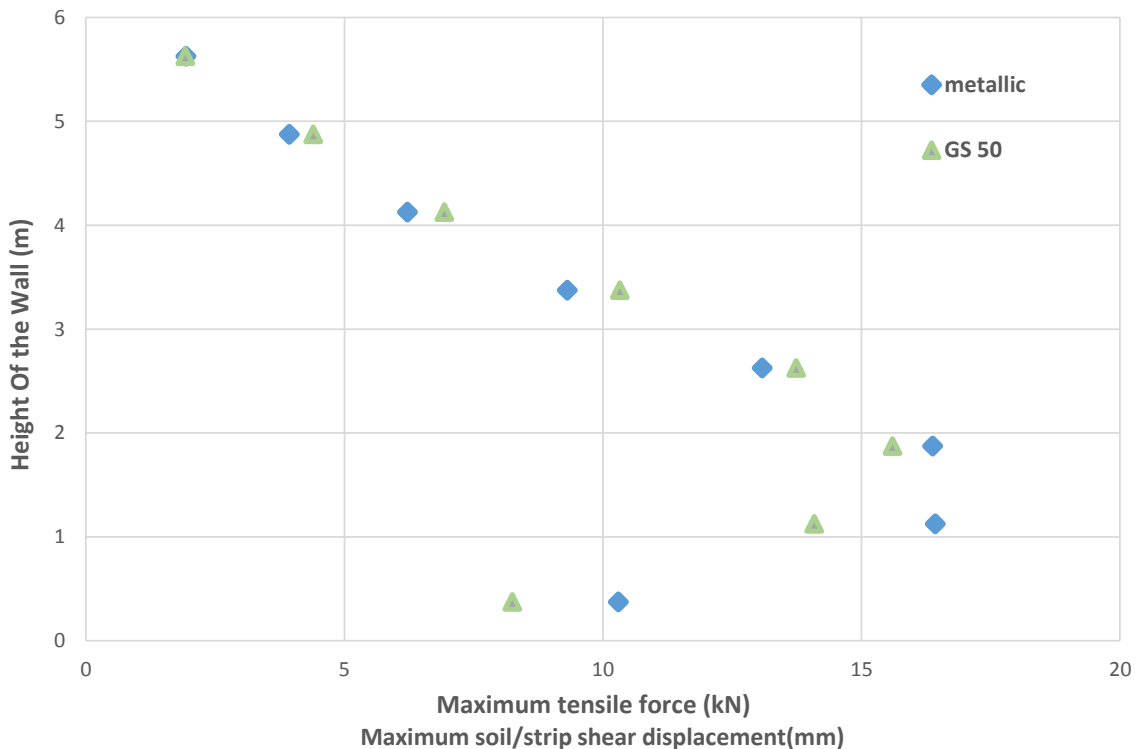
## ۳-۳- مقایسه نتایج تسمه پلیمری با تسمه فلزی

الف) حالتی که تسمه ها از هم فاصله دارند ( $W/H=2$ )

برای این حالت عرض دیوار ( $W$ ) برابر با ۱۲ در نظر گرفته شده و مسلح کننده ها به طول ۴ متر در راستای افقی قرار گرفته اند (شکل ۶-ب). رفتار دیوار خاک مسلح پشت به پشت برای دو نوع مسلح کننده در حالت نسبت عرض به ارتفاع دیوار برابر با ۲ مورد بررسی قرار گرفته اند.

جابجایی های برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده از پایین دیوار شروع به افزایش و با بیشتر شدن ارتفاع دیوار کاهش پیدا می کنند. بیشترین جابجایی در تسمه سوم و چهارم و کمترین آن در تسمه های اول و هشتم رخ می دهد. روند تغییرات جابجایی برشی و همچنین محل وقوع بیشترین جابجایی برای هر دو نوع مسلح کننده مشابه می باشد اما از نظر مقدار متفاوت می باشد به طوریکه بیشترین جابجایی مربوط به تسمه پلیمری و کمترین برای تسمه فلزی بوده که اختلاف بین آن ها حدود ۱۸ میلیمتر می باشد (شکل ۹-الف).

بیشترین نیروی کششی در ۲ متر پایین دیوار رخ می دهد و سپس روند کاهشی دارد و در بالای دیوار به کمترین مقدار خود می رسد. بیشترین نیروی کششی در تسمه سوم و کمترین در هشتمین تسمه رخ می دهد و اختلاف آن ها ۸/۱ کیلونیوتن می باشد. روند تغییرات و محل وقوع بیشترین نیروی کششی وارد بر مسلح کننده برای هر دو نوع تسمه مشابه است (شکل ۹-ب).



الف) تغییرات جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده

ب) تغییرات نیروی کششی

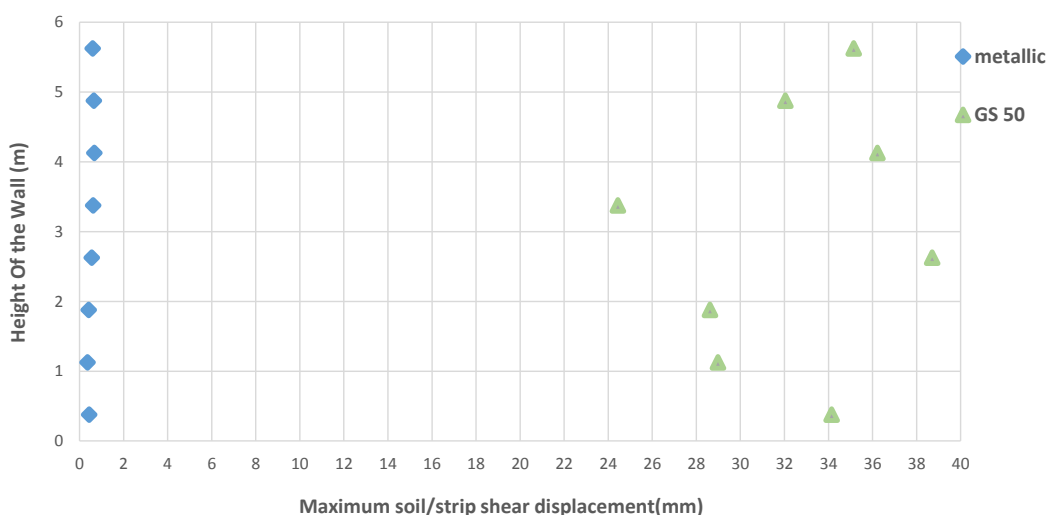
شکل ۹. نتایج مربوط به تسمه پلیمری و تسمه فلزی در  $W/H=2$

### ب) حالتی که تسمه ها از هم فاصله ندارند ( $W/H=1/33$ )

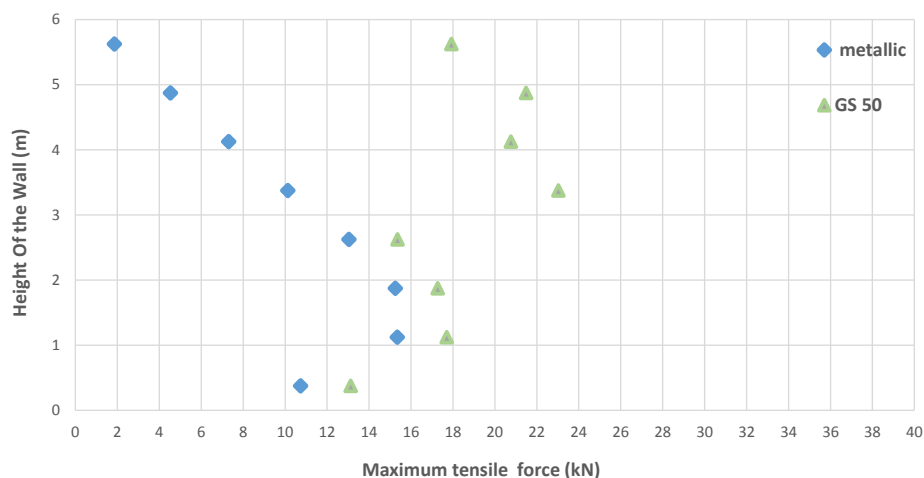
در این حالت عرض دیوار ( $W$ ) برابر با ۸ متر بوده بطوریکه مسلح کننده ها از هم فاصله نداشته و در مرکز دیوار به هم می رسند (شکل ۶-الف).

رفتار این دیوار با دو نوع مسلح کننده در مقایسه با حالت الف کاملا متفاوت می باشد بطوریکه تغییرات جابجایی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده برای تسمه پلیمری برعکس تسمه فلزی روند مشخصی ندارد و دارای نوسانات ناگهانی می باشد (شکل ۱۰-الف).

بررسی نیروی کششی وارد بر تسمه ها نشان می دهد که روند تغییرات نیروی کششی وارد بر تسمه پلیمری همانند جابجایی برشی آن دارای تغییرات ناگهانی و پی در پی می باشد. این روند برای تسمه فلزی کاملا متفاوت است بطوریکه روند تغییرات نیروی کششی در تسمه فلزی از الگوی ثابتی پیروی میکند (شکل ۱۰-ب).



