

بررسی تاثیر طول موج حرکات لرزه ای زمین بر ناپایداری دینامیکی شیروانی ها

محمد مهدی شهرابی

کارشناس ارشد ژئوتکنیک، مهندسین مشاور آنگیر، تهران، ایران
mahdi89sh@yahoo.com

فردین جعفرزاده

دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
fardin@sharif.edu

هادی فرحی جهرمی

دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
mani_ff@yahoo.com

کلید واژه‌ها: ناپایداری شیروانی، مدل‌سازی عددی، تشدیدهای توپوگرافی، امواج سطحی

چکیده

به وجود آمدن امواج رایلی (Rayleigh) در نزدیکی سطح زمین تحت اثر امواج حجمی منتشر شده، در ادبیات به صورت مفصل مورد بحث قرار گرفته است. این پدیده عموماً در نواحی با نامنظمی‌های سطحی به وجود می‌آید، مثلاً در شیروانی‌ها. علاوه بر این، شیروانی‌های خاکی در حین وقوع زلزله، در اثر ایجاد نیروهای اینرسی اضافی که روی گوه‌های دارای پتانسل لغزش اثر می‌کنند، در معرض ناپایداری قرار می‌گیرند. اگرچه به نظر می‌رسد که تاثیر تشدیدهای ناشی از توپوگرافی در بررسی رفتار لرزه‌ای شیروانی‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در اثر آن به خوبی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، ضمن اثبات اینکه چگونه این واقعیت شاهدهی بر رفتار وابسته به فرکانس ناپایداری لرزه‌ای در شیروانی‌های خاکی می‌باشد، به بررسی تاثیر طول موج امواج زلزله بر این پدیده پرداخته شده است. به همین منظور، از یک مدل عددی اجزای محدود (Finite Element Model) صحت سنجی شده برای بررسی تاثیر طول موج امواج حجمی برخوردار شد. شیروانی بر تشکیل امواج سطحی رایلی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای افزایش دقت استفاده از روابط تخمینی پیش‌بینی جابجایی‌های شیروانی در اثر ناپایداری‌های لرزه‌ای، تشکیل امواج سطحی و تشدیدهای ناشی از آن باید در نظر گرفته شود. در آخر، مفهوم "عمق موثر تشدیدهای سطحی" به عنوان پلی بین دو مفهوم کلاسیک تشدیدهای سطحی و ناپایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، معرفی شده است.

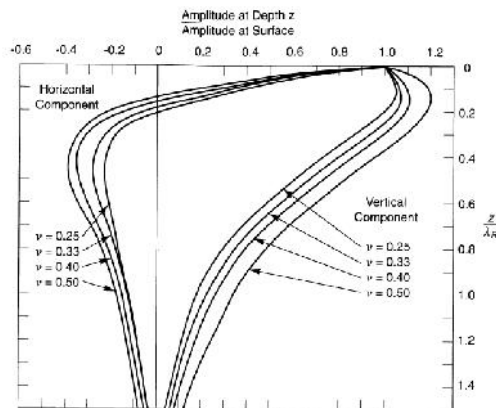
مقدمه

امواج لرزه‌ای حجمی پس از برخورد به سطح زمین، به علت وجود ناهمواری‌های توپوگرافی دچار تغییر ماهیت می‌شوند. در زلزله‌های متعددی، شتاب‌های حداکثر شدیدی روی سطح و در قله تپه‌ها، شیب‌ها و شیروانی‌های پله‌ای اندازه‌گیری شده است. برای مثال در Matsuzaki ژاپن، روی یک تپه شتاب حداکثر اندازه‌گیری شده روی قله، $2/5$ برابر شتاب اندازه‌گیری شده در نزدیکی پنجه آن بوده است (Jibson, 1987). انعکاس و انکسار امواج، به عنوان علت اصلی تشدید امواج لرزه‌ای در نزدیکی شیروانی‌ها شناخته شده است. معمولاً امواج SH منتشر شده باعث تشکیل دیگر انواع موج‌ها نمی‌شوند (برای مثال P، SV و Rayleigh). در واقع، امواج SH می‌توانند باعث ایجاد امواج Love شوند، در شرایط خاص سایت که منجر به محبوس شدن امواج لرزه‌ای در لایه‌ای کم عمق نزدیک به سطح زمین شود (لایه‌ای نرم روی لایه‌ای سخت). از طرفی، امواج SV منتشر شده در نزدیکی سطح شیروانی‌ها، به صورت امواج دیگری به خصوص امواج Rayleigh بازتاب می‌شوند. همچنین نشان داده شده است که دامنه تشدید امواج SV می‌تواند بیشتر از دامنه تشدید امواج SH باشد (Asimaki and Gazetas, 2004). طبق بررسی‌های Harumi و Ohtsuki (1983)، امواج Rayleigh به وسیله امواج SV ورودی در اطراف پنجه شیروانی تشکیل شده، و سپس روی سطح شیروانی به طرف تاج منتشر می‌شوند. اشاره شده است که امواج Rayleigh منتشر شده در پشت تاج شیروانی، دامنه‌ای در حدود ۳۵-



۴۰٪ دامنه امواج ورودی دارند. البته به علت تداخل امواج متعدد منعکس و منکسر شده، آنالیز تشدید و تخفیف وابسته به توپوگرافی مسئله ای پیچیده می باشد. در حقیقت، الگوی اثرات توپوگرافی وابسته به هندسه ناهمواری و نیز نوع، فرکانس و زاویه تابش امواج ورودی می باشد (Sanchez-Sesma and Campillo, 1993). در نتیجه، مطالعات همه جانبه اندکی در این زمینه وجود دارد که دیدگاه دقیقی را برای بررسی اثر هر موج به طور جداگانه ارائه نماید.

به هر صورت، این واقعیت که در اثر انکسار امواج SV در نزدیکی شیروانی ها، امواج Rayleigh تشکیل می شوند اثبات شده است. مولفه های افقی و قائم جابجایی امواج Rayleigh به طور واضح نشان می دهد که عمق موثری حدوداً برابر با یک طول موج (R) وجود دارد، که این امواج تولید جابجایی های مورد توجهی می نمایند (شکل ۱). با توجه به این واقعیت که امواج سطحی باعث ایجاد نیروهای اینرسی اضافه بر نیروهای ایجاد شده توسط امواج حجمی بر روی توده لغزنده می شوند، اهمیت موضوع فوق الذکر افزایش می یابد. از این پس، عمقی پایین تر از سطح شیروانی که در آن امواج سطحی تولید نیرو و شتاب های اضافی می کنند به عنوان "عمق موثر تشدید سطحی" اتلاق خواهد شد.

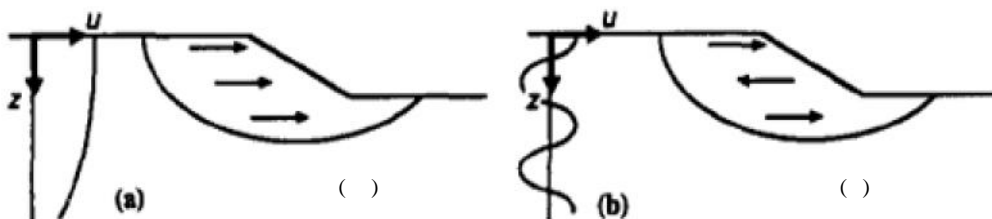


شکل ۱: حرکت افقی و قائم امواج Rayleigh (Kramer, 1996)

در تئوری بلوک صلب ارائه شده توسط Newmark برای تخمین جابجایی لرزه ای شیروانی ها، در ابتدا فرض بر صلب بودن "توده لغزنده" بود؛ اگرچه مصالح تشکیل دهنده اکثر شیروانی انعطاف پذیر می باشند. محدوده ای که در آن فرض صلب بودن "توده لغزنده" صحیح می باشد، وابسته به طول موج حرکت ورودی در قیاس با ابعاد توده لغزش بالقوه می باشد (Kramer and Smith, 1997). همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می شود، برای توده های لغزنده باریک و/یا طول موج های بلند (فرکانس ورودی پایین)، حرکات روی توده لغزنده هم فاز هستند و اثرات انعطاف پذیری توده لغزنده کوچک می باشد. در طرف مقابل، برای توده های لغزنده ضخیم و/یا طول موج های کوتاه (فرکانس ورودی بالا)، این اثر ممکن است بسیار چشمگیر باشد (شکل ۲-ب) و این واقعیت که نیروی محرک برآیند موثر بر توده لغزش بالقوه نسبتی با شتاب اعمالی بر روی تک تک نقاط داخل توده ندارد، به روشنی اهمیت طبیعت وابسته به فرکانس پاسخ لرزه ای شیروانی ها را نشان می دهد. Yegian و همکاران (1991) رابطه زیر را برای در نظر گرفتن اثرات محتوای فرکانسی حرکت زمین در محاسبه جابجایی های دائمی شیروانی ها ارائه کردند

$$\log u^* = \log \left(\frac{u}{a_{\max} N_{eq} T^2} \right) = 0.22 - 10.12 \frac{a_y}{a_{\max}} + 16.38 \left(\frac{a_y}{a_{\max}} \right)^2 - 11.48 \left(\frac{a_y}{a_{\max}} \right)^3 \quad (1)$$

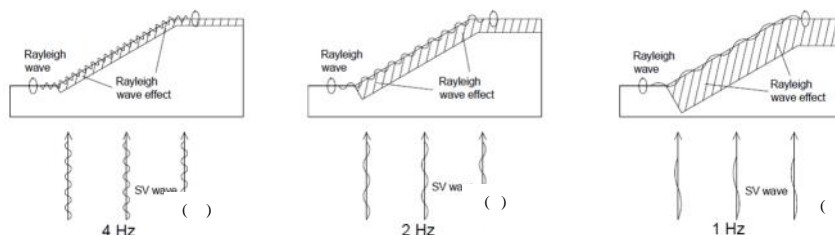
که در آن N_{eq} تعداد سیکل های معادل و T پریود غالب حرکت زمین می باشد.



شکل ۲: اثر طول موج حرکت ورودی و هندسه توده لغزش (الف) فرکانس پایین، طول موج بلند؛ (ب) فرکانس بالا، طول موج کوتاه (Kramer, 1996)

با توجه به تعریف "عمق موثر تشدید سطحی"، جنبه مهم دیگری از طبیعت وابسته به فرکانس ناپایداری لرزه ای شیروانی را می توان گسترش داد. همانطور که بحث شد، امواج Rayleigh تشکیل شده باعث افزایش شتاب اعمالی تا عمقی مشخص در زیر سطح شیروانی می شوند، که این عمق رابطه مستقیم با طول موج حرکت ورودی دارد (رابطه معکوس با فرکانس موج ورودی). در نتیجه، می توان به طور خلاصه گفت که هر چه فرکانس غالب حرکت ورودی زمین پایین تر باشد، مساحت (حجم) بزرگ تری از شیروانی تحت تاثیر امواج Rayleigh تشکیل شده قرار می گیرد (شکل ۳). این پدیده باعث ایجاد نیروهای اینرسی بزرگ تری روی توده لغزنده می شود؛ در نتیجه تغییر شکل های بزرگ تری رخ می دهد. در حقیقت، این ادعا با رابطه ارائه شده در بالا توسط Yegian و همکاران نیز مطابقت دارد. هر دو رابطه پیشنهاد می کنند که پریود غالب بزرگ تر حرکت زمین منجر به جابجایی های بزرگ تر می شود.

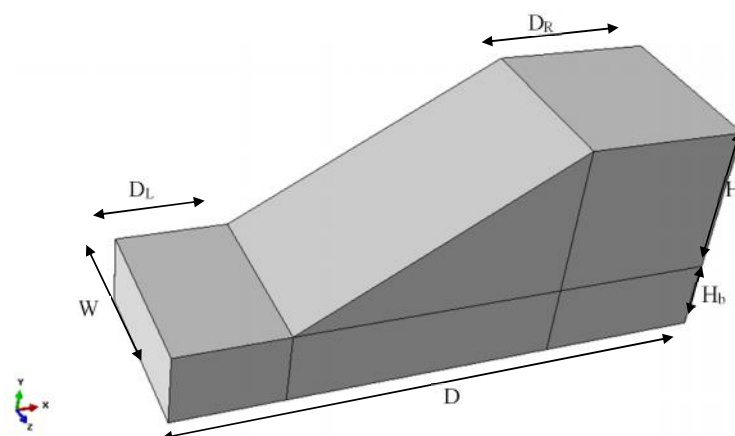
به طور خلاصه می توان گفت که یک جنبه ای مهم از تشدیدهای توپوگرافی و تشکیل امواج Rayleigh در نزدیکی خاکریزها، تپه ها و شیروانی های پله ای، خصوصیتی کلیدی از امواج سطحی یا همان عمق موثر می باشد. این واقعیت، دلیل دیگری بر طبیعت وابسته به فرکانس ناپایداری لرزه ای شیروانی ها می باشد.



شکل ۳: اثر عمق موثر تشدید سطحی برای امواج ورودی SV با فرکانس غالب (الف) ۴ هرتز، (ب) ۲ هرتز، (پ) ۱ هرتز

فرضیات مدل سازی عددی شیروانی خاکی

ابعاد شیروانی: به منظور مدل سازی عددی شیروانی خاکی، از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. ابعاد مدل با توجه به مدل فیزیکی شیروانی روی میز لرزه در دانشگاه صنعتی شریف (Farahi et al., 2013) و بر مبنای مدل بزرگ مقیاس متناظر با آن (با ضریب تشابه هندسی ۱۰) تعیین شده است و آنالیزهای صحت سنجی در این زمینه انجام گرفته است (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۲). هندسه شیروانی در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد. همچنین ابعاد هندسی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۴: ابعاد هندسی مدل عددی

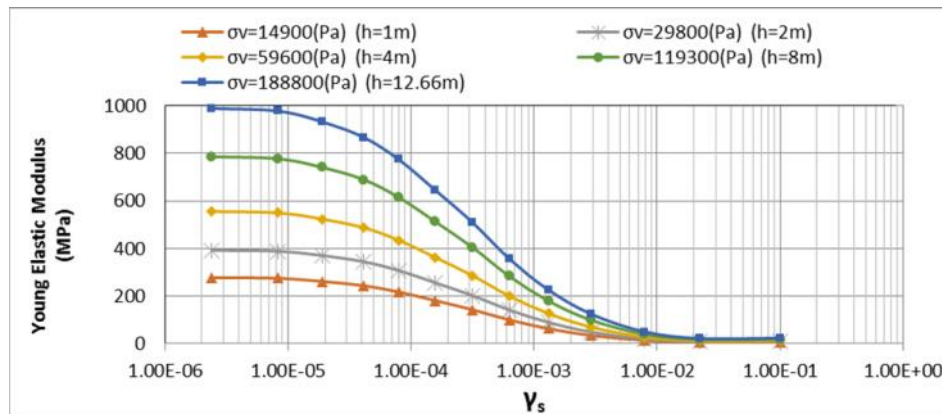
جدول ۱: پارامترهای هندسی مدل عددی

$i (^{\circ})$	W (m)	L (m)	L_c (m)	L_t (m)	H_b (m)	H_s (m)
۳۰	۱۰/۰	۳۰/۱۵	۹/۱۵	۶/۰	۴/۰	۸/۶۶



خصوصیات مصالح: مصالح مورد استفاده در مدلسازی عددی بر مبنای پارامترهای اندازه گیری شده خاک ماسه ای خشک بابلر که آزمایش های پایه میز لرزه بر روی آن انجام گرفته بود انتخاب شده است (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۲). بر این مبنای خصوصیات الاستیک به صورت خطی معادل وابسته به کرنش برشی (Kramer, 1996) و با توجه به رابطه پیشنهادی (EPRI (1996) تعریف گردید. همچنین مدول الاستیک با نسبت مجذور تنش نرمال در هر ارتفاع مدل به صورت متغیر تعریف شد. در شکل ۵ روابط کاهش الاستیک خطی را که در این مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت مشاهده می کنید.

خصوصیات پلاستیک نیز برای مصالح خاکی در نظر گرفته و با توجه به مدل رفتاری موهر-کولمب تعریف شد. پارامترهای متناظر مدل موهر-کولمب بر مبنای نتایج آزمایش های انجام گرفته روی خاک ماسه ای مورد استفاده در آزمایش های فیزیکی اندازه گیری شد که در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۵: روابط کاهش الاستیک خطی معادل مورد استفاده در مدلسازی خاک ماسه ای

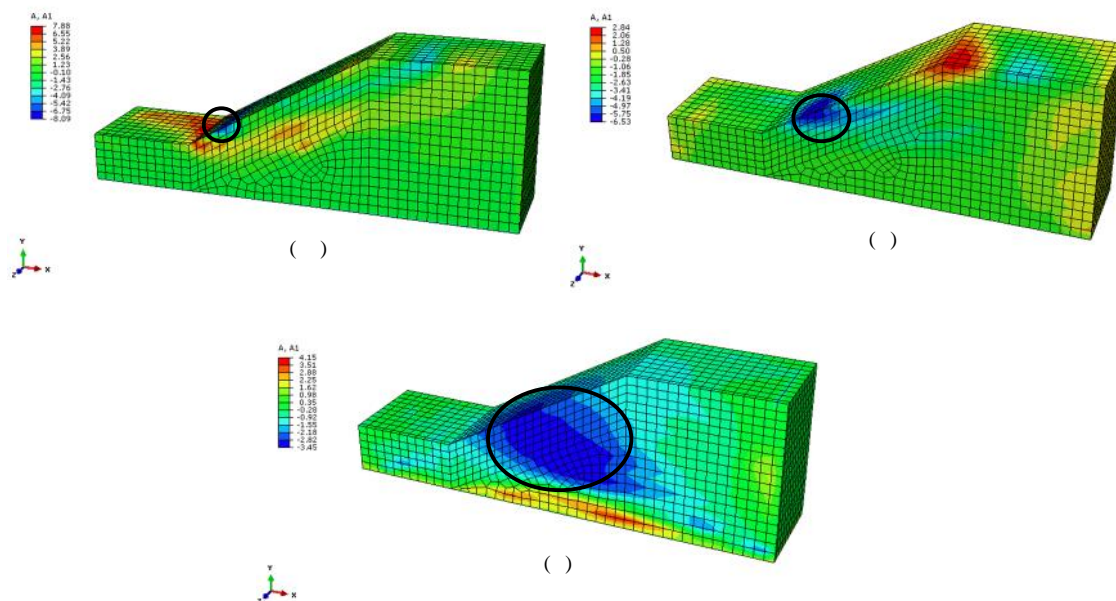
جدول ۲: پارامترهای هندسی مدل عددی (درخشان غازی، ۱۳۹۲)

زاویه اصطکاک (ا)	زاویه اتساع (ا)	چسبندگی (Pa) - c	دانسیته (kg/m ³) -
۳۰	۰/۱	۶۰۰	۱۵۲۰

شرایط مرزی و خصوصیات بار لرزه ای: دو نوع شرایط اولیه پیش از بارگذاری دینامیکی (شرایط تنش برجا) روی شیروانی تعریف می شود، وزن خاک و فشار جانبی روی دیواره های مدل. وزن خاک با توجه به چگالی 1520 kg/m^3 در جهت قائم و نیز فشار جانبی اعمالی روی صفحات جانبی مدل در حالت ساکن با ضریب k_0 در شرایط اولیه تعریف می شود. این فشار با توجه به ارتفاع خاک بالای هر نقطه در مدل محاسبه می شود. همچنین به منظور ایجاد مرزهای جاذب در اطراف مدل، در گام دینامیکی فنرها و میراگرهایی بر مبنای مدل های مخروطی Meek and Wolf (1992) در مرزهای مدل و در محل اتصال المانها اعمال شد. همچنین برای بارگذاری دینامیکی، ۲۵ سیکل با دامنه $g \cdot 0.32$ (۶۵٪ دامنه حداکثر شتاب افقی پیش بینی شده در سطح زمین) و با فرکانس $3/8$ هرتز انتخاب شد.

شواهدی بر تشکیل امواج سطحی در مدل های عددی

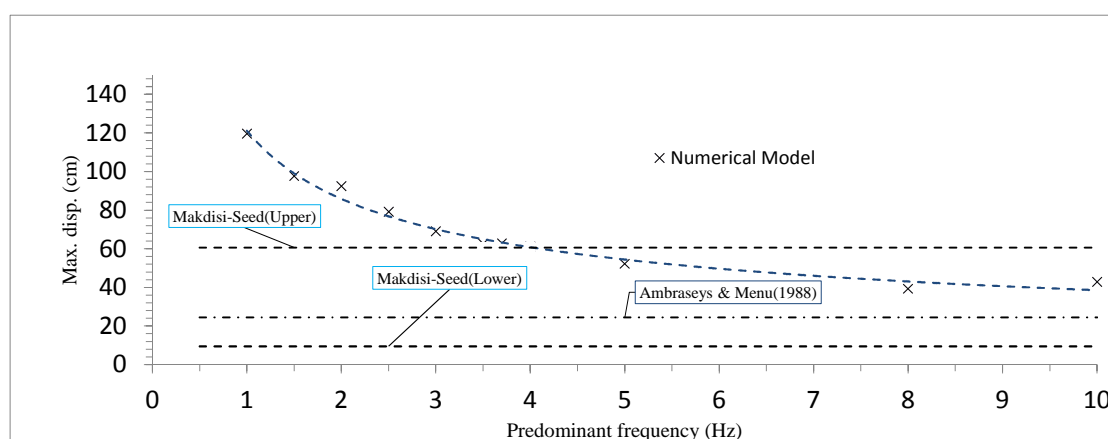
همانطور که پیش تر گفته شد، یک خصوصیت مهم امواج Rayleigh عمقی است که آن ها در داخل سطح نفوذ می کنند. این عمق، حدوداً برابر با طول موج آن ها می باشد. در نتیجه، برای امواجی با فرکانس غالب پایین تر، تشدیدهای ایجاد شده در اثر تشکیل امواج Rayleigh تا عمق بیش تری اثرگذار هستند. این مفهوم، که به عنوان "عمق موثر تشدید سطحی" معرفی شد، در آنالیزهای دینامیکی پایداری شیروانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در آنالیز فرکانسی مدل عددی بزرگ مقیاس در بازه ۱-۱۰ هرتز، این پدیده از زاویه ای دیگر نیز قابل مشاهده است. جبهه امواج Rayleigh در شکل ۶ برای مدل های با فرکانس ورودی ۱، $3/8$ و ۱۰ هرتز به ترتیب نشان داده شده است. عمقی که شتاب های افقی تا آن افزایش یافته اند، به خوبی عمق اثر این امواج را نشان می دهد. این شاهد به خوبی ماهیت وابسته به فرکانس تشدیدهای توپوگرافی تاثیرگذار بر شیروانی ها، یا به بیان بهتر گوه های لغزشی روی شیروانی ها، را نشان می دهند. نمای شماتیک موجود در شکل ۶ نشان می دهد که "شتاب ورودی با طول موج بلندتر می توان تاثیر مخرب تری روی شیروانی ها داشته باشد، نه فقط به دلیل ایجاد نیروهای هم فاز روی توده لغزنده (Kramer and Smith, 1997)، همینطور به علت عمق تاثیر بیشتر امواج Rayleigh تشکیل شده".



شکل ۶: شتاب های افقی، عمق موثر امواج Rayleigh تشکیل شده در نزدیکی شیروانی با امواج ورودی
(الف) ۱۰ هرتز، (ب) ۳/۸ هرتز، (پ) ۱ هرتز

مقایسه جابجایی دائمی محاسبه شده با روابط تخمینی

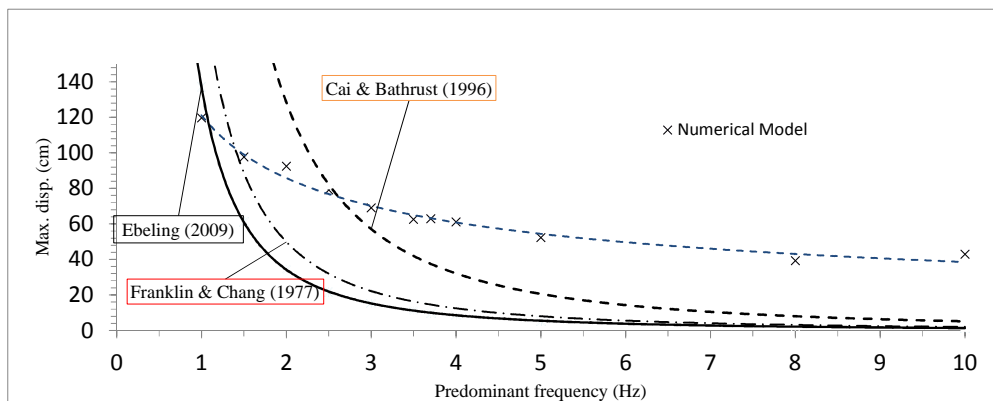
با استفاده از روابط ارائه شده توسط برخی از محققین، نتایج جابجایی دائمی بدست آمده از روابط تخمینی و نیز مدل های عددی مقایسه شده اند. لازم به ذکر است که اکثر این مدل ها، برای جابجایی دائمی شیروانی ناپایدار روابطی مستقل از فرکانس بارگذاری ارائه می کنند (Makdisi and Seed, 1978 و Ambraseys and Menu, 1988). برخی از این روابط به صورت غیرمستقیم جابجایی را به فرکانس وابسته نشان می دهند (Franklin and Chang, 1977 و Cai and Bathurst, 1996 و Ebeling, 2009) و تعداد کمی نیز به صورت مستقیم این وابستگی را در روابط پیشنهادی لحاظ می کنند (Yegian et al., 1991). در شکل ۷ جابجایی بدست آمده از روابط Seed و Makdisi و Ambraseys و Menu با نتایج مدلسازی عددی در فرکانس های مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، روابط تخمینی مقادیری کمتر از جابجایی های مشاهده شده در مدل عددی را نشان می دهند.



شکل ۷: جابجایی افقی حداکثر شیروانی در معرض بارهای دینامیکی با فرکانس های متفاوت (۱)

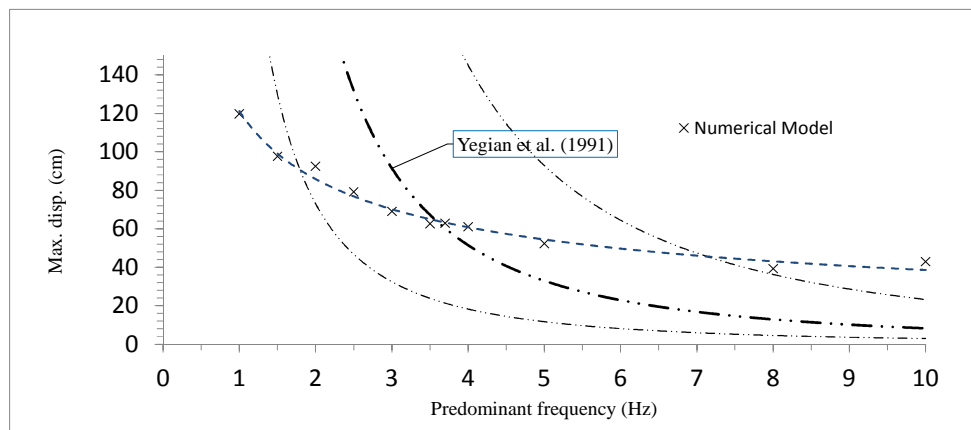
در شکل ۸ جابجایی بدست آمده از روابط Franklin و Chang و Cai و Bathurst (بر پایه تئوری بلوک لغزنده نیومارک) و نیز Ebeling نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، روابط تخمینی Franklin و Chang و نیز Ebeling مقادیری کمتر از جابجایی های مشاهده شده در مدل عددی را نشان می دهند. پیش بینی Cai و Bathurst در حدود فرکانس ۲/۵ هرتز دقیقاً بر نتایج مدلسازی عددی منطبق است و در فرکانس های بالاتر و پایین تر به ترتیب پیش بینی هایی کمتر و بیشتری را نشان می دهد.





شکل ۸: جابجایی افقی حداکثر شیروانی در معرض بارهای دینامیکی با فرکانس های متفاوت (۲)

در شکل ۹ جابجایی بدست آمده از رابطه Yegian و همکاران را در مقایسه با نتایج مدلسازی عددی نشان می دهد. همانطور که بیان شد، این رابطه جابجایی های دائمی در شیروانی های خاکی تحت بارگذاری زلزله را به فرکانس (پرپود) حرکت ورودی ارتباط می دهد. مشاهده می شود که به جز فرکانس های خیلی پایین (کمتر از ۱/۵ هرتز)، جابجایی های مشاهده شده در مدل عددی با نتایج بدست آمده از رابطه Yegian و همکاران انطباق مناسبی دارد.



شکل ۹: جابجایی افقی حداکثر شیروانی در معرض بارهای دینامیکی با فرکانس های متفاوت (۳)

نتیجه گیری

مهم ترین نتایج بدست آمده در این پایان نامه را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- (۱) در اثر برخورد امواج حجمی لرزه ای به ناهمواری های سطح زمین، از جمله شیروانی، امواج سطحی در اطراف شیروانی تشکیل شده و از پنجه به سمت تاج حرکت می کند که موجب تشدید حرکات زمین می گردد.
- (۲) با کاهش فرکانس بارگذاری لرزه ای، امواج سطحی با فرکانس پایین تر تشکیل می شوند. در نتیجه حرکات تشدید یