

روشی برای بررسی رفتار لرزه‌های دیواره‌های حفاظت‌شده گودبرداری‌های عمیق با سیستم دیوار برلنی^۱ در آبرفت درشت‌دانه

محمد علیایی^۱، سید شهاب‌الدین یثربی^۲، محمد امامی^{۳*}

- ۱- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

r_m_emami@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۲۵

چکیده- دیوارهای برلنی مهارشده با میل مهارهای جانبی در پروژه‌های زیادی مورد استفاده شده و به عنوان گزینه مناسبی در پایدارسازی دیواره‌های گودبرداری‌های عمیق مطرح شده است. با این وجود، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده مربوط به حالت استاتیکی است که تغییر مکان و گسیختگی دیوار در اثر افزایش ارتفاع آن را بررسی کرده است؛ اما رفتار لرزه‌ای این نوع دیوارها به ندرت بررسی شده است. با توجه به افزایش استفاده از سیستم‌های دیوار برلنی در مناطق لرزه‌خیز، بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها اهمیت می‌یابد. در این پژوهش، به روشی برای بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برلنی در بخشی از آبرفت درشت‌دانه تهران پرداخته شده است. با توجه به آن‌که بررسی پایداری لرزه‌ای شیروانی‌های خاکی نشان‌دهنده آن بوده است که روش شبه‌استاتیکی، رویکردی مناسب و ساده برای معادل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی است؛ در این پژوهش سعی شده است برای دیوارهای برلنی، روشی مشابه برای معادل‌سازی رفتار دینامیکی با در نظر گرفتن یک ضریب شبه‌استاتیکی برابر پیشنهاد شود. بنابراین سطوح گسیختگی محتمل در تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی با هم مقایسه شده و با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر میل مهارها (مهم‌ترین عامل پایداری گوه گسیختگی محتمل) به عنوان پایه‌ی مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل ارائه شده است.

واژگان کلیدی: دیوار برلنی، تحلیل دینامیکی، تحلیل شبه‌استاتیکی، ضریب شتاب افقی معادل زلزله، آبرفت درشت‌دانه تهران.

۱- مقدمه^۱

ایستگاه‌های مترو، اهمیت زیادی دارد. از مهم‌ترین سیستم‌هایی که برای حفاظت از دیواره‌های گودبرداری استفاده می‌شود، سیستم دیوار برلنی با مهارهای جانبی است. تحقیقات مختلفی درباره‌ی رفتار استاتیکی

حفاظت از دیواره‌های گودبرداری‌ها در پروژه‌های مختلف مهندسی عمران شامل گودبرداری‌های عمیق، تونل‌سازی و

1- Soldier pile

سیستم‌های دیوار برلنی انجام شده است. با این وجود، محققین، کمتر به رفتار لرزه‌ای سیستم‌های دیوار برلنی توجه کرده‌اند. با توجه به آن‌که رفتار لرزه‌ای این سیستم‌ها در مناطق لرزه‌خیزی که از آن‌ها استفاده می‌شود اهمیت دارد؛ در این پژوهش رفتار لرزه‌ای سیستم‌های برلنی بررسی شده است.

اولین کاربردهای دیوار برلنی توسط Calindo et al. در سال ۱۹۹۰ ارائه شده است. آن‌ها از دیوار برلنی برای حفاظت دیواره‌های یک پارکینگ چهارطبقه در ایالت یوتا استفاده کردند [۱]. Mousher & Nowels نیز در سال ۱۹۹۰ دیوار برلنی با ارتفاع حدود ۱۵ متر برای پروژه سد رودخانه کلمبیا را بررسی کردند. این دیوار به عنوان جداکننده موقت برای محافظت از دیواره‌های راه‌آهن موجود طراحی شد [۱].

مطالعه دیگری درباره‌ی مدل‌سازی سه‌بعدی اندرکنش شمع دیوار و خاک (Coupling) در گودبرداری‌های محافظت‌شده بوسیله دیوار برلنی به‌وسیله‌ی Hong et al. در سال ۲۰۰۳ انجام شد [۱]. در این بررسی، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی با هم مقایسه شده است.

Vermeer & Nico Ruse در سال ۲۰۰۱ از دیوار برلنی برای پایدارسازی دیواره‌های کناری قسمت توسعه راه‌آهن بین کلن و فرانکفورت استفاده کردند [۲]. شکل ۱ نمایی از دیوار برلنی ۱۶ متری اجراشده را نشان می‌دهد. همچنین پدیده طاقی شدن افقی (Arching) در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی یک مقطع عرضی - افقی بررسی شده است.

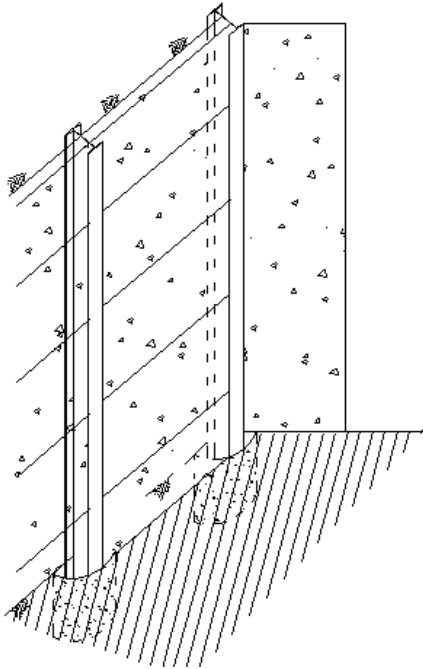
تحلیل دیواره‌های مهارشده با استفاده از منحنی‌های P-y برای مدل‌سازی خاک به صورت فنر، مطالعه دیگری است که در زمینه گودبرداری‌های محافظت‌شده به وسیله دیوار برلنی به‌وسیله‌ی Jeyoung & Seo در سال ۲۰۰۴ انجام شده است [۵]. روش تحلیلی اندرکنش بین خاک و دیوار با استفاده از منحنی‌های P-y بر اساس مدل Velasouwf انجام شده است. هدف اصلی این بررسی، تحلیل اثر ساخت مرحله‌ای در رفتار دیوار مهارشده است.

مدل‌سازی سانتریفیوژ یک دیوار برلنی دوتایی بدون مهار در خاک ماسه‌ای به‌وسیله‌ی Lee et al. در سال ۲۰۰۸ انجام شد [۶]. دیوارهای برلنی دوتایی بدون مهار (Self-Supported) به خاطر سرعت بالای اجرا و هزینه کمتر در پروژه‌های گودبرداری استفاده می‌شود.



شکل (۱) نمای یکی از کاربردهای دیوار برلنی [۲]

می‌شود. در شکل ۲ نمایی از این نوع دیوار برای حفاظت گودبرداری‌های عمیق نشان داده شده است.



شکل (۲) نمایی از سیستم حفاظت با روش دیوار برلنی [۷]

از آنجا که شمع‌های فولادی، مقاطع I یا H شکل دارند، صفحات بتنی پیش‌ساخته بین بال‌های آن قرار گرفته و همزمان با گودبرداری، قطعات کم‌کم به سمت پایین حرکت می‌کنند. به جای استفاده از دال‌های بتنی پیش‌ساخته می‌توان دیوارها را به صورت درجا اجرا کرد. در این حالت پس از خاک‌برداری مرحله‌ای، شبکه آرماتور بین پروفیل‌ها قرار داده شده و پس از قالب‌بندی، بتن‌ریزی می‌شود. اجرای این دیوارها را می‌توان به صورت درجا با قرار دادن شبکه فلزی و بتن‌پاشی نیز انجام داد؛ در این حالت، شبکه فولادی در محل قرار داده شده و بتن‌پاشی تا رسیدن به ضخامت مورد نیاز انجام می‌شود. شکل ۳ نمونه‌ای از اجرای سیستم حفاظت دیواره‌های گود را با روش دیوار برلنی، در تهران نمایش می‌دهد. از مهم‌ترین مزایای سیستم دیوار برلنی، کنترل تغییر شکل است.

آزمایش‌های سانتریفیوژ روی دیوارهای برلنی تک و دوتایی با شتاب $30g$ انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار برلنی دوتایی تا حدود زیادی تغییر مکان‌های سطح زمین را نسبت به دیوار برلنی تک، کاهش می‌دهد. همچنین دیوار برلنی دوتایی تا ۵۰ درصد ممان واردشده به ستون دیوار برلنی را نسبت به حالت تک کاهش داده است.

با توجه به آن‌که روش شبه‌استاتیکی، رویکردی مناسب و ساده برای معادل‌سازی تحلیل‌های دینامیکی است؛ هدف اصلی این مقاله، بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برلنی در آبرفت درشت‌دانه بر پایه‌ی روش عددی تفاضل محدود و ارائه روشی برای معادل‌سازی رفتار دینامیکی با پیشنهاد یک ضریب شبه‌استاتیکی برابر برای مدل است.

۲- معرفی سیستم دیوار برلنی

برای حفاظت از دیواره‌های گودبرداری‌های عمیق با استفاده از سیستم دیوار برلنی و برای مهار رانش خاک، از پروفیل فولادی استفاده می‌شود. برای نصب پروفیل‌ها ابتدا عملیات کندن چاه‌ها در فواصل مناسب انجام می‌شود. عمق این چاه‌ها برابر عمق گود به اضافه طول گیرداری شمع بتنی است. شمع‌های بتنی برای تأمین گیرداری پروفیل‌ها است و ارتفاع آن $0/25$ تا $0/35$ برابر عمق گود، پایین‌تر از رقوم کف گود در نظر گرفته می‌شود. پروفیل فولادی به صورت I یا H شکل در چاه قرار داده شده و پس از بتن‌ریزی در انتهای چاه، شمع بتنی- فولادی با انتهای گیردار به وجود می‌آید. حال می‌توان عملیات گودبرداری را مرحله به مرحله از بالا به پایین آغاز کرد. برای جلوگیری از ریزش خاک بین شمع‌ها، از دال‌های بتنی پیش‌ساخته یا بتن در جاریز استفاده

۳- مدل‌سازی عددی و پارامترهای مصالح

۳-۱- بیان مسئله

در این مقاله، مدل‌سازی بر پایه‌ی روش عددی تفاضل محدود دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC انجام شده است. مدل‌سازی برای دیوارهای عمیق و نیمه‌عمیق با آرایش‌های مختلف نیل‌ها که بر اساس استاندارد FHWA [۷] و تحلیل استاتیکی به‌دست آمده، انجام شده است. روند مدل‌سازی شامل ایجاد هندسه مدل، تعیین پارامترهای مصالح، اعمال شرایط مرزی و اولیه، بارگذاری استاتیکی (با در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای)، بارگذاری دینامیکی (اعمال شتاب نگاشت)، بارگذاری شبه‌استاتیکی (اعمال ضریب شتاب افقی معادل مدل) و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل‌ها و نیروها بوده است. تحلیل حساسیت شامل ارتفاع دیوار، آرایش نیل‌ها و نوع خاک است.



شکل (۳) اجرای سیستم حفاظت دیواره‌های گود با روش دیوار برلنی (عمق گود ۲۴ متر) [۸]

۳-۲- پارامترهای مدل

نوع خاک، آبرفت درشت‌دانه در نظر گرفته شده که بر اساس میزان تراکم و سیمانتاسیون آن، دو نوع خاک با تراکم و سیمانتاسیون بالا و خیلی بالا (به ترتیب خاک ۱ و

خاک ۲) که بتوانند محدوده‌ای کلی از این آبرفت را پوشش دهند، انتخاب شده است. مدل رفتاری دوخطی الاستوپلاستیک Mohr-Coulomb برای مدل‌سازی رفتار خاک انتخاب شد. همچنین اندرکنش خاک و سازه نگهبان با در نظر گرفتن المان‌های فصل مشترک (Interface)، لحاظ شده است. پارامترهای المان Interface عبارتند از: برای شمع: $K_s=1E08$ و $K_n=2E08$ و برای ماسخ: $K_s=4E07$ ، $S_{bond}=4E04$ و $\phi=20$ و $c=20$.

برای انتخاب ستون دیوار برلنی از مقاطع مختلفی مانند مقاطع I شکل نیم‌پهن و پهن، مقاطع قوطی و ... استفاده شد. سرانجام از مقاطع IPB300 و IPB400 به ترتیب به عنوان مقاطع بهینه برای دیوارهای ۱۰ متری (دیوار نیمه‌عمیق) و ۲۰ متری (دیوار عمیق) استفاده شد. انتخاب نوع پروفیل، مطابق توصیه استاندارد FHWA و بر اساس پوش‌های فشار Terzaghi & Peck که در سال ۱۹۶۷ برای گودبرداری‌ها ارائه شده، انجام شده است [۴ و ۷]. براساس تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده، فاصله جانبی بهینه پروفیل‌ها (S_H)، ۴ متر در نظر گرفته شده است.

پس از مشخص شدن نوع پروفیل و فاصله افقی، آرایش‌های مختلف میل مهارها (فاصله قائم و طول) برای دو ارتفاع دیوار و دو نوع خاک به‌دست آمد. این آرایش‌ها بر اساس توصیه‌های استاندارد FHWA [۷] و ارضای ضریب اطمینان مجاز در تحلیل استاتیکی مشخص شده است. به عبارت دیگر برای هر یک از حالات بالا با انجام تحلیل حساسیت نسبت به فواصل قائم، دو نوع آرایش بهینه برای طول نیل‌ها به‌دست آمده‌اند.

در این پژوهش، رفتار نیرو- تغییرشکل محوری میل مهار به صورت الاستیک کامل با در نظر گرفتن مقاومت تسلیم، مدل شده است. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، از میلگردهای A_{III} با مقاطع $\bar{\Phi}32$ و $\bar{\Phi}25$ استفاده شد. رویه

جدول (۳) مشخصات آرایش بهینه میل مهارهای دیوار برنی ۱۰ متری

آرایش	عمق (متر)	طول (متر)	قطر میلگرد
A1	۲	۱۰	$\bar{2}\phi_{25}$
	۴	۱۰	$\bar{2}\phi_{25}$
	۶	۱۲	$\bar{2}\phi_{32}$
	۸	۱۲	$\bar{2}\phi_{32}$
A2	۳	۱۰	$\bar{2}\phi_{25}$
	۶	۱۲	$\bar{2}\phi_{32}$
	۸	۱۲	$\bar{2}\phi_{32}$

جدول (۴) مشخصات آرایش بهینه میل مهارهای دیوار برنی ۲۰ متری

آرایش	عمق (متر)	طول (متر)	قطر میلگرد
A3	۲	۱۲	$\bar{4}\phi_{32}$
	۴	۱۲	$\bar{4}\phi_{32}$
	۶	۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
	۸	۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
	۱۰	۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
	۱۲	۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
	۱۴	۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
	۱۶	۱۲	$\bar{4}\phi_{32}$
	۱۸	۱۲	$\bar{4}\phi_{32}$
	A4	۳	۱۲
۶		۱۲	$\bar{4}\phi_{32}$
۹		۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
۱۲		۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
۱۴		۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$
۱۶		۱۴	$\bar{4}\phi_{32}$

برای مدل‌سازی، طول مدل در پشت دیوار برای مدل با ارتفاع ۱۰ متر، ۴۰ متر و برای مدل با ارتفاع ۲۰ متر، ۸۰ متر و عمق خاک زیر کف گود به ترتیب ۱۰ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از ناپایداری عددی حین تحلیل

(دیوار بتن مسلح درجای بین دو ستون) نیز با در نظر گرفتن مقطع معادل بتن مسلح درجا به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر مدل شده است. از آنجا که در تحقیقات انجام شده برای سازه‌های دیوار نگهدارنده، نسبت میرایی Rayleigh ۳ درصد پیشنهاد شده است [۹ و ۱۰]؛ از این نسبت میرایی در تحلیل‌های دینامیکی استفاده شد. مدل‌های مختلف تحلیل حساسیت در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مدل‌های مختلف تحلیل حساسیت

مدل	آرایش میل مهارها (طول و فاصله‌های قائم)	نوع خاک	ارتفاع دیوار (متر)
H10T1A1	A1	۱	۱۰
H10T1A2	A2		
H10T2A1	A1	۲	
H10T2A2	A2		
H20T1A3	A3	۱	۲۰
H20T1A4	A4		
H20T2A3	A3	۲	
H20T2A4	A4		

در جدول بالا، سازه نگهدارنده رویه قائم دارد و ارتفاع‌های ۱۰ متر و ۲۰ متر که به ترتیب بیانگر گودبرداری برای ساخت بناهایی با ۳ و ۶ طبقه، زیر زمین است که نماینده گودبرداری‌های دائم نیمه‌عمیق و عمیق در مناطق شهری است. مقادیر پارامترهای مصالح مدل Mohr-Coulomb برای دو نوع خاک مطالعه شده، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲) پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در مدل Mohr-Coulomb

نوع خاک	γ_m (gr/cm ³)	C (kg/cm ²)	Φ (Deg.)	E (kg/cm ²)	ν
۱	۱/۸۰	۰/۲	۳۲	۶۰۰	۰/۳۴
۲	۱/۹	۰/۴	۳۶	۸۰۰	۰/۳۲

در جدول بالا، γ_m وزن مخصوص، C چسبندگی، Φ زاویه اصطکاک داخلی، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسن است. آرایش بهینه میل مهارها (طول و فاصله‌های قائم) برای مدل‌های جدول ۱، مطابق جدول‌های ۳ و ۴ در مدل‌سازی به کار رفته است.

بسیج شده در میل مهارها، لنگر پروفیل، شتاب و تغییر مکان افقی و قائم نقاط مختلف در بالای دیوار و روی رویه و همچنین گوه‌های گسیختگی محتمل به عنوان پارامترهای خروجی بررسی شد.

۳-۳-۳- تحلیل شبه‌استاتیکی

در روش شبه‌استاتیکی شیروانی‌های خاکی، نیرویی افقی، معادل نسبتی از نیروی اینرسی بیشینه هنگام زلزله، به گوه گسیختگی وارد می‌شود. این نیرو برابر حاصل ضرب ضریب شتاب افقی معادل K_h در وزن گوه گسیختگی است.

در این پژوهش، ضریب شتاب افقی معادل برای مدل دیوار برلنی ایجاد شده، در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به دست آمده است. به عبارت دیگر در مدل تفاضل محدود، نیروی اینرسی هر المان برابر است با حاصل ضرب ضریب شتاب افقی معادل مدل K_{hm} ، در وزن المان.

تحلیل در مدل تفاضل محدود، نیروی اینرسی هر المان به صورت حاصل ضرب شتابی برآیند در جرم سازه در نظر گرفته شده است. شتاب برآیند، برآیند شتاب گرانش و شتاب افقی معادل خواهد بود.

بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی، تحلیل استاتیکی معادل با در نظر گرفتن مقادیر ۰/۱۵، ۰/۱۸ و ۰/۲ برای ضرایب K_{hm} در هر مدل انجام شده است و با مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی معادل با نتایج تحلیل دینامیکی، محدوده مناسب K_{hm} برای طراحی لرزه‌ای شبه‌استاتیک دیوارهای برلنی در آبرفت درشت‌دانه ارائه شده است.

۴- ارزیابی (سنجش درستی) مدل

فرآیند ارزیابی مدل برای سه حالت تحلیل استاتیکی، دینامیکی و شبه‌استاتیکی انجام شده است. برای سنجش درستی مدل از

دینامیکی، برای مدل اول از المان‌های با بیشینه‌ی بعد ۰/۲ متر و برای مدل دوم از المان‌های با بیشینه‌ی بعد ۰/۴ متر استفاده شده است. شرایط مرزی در حالت تحلیل استاتیکی و شبه‌استاتیکی برای مرزهای جانبی به صورت غلطکی و برای مرز تحتانی به صورت مفصل کامل در نظر گرفته شد. در تحلیل‌های دینامیکی، برای جلوگیری از برگشت امواج زلزله از مرز ویسکوز در اطراف مدل استفاده شده است.

۳-۳-۳- مراحل مدل‌سازی

مدل‌سازی‌های انجام شده سه مرحله زیر را دارد:

- تحلیل استاتیکی (با در نظر گرفتن فرآیند ساخت مرحله‌ای)؛
- تحلیل دینامیکی (اعمال شتاب‌نگاشت)؛
- تحلیل شبه‌استاتیکی یا استاتیکی برابر (اعمال ضریب شتاب افقی معادل مدل).

۳-۳-۱- تحلیل استاتیکی

تحلیل استاتیکی با در نظر گرفتن فرآیند ساخت مرحله‌ای برای مدل‌سازی توالی مراحل خاک‌برداری، نصب میل مهارها و اجرای رویه، انجام شده است. با به تعادل رسیدن مدل پس از هر مرحله خاک‌برداری، گام بعدی تحلیل انجام می‌شود.

۳-۳-۲- تحلیل دینامیکی

در این تحلیل، شتاب‌نگاشت‌های سه زلزله مهم لوماپریتا، السنتر و طیس به مدل اعمال می‌شوند. برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، دامنه بیشینه شتاب، محتوی بسامد و مدت دوام زلزله در نظر گرفته شده است. برای افزایش دقت، از شتاب‌نگاشت‌های فیلتر شده استفاده شده است. برای مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها از ضریب 0.35g (مقدار شتاب مبنای طرح، برای شهر تهران، مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰) در هر سه زلزله استفاده شده است. تاریخچه‌های زمانی نیروهای

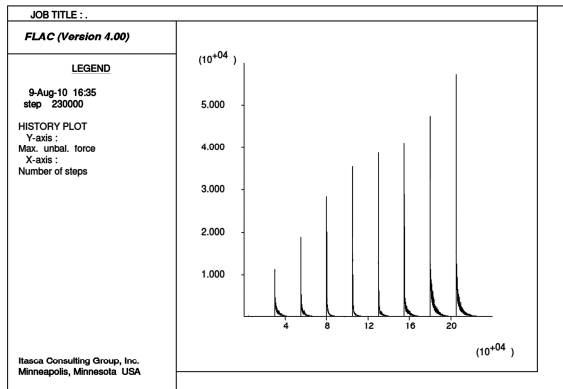
جدول (۵-الف) تغییر مکان افقی بیشینه دیوار (cm) برای مدل

H20T1A3		
مدل اجزاء محدود	مدل تفاضل محدود	
۲/۷	۲/۵	تحلیل استاتیکی
۷/۹	۷/۵	تحلیل دینامیکی
۶/۶	۶/۳	تحلیل شبه‌استاتیکی

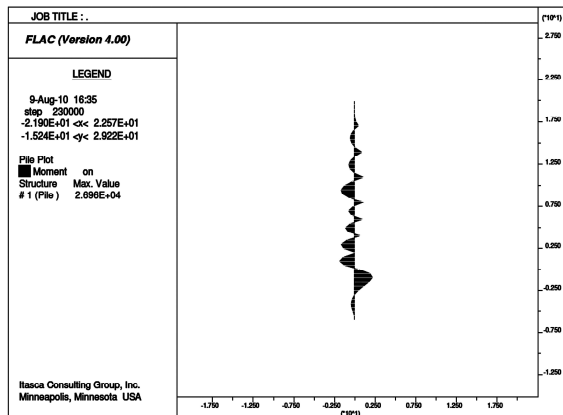
جدول (۵-ب) بیشینه نیروهای بسیج شده میل مهارها (Ton) برای مدل

H20T1A3		
مدل اجزاء محدود	مدل تفاضل محدود	
۱۱۵	۱۱۰	تحلیل استاتیکی
۱۶۰	۱۵۵	تحلیل دینامیکی
۱۵۵	۱۵۳	تحلیل شبه‌استاتیکی

*نتایج تحلیل دینامیکی مربوط به زلزله لوماپریتا و نتایج تحلیل شبه استاتیکی مربوط به حالت $K_{hm}=0.18$ است.



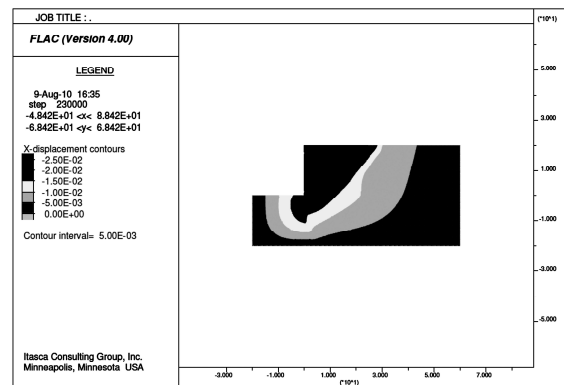
شکل (۵) تعادل نیروهای نامتوازن در ساخت مرحله‌ای مدل H20T1A4



شکل (۶) لنگر واردشده بر ستون دیوار برلنی مدل H20T1A4

نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS استفاده شده است.

مقادیر نیروهای بسیج شده در میل مهارها و تغییر مکان‌های دیوار برای هر دو مدل تفاضل محدود و اجزاء محدود بررسی شده و تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند. نمونه‌ای از تغییر مکان‌ها برای تحلیل استاتیکی مدل H20T1A3 در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه بین مقادیر تغییر مکان‌ها و نیروها برای سه حالت تحلیل مدل بالا در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- تغییر مکان افقی مدل تفاضل محدود در حالت استاتیکی (مدل H20T1A3)

۵- نتایج عددی

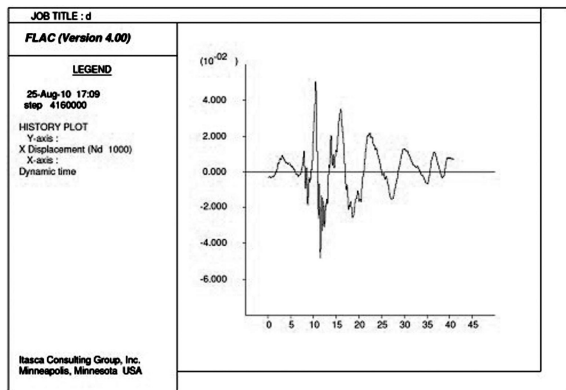
در این بخش، نتایج عددی تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی و شبه‌استاتیکی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف بررسی شده، آمده است. این پارامترها شامل ارتفاع دیوار، نوع خاک و آرایش میل مهارها است.

۵-۱- داده‌های خروجی تحلیل استاتیکی

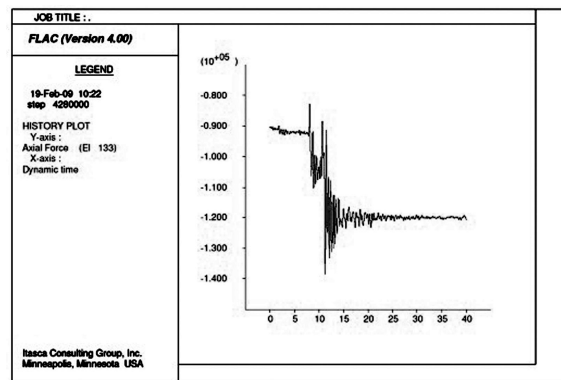
توالی مراحل خاک‌برداری، نصب میخ و اجرای رویه و به تعادل رسیدن مدل پس از هر مرحله خاک‌برداری در شکل ۵ به عنوان نمونه برای مدل H20T1A4 نشان داده شده است. نمودار لنگر وارد بر پروفیل این مدل، در شکل ۶ مشاهده می‌گردد. اثر میل مهارها بر پخش لنگر در این شکل دیده می‌شود.

۵-۲- داده‌های خروجی تحلیل دینامیکی

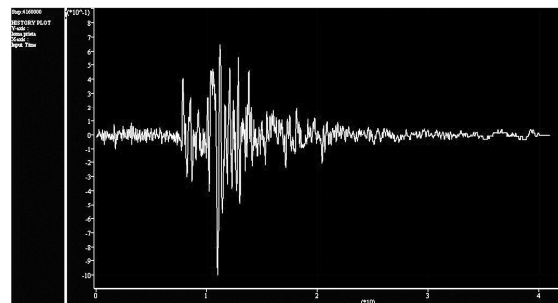
نمونه‌ای از داده‌های خروجی تحلیل‌های دینامیکی برای زلزله لوماپریتا و مدل H20T1A4 در این قسمت آمده است. شکل ۷، شتاب‌نگاشت ورودی زلزله گفته شده را نشان می‌دهد. از آنجا که بیشترین تأثیر گودبرداری‌های عمیق بر پی‌های سطحی سازه‌های مجاور است؛ نوک دیوار به عنوان نقطه مرجع برای بررسی شتاب و تغییر مکان ناشی از زلزله در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، اثر خاک مسلح بر محتوی بسامد شتاب‌نگاشت ورودی مشهود است. در شکل ۹، تاریخچه زمانی تغییر مکان نوک دیوار حین زلزله نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نقطه مورد نظر، حین زلزله، تغییر مکانی حدود ۵ برابر تغییر مکان ماندگار را تحمل می‌کند. همچنین تاریخچه زمانی نیروی بسیج شده در بحرانی‌ترین میل مهار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. اثر بیشینه شتاب زلزله بر فعال شدن میل مهار در این شکل مشاهده می‌شود.



شکل (۹) تغییر مکان نوک دیوار مدل H20T1A4 (زلزله لوماپریتا)



شکل (۱۰) نیروی بسیج شده در بحرانی‌ترین میل دیوار مدل H20T1A4 (زلزله لوماپریتا)

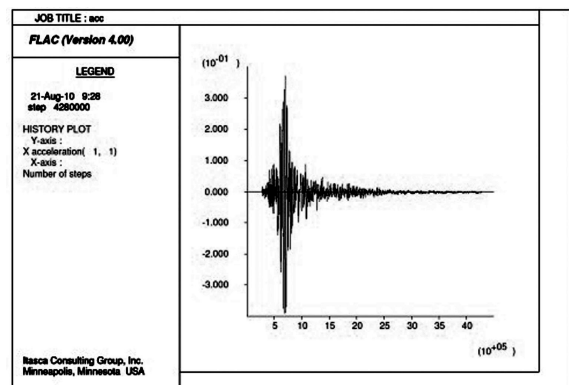


شکل (۷) نمونه‌ای از شتاب‌نگاشت ورودی (زلزله لوماپریتا)

۵-۳- داده‌های خروجی تحلیل شبه‌استاتیکی

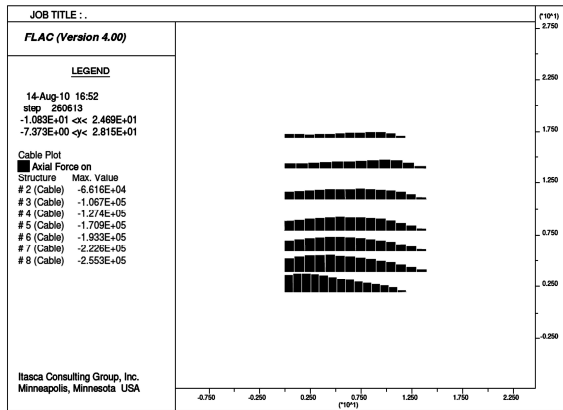
با مقایسه سطوح گسیختگی محتمل در تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی، از آنجا که مهم‌ترین عامل پایداری گوه گسیختگی محتمل، نیروی بسیج شده در میل مهارها است؛ بیشینه این نیرو به عنوان پایه‌ی مقایسه برای به دست آوردن ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل، در نظر گرفته شده است.

بنابراین پخش نیروهای بسیج شده در نیل‌ها به عنوان نمونه برای خاک با تراکم و سیمان‌تاسیون کمتر، به ازای ارتفاع‌های مختلف دیوار و آرایش‌های مختلف میل مهار، برای K_{hm} برابر 0.2 در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نمونه‌ای از الگوی نقاط پلاستیک نیز گویای گوه

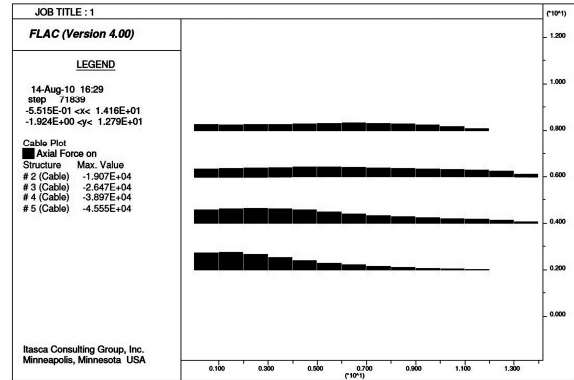


شکل (۸) شتاب نوک دیوار مدل H20T1A4 (زلزله لوماپریتا)

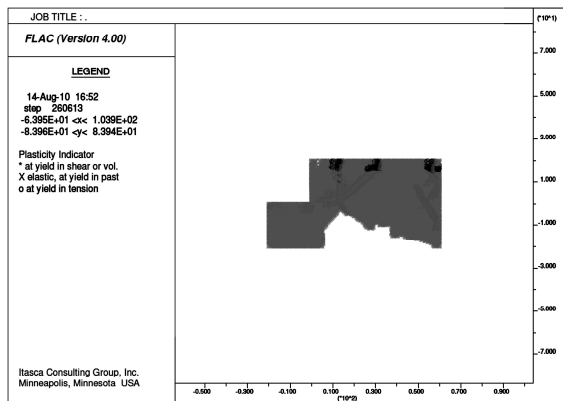
گسیختگی محتمل برای مدل H20T1A4 است که در شکل ۱۲ مشاهده می شود.



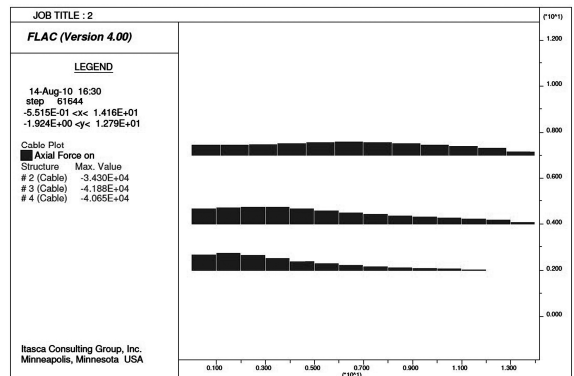
شکل (۱۱-د) نیروهای بسیج شده در میل مهارهای مدل H20T1A4 ($K_{hm} = 0.20$)



شکل (۱۱-الف) نیروهای بسیج شده در میل مهارهای مدل H10T1A1 ($K_{hm} = 0.20$)

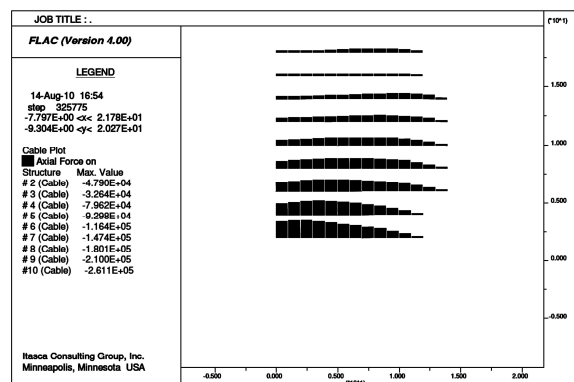


شکل (۱۲) الگوی نقاط پلاستیک برای مدل H20T1A4 ($K_{hm} = 0.20$)

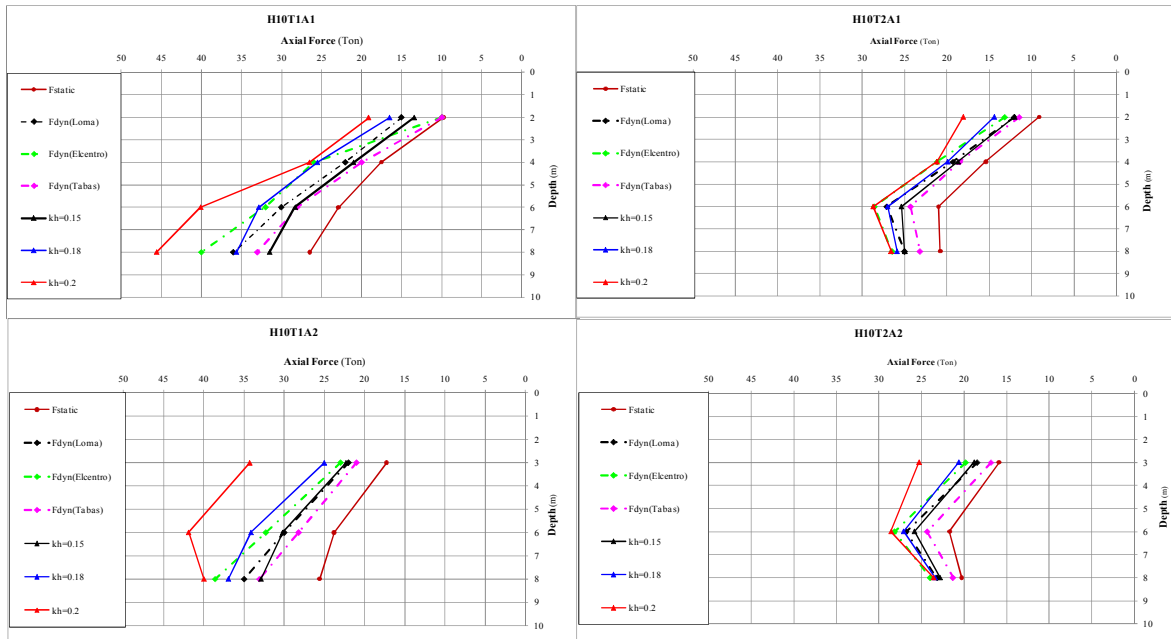


شکل (۱۱-ب) نیروهای بسیج شده در میل مهارهای مدل H10T1A2 ($K_{hm} = 0.20$)

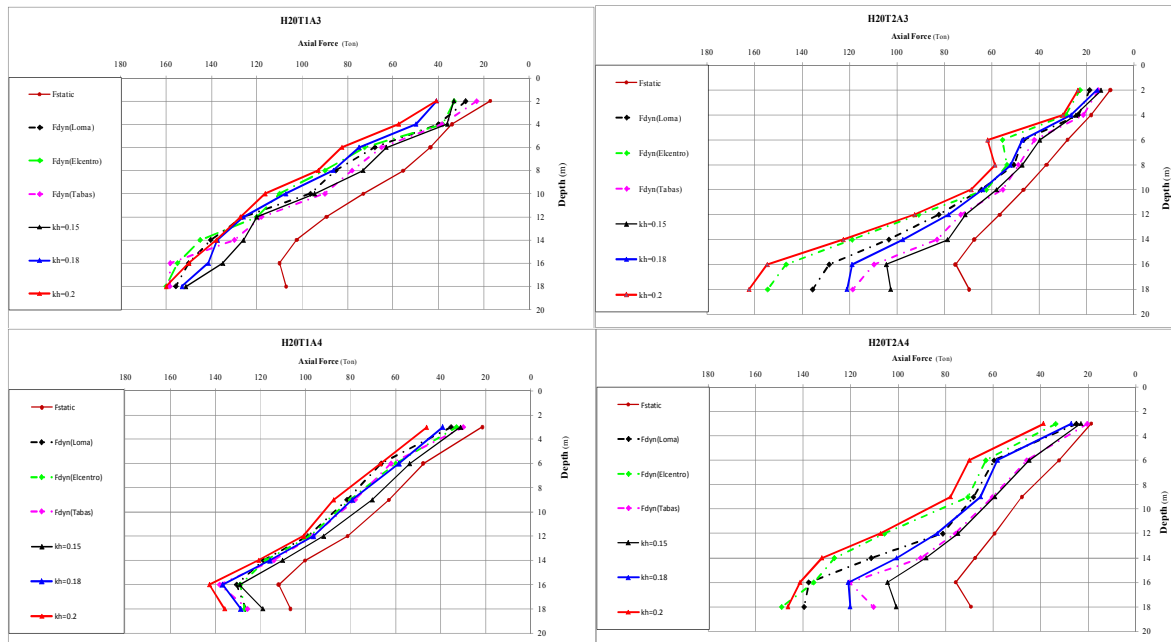
۴-۵- مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی و شبه استاتیکی همان گونه که اشاره شد برای مقایسه نتایج تحلیل های دینامیکی و استاتیکی معادل، بیشینه نیروی بسیج شده در میل مهارهای دیوار برلنی به عنوان مبنای مقایسه، بررسی شده است. پخش بیشینه نیروهای بسیج شده در میل مهار- های در تحلیل های دینامیکی و شبه استاتیکی برای ترازهای مختلف در شکل های ۱۳ و ۱۴ مقایسه شده است. پخش نیرو در حالت استاتیکی نیز برای مقایسه در این آورده شده است.



شکل (۱۱-ج) نیروهای بسیج شده در میل مهارهای مدل H20T1A3 ($K_{hm} = 0.20$)



شکل (۱۳) پخش بیشینه نیروهای بسیج شده میل مهارها در تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی همراه توزیع نیروهای استاتیکی (ارتفاع دیوار ۱۰ متر)



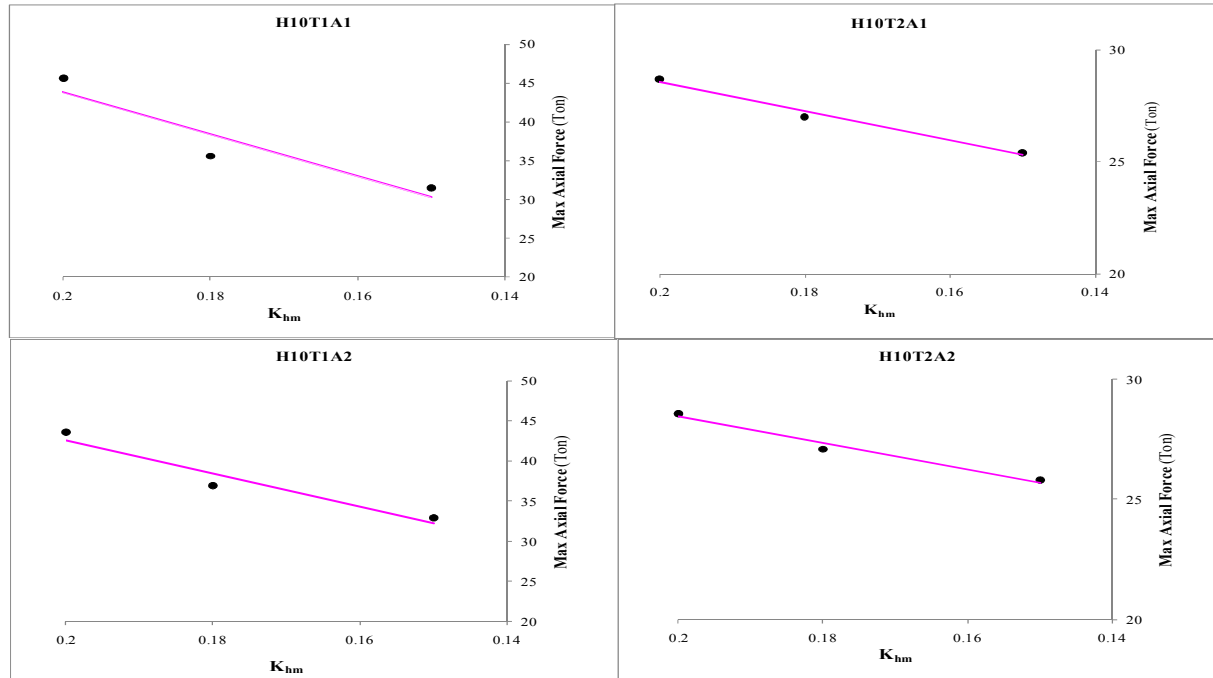
شکل (۱۴) پخش بیشینه نیروهای بسیج شده میل مهارها در تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی همراه توزیع نیروهای استاتیکی (ارتفاع دیوار ۲۰ متر)

افقی به کاررفته در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی ترسیم شده است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). سپس برای هر یک از زلزله‌های اعمالی، با انتخاب مقدار بیشینه نیروی بسیج شده میل مهارها حین تحلیل‌های دینامیکی (شکل‌های ۱۳ و

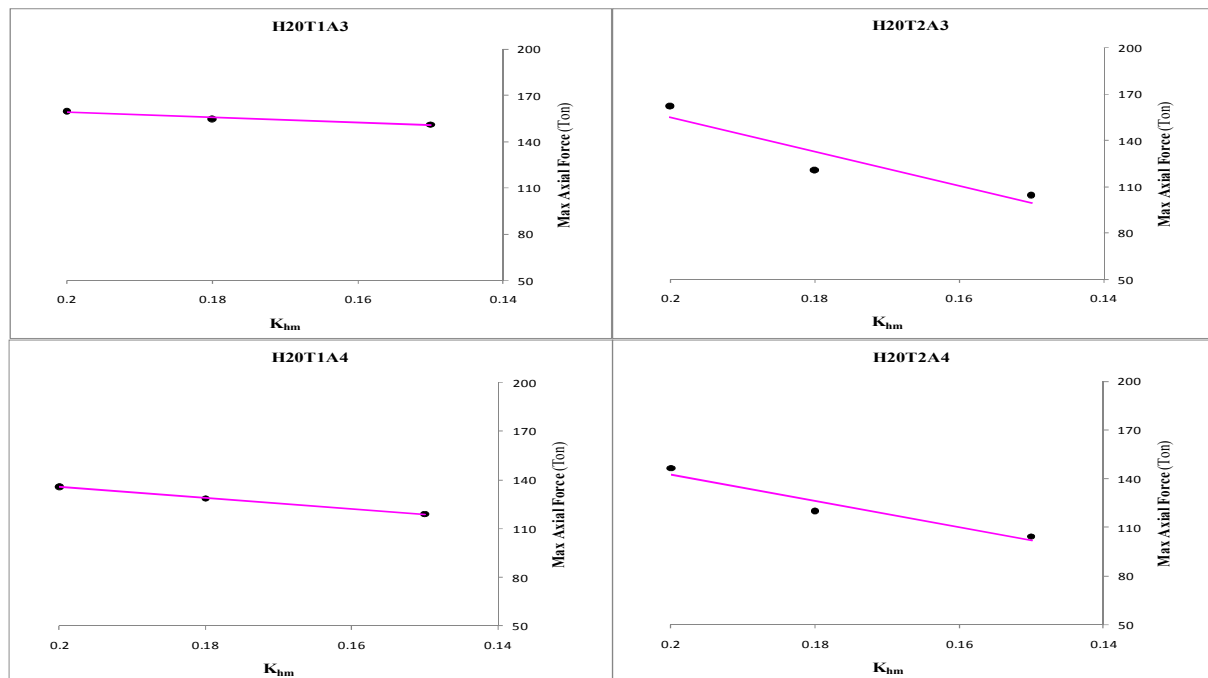
۵-۵- تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})

برای تعیین ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})، ابتدا برای هر یک از مدل‌های جدول ۱، نمودار تغییرات بیشینه نیروی بسیج شده میل مهارها در برابر ضریب شتاب

۱۴)، می‌توان ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})، متناظر با زلزله گفته شده را از تحلیل‌های استاتیکی برابر، درون‌یابی کرد. ضرایب به‌دست‌آمده از این روند، در جدول‌های ۶ و ۷ آمده است.



شکل (۱۵) نمودار تغییرات بیشینه نیروی بسیج‌شده میل مهارها برابر ضریب شتاب افقی به‌کاررفته در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی (ارتفاع دیوار ۱۰ متر)



شکل (۱۶) نمودار تغییرات بیشینه نیروی بسیج‌شده میل مهارها در برابر ضریب شتاب افقی به‌کاررفته در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی (ارتفاع دیوار ۲۰ متر)

سیمانتاسیون مناسب آبرفت درشت‌دانه باشد.

جدول (۶) ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm}) متناظر با زلزله‌های مختلف (ارتفاع دیوار: ۱۰ متر)

مدل	ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})		
	لوماپریتا	السترو	طیس
H10T1A1	۰/۱۸۱	۰/۱۹۰	۰/۱۶۳
H10T1A2	۰/۱۷۴	۰/۱۸۵	۰/۱۵۴
H10T2A1	۰/۱۸۴	۰/۱۸۸	۰/۱۶۸
H10T2A2	۰/۱۶۹	۰/۱۸۶	۰/۱۴۴

جدول (۷) ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm}) متناظر با زلزله‌های مختلف (ارتفاع دیوار: ۲۰ متر)

مدل	ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})		
	لوماپریتا	السترو	طیس
H20T1A3	۰/۱۹۱	۰/۱۹۵	۰/۱۹۳
H20T1A4	۰/۱۸۷	۰/۱۸۶	۰/۱۷۸
H20T2A3	۰/۱۹۳	۰/۱۹۰	۰/۱۷۹
H20T2A4	۰/۱۸۹	۰/۱۹۳	۰/۱۸۳

۶- نتایج

رفتار دیوارهای برلنی مهارشده با میل مهارهای جانبی به عنوان گزینه مناسبی برای کنترل تغییر شکل‌های سطح زمین و پایدارسازی دیواره‌های گودبرداری‌های عمیق و نیمه‌عمیق تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شده و تأثیر ارتفاع دیوار، نوع خاک و آرایش میل مهارها بر رفتار لرزه‌ای، بررسی شده است. با در نظر گرفتن یک ضریب شبه‌استاتیکی برابر، روشی برای برابری رفتار دینامیکی، پیشنهاد شده است. بنابراین سطوح گسیختگی محتمل در تحلیل‌های دینامیکی و شبه‌استاتیکی با همدیگر مقایسه شده و با در نظر گرفتن بیشینه نیروهای وارد بر میل مهارها (مهم‌ترین عامل پایداری گوه گسیختگی محتمل)، به عنوان پایه‌ی مقایسه، ضریب شتاب افقی معادل زلزله برای مدل ارائه شده است.

مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، به قرار زیر است:

- محدوده ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm}) برای گودبرداری‌های عمیق (حدود ۲۰ متر) ۰/۱۸ ~ ۰/۲ و برای گودبرداری‌های نیمه‌عمیق (حدود ۱۰ متر) ۰/۱۴ ~ ۰/۱۹ پیشنهاد می‌شود.

- بر اساس آیین‌نامه FHWA برای دیوارهای میخکوبی‌شده، ضریب شتاب افقی معادل زلزله در محدوده ۰/۵ تا ۰/۶۷ شتاب بیشینه هنگام زلزله پیشنهاد شده است. مشاهده می‌شود نتایج این پژوهش برای آبرفت درشت‌دانه محدوده مورد نظر در تطابق با حد پایینی محدوده پیشنهادی است.

- تأثیر آرایش نیل‌ها در خاک با تراکم و سیمان‌تاسیون کمتر، ملموس‌تر است.

- نوع خاک انتخاب‌شده در این پژوهش، به تنهایی تأثیر چندانی در نتایج تحلیل ندارد. این موضوع می‌تواند ناشی از

همان‌گونه که در جدول‌های بالا مشاهده می‌شود، بین پارامترهایی که تحلیل حساسیت روی آن‌ها انجام شده است، ارتفاع دیوار بیشترین تأثیر را دارد. بنابراین به عنوان هدف اصلی این پژوهش، محدوده ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm}) به صورت جدول زیر برای گودبرداری‌های عمیق و نیمه‌عمیق پیشنهاد می‌شود:

جدول (۸) محدوده پیشنهادی ضریب شتاب افقی معادل زلزله مدل (K_{hm})

K_{hm}	عمق گودبرداری
۰/۱۸ ~ ۰/۲۰	گودبرداری عمیق (حدود عمق: ۲۰ متر)
۰/۱۴ ~ ۰/۱۹	گودبرداری نیمه عمیق (حدود عمق: ۱۰ متر)

همان‌گونه که در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، تأثیر آرایش میل مهارها در خاک با تراکم و سیمان‌تاسیون کمتر، ملموس‌تر است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که محدوده خاک انتخابی به تنهایی تأثیر چندانی در نتایج تحلیل ندارد. این موضوع می‌تواند ناشی از اثر

- [5] Jeyoung & Seo., "Anchored wall analysis based on P-y curves", *Computers and Geotechnics* 32 (2004) 235-243
- [6] Ch. J Lee, H.T Chen, Yu. Ch. Wei, Yi.Ch. Lin, W. Huang & K. Chiang, "Centrifuge modeling of a self-supported double soldier piled wall in sandy soil", *Journal of GeoEngineering*, Vol. 2, No. 3, PP. 97-109
- [7] "Demonstration Project 103-Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", 7 Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-99-026, 1999
- [8] Monitoring Report of Yas Commercial Project, Pajohesh Omran Rahvar consultant engineering, 2010
- [9] Itasca Consulting Group, *FLAC Manual*, Minneapolis, Minnesota, 1999
- [10] Kim, J. S., Kim, J. Y. and Lee, S. R., "Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method", *Computers and Geotechnics*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-14, 1997

اثر سیمان‌تاسیون مناسب آبرفت درشت‌دانه باشد.

۷- قدردانی

بدین وسیله از آقایان مهندس مازیار پاسدارپور و مهندس سینا مجیدیان که ما را از پیشنهادهای ارزنده خویش بهره‌مند ساختند، قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

- [1] S.H. Hong, F.H. Lee, K.Y. Yong, "Three-dimensional pile-soil interaction in soldier-piled excavations", *Computers and Geotechnics* 30 (2003) 81-107
- [2] P.A. Vermeer, A.P. Nico Ruse, "Arching effects behind a soldier pile wall", *Computers and Geotechnics* 28 (2001) 379-396
- [3] G. Ren, J.V. Smith, J.W. Tang, Y.M. Xie, "Underground excavation shape optimization using an evolutionary procedure", *Computers and Geotechnics* 32 (2005) 122-132
- [4] Terzaghi, K., and Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., Wiley, New York.