### الف) تغییرات جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده



### ب) تغییرات نیروی کششی - شکل ۱۰. رفتار دیوار در $W/H=1/33$

#### ۴- تحلیل نتایج

بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد دیوار خاک مسلح پشت به پشت با تسمه پلیمری دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است که این انعطاف‌پذیری منجر به تغییر شکل بیشتر می‌شود و به تبع آن جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده دارای مقادیر بزرگتری نسبت حالت مسلح شده با تسمه فلزی می‌باشد. علت این امر کمتر بودن مدول الاستیک و سختی برشی سطح مشترک بین خاک و تسمه پلیمری نسبت به تسمه فلزی می‌باشد به عبارت دیگر تسمه پلیمری انعطاف‌پذیر و تسمه فلزی صلب می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که هر چه سختی برشی بین خاک و مسلح کننده و مدول الاستیک مسلح کننده بزرگتر باشد (تسمه فلزی) قادر به تحمل نیروی کششی بیشتری می‌باشند. از طرف دیگر مطالعه دیوار خاک مسلح پشت به پشت در نسبت های مختلف عرض به ارتفاع نشان داد که هر چه عرض دیوار کمتر شود و تسمه‌های مسلح کننده به یکدیگر نزدیکتر شوند بطور خاص برای حالتی که مسلح کننده ها از هم فاصله ندارند ( $D=0$ ) بسیج شدن نیروی کششی در مرکز دیوار مشاهده می‌شود که این تمرکز نیرو باعث کاهش حداکثر مقاومت کششی لازم می‌شود و منجر به یک طراحی غیرایمن برای پایداری خارجی دیوار می‌شود. ناپایدارترین وضعیت دیوار در  $D=0$  مربوط به تسمه‌های پلیمری است که دارای بیشترین مقدار و نوسانات جابجایی های برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده و کمترین مقاومت کششی می‌باشند. این در حالی است که تسمه فلزی به علت داشتن سختی برشی بین خاک و مسلح کننده و مدول الاستیک بیشتر دارای مقاومت کششی بیشتر و در نتیجه جابجایی برشی کمتر بوده که این موضوع باعث پایداری بیشتر دیوار خاک مسلح می‌باشد.

#### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در بررسی دیوار خاک مسلح پشت به پشت برای نسبت های مختلف عرض به ارتفاع دیوار نتایج حاکی از آن است که این نسبت با نیروی کششی وارد بر مسلح کننده ها رابطه مستقیم و با جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر هرچه نسبت عرض به ارتفاع بیشتر باشد یا هرچه عرض دیوار بزرگتر باشد فاصله تسمه‌های مسلح کننده از یکدیگر بیشتر و در نتیجه نیروی کششی وارد بر تسمه‌های مسلح کننده افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش عرض دیوار، جابجایی برشی سطح مشترک بین خاک و مسلح کننده برای هر دو نوع تسمه مسلح کننده کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت عرض به ارتفاع دیوار خاک مسلح پشت به پشت، پایداری دیوار کاهش می‌یابد بطوریکه در نسبت  $W/H=1/33$  که مسلح کننده ها به هم می‌رسند دیوار در ناپایدارترین حالت قرار می‌گیرد مخصوصا اگر مسلح کننده ها پلیمری باشند. مطالعه تاثیر نوع تسمه‌های مسلح کننده نشان داد که بیشترین جابجایی برشی بین خاک و مسلح کننده مربوط به تسمه پلیمری و کمترین جابجایی برشی برای تسمه فلزی است. بیشترین نیروی کششی وارد بر تسمه‌های مسلح کننده مربوط به تسمه فلزی و کمترین نیروی کششی مربوط به تسمه پلیمری می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] A. Abdelouhab, D. Dias, N. Freitag, Numerical analysis of the behaviour of mechanically stabilized earth walls reinforced with different types of strips, *Geotextiles and Geomembranes*, 29 (2010) 116-129.
- [2] F. Vahedifard, S. Shahrokhbabadi, D. Leshchinsky, Geosynthetic-reinforced soil structures with concave facing profile, *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (2016) 358-365.
- [3] Y. Yu, R. J. Bathurst, Y. Miyata, Numerical analysis of a mechanically stabilized earth wall reinforced with steel strips, *Soils and Foundations*, 55 (2015), 536-547.
- [۴] محمد جواد شعبانی رمتنی، محمد علی روشن ضمیر، عباس اسلامی حقیقت، "ارزیابی عملکرد دیوار خاک مسلح با تسلیح کننده های مورب، رویه شیب دار و مهار تسلیح کننده ها" مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس، فروردین ۱۳۹۵، تهران، ایران.
- [5] J. Han, D. Leshchinsky, Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (2010), 262-267.
- [6] R. El-Sherbiny, Ph.D., P.E., M. ASCE, E. Ibrahim, and A. Salem, Ph.D, Stability of Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth Walls, *Geo-Congress*, 2013.
- [7] M. Djabri, S. Benmebarek, FEM Analysis of Back-to-Back Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, *Int. J. of Geosynth and Ground Eng*, 2016.
- [8] M. Esmaili, B. Arbabi, Railway embankments stabilization by tied back-to-back system, *Computers and Geotechnics*, 67 (2015), 110-120.