



## بررسی پارامتریک دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی قرار گرفته بر روی بستر تراکم پذیر

واحد قیاسی<sup>۱\*</sup>، امین فرزنان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>، آگروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ شهریور ماه ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۱ بهمن ماه ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۱ بهمن ماه ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

دیوار خاک مسلح  
مدل سازی عددی  
ژئوگرید  
زاویه نما  
شرایط پنجه

**چکیده:** مطالعات زیادی بر روی دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی با فرض صلب بودن بستر صورت گرفته است، اما رفتار این سیستم و بررسی اجزاء آن به هنگام تراکم پذیر بودن و یا سست بودن خاک بستر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیق حاضر به بررسی اثر پارامترهای تاثیرگذار (شامل زاویه نما، دیوار خاک مسلح نسبت به راستای قائم، نوع اتصال مسلح کننده به دیوار، شرایط پنجه ی دیوار، طول مسلح-کننده و فاصله ی عمودی مسلح کننده ها) بر رفتار دیوار خاک مسلح قرار گرفته بر روی بستر تراکم پذیر، به روش اجزاء محدود می پردازد. همچنین رفتار دیوار تحت شرایط پایان ساخت دیوار و نیز بارگذاری سربار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد پارامترهایی که بیشترین تاثیر را به هنگام ضعیف شدن بستر بر رفتار دیوار خاک مسلح داشتند، زاویه نما دیوار، فاصله ی عمودی بین مسلح-کننده ها و شرایط پنجه ی دیوار می باشند. کم نمودن فاصله ی مسلح کننده ها و افزایش زاویه نما دیوار موجب کاهش قابل توجه جابجایی جانبی دیوار و بار بیشینه ی مسلح کننده ها می گردد. همچنین طبق نتایج در بستر با خاک تراکم پذیر، نوع اتصال مسلح کننده و طول مسلح کننده تاثیر محسوسی بر بهبود رفتار دیوار، بجز در حالتی که دیوار بر روی بستر ضعیف قرار گرفته است، از خود نشان ندادند.

### ۱- مقدمه

دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی به عنوان نگهدارنده ی توده ی خاکی در مقابل فشار جانبی خاک و آب، تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی و نیز به دلیل هزینه ی کم ساخت، زمان کوتاه، انعطاف پذیری، راحتی ساخت و هم چنین از نظر زیبا سازی نمای بیرونی در محیط زیست نسبت به سایر روش های پایدار سازی گسترش روزافزون یافته است [۱-۴].

تاکنون مطالعات متعددی بر روی دیوار خاک مسلح مستقر بر روی بستر صلب، نظیر پژوهش ارلیچ و میرمادی (۲۰۱۳)، میرمادی و ارلیچ (۲۰۱۴)، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، رحمونی و همکاران (۲۰۱۶) و ابدالوحاب و همکاران (۲۰۱۱) صورت گرفته است که تاثیر پارامترهای مختلف، نظیر طول مسلح کننده، فاصله ی بین ژئوگریدها، زاویه نما، شرایط پنجه و نوع اتصال مسلح کننده به دیوار بررسی شده اند، اما تاثیر این پارامترها در ترکیب با شرایط بستر تراکم پذیر و با مقاومت کم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۴].

در پژوهش اسکاینر و راو (۲۰۰۱) که به روش اجزاء محدود انجام پذیرفت، رفتار دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی را که بر روی یک بستر

تشکیل یافته از رس سخت و خاک گلدانی قرار گرفته بود مورد ارزیابی قرار گرفته شد و دریافت شد که مقاومت و سختی بستر دیوار خاک مسلح اثر مهمی بر رفتار دیوار خواهد گذاشت و بستر ضعیف می تواند موجب افزایش کرنش مسلح کننده ها و جابجایی نمای دیوار گردد [۱۱]. هم چنین اسکاینر و راو (۲۰۰۳) پژوهش دیگری که در آن تاثیر نرخ بارگذاری بر مقاومت برشی زه کشی نشده بستررسی ویسکوپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است را انجام دادند و نشان داده شد که طبیعت ویسکوپلاستیکی برخی خاک های رسی می تواند باعث افزایش کرنش مسلح کننده ها تا ۴۵ درصد بیشتر از مقادیر مورد انتظار طراحی شود [۱۲]. در مطالعه پارامتریک به روش اجزاء محدود، توسط لینگ و لشچنسکی (۲۰۰۳)، به بررسی اثر مشخصات خاک بستر بر رفتار دیوار خاک مسلح بلوکی قطعه ای، پرداخته شد و نتیجه این بود که پاسخ دیوار و مسلح کننده به تغییر در سختی بستر الاستیک حساس نمی باشد، و تاثیر خاک بستر در ارتباط با جابجایی جانبی نما و بار کششی در مسلح کننده ها باید با مدل های غیر خطی خاک نیز شبیه سازی گردد [۱۱]. در پژوهش دامیانس و همکاران (۲۰۱۴) نیز که به روش تفاضل محدود صورت پذیرفت، به بررسی اثر تراکم پذیری بستر بر بارهای ایجاد شده در ژئوسنتتیک ها در دیوار خاک مسلح پرداخته شد، که نتیجه شد به میزانی که سختی بستر دیوار

و مدل‌های تحقیق استفاده شده است. مدل خاک سخت شونده یک مدل پیشرفته برایشبیه‌سازی رفتار انواع مختلف خاک‌های نرم و سخت است. هم‌چنین برای مش‌بندی مدل صحت‌سنجی و مدل‌های تحقیق از نوع مش‌بندی ریز استفاده شده است و مش اطراف لایه‌های ژئوگرید در ناحیه‌ی خاک مسلح توسط گزینه‌ی refine line در نرم‌افزار، ریزتر از باقی بخش‌های دیوار گردید.

### ۳- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده در این تحقیق از نتایج کار آزمایشگاهی تمام مقیاس (دیوار شماره ۱۵) که توسط بادرست و همکاران (۲۰۰۰)، حاتمی و بادرست (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی شماره ۱ (دیوار شماره ۱) دارای خاکریزی از جنس ماسه به طول بیشینه ۶ متر و با ارتفاع ۳/۶ متر با زاویه‌ی نمای ۸ درجه نسبت به راستای قائم می‌باشد. جنس مسلح‌کننده‌ها از جنس ژئوگرید پلی‌پروپیلن دو محوره می‌باشند که هر کدام دارای طول ۲/۵۲ متر و فاصله‌ی عمودی ۰/۶ متر نسبت به یکدیگر می‌باشند و نیز نمای دیوار تشکیل یافته از بلوک‌های سیمانی مدولار با ابعاد ۳۰۰ میلی‌متر طول و ۱۵۰ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد. شکل ۱ مدل هندسی ساخته شده در نرم‌افزار، که عیناً مشابه با مدل تمام مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد را نشان می‌دهد. پارامترهای خاکریز و مصالح بکار رفته در دیوار برای ورودی مدل صحت‌سنجی، مطابق با مقادیر کار آزمایشگاهی بادرست و همکاران (۲۰۰۰) بکار رفته است که در مقالات حاتمی و بادرست (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) منتشر شده است [۱۶ و ۱۵].

مقدار  $E_{urref}=3E_{50ref}$  مطابق با پیش فرض نرم‌افزار پلکسیس می‌باشد و مقدار  $m$  بر مبنای مقدار پیشنهادی جانبو، که مقدار آن را ۰/۵ برای ماسه‌های نروژی گزارش کرد، قرار داده شده است [۱۸]. مسلح‌کننده‌های ژئوگریدی که سختی محوری آنها در جدول ۱ آمده است، توسط المان ژئوگرید در پلکسیس و به عنوان مصالح الاستیک خطی با در نظرگیری اندرکنش کامل با خاک اطراف مدل سازی شده‌اند. در مدل آزمایشگاهی بادرست و همکاران (۲۰۰۰)، خاکریز به حالت خشک و بستر به صورت صلب و بدون تراز آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است، که در مدل صحت‌سنجی نرم‌افزار و مدل‌های تحقیق همین شرایط برای درجه اشباع خاکریز و تراز آب زیرزمینی حاکم است.

