

# بررسی تغییر شکل پذیری دیوار خاک مسلح به ارتفاع ۱۷ متر در شرایط لرزه‌ای

کاظم فخاریان<sup>۱</sup>؛ سید حسام الدین قدرتیان<sup>۲</sup>

## چکیده

در این مقاله به بررسی لرزه‌ای اثر پارامترهای مختلف بر روی تغییر شکل دیوار خاک مسلح به ارتفاع ۱۷ متر در شرایط کرنش‌های بزرگ (large strain) پرداخته شده است. با تغییر در خصوصیات مقاومتی (زاویه اصطکاک و چسبندگی) خاک بستر و تغییر در مشخصات مسلح‌کننده‌ها (طول و سختی)، روند تغییرات در مقادیر تغییر شکل افقی نما و قائم پای دیوار بررسی شده است.

هدف از این بررسی ایجاد عملکرد هر چه بهتر این نوع دیوارها (با ارتفاع بلند) و موارد مشابه آن در شرایط لرزه-ای است. آنالیز عددی به روش تفاضل محدود و توسط نرم‌افزار FLAC به صورت دو بعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای انجام شده است. مدل عددی در تراز پایه (پای فونداسیون) توسط یک موج هارمونیک با دامنه متغیر و فرکانس ۳ هرتز به لرزه در می‌آید. نتایج بدست آمده حاکی از این است که با انتخاب خاک بستر با مقاومت برشی بالا و مسلح‌کننده‌های فلزی (تسمه) با طول مناسب بر اساس ارتفاع دیوار، تغییر شکل‌های دیوار به میزان قابل توجهی کاهش یافته و موجب عملکرد مناسب دیوار در شرایط لرزه‌ای می‌گردد.

## کلمات کلیدی

دیوار خاک مسلح، ارتفاع بلند، تحلیل لرزه‌ای، مدل عددی، تفاضل محدود، تغییر شکل پذیری، چسبندگی خاک بستر، زاویه اصطکاک خاک بستر، سختی و طول مسلح‌کننده.

## *Investigation of Deformation Characteristics of a 17-m Reinforced Earth Wall Under Seismic Conditions*

Author's Names; K. Fakharian ; S.H. Ghodratiان

### ABSTRACT

This paper presents the effect of various parameters on deformation characteristics of a 17-m reinforced wall under seismic conditions with consideration of large strains. The foundation soil strength parameters (angle of internal friction and cohesion) and reinforcing elements (length and stiffness) are varied to investigate their effects on horizontal facing deformation and vertical displacement of the wall toe. The main objective of this research is to investigate the optimized performance of such (high) walls under seismic conditions. Numerical 2-D plane-strain analysis with a finite difference scheme using FLAC-2D is performed to achieve the objectives. A variable amplitude harmonic wave with a 3-Hz frequency is applied to the wall foundation. The results show that an improved foundation soil properties of suitable shear strength and steel reinforcement belts with proper length (with respect to the wall height), the wall deformations are significantly reduced and the wall performance under seismic conditions is improved.

<sup>۱</sup> استادیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: [kfakhari@aut.ac.ir](mailto:kfakhari@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: [h.ghodratiان@gmail.com](mailto:h.ghodratiان@gmail.com)



## KEYWORDS

Reinforced earth wall, tall wall, seismic analysis, numerical model, finite difference, deformation characteristics, foundation soil cohesion and friction, reinforcement length and stiffness.

در امریکا ساخته شده است. این دیوار توسط شرکت خاک مسلح Vienna, Virginia امریکا طراحی شده و ساخت آن از آگوست ۱۹۹۸ تا آوریل ۱۹۹۹ ادامه داشته است. این دیوار خاک مسلح بلندترین دیوار ساخته شده توسط گروه INDOT است. شکل (۱) مقطع ابزارگذاری شده این دیوار را نشان می‌دهد.

این دیوار شامل ۱۱ بلوک با ضخامت ۱۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۵ متر و همچنین ۲۲ ردیف مسلح‌کننده (تسمه فلزی) با فاصله قائم ۰/۷۵ متر و فاصله افقی متغیر بین ۰/۳ متر در پایین و ۱ متر در بالای دیوار است. بیشتر مسلح‌کننده‌ها طول ۱۱/۹ متر معادل 0.7H دارند. به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک فونداسیون، طول ۵ لایه پایینی از مسلح‌کننده‌ها تا ۱۵/۵ متر افزایش داده شده است.

خاک قسمت مسلح‌شده (Reinforced Soil) ماسه شن‌دار بدانه‌بندی شده است که در سیستم طبقه‌بندی متحد در ردیف SP و در سیستم طبقه‌بندی AASHTO در ردیف A-1-a قرار گرفته و دارای وزن واحد حجم متوسط  $20.8 \text{ kN/m}^3$  و رطوبت متوسط 4.8 درصد است. خاک نگه داشته شده (Retained Soil) ماسه خوب دانه‌بندی شده همراه با سیلت است که در سیستم‌های طبقه‌بندی متحد و AASHTO به ترتیب در ردیف SW-SM و A-1-b قرار گرفته و دارای وزن واحد حجم  $19.7 \text{ kN/m}^3$  و رطوبت متوسط ۵/۸ درصد است.

بر اساس ۱۲ آزمایش تمام مقیاس سه محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌شده فشاری روی نمونه‌هایی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر که ۶ نمونه روی خاکریز مسلح شده و ۶ نمونه روی خاک نگه‌داشته شده انجام شد، مقدار  $\Phi$  برای خاکریزهای مسلح شده و خاک نگه‌داشته شده به ترتیب ۳۸ و ۳۵/۲ درجه بدست آمد. مقدار چسبندگی برای هر دو حالت صفر ارزیابی شده است.

نوار مسلح‌کننده‌ها از گالوانیزه مدل Steel 65 با  $f_u = 552 \text{ MPa}$  و  $f_y = 448 \text{ MPa}$  بوده که فاصله دنده‌ها در نوار فلزی متغیر بین ۵۰ تا ۱۲۵ میلی‌متر است. عرض مقطع مسلح‌کننده ۵۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۴ میلی‌متر است. بر اساس نتایج آزمایشهای کشش روی ۳ نوار مسلح-کننده  $T_u = 143 \text{ kN/m}$  و  $T_y = 107 \text{ kN/m}$  بدست آمده است. مدول مسلح‌کننده‌ها  $E = 200 \times 10^6 \text{ kPa}$  برای تخمین کرنش مسلح‌کننده‌ها ارائه شده است.

## ۱- مقدمه

با مروری بر تاریخچه مطالعات صورت گرفته بر روی سازه‌های خاک مسلح مشاهده می‌شود که اغلب مطالعات صورت گرفته نظیر (Bathurst and Hatami, 1998)، (Bathurst and Hatami, 1999) و (Bahurst and Alfaro, 1996) بر دیوارهای خاک مسلح و یا مجتهدی (۱۳۸۰)، حسین‌زاده (۱۳۸۳) و (Fakharian and Hosseinzadeh, 2007) در کوله پلها، با اینکه مطالعات در هر دو شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهادهای و الگوهای مناسبی هم برای طراحی ارائه شده است، ولی اغلب محدود به ارتفاع‌های نسبتاً کوتاه و معمول بوده (تا حدود ۸ متر) و تحقیق زیادی روی دیوارهای بلند، بخصوص در شرایط لرزه‌ای صورت نگرفته است. پس بر اساس نیاز در کلان شهرهایی مانند تهران به این نوع دیوارها و لرزه‌خیز بودن اکثر نقاط کشور، بررسی لرزه‌ای دیوارهای بلند خاک مسلح از اهمیت خاصی برخوردار است.

طراحی دیوارهای بلند خاک مسلح به مانند طراحی همین دیوارها با ارتفاع کوتاهتر است، اما باید روی عملکرد این دیوارها به‌خصوص در بخش مطالعات محلی قبل از طراحی و استفاده از مشاهدات ابزارگذاری شده در حین ساخت، توجه لازم مبذول گردد تا عملکرد قابل قبولی برای این سازه‌ها فراهم شود. در این راستا انتخاب مصالح و نوع مسلح‌کننده‌ها بسیار تاثیرگذار بوده و نقش مهمی را در طراحی و پایداری ایفا می‌کند.

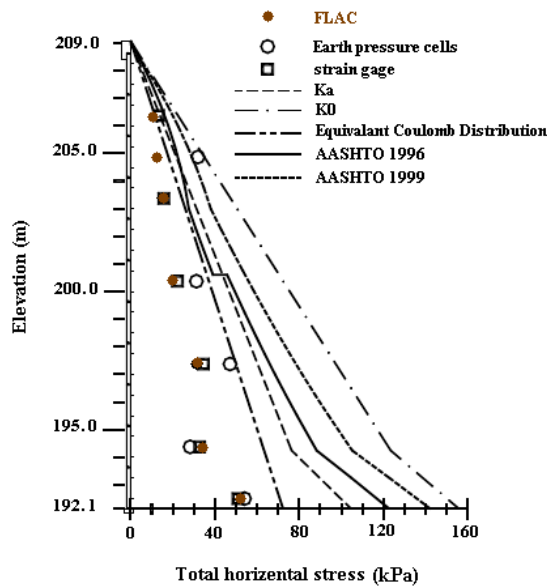
در این مقاله با ساخت مدل عددی دیوار ۱۷ متری که در ایندیانا امریکا توسط گروه INDOT ساخته شده و توسط (Runser et al., 2001) پایش شده است، اثر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک بستر و همچنین اثر سختی و طول مسلح-کننده‌ها در شرایط لرزه‌ای بر روی تغییر شکل‌های افقی نما و تغییر شکل‌های قائم پای بلوک نمای این دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نحوه کنترل صحت عملکرد مدل عددی در شرایط استاتیکی و دینامیکی نیز به طور مختصر ارائه شده است.

## ۲- خصوصیات دیوار ۱۷ متری (Runser et al., 2001)

برای این مطالعه، دیوار خاک مسلح Minnow Creek در نظر گرفته شده که توسط گروه INDOT در Logansport، ایندیانا

### ۳- مدل عددی استاتیکی

قبل از بررسی لرنه‌های دیوار، تحلیل استاتیکی بر روی آن انجام و با نتایج ابزارگذاری و پایش دیوار اصلی مقایسه شد. اشکال (۲) و (۳) به ترتیب توزیع فشار افقی پشت توده خاک مسلح و پشت بلوک نما را نشان می‌دهد. در این اشکال پیداست که تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از FLAC و نتایج ابزار وجود دارد. جزئیات بیشتر در مورد مقایسه‌های صورت گرفته در [۲] ارائه شده‌است.



شکل (۳): مقایسه توزیع فشار افقی پشت بلوک نما در دیوار Minnow creek

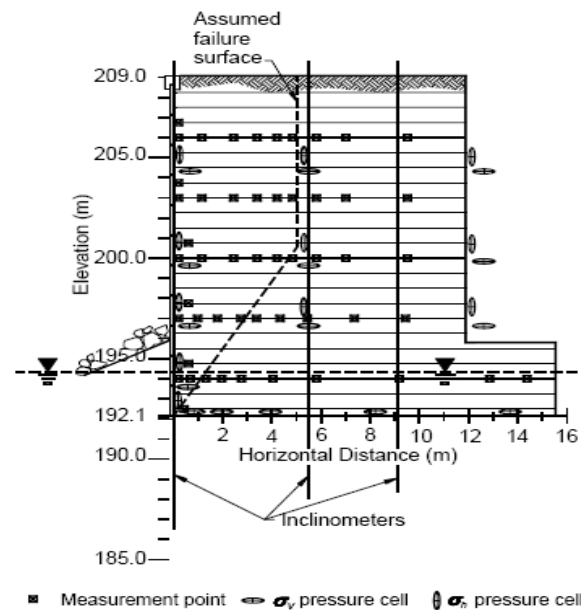
### ۴- مدل عددی دینامیکی

#### ۴-۱- شبکه‌بندی عددی و مشخصات مرزها

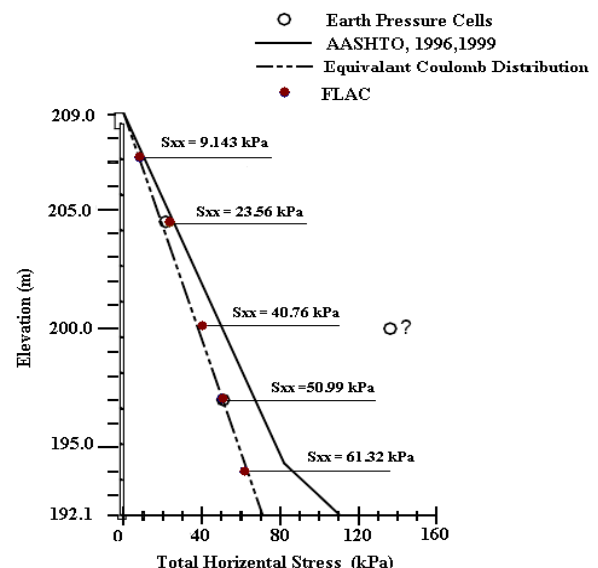
تحلیل دینامیکی مدل دیوار بلند خاک مسلح، تحت حرکت زمین توسط یک موج هارمونیک با دامنه متغیر شبیه‌سازی شده است. تمامی مشخصات هندسی و خواص مصالح بر اساس آنچه که در خصوصیات دیوار اصلی شرح داده شد در مدل عددی ملحوظ گردیده‌است. تنها از مدل‌کردن تراز آب در سیستم صرف‌نظر شده‌است. در شکل (۴) شبکه تقاضل محدود این دیوار به وضوح نمایان‌است. برای مدل عددی باید یک عرض محدود برای خاکریز مشخص گردد. در این مدل عرض خاکریز ۴۰ متر لحاظ شده که از پشت بلوک نما امتداد می‌یابد. برای کنترل و جذب موج و عدم بازگشت مجدد موج اعمالی به سیستم از مرزهای free-field در مرز سمت چپ (ارتفاع پی) و مرز سمت راست (ارتفاع پی و دیوار) مدل استفاده شده‌است. در مرز سمت راست شبکه، عرضی به طول ۱۰ متر با دادن چسبندگی بالا بعنوان قسمت تسلیم نشده انتخاب می‌گردد، چرا که FLAC اجازه نمی‌دهد مرز free-field با مصالح تسلیم شده در ارتباط باشد.

#### ۴-۲- مشخصات مصالح

بر اساس آزمایش‌های سه محوری صورت گرفته، مصالح خاکی بصورت الاستو پلاستیک با معیار خرابی موهر - کولمب مدل شده‌است. برای ساده‌سازی در مدل، مدول کشسانی خاک در طول تحلیل ثابت نگه داشته شده‌است. اما در شرایط



شکل (۱): مقطع ابزارگذاری شده دیوار خاک مسلح Minnow Creek [۲]



شکل (۲): توزیع فشار افقی کلی در پشت توده خاک مسلح دیوار Minnow creek

یک زاویه اصطکاک بزرگ و چسبندگی صفر نیز مدل شده است.

#### ۴-۴- بار لرزه‌ای

بار لرزه‌ای به نقاط پایین مدل وارد می‌گردد. این شتاب در حالی وارد می‌شود که سیستم در حالت استاتیکی به تعادل رسیده و تغییر شکل‌های مربوط به تمام نقاط مدل صفر گردیده است تا به این ترتیب تغییر شکل‌های حاصل شده از تحلیل دینامیکی به‌طور خالص مربوط به این حالت باشد. اما نیروهای حاصل شده از تحلیل دینامیکی، ترکیبی از حالت استاتیکی و دینامیکی است زیرا با صفر کردن تغییر شکل‌ها، نیروها صفر نمی‌شود و همان نیروهای انتهایی ساخت باقی می‌ماند. شتابی که برای این دیوار در نظر گرفته شده موجی هارمونیک با دامنه متغیر و فرکانس 3 Hz بوده که ماکزیمم شتاب آن 0.2g است. معادله ریاضی شتاب ورودی بصورت زیر است:

$$\ddot{u} = \sqrt{\beta} e^{-\alpha t^\zeta} \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

که در این معادله  $\zeta = 12$ ،  $\beta = 55$ ،  $\alpha = 5.5$  و  $f$  فرکانس شتاب ورودی است. فرکانس انتخاب شده در حدود فرکانس غالب زلزله‌های طبیعی است. معادله بالا توسط زبان برنامه نویسی FISH به مدل داده شده است. شکل (۵) این شتاب را که در FLAC مدل شده نشان می‌دهد.

#### ۵- بررسی صحت عملکرد مدل در شرایط لرزه‌ای

از آنجا که هیچ‌گونه مطالعات لرزه‌ای بر روی دیوار Minnow Creek صورت نگرفته، جهت اثبات درستی نتایج عددی به دست آمده در تحلیل‌های لرزه‌ای، دیوار ۱ متری RMC (Royal Military College) که توسط Bathurst et al. (2001) به کمک میز لرزه مورد مطالعه لرزه‌ای قرار گرفته است با نرم-افزار FLAC مدل شده و نتایج آن با نتایج این میز مقایسه شده است. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب شبکه تغییر شکل یافته تفاضل محدود دیوار RMC را در شرایط پایه مفصلی و پایه لغزشی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۸) و شکل (۹) نیز مقایسه تغییر شکل‌های افقی بالای دیوار را در دو شرایط پایه مفصلی و پایه لغزشی نمایش می‌دهد. قابل ذکر است که کلیه پارامترها از قبیل خصوصیات و مدل رفتاری خاک (خاکریز مسلح شده، خاکریز نگه داشته شده و خاک پی) و موج اعمال شده برای لرزش مطابق با کار Bathurst et al. (2001) است. از روی شکل‌ها پیداست که تطابق خوبی بین نتایج عددی و میز لرزه وجود دارد. جزئیات بیشتر مربوط به مدل عددی دیوار ۱ متری RMC و مقایسه نتایج بدست آمده در [۱] و [۲] آمده

دینامیکی برای مدل کردن رفتار رفت و برگشتی زلزله از مدل هیسترتیک [۱] استفاده شده است. از آنجا که مشخصات هیسترتیک خاک در دست نیست، برای مشخص شدن پارامترهای این مدل لازم است  $G_{max}$  تعیین شود. مدول برشی ابتدایی خاک ( $G_{max}$ ) بوسیله رابطه تجربی [۱۰] بصورت زیر پیشنهاد شده است.

$$G_{max} = 21.7 \times K_{2max} \times P_a \times [\sigma_a / P_a] \quad (1)$$

$K_{2max}$  (ضریب مدول برشی دینامیکی خاک) که به جنس و نوع خاک بستگی دارد جهت رفتار مناسب‌تر دیوار ۲۰۰ لحاظ شده است. مدل هیسترتیک فقط در خاک مسلح شده استفاده شد چرا که تمرکز تنش در این قسمت زیاد است. در خاک نگه داشته شده مانند حالت استاتیکی از مدل موه‌ر-کولمب خطی استفاده شده است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات مصالح خاکی ارائه شده است که مقادیر مربوط به مشخصات الاستیک خاک (مدول کشسانی و ضریب پواسون)، مشخصات خاک پی در شرایط استاتیکی و خصوصیات دینامیکی خاک مسلح شده به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی فرضی می‌باشد.

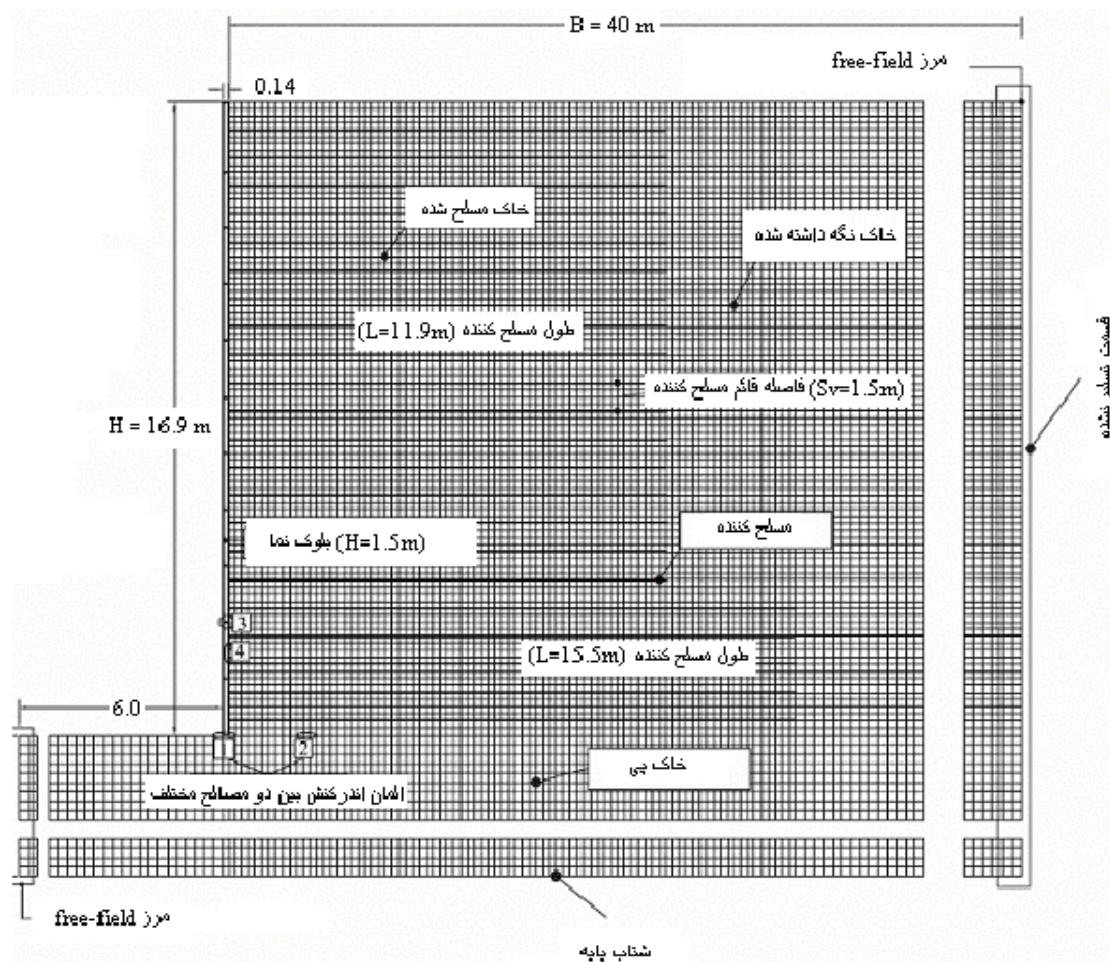
#### ۴-۳- مدل مسلح کننده، سیستم نما و المانهای

##### Interface

لایه‌های مسلح کننده با استفاده از المانهای الاستو پلاستیک خطی کابل با مقاومت فشاری ناچیز مدل شده‌اند. سختی مسلح-کننده‌ها بر اساس تعداد تسمه‌ها در جهت افقی تعیین می‌شود. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای و متغیر بودن فاصله افقی تسمه‌ها سختی هر لایه متفاوت با لایه دیگر است. مقاومت کششی تسلیم تسمه‌ها نیز 107 kN/m است که جهت کنترل پارگی در تسمه‌ها به مدل داده می‌شود.

اندرکنش بین مسلح کننده‌ها و خاک نیز به کمک Grout Material در FLAC با زاویه اصطکاک معادل 28.5 درجه مدل شده است. سختی اتصال  $K_b = 6.24e3 \sim 1.37e5$  kPa و مقاومت چسبندگی اتصال  $S_b = 0.5$  kPa برای مدل کردن چسبندگی مسلح کننده و خاک در نظر گرفته شده است. نمای دیوار Minnow Creek به صورت بلوکهای بتنی ساخته شده که با دانسیته  $2.4 \text{ t/m}^3$ ، مدول برشی  $G=3e5$  kPa و مدول بالک  $b=0.384e6$  kPa با رفتاری الاستیک مدل می‌شود. قابل ذکر است که مسلح کننده‌ها به بلوک نما متصل شده‌اند.

سطح تماس بین بلوکها، بین خاک پی و بلوک و همچنین خاک پشت نما با بلوک با المانهای Interface که ماهیت اصطکاک دارد مدل شده است. از طرفی از آنجایی که پای دیوار به صورت مفصلی عمل می‌کند این سطح تماس با در نظر گرفتن

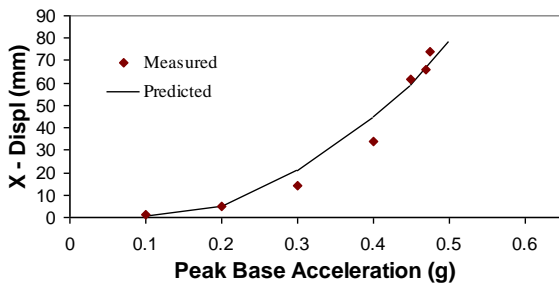


شکل (۴): هندسه، شرایط مرزی، آرایش مسلح‌کننده‌ها و موقعیت المان‌های Interface و شبکه تقاضل محدود دیوار بلند خاک مسلح در شرایط لرزه‌ای

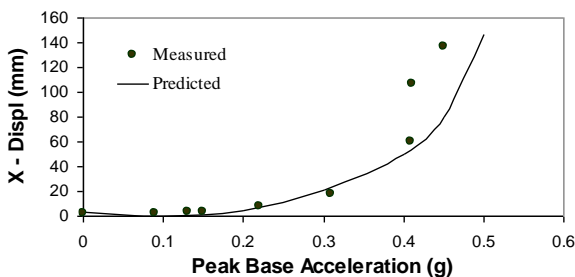
جدول (۱): خصوصیات خاکریز مسلح شده، نگه‌داشته شده و بستر (ورودی برای FLAC)

خصوصیات مصالح خاکی در شرایط استاتیکی					
$\Phi$	C (kPa)	$\nu$	E (MPa)	$\gamma$	
۲۸	۰	۲۵	۶۰	۲۰/۸	خاک مسلح‌شده
		۰/			
/۳	۰	/۳	۴۰	۱۹/۷	خاک نگه‌داشته شده
۳۵		۰			
۲۳	۳۰	۲۵	۵۰	۱۸	خاک پی
		۰/			
خصوصیات مصالح خاکی در شرایط دینامیکی					
	C (kPa)	$\nu$	E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	

		۳	۲۵	۶۰	۲۰	خاک مسلح شده
	۵		۰/			



شکل (۸): تغییر شکل افقی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در بالای نما در مقابل شتاب ورودی در شرایط پایه مفصلی



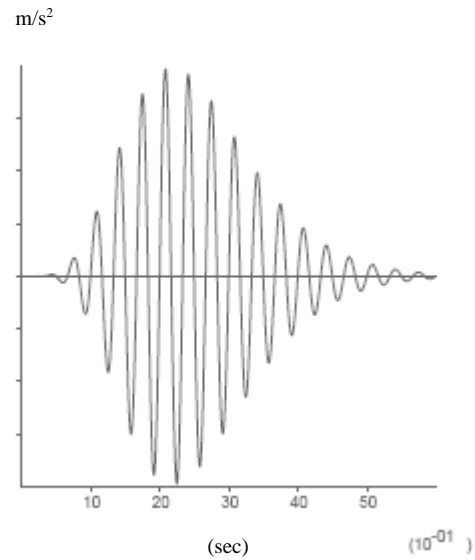
شکل (۹): تغییر شکل افقی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در بالای نما در مقابل شتاب ورودی در شرایط پایه لغزشی

## ۶ - نتایج تحلیل لرزه‌ای دیوار ۱۷ متری

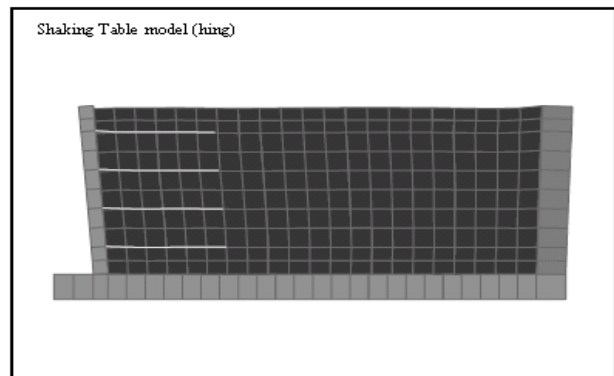
نتایج تحلیل حاصل از اثر اعمال موج هارمونیک روی دیوار خاک مسلح Minnow Creek بر روی تغییر شکل‌های افقی و قائم دیوار و همچنین تغییرات نیروی کششی ماکزیم مسلح-کننده‌ها بررسی شده است.

شکل (۱۰) شبکه تغییر شکل‌یافته این دیوار را در پایان شتاب پایه 0.2g نشان می‌دهد. به طوری که در شکل مشاهده می‌شود در انتهای بخش مسلح شده نشست قائم بالای دیوار بیشتر می‌شود. همچنین در این شکل پای دیوار با مقیاس بزرگتری ارائه شده است.

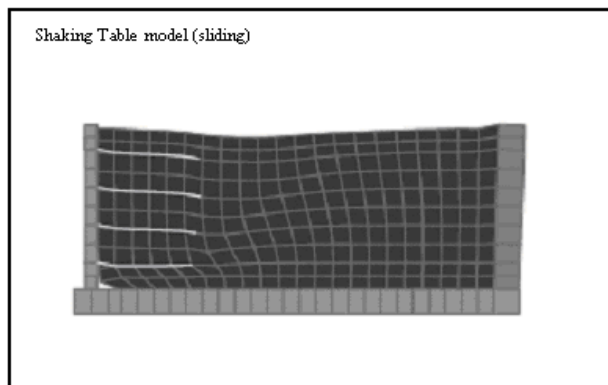
اشکال (۱۱) و (۱۲) به ترتیب روند تغییر شکل‌های افقی بلوک نما و قائم پای دیوار را نشان می‌دهد. از آنجا که قبل از تحلیل دینامیکی کلیه تغییر شکل‌های ناشی از تحلیل استاتیکی صفر شده است، تغییر شکل‌های بدست آمده در تحلیل دینامیکی مختص شرایط دینامیکی است. شکل (۱۳) تغییر شکل‌های افقی نمای دیوار را در طول ارتفاع دیوار برای شرایط استاتیکی، دینامیکی و مجموع نشان می‌دهد. با اینکه کلیه تغییر شکل‌ها پیش از تحلیل دینامیکی صفر می‌شود، اما نیروی هر



شکل (۵): موج ورودی اعمال شده برای تحلیل لرزه‌ای مدل عددی دیوار خاک مسلح Minnow creek



شکل (۶): شبکه تفاضل محدود میز لرزه در پایان شتاب ماکزیم پایه 0.5g در شرایط پایه مفصلی (مدل FLAC)



شکل (۷): شبکه تفاضل محدود میز لرزه در پایان شتاب ماکزیم پایه 0.5g در شرایط پایه لغزشی (مدل FLAC)

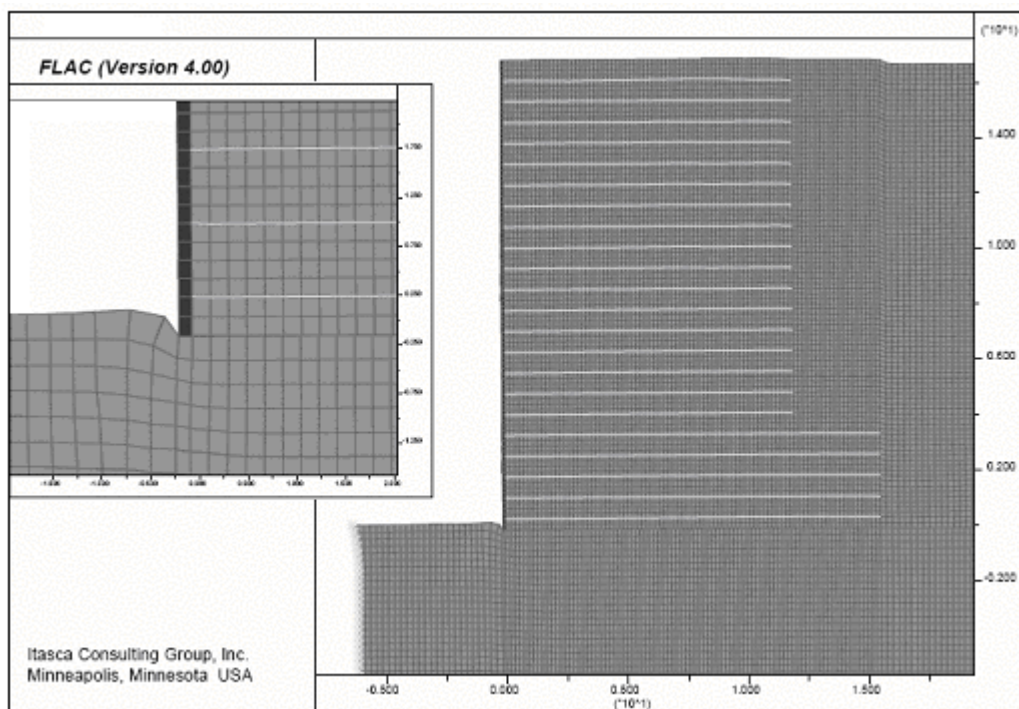
بررسی قرار گرفته است. با تغییر چسبندگی خاک بستر از kPa ۰ تا ۶۰ و همچنین تغییر زاویه اصطکاک خاک بستر از ۲۵ تا ۵۰ درجه این بررسی به طور جداگانه انجام شده است.

شکل (۱۵) روند تغییر شکل افقی نما را در طول ارتفاع دیوار با تغییر چسبندگی خاک بستر نشان می‌دهد. با توجه به شکل پیداست که با افزایش چسبندگی خاک بستر تغییر شکل‌های افقی نما به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. روند تغییرات نشان می‌دهد چسبندگی خاک بستر بسیار اثرگذار است. بطوریکه در بیشترین مقادیر تا ۳/۶ برابر کاهش مشاهده می‌شود. شکل (۱۶) نیز روند تغییر شکل‌های قائم پای بلوک دیوار را نشان می‌دهد. با افزایش چسبندگی از ۰ تا ۶۰ kPa تغییر شکل قائم پای دیوار ۳/۹ برابر کاهش می‌یابد. از مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که افزایش چسبندگی خاک بستر بر پایداری لرزه‌ای دیوار بسیار موثر است.

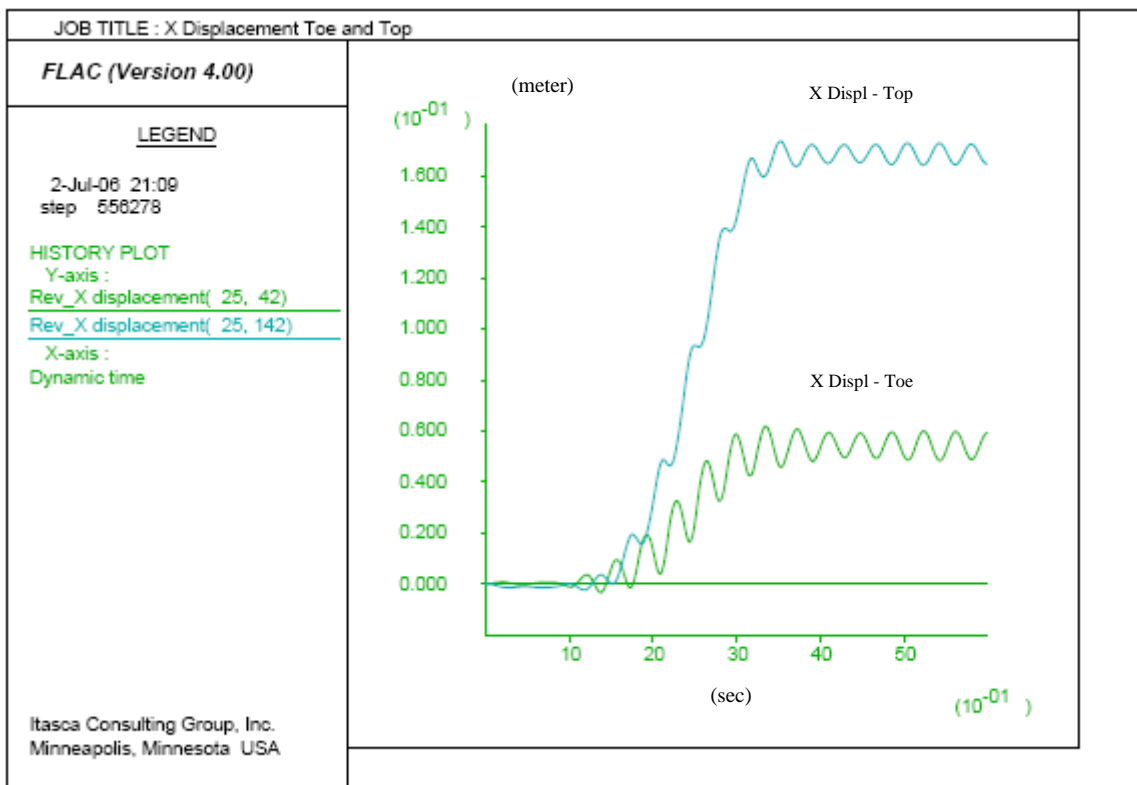
مسلح‌کننده شامل نیروی استاتیکی آن در تحلیل دینامیکی باقی می‌ماند. شکل (۱۴) تغییرات نیروی کششی ماکزیم مسلح-کننده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که از تراز ۲۰۰متری به بالا تغییرات در نیروی کششی ماکزیم مسلح‌کننده‌ها در اثر اعمال بار لرزه‌ای اندک است و افزایش نیرو در مسلح‌کننده‌ها به علت اعمال نیروی دینامیکی زلزله عمدتاً در نیمه پائینی دیوار اعمال می‌گردد.

## ۷- اثر پارامترهای مقاومتی خاک بستر بر رفتار لرزه‌ای

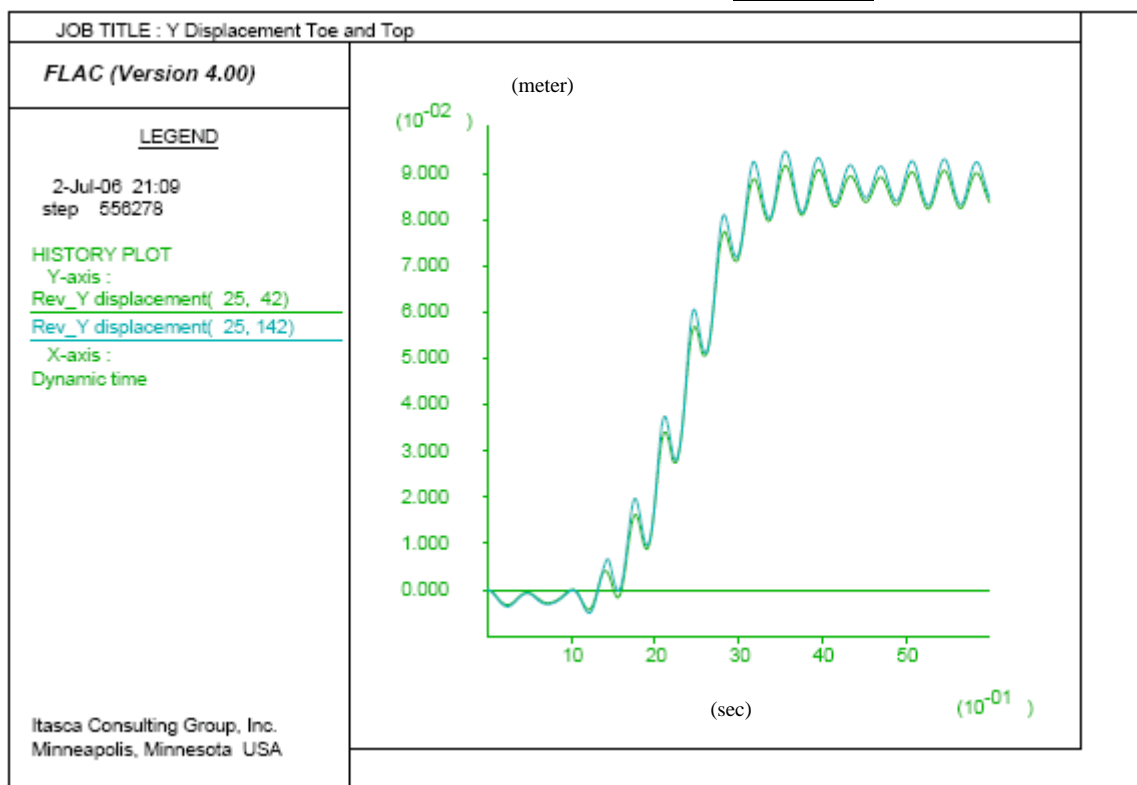
از آنجا که خاک بستر ضعیف می‌تواند شرایط پایداری سازه را به هم بزند، با ثابت فرض کردن کلیه پارامترها و تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک بستر، اثر این پارامترها روی تغییر شکل‌های دیوار در شرایط لرزه‌ای در این قسمت مورد



شکل (۱۰): شبکه تفاضل محدود تغییر شکل یافته دیوار خاک مسلح Minnow Creek



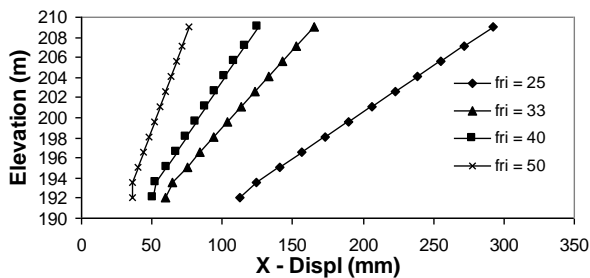
شکل (۱۱): روند تغییر شکل افقی بالا و پای دیوار برحسب متر در پایان شتاب پایه ورودی (۶ ثانیه)



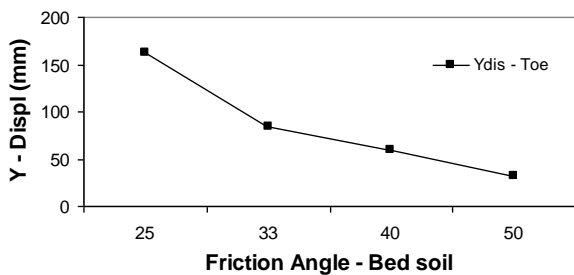
شکل (۱۲): روند تغییر شکل قائم پای دیوار بر حسب متر در پایان شتاب پایه ورودی (۶ ثانیه)



زاویه اصطکاک از ۲۵ درجه تا ۵۰ درجه در بیشترین تغییر شکل افقی نما تا ۳/۸ برابر کاهش مشاهده می‌شود. در تغییر شکل‌های قائم پای دیوار نیز به همین صورت تا ۴/۷ برابر کاهش دیده می‌شود.



شکل (۱۷): تغییر شکل افقی نما در طول ارتفاع دیوار بر اساس تغییر در زاویه اصطکاک خاک بستر در انتهای شتاب پایه



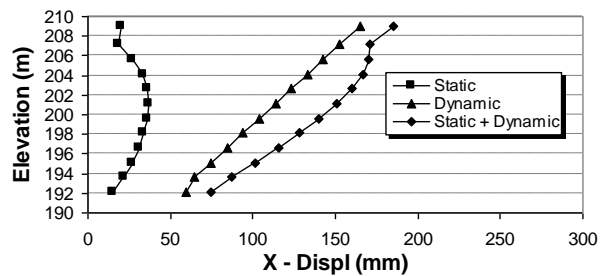
شکل (۱۸): تغییر شکل قائم پای دیوار بر اساس تغییر در زاویه اصطکاک خاک بستر در انتهای شتاب پایه

## ۸- اثر خصوصیات مسلح‌کننده‌ها

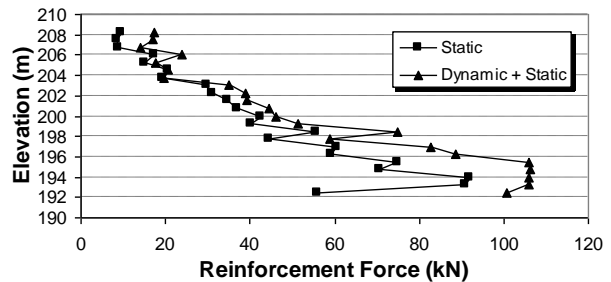
### ۸-۱- اثر سختی مسلح‌کننده‌ها

مسلح‌کننده‌های مورد استفاده از نوع پلیمری و فلزی است. از آنجا که با توجه به ارتفاع بلند دیوار استفاده از ژئوگریدهای ضعیف و متوسط پایداری سازه را فراهم نمی‌کند و تغییر شکل‌های زیادی در سازه ایجاد می‌کند، جهت مطالعات پارامتریک فقط از ژئوگریدهای قوی ( $j = 2000 \text{ kN/m}$ ) استفاده شده‌است. برای بررسی اثر سختی و یافتن حدود سختی مناسب مسلح‌کننده‌ها، پاسخ دیوار بلند خاک مسلح با قرار دادن مقادیر  $2000$ ،  $9000$ ،  $20000$  و  $200000 \text{ kN/m}$  در سختی مسلح‌کننده‌ها بررسی می‌شود تا علاوه بر اثر مقدار سختی، نوع آن نیز روی رفتار دیوار بررسی شود.

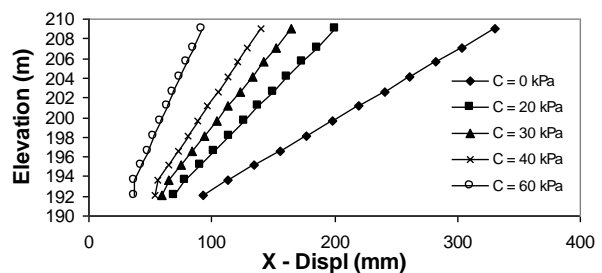
شکل (۱۹) نشان می‌دهد که با افزایش سختی مسلح‌کننده‌ها کاهش قابل توجهی در تغییر شکل افقی نما ایجاد می‌شود. شکل (۲۰) نیز تغییر شکل قائم پای بلوک دیوار را در مقابل تغییرات سختی مسلح‌کننده‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش سختی مسلح‌کننده‌ها تغییر شکل‌های قائم پای بلوک دیوار



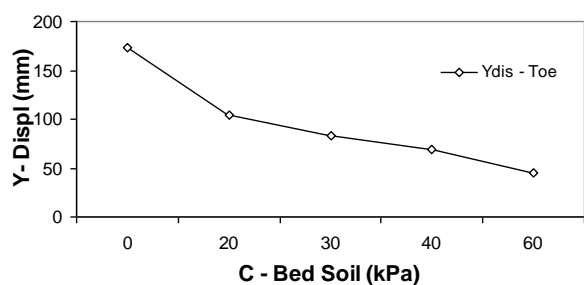
شکل (۱۳): تغییر شکل افقی نما در طول ارتفاع دیوار در شرایط استاتیکی و دینامیکی



شکل (۱۴): توزیع نیروی کششی ماکزیم مسلح‌کننده‌ها در شرایط استاتیکی و دینامیکی



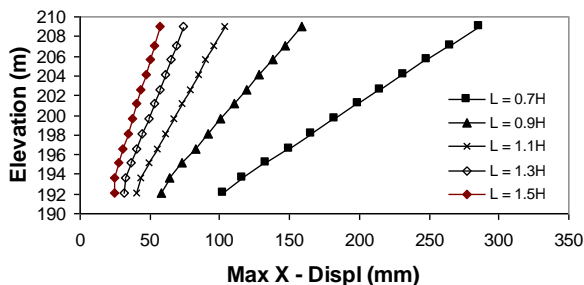
شکل (۱۵): تغییر شکل افقی نما در طول ارتفاع دیوار بر اساس تغییر در چسبندگی خاک بستر در انتهای شتاب پایه



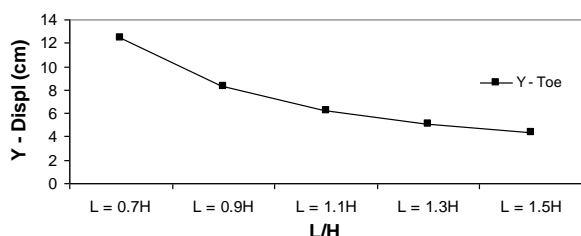
شکل (۱۶): تغییر شکل قائم پای دیوار بر اساس تغییر در چسبندگی خاک بستر در انتهای شتاب پایه

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان می‌دهند که با تغییر در زاویه اصطکاک خاک بستر روند تغییرات در تغییر شکل‌های افقی نما و قائم پای بلوک دیوار مانند حالت تغییر در چسبندگی خاک بستر است. اما روند کاهش در تغییر شکل‌ها نسبت به قسمت چسبندگی خاک بستر اندکی بیشتر است، طوری‌که با تغییر

کاهش می‌یابد. این روند با تغییر سختی از  $200000 \text{ kN/m}$  به  $20000 \text{ kN/m}$  بسیار ملایم می‌شود. با توجه به اشکال زیر و نکات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط لرزه‌ای استفاده از ژئوگریدها برای این دیوار با ارتفاع حدود ۱۷ متر مناسب نیست، چرا که تغییر شکل‌های بسیار بزرگی ایجاد کرده و شرایط پایداری خارجی را برای سازه فراهم نمی‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان این‌گونه استنباط کرد که استفاده از تسمه با سختی  $20000 \text{ kN/m}$  معقول و از نظر اقتصادی به صرفه‌است.



شکل (۲۱): تغییر شکل افقی نما در طول ارتفاع دیوار بر اساس تغییر در طول مسلح‌کننده‌ها در انتهای شتاب پایه



شکل (۲۲): تغییر شکل قائم پای دیوار بر اساس تغییر در طول مسلح‌کننده‌ها در انتهای شتاب پایه

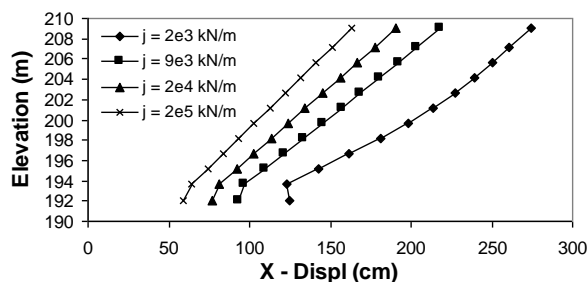
## ۹ - نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله بررسی تغییر شکل‌پذیری دیوار بلند خاک مسلح در شرایط لرزه‌ای بوده است. این مسئله با مدل کردن دیوار ۱۷ متری Minnow Creek با نرم افزار FLAC بررسی شده است. پس از کنترل عملکرد مدل عددی ساخته شده به کمک مقایسه با نتایج ابزار دیوار در شرایط استاتیکی و همچنین با اعمال یک موج هارمونیک با دامنه متغیر، و تغییر در خصوصیات مقاومتی خاک بستر و خصوصیات مسلح‌کننده‌ها اثر این تغییرات بر روی تغییر شکل پذیری دیوار Minnow Creek بررسی شد. اهم نتایج حاصله از مطالعات پارامتریک به شرح زیر است:

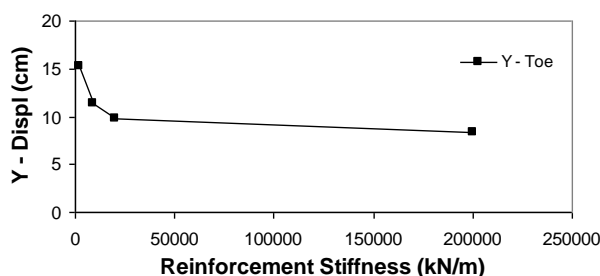
- با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بستر، تغییر شکل‌های افقی نما و قائم پای بلوک دیوار به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، بنابراین استفاده از خاک بستر با زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بالا (ماسه متراکم همراه با ریزدانه) در فراهم کردن ضریب اطمینان مناسب

کاهش می‌یابد. این روند با تغییر سختی از  $200000 \text{ kN/m}$  به  $20000 \text{ kN/m}$  بسیار ملایم می‌شود.

با توجه به اشکال زیر و نکات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط لرزه‌ای استفاده از ژئوگریدها برای این دیوار با ارتفاع حدود ۱۷ متر مناسب نیست، چرا که تغییر شکل‌های بسیار بزرگی ایجاد کرده و شرایط پایداری خارجی را برای سازه فراهم نمی‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان این‌گونه استنباط کرد که استفاده از تسمه با سختی  $20000 \text{ kN/m}$  معقول و از نظر اقتصادی به صرفه‌است.



شکل (۱۹): تغییر شکل افقی نما در طول ارتفاع دیوار بر اساس تغییر در سختی مسلح‌کننده‌ها در انتهای شتاب پایه



شکل (۲۰): تغییر شکل قائم پای دیوار بر اساس تغییر در سختی مسلح‌کننده‌ها در انتهای شتاب پایه

## ۸-۲ - اثر طول مسلح‌کننده‌ها

با توجه به اینکه در این دیوار نحوه تیپ‌بندی مسلح‌کننده‌ها بدین صورت است که ۵ لایه اول طول بلندتری نسبت به بقیه لایه‌ها دارند، پس برای بررسی اثر طول دیوار از افزایش طول در این ناحیه صرف‌نظر شده و تمام مسلح‌کننده‌ها با طول یکسان در دیوار با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای بررسی اثر طول مسلح‌کننده‌ها در پاسخ لرزه‌ای دیوار بلند خاک مسلح با تغییر مشخصه  $L/H$  از  $0.7$  تا  $1.5$  رفتار دیوار بررسی می‌شود. نسبت  $0.5$  در نظر گرفته نشده چرا که تغییر شکلهای بسیار بزرگی در نمای دیوار ایجاد کرده و سیستم متماثل به ناپایداری خارجی می‌شود.

شکل (۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش طول مسلح‌کننده‌ها کاهش شدیدی در تغییر شکل افقی نما رخ می‌دهد، اما این

ژئوسنتتیکها برای پلها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۰.

Bathurst, R.J.; Hatami, K.; "Seismic Response Analysis of a Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Wall", Geosynthetics International, Vol. 5, Nos. 1-2, pp. 127-166, 1998.

Bathurst, R.J.; Hatami, K.; "Earthquake Response Analysis of Reinforced - Soil Wall Using FLAC", FLAC and Numerical Modeling In Geomechanics, Detournay & Hart (eds), Balkema, Rotterdam, 1999.

Bathurst, R.J.; EL-Emam, M.M.; Mashhour, M.M.; "Shaking Table Model Study on the Dynamic Response of Reinforced Soil Walls", Geosynthetic -7<sup>th</sup> ICG -Delmas, Gourc & Girad (eds), 2002.

Bathurst, R.J.; Alfaro M.C.; "Review of Seismic Design, Analysis and Performance of Geosynthetic Reinforced Walls, Slopes and Embankments" IS-Kyushu.96 Third International Symposium on Earth Reinforcement Fukuoka, Kyushu, Japan 12-14 November 1996.

Fakharian, k.; Hosseinzadeh Attar, I.; "Verification of Static and Seismic Numerical Modeling of Geosynthetic-Reinforced Soil Segmental Bridge Abutments", Geosynthetic International, 2007 (in press).

Runser, D.J.; Fox, P.J.; Bourdeau, P.L.; "Field Performance of a 17 M-High Reinforced Soil Retaining Wall" Geosynthetic International, V8, N5, p367-390, 2001.

Seed, H.B.; Idriss, I.M.; "Soil Module and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", Report No. FERC 70-10, Earthquake Engng Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif., Dec, 1970.

جهت پایداری دیوارهای بلند خاک مسلح بسیار موثر است.

[۴] استفاده از مسلح کننده های پلیمری (ژئوگریدها) برای دیوارهای بلند خاک مسلح چندان مناسب نبوده و بهتر

[۵] است از تسمه با سختی مناسب براساس ارتفاع دیوار استفاده شود.

- افزایش در سختی مسلح کننده ها به میزان قابل توجهی تغییر شکل های دیوار را کاهش می دهد، بنابراین استفاده

[۶] از سختی بالاتر در مسلح کننده ها برای کنترل تغییر شکل های دیوار مناسب است. البته باید شرایط اقتصادی را نیز در نظر گرفت.

- با افزایش طول مسلح کننده ها تغییر شکل های افقی نما و قائم پای بلوک دیوار کاهش می یابد، که این روند با تغییر

[۸] در مشخصه L/H از ۱/۱ به ۱/۵ ملایم تر می شود. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل های عددی روی دیوار Minnow Creek، یک طول بحرانی که با افزایش طول مسلح کننده از این طول بحرانی به بعد تغییری در روند تغییر شکل های دیوار حاصل نشود، به دست نیامده است.

[۹]

## ۱۰ - مراجع

[۱] حسین زاده عطار، ایمان؛ تحلیل دینامیکی و غیر خطی خاک مسلح شده با ژئوگریدها در کوله پل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۳.

[۲] قدرتیان، سید حسام الدین؛ تحلیل لرزه ای دیوارهای بلند خاک مسلح ژئوگریدی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۵.

[۳] مجتهدی، محمدعلی؛ آنالیز غیر خطی کوله خاک مسلح با