در مدل آزمایشگاهی بادرست و همکاران (۲۰۰۰)، عکس العمل افقی پنجه‌ی دیوار توسط یک میله‌ی سنجش بار اندازه‌گیری شد که برای شبیه‌سازی شرایط پنجه در مدل عددی، مشابه با مدل سازی صورت گرفته توسط بادرست و حاتمی (۲۰۰۵)، در جهت افقی از المان انکرا با انتهای بسته با سختی محوری ۴۰۰۰ کیلونیوتن بر متر استفاده شد و از جابجایی پنجه‌ی دیوار در جهت عمودی توسط گیرداری عمودی،

کاهش می‌یابد، بار مسلح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد. در پژوهش دامیانس و همکاران (۲۰۱۴)، محیط خاک بستر دیوار یک محیط الاستیک خطی می‌باشد و توسط صفر قرار دادن ضریب پواسون، عملاً پاسخ تغییر شکل بستر معادل با فنر وینکلر در نظر گرفته شده است و نیز جابجایی بستر دیوار خاک مسلح و پنجه‌ی دیوار، تنها در جهت عمودی در نظر گرفته شده است که این خود شرایطی محدود شده می‌باشد [۱۲].

با توجه به پیشینه ادبیات فنی و ابهامات ذکر شده، نظیر خطی بودن مدل رفتاری خاک در تحقیقات پیشین، معادل‌سازی خاک با فنر وینکلر و در نظر نگرفتن تاثیر پارامترهای هندسی بر دیوار مستقر بر روی بستر تراکم‌پذیر، در این تحقیق به بررسی تاثیر زاویه‌ی نمای دیوار نسبت به راستای قائم، نوع اتصال ژئوگرید به دیوار، گیردار بودن و یا نبودن پنجه‌ی دیوار، نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار و فاصله‌ی بین مسلح‌کننده‌های دیوار خاک مسلح قرار گرفته بر روی بستر صلب و غیرصلب (بستر ضعیف و بستر متراکم)، در شرایط پایان ساخت و بارگذاری سربار پرداخته شده است، که مدل رفتاری خاک، مدل پیشرفته‌ی خاک سخت شونده می‌باشد و لایه‌ی بستر در سه دسته‌ی متفاوت صلب، بستر متراکم و بستر ضعیف تقسیم شده است.

### ۲- مدل‌سازی

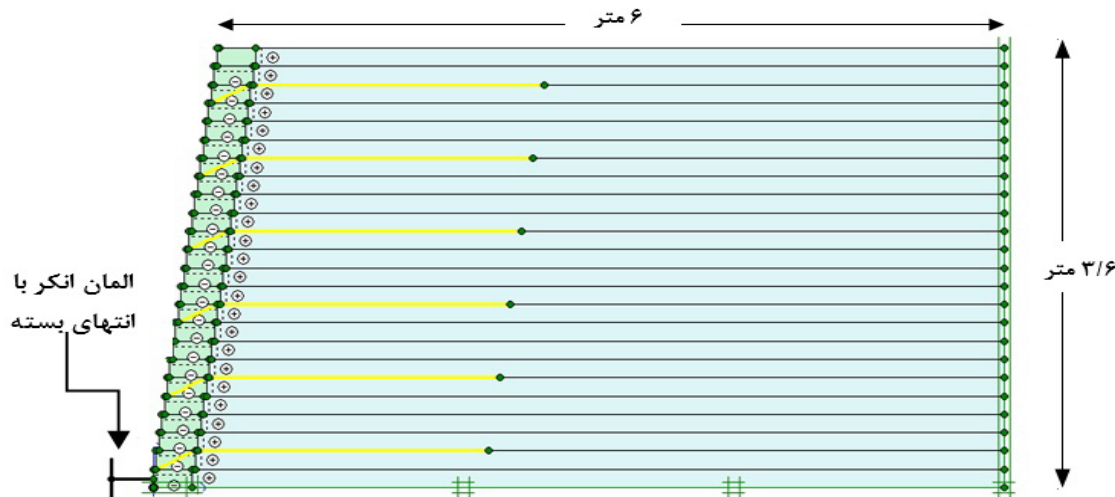
با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس ورژن ۸/۶ به بررسی جابجایی افقی و عمودی دیوار و نیز بار کششی بیشینه به وجود آمده در مسلح‌کننده‌ها، پرداخته شده است.

در پلکسیس برای مدل‌سازی، از مدل دو بعدی کرنش صفحه‌ای و هم‌چنین از المان‌های مثلثی که دارای ۱۵ گره و ۱۲ نقطه‌ی تنش می‌باشند استفاده شده است، چراکه المان ۱۵ گره‌ای المان دقیقی است که نتایج بهتری را برای مسائل مشکل ارائه می‌دهد [۱۳]. مدل‌سازی دیوارها در نرم‌افزار پلکسیس بصورت ساخت مرحله‌ای انجام شده‌اند که در آن لایه‌های خاک به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر (به اندازه‌ی ارتفاع یک قطعه بلوک) در مدل صحت‌سنجی، و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در مدل‌های تحقیق به صورت متناوب روی هم قرار داده می‌شوند، تا زمانی‌که دیوار به ارتفاع کامل برسد.

حاتمی و بادرست (۲۰۰۵)، تنش‌های اعمال شده از سوی غلطک به لایه‌های خاکریز برای عمل تراکم را با اعمال یک بار عمودی یکنواخت به میزان ۸ کیلونیوتن بر متر بر روی هر لایه شبیه‌سازی کردند که روش شبیه‌سازی تنش‌های ناشی از تراکم در تمامی مدل‌های این تحقیق نیز بدین صورت می‌باشد و در برنامه‌ی محاسبات، در هر فاز این بارها در لایه‌ی جدید فعال و در لایه‌ی قبلی غیرفعال می‌گردند [۱۴]. برای شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل خاک سخت شونده برای مدل صحت‌سنجی

توسط اتصال مکانیکی به بلوک‌های پوسته متصل شده اند که این امر در مدل‌سازی عددی توسط عبور دادن ژئوگرید از درون بلوک‌های مدولار به صورت قطری انجام شده است. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای ورودی برای اجزاء مختلف در مدل صحت‌سنجی آورده شده است. نتایج به دست آمده از مدل صحت‌سنجی در مقایسه با نتایج ارائه شده از مدل‌های آزمایشگاهی توسط حاتمی و بادرست در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

مطابق با شرایط مدل آزمایشگاهی جلوگیری شد. هم‌چنین مطابق با شرایط بستر دیوار در مدل آزمایشگاهی که به صورت صلب می‌باشد، در مدل عددی گیرداری‌های افقی و عمودی در زیر دیوار تعریف شد و نیز در سمت راست مدل، تنها گیرداری افقی برای مجاز نمودن جابجایی عمودی دیوار تحت اثر وزن خاک و تراکم اعمالی بر لایه‌ها، قرار داده شد. سطح مشترک افقی بین بلوک‌های مدولار و سطح مشترک عمودی بین بلوک‌ها و خاکریز تعریف شده است. در مدل فیزیکی لایه‌های ژئوگرید

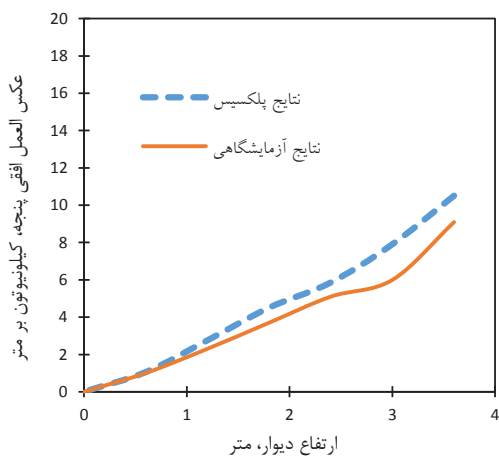


شکل ۱: هندسه مدل عددی صحت‌سنجی مشابه با مدل آزمایشگاهی

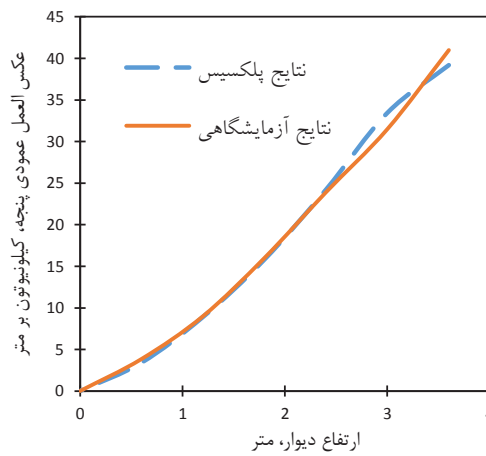
Fig. 1 The geometry of the numerical verification model similar to the laboratory model

لازم به ذکر است که نشانه‌های موجود بر نمودارهای شکل ۳-الف و ب نشان‌دهنده لایه‌های ژئوگرید متناظر در تراز مربوط به هر یک از لایه‌ها می‌باشد. در شکل ۳-ب نیز که مقادیر بدست آمده از نتایج مدل فیزیکی و عددی را برای بار اتصال مسلح کننده‌ها به نمای دیوار با هم مقایسه می‌کند، در طول نمودار بجز لایه شماره دو تطبیق مناسبی وجود دارد.

شکل ۲ پذیرشی مناسب مابین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده از عکس‌العمل در جهت افقی و عمودی پنجه دیوار خاک مسلح را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی برای جابجایی افقی نمای دیوار در شکل ۳-الف آمده است که تطبیق خوبی با یکدیگر دارند.



(ب)



(الف)

شکل ۲: مقایسه نتایج بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی.

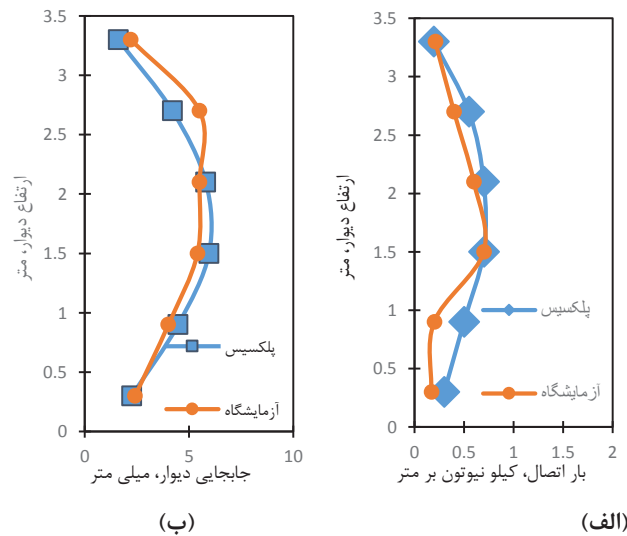
(الف) عکس‌العمل افقی بار پنجه دیوار. (ب) عکس‌العمل عمودی بار پنجه دیوار.

Fig. 2: Comparison of laboratory results and numerical modeling results

(a) Horizontal toe reaction load. (b) vertical toe reaction load

به طور کلی میتوان نتیجه گرفت که مدلسازی صورت گرفته برای صحت سنجی در این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار است.

در مقایسه نتایج مدلسازی تفاضل محدود و دیوار فیزیکی مشابه که حاتمی و بادرست (۲۰۰۵) انجام دادند نیز تطبیق مناسبی در نمودار بار اتصال مسلح کننده به جز در لایه‌های یک و دو مشاهده میشود.



شکل ۳: مقایسه نتایج بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی عددی. (الف) عکس العمل افقی بار پنجه دیوار (ب) عکس العمل عمودی بار پنجه ی دیوار  
 Fig. 3: Comparison of laboratory results and numerical modeling results.

(a) Horizontal wall displacement. (b) Connection load

جدول ۱: پارامترهای بکار برده شده در مدل صحت سنجی و مدل های مورد بررسی در تحقیق

Table 1. Input parameters in validation model and research models

نام پارامتر	خاکریز در مدل صحت سنجی	خاکریز در مدل پارامتری	بستر (خاک ضعیف)	بستر (خاک متراکم)
زاویه اصطکاک $\phi$ (degrees)	۴۴	۵۰	۳۰	۴۱
چسبندگی $c$ (kPa)	۱	۱	۱	۱
زاویه اتساع $\psi$ (degrees)	۱۱	۰	۰	۱۴
وزن مخصوص $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	۱۶/۸	۲۰	۱۷	۱۷/۵
$E_{50}^{ref}$	۵۶۶۶۷	۴۲۵۰۰	۲۰۰۰۰	۳۷۰۰۰
$E_{oed}^{ref}$	۵۶۶۶۷	۳۱۸۰۰	۱۶۰۰۰	۲۹۶۰۰
$E_{ur}^{ref}$	۱۷۰۰۰۰	۱۲۷۵۰۰	۶۰۰۰۰	۹۰۰۰۰
توان وابسته به تنش $m$	۰/۵	۰/۵	۰/۶۵	۰/۵
ضریب شکست $R_f$	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
ضریب پواسون $\nu$	۰/۲۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲
بلوک مدولار				
مدل	الاستیک خطی	الاستیک خطی	-	-
اندازه	۰/۱۵×۰/۳	۰/۱۵×۰/۳	-	-
وزن مخصوص $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	۲۱/۸	۲۱/۸	-	-
مدول سختی $E$ (kPa)	۱×۱۰ <sup>۵</sup>	۱×۱۰ <sup>۵</sup>	-	-
ضریب پواسون $\nu$	۰/۱۵	۰/۱۵	-	-
سختی محوری مسلح کننده	۴۰۰۰	۴۰۰۰	-	-

$E_{50}^{ref}$ : کرنش پلاستیک ناشی از بارگذاری انحرافی اولیه

$E_{oed}^{ref}$ : کرنش پلاستیک ناشی از فشار اولیه

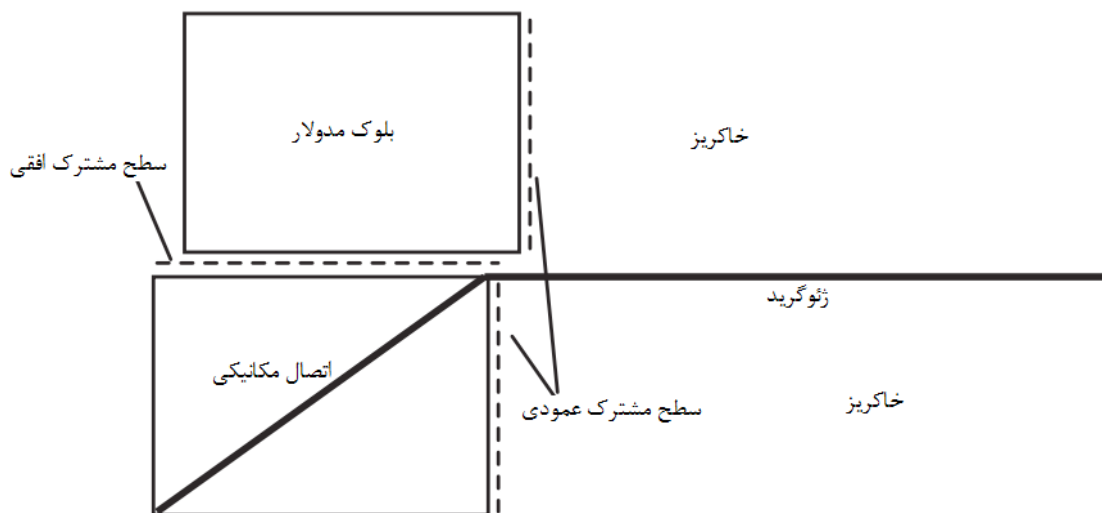
$E_{ur}^{ref}$ : مدول باربرداری-بارگذاری مجدد الاستیک

#### ۴- بررسی پارامتریک

با هدف انجام مطالعات پارامتریک، مدل‌هایی با ابعاد مشابه دیوار آزمایشگاهی بادرست و همکاران (۲۰۰۰) یا همان مدل صحت‌سنجی ایجاد گردید. زوایای دیوارها صفر و ۸ درجه، نسبت طول ژئوگریدها به ارتفاع دیوار (L/H) ۰/۷ و ۱، فاصله‌ی بین ژئوگریدها ۰/۴ و ۰/۸، نوع اتصال ژئوگریدها به دیوار، به دو حالت اصطکاکی و مکانیکی، و نیز حالت پنجه‌ی دیوار در دو حالت گیردار و آزاد در نظر گرفته شده‌است. شرایط بستر مدل‌ها نیز به سه دسته‌ی بستر صلب، بستر خاک ماسه‌ای متراکم و بستر خاک ماسه‌ای ضعیف تقسیم شده‌است. نتایج تحلیل‌ها در دو فاز پایان ساخت و بعد بارگذاری سربار به طول ۳ متر (از پشت بلوک‌های نما) و به شدت ۴۰ کیلونیوتن بر متر (۴ تن بر متر) بررسی شده‌است. شکل ۵ نمونه‌ای از مش بندی یکی از مدل‌های

عددی ساخته شده در تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۴، اندرکنش بین اجزاء دیوارها، توسط المان سطح مشترک بین مصالح بلوک-بلوک و خاک-بلوک در تمامی مدل‌های ساخته شده در تحقیق مدل‌سازی گردیده است و روش مدل کردن اتصال اصطکاکی در مدل‌سازی به صورت قرار دادن لایه‌های ژئوگرید به صورت افقی بین بلوک‌های مدولار نما می‌باشد، هم‌چنین برای مدل کردن اتصال مکانیکی از روش گولار و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده‌است بطوریکه لایه‌ی ژئوگرید را به صورت قطری در بلوک مدولار مدل‌سازی کرده است.

پارامترهای بکار رفته برای مصالح خاک و بلوک مدولار و هم‌چنین مسلح‌کننده‌ها، برای مدل‌های تحقیق در جدول شماره ۱ بیان شده‌است، که در آن پارامترهای خاک‌ریز در مدل صحت‌سنجی از مقاله‌ی بادرست و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶)، پارامترهای خاک‌ریز در مدل پارامتری از کار میرمادی و اریلیچ (۲۰۱۴) و پارامترهای بسترهای خاک ضعیف و خاک متراکم از راهنمای پلکسیس (۲۰۰۶) اقتباس گردیده است.



شکل ۴: نحوه‌ی اجرای سطح مشترک و اتصال مکانیکی در مدل‌سازی (گولار و همکاران، ۲۰۰۷)

Fig 4: Mode of interface and mechanical connection in modeling

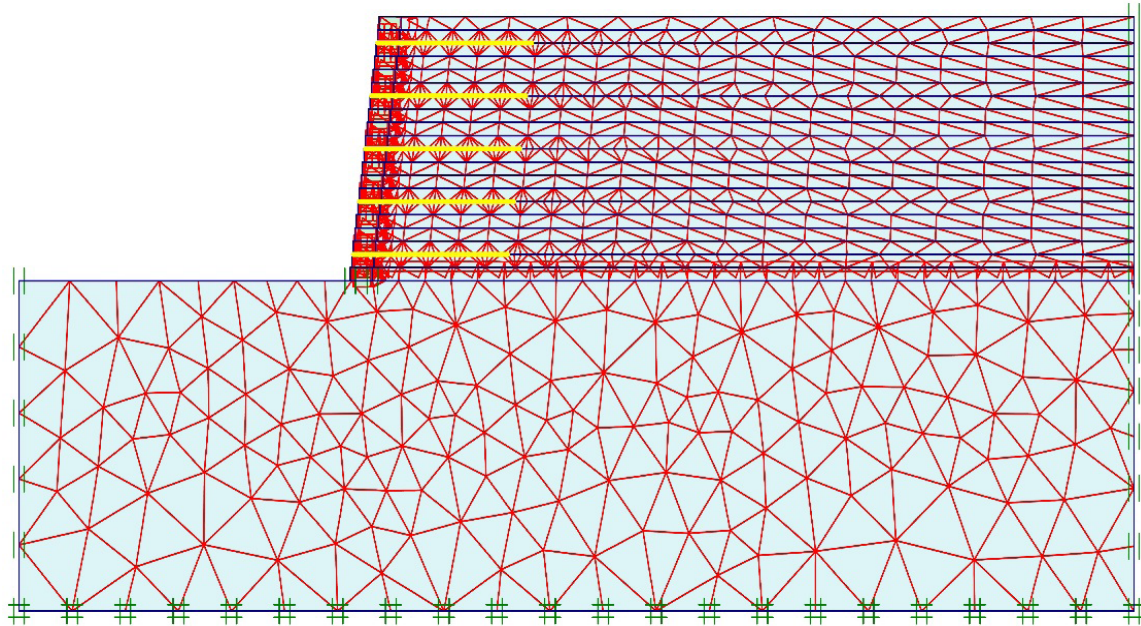
#### ۵- نتایج و بحث

##### ۵-۱- تاثیر ترکیبی فاصله بین مسلح‌کننده و شرایط بستر

با توجه به شکل ۷، ضعیف شدن بستر دیوار خاک مسلح تاثیر قابل توجهی بر جابجایی افقی دیوار خاک مسلح، بخصوص به هنگام بارگذاری سربار خواهد گذاشت. با کاهش فاصله‌ی بین ژئوگریدها از

۰/۸ متر به ۰/۴ متر در حالت سربار، جابجایی افقی تاج دیوار در خاک ماسه‌ای ضعیف ۱۱ میلی‌متر و در بستر صلب ۸ میلی‌متر کاهش را نشان می‌دهد که می‌توان به تاثیر مثبت کاهش فاصله‌ی بین ژئوگریدها با ضعیف‌تر شدن بستر دیوار خاک مسلح پی برد.

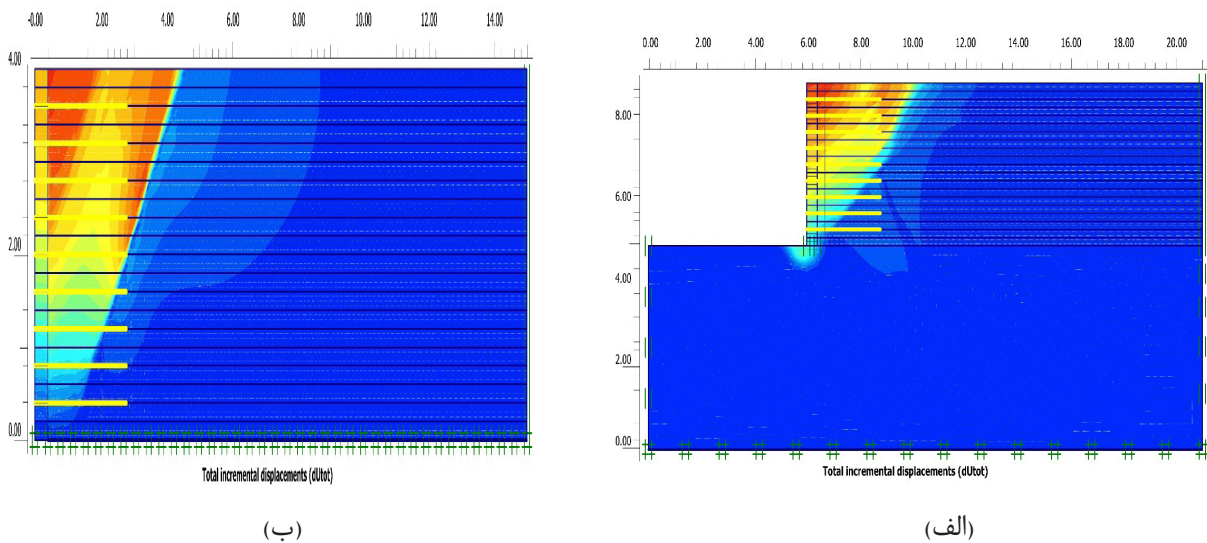




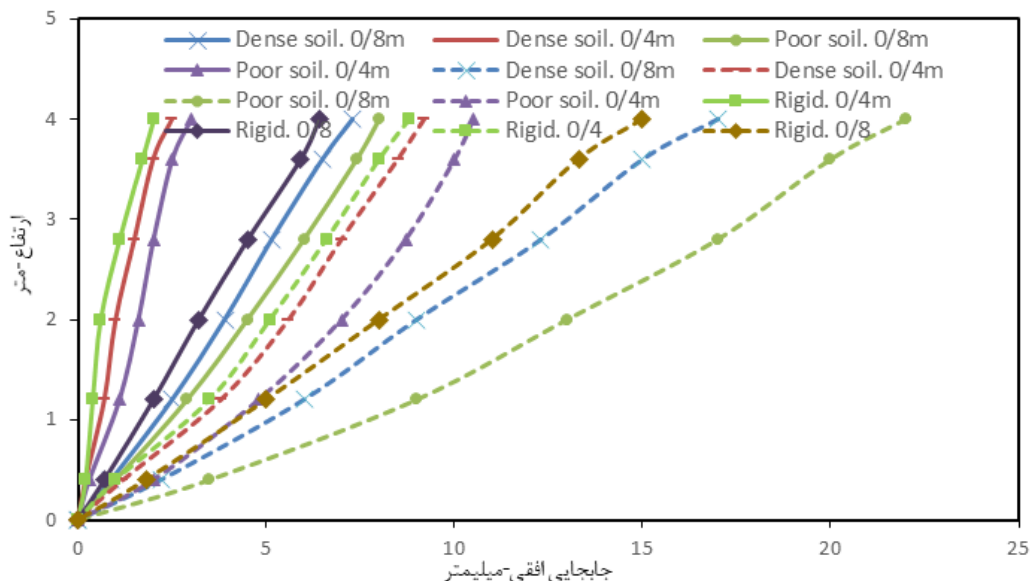
شکل ۵: مش بندی اجزاء محدود مدل تحقیق  
 Fig 5: Mesh of the finite element of the research model

خاک ضعیف، قابل مشاهده می باشد. در حالتی که بستر دیوار خاک مسلح به صورت صلب می باشد (در طراحی در نظر گرفته نشده) گوهی گسیختگی به صورت ذوزنقه ای می باشد و تا ارتفاع ۵/۰ متری از کف دیوار خاک مسلح ادامه پیدا می کند، و در حالتی که بستر دیوار خاک مسلح به صورت خاک ضعیف در نظر گرفته شده است، گوهی گسیختگی به شکل مثلثی می باشد و تا زیر پنجه ی دیوار ادامه می یابد، که این حاکی از تاثیر قابل توجه در نظریه ی بستر دیوار خاک مسلح در طراحی های می باشد.

هم چنین بار بیشینه ی مسلح کننده ها با کاهش فاصله ی بین ژئوگریدها کاهش قابل ملاحظه ای نشان می دهد، (شکل ۸). تغییر در بار به وجود آمده در مسلح کننده ها بین حالت بستر صلب و بستر متراکم به مراتب بیشتر از تغییر مابین حالات بستر خاک متراکم و بستر خاک ضعیف می باشد، که این خود نشان دهنده ی اختلاف زیاد نتایج مابین بستر صلب و بستر غیر صلب می باشد. در شکل ۶ گوه های گسیختگی برای دیوارهای با ارتفاع ۴ متر و با فاصله ی مسلح کننده ی ۰/۴ متر، در دو حالت بستر صلب و بستر با

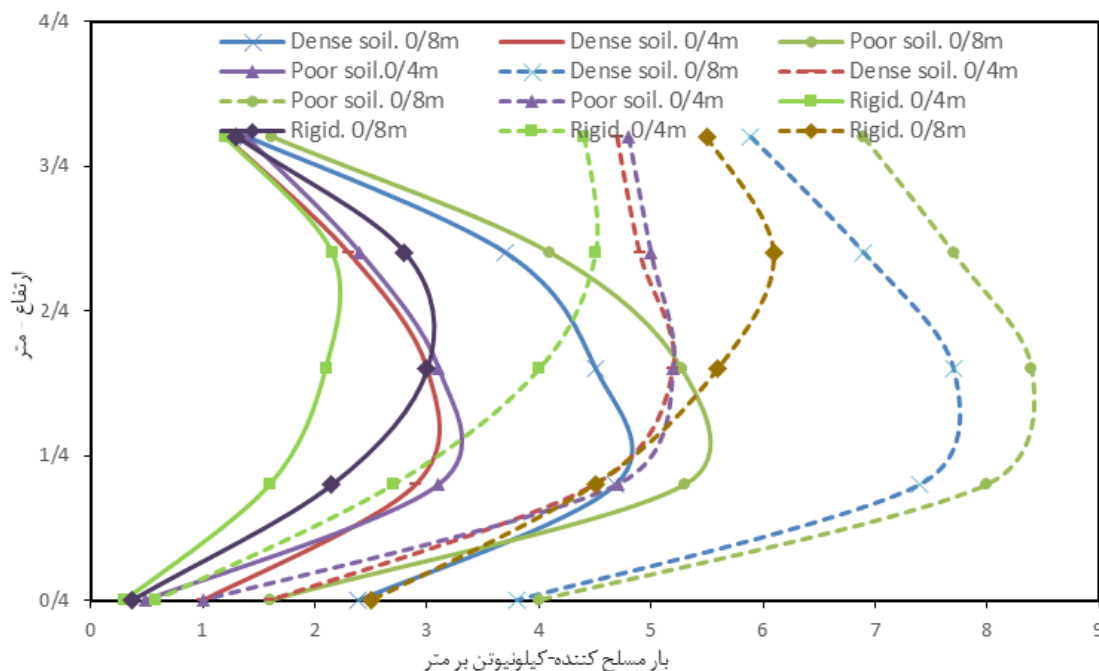


شکل ۶: گوهی گسیختگی الف) دیوار بر روی بستر صلب ب) دیوار بر روی بستر ضعیف  
 Fig 6: Wedge failure. Right: Wall on rigid bed. Left: wall on poor floor



شکل ۷: جابجایی جانبی نمای دیوار در بررسی ترکیبی فاصله مسلح‌کننده‌ها و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سرپار.

Fig 7 : Lateral displacement side view of the wall in the combined analysis of the spacer of reinforcement and the bed conditions. Continuous line: finish construction. Line: overhead.



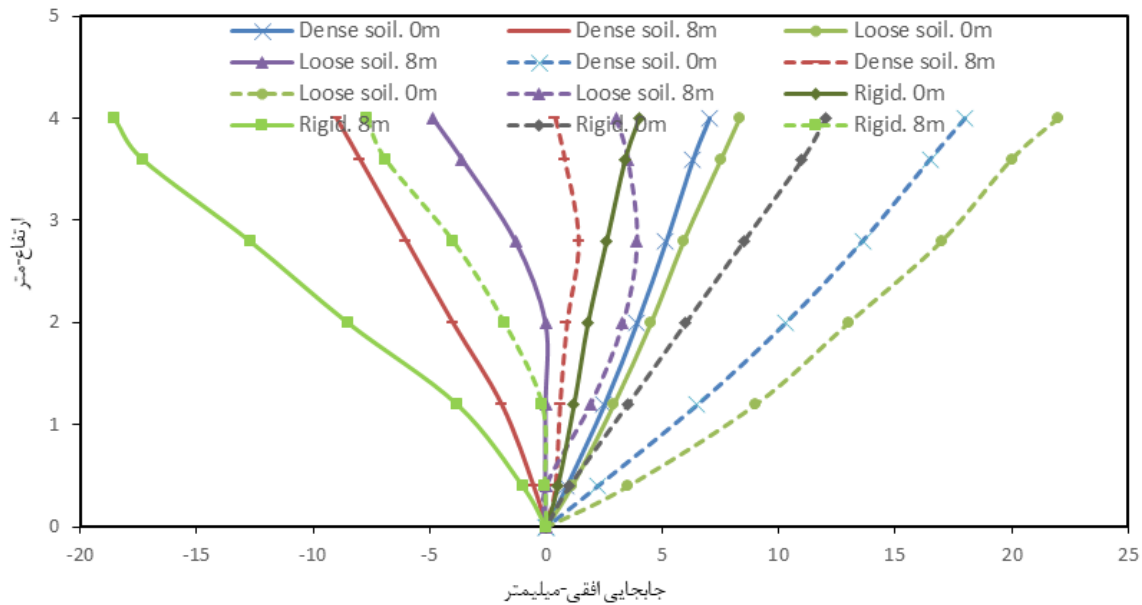
شکل ۸: بار بیشینه ژئوگرید در بررسی ترکیبی فاصله مسلح‌کننده‌ها و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سرپار.

Fig. 8: Maximum Geogrid Load in Combined Study of reinforcing Distance and bed Condition. Continuous line: finish construction. Line: overhead.

دلیل بر شرایط دوراز واقعیت در نظرگیری بستر صلب باشد و همین موضوع نیز در شکل ۱۰ برای اختلاف بار بیشینه‌ی مسلح‌کننده بین بستر صلب و بسترهای متراکم و ضعیف دیده می‌شود. هم‌چنین کاهش قابل ملاحظه بار مسلح‌کننده‌ها در اثر افزایش زاویه‌ی نمای دیوار به ویژه با توجه به مقاومت بستر به چشم می‌خورد. در شکل ۹ مقادیر منفی نمودار در محور افقی، به دلیل داشتن زاویه‌ی دیوار نسبت به راستای قائم می‌باشد.

## ۲-۵- تاثیر ترکیبی زاویه‌ی دیوار و شرایط بستر

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، افزایش زاویه‌ی نمای دیوار نسبت به راستای قائم از صفر درجه به ۸ درجه موجب کاهش جابجایی جانبی دیوار به ویژه در بستر با خاک ضعیف می‌شود، هم‌چنین با توجه به منحنی‌ها مابین منحنی شرایط بستر صلب و منحنی‌های بستر متراکم و بستر ضعیف در تمامی حالات، اختلاف محسوسی وجود دارد که می‌تواند

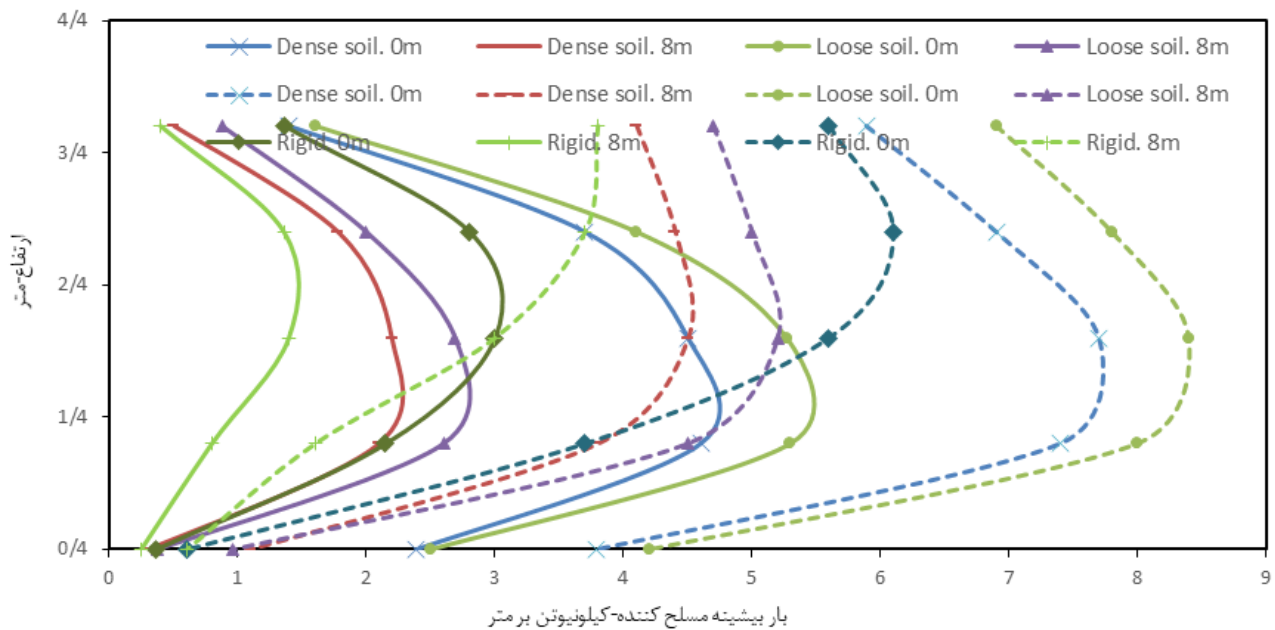


شکل ۹: جابجایی جانبی نمای دیوار در بررسی ترکیبی زاویه دیوار و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سربار.  
 Figure 9: lateral displacement Side view of the wall in the combination of wall angles and bed conditions. Continuous line: finish construction. Linear: Overhead

در بستر با خاک ماسه‌ای ضعیف موجب کاهش جابجایی افقی دیوار می‌گردد، اما این افزایش در نسبت طول مسلح‌کننده برای بسترهای خاک متراکم و صلب، به ویژه صلب، مقدار نامحسوسی می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۱۲ نیز افزایش چشمگیر بار بیشینه ژئوگرید با تغییر حالت بستر از صلب به متراکم و ضعیف قابل مشاهده می‌باشد.

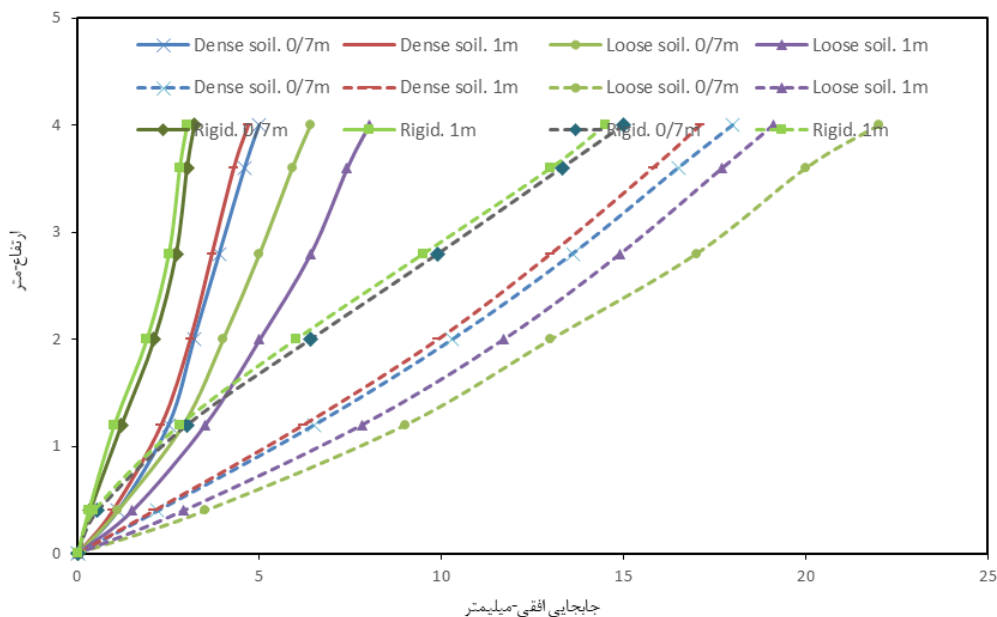
۳-۵- تاثیر ترکیبی نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار و شرایط بستر

اثر نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار (L/H)، بر جابجایی افقی دیوار (شکل ۱۱)، در دیوارهای با بستر خاک ماسه‌ای ضعیف مقداری محسوس می‌باشد که با افزایش مقاومت بستر این تاثیر کم‌رنگ‌تر می‌شود، یعنی افزایش نسبت طول مسلح‌کننده از ۷/۰ به ۱



شکل ۱۰: بار بیشینه ژئوگرید در بررسی ترکیبی زاویه دیوار و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سربار.  
 Figure 10: Maximum Geogrid Load in Combined Study of Wall Angle and bed Condition. Continuous line: finish construction. Linear: overhead

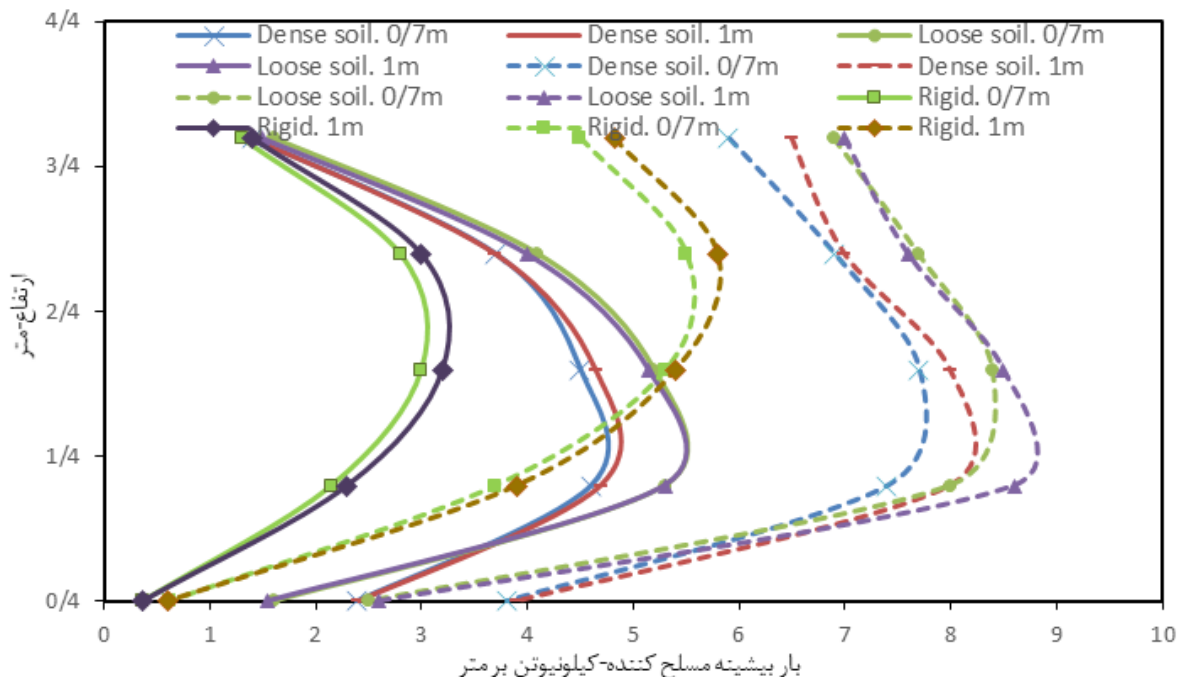




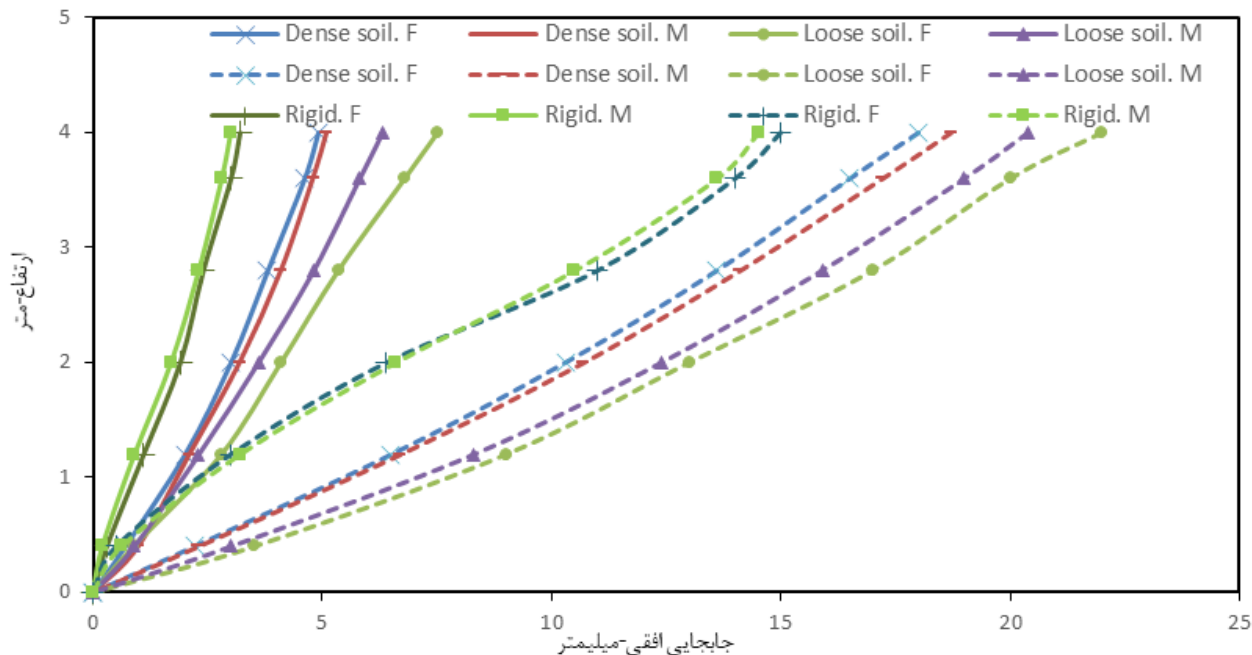
شکل ۱۱: جابجایی جانبی نمای دیوار در بررسی ترکیبی نسبت طول ژئوگرید و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سربار.  
 Figure 11: lateral displacement of Side view of the wall in the combined analysis of the ratio of ge-grid length and bed conditions. Continuous line: finish construction. Line: overhead.

در بستر با خاک ماسه‌ای ضعیف موجب اختلاف بیشتری در جابجایی افقی، به ویژه در قسمت تاج دیوار می‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نوع اتصال ژئوگرید به نمای دیوار (اتصال اصطکاکی یا مکانیکی) تاثیر چندانی در نتایج بدست آمده از جابجایی جانبی دیوار، بخصوص در بستر با خاک متراکم و بستر صلب، نخواهد گذاشت.

۴-۵- تاثیر ترکیبی نوع اتصال ژئوگرید به دیوار و شرایط بستر با توجه به شکل ۱۳ تغییر حالت اتصال ژئوگرید به نمای دیوار خاک مسلح از حالت اتصال اصطکاکی (در شکل اتصال F) به اتصال مکانیکی (در شکل اتصال M)، موجب کاهش بسیار اندکی در جابجایی افقی دیوار، در دیوار با بستر صلب و خاک متراکم می‌شود، اما این تغییر در نوع اتصال



شکل ۱۲: بار بیشینه ژئوگرید در بررسی ترکیبی زاویه دیوار و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سربار.  
 Figure 12: Maximum geogrid load in the combination of wall angles and bed conditions. Continuous line: finish construction. Line: overhead.



شکل ۱۳. جابجایی جانبی نمای دیوار در بررسی ترکیبی نوع اتصال ژئوگرید و شرایط بستر. خط ممتد: پایان ساخت. خط چین: سربار.  
 Figure 14: Lateral displacement side view of the wall in the combined of the wall toe and bed conditions. Continuous line: rigid toe wall in finish condition. China Line: Free Tail.

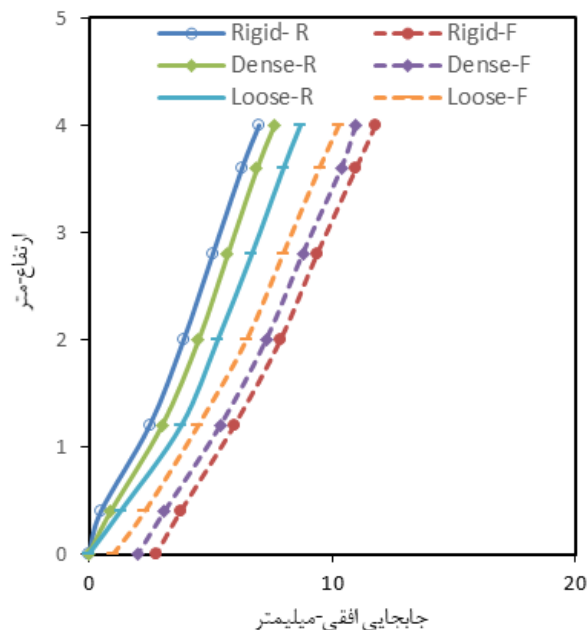
جابجایی عمودی در زیر نمای دیوار به علت وزن ناشی از بلوک‌های بتنی در نمای دیوار می‌باشد.

### ۶- نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعات پارامتریک متعددی بر روی دیوار خاک مسلح با فرض صلب بودن بستر دیوار و عدم در نظرگیری شرایط بستر صورت پذیرفته است، در صورتی که عملکرد پارامترهای دیوار تحت شرایط مقاومتی مختلف بستر می‌تواند متفاوت باشد. لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر زاویه‌ی نمای دیوار نسبت به راستای قائم، نوع اتصال ژئوگرید به نمای دیوار، نسبت طول به ارتفاع مسلح‌کننده، فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده‌ها و گیردار بودن و یا نبودن پنجه‌ی دیوار بر رفتار دیوار خاک مسلح تحت شرایط مقاومتی مختلف بستر پرداخته شده‌است.

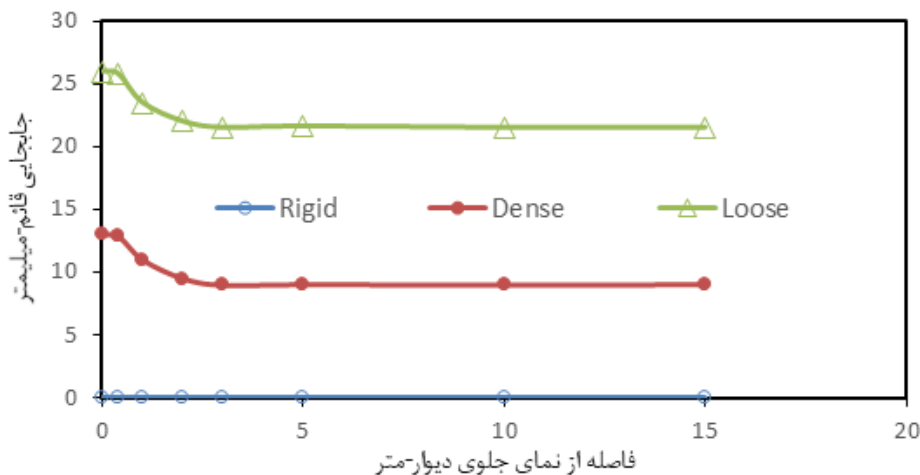
نتایج نشان دادند که در نظرگیری مقاومت بستر تاثیر مهمی بر نتایج حاصله از رفتار دیوار که شامل جابجایی افقی نما و نیز بار مسلح‌کننده‌ها می‌شود، دارد. در حالت کلی ضعیف شدن مقاومت بستر موجب افزایش جابجایی جانبی دیوار و بار بیشینه‌ی مسلح‌کننده‌ها می‌شود.

۵-۵- تاثیر ترکیبی شرایط گیرداری پنجه‌ی دیوار و شرایط بستر در دیوارهای خاک مسلح ژئوگریدی مورد بحث در این مقاله به همراه نمای بلوک مدولار، در شرایطی که بلوک نمای ردیف اول تا اولین تراز ژئوگرید، با وارد شدن نیروی افقی از جانب خاک ریز دیوار، نسبت به زمین دچار جابجایی نشوند، پنجه‌ی دیوار گیردار محسوب می‌شود و در غیر این صورت پنجه آزاد می‌باشد. با توجه به نتایج در شکل ۱۴، به هنگام گیردار بودن پنجه‌ی دیوار خاک مسلح، جابجایی افقی دیوار با ضعیف شدن بستر دیوار خاک مسلح افزایش می‌یابد، اما این روند با آزاد نمودن پنجه‌ی دیوار در جهت جابجایی افقی، نتیجه‌ی عکس خواهد داد و با ضعیف شدن مقاومت بستر دیوار جابجایی جانبی دیوار کاهش می‌یابد. هم‌چنین جابجایی پای دیوار در حالت‌هایی که پنجه‌ی دیوار گیردار است، صفر می‌باشد که با آزاد نمودن این گیرداری، پنجه‌ی دیوار جابجایی از خود نشان می‌دهد و مقدار این جابجایی با افزایش مقاومت بستر افزایش می‌یابد، یعنی هنگامی که بستر دیوار صلب می‌باشد، پنجه‌ی دیوار دچار بیشترین جابجایی خواهد شد. این امر می‌تواند به خاطر فرصت یافتن دیوار برای نشست یا جابجایی عمودی بیشتر (شکل ۱۵) به هنگام ضعیف‌تر شدن بستر باشد، که موجب تمایل کمتر جابجایی پنجه‌ی دیوار در جهت افقی در دیوارهای با پنجه‌ی آزاد می‌باشد. در شکل ۱۵ افزایش



شکل ۱۴. جابجایی جانبی نمای دیوار در بررسی ترکیبی گیرداری پنجه دیوار و شرایط بستر. خط ممتد: پنجه گیردار در شرایط پایان ساخت. خط چین: پنجه آزاد.

Figure 14 Lateral displacement side view of the wall in the combined of the wall toe and bed conditions. Continuous line: rigid toe wall in finish condition. China Line: Free Tail.



شکل ۱۵. جابجایی عمودی زیر دیوار برای حالات مختلف بستر در شرایط پایان ساخت

Fig 15: Vertical under-wall displacement for different bed conditions at the end of construction

می‌گردد اما این افزایش در بستر خاک ماسه‌ای متراکم و بستر صلب، موجب تغییر ناچیزی در رفتار دیوار می‌گردد. توصیه‌ی FHWA [۱۹] مبنی بر در نظر گرفتن مقدار ۷/۰٪ برای نسبت طول مسلح‌کننده، برای بستر با مقاومت بالا، مقدار مناسبی است.

تغییر در نوع اتصال ژئوگرید (اتصال اصطکاکی یا مکانیکی) اختلاف ناچیزی در رفتار دیوار را سبب گردید، اما در دیوارهای با بستر ضعیف، اتصال اصطکاکی مقداری جابجایی جانبی بیشتر نسبت به اتصال مکانیکی از خود نشان می‌دهد.

از میان پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، فاصله‌ی بین مسلح‌کننده‌ها، زاویه‌ی نمای دیوار نسبت به راستای قائم و نیز شرایط گیرداری پنجه‌ی دیوار پارامترهایی هستند که بیشترین تاثیر را در رفتار دیوار دارند. کاهش فاصله‌ی بین مسلح‌کننده افزایش زاویه‌ی نمای دیوار تا ۸ درجه، در بستر با خاک ماسه‌ای سست، به ویژه تحت شرایط سربار تاثیر قابل توجهی بر کاهش جابجایی جانبی دیوار خواهد گذاشت.

افزایش نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار (L/H)، از ۷/۰٪ به یک، در بستر با مقاومت پایین، موجب کاهش جابجایی جانبی دیوار

numerical investigation into the behavior of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(5) (2016) 435-444.

[9] S. Mirmoradi, M. Ehrlich, Numerical evaluation of the behavior of GRS walls with segmental block facing under working stress conditions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3) (2014) 401-409.

[10] 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(2) (2011) 116-129.

[11] H. Ling, D. Leshchinsky, Finite element parametric study of the behavior of segmental block reinforced-soil retaining walls, *Geosynthetics International*, 10(3) (2003) 77-94.

[12] Y. Yu, I.P. Damians, R.J. Bathurst, Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions, *Computers and Geotechnics*, 65 (2015) 164-174.

[13] R. Brinkgreve, *Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: 2D-Version 8:[user's Guide]*, Balkema, 2006.

[14] R.J. Bathurst, D. Walters, N. Vlachopoulos, P. Burgess, T. Allen, Full scale testing of geosynthetic reinforced walls, in: *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics*, 2000, pp. 201-217.

[15] K. Hatami, R.J. Bathurst, Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4) (2005) 1066-1085.

[16] K. Hatami, R.J. Bathurst, Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 132(6) (2006) 673-684.

[18] N. Janbu, Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests, in: *Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering*, 1963, pp. 19-25.

[19] FHWA, *Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*, Volume I, (2010).

جابجایی جانبی دیوار به هنگام گیردار نمودن پنجه‌ی دیوار، در دیوار با بستر خاک ماسه‌ای سست بیشترین مقدار را دارد، اما هنگامی که پنجه‌ی دیوار خاک مسلح در جهت افقی آزاد می‌باشد، جابجایی جانبی دیوار در بستر با خاک ضعیف کمترین مقدار و در بستر صلب بیشترین مقدار می‌باشد، و دلیل این امر می‌تواند به خاطر فرصت یافتن دیوار برای نشست یا جابجایی عمودی بیشتر، به هنگام ضعیف‌تر شدن بستر باشد، که موجب تمایل کمتر جابجایی پنجه‌ی دیوار در جهت افقی در دیوارهای با پنجه‌ی آزاد می‌باشد.

## مراجع

[1] K. Kazimierowicz-Frankowska, A case study of a geosynthetic reinforced wall with wrap-around facing, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(1) (2005) 107-115.

[2] C. Yoo, S.-B. 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.

[3] G. Yang, B. Zhang, P. Lv, Q. Zhou, Behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall with concrete-rigid facing, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5) (2009) 350-356.

[4] M. Ehrlich, S. Mirmoradi, Evaluation of the effects of facing stiffness and toe resistance on the behavior of GRS walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 40 (2013) 28-36.

[5] S. Mirmoradi, M. Ehrlich, Effects of facing, reinforcement stiffness, toe resistance, and height on reinforced walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1) (2017) 67-76.

[6] S. Mirmoradi, M. Ehrlich, Evaluation of the effect of toe restraint on GRS walls, *Transportation Geotechnics*, 8 (2016) 35-44.

[7] S. Mirmoradi, M. Ehrlich, C. Dieguez, Evaluation of the combined effect of toe resistance and facing inclination on the behavior of GRS walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3) (2016) 287-294.

[8] O. Rahmouni, A. Mabrouki, D. Benmeddour, M. Mellas, A

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Vahed Ghiasia, Amin Farzanb, Parametric Investigation of Geosynthetics Reinforced Soil Wall Seated on Compressible Bed, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)231-242.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13337.5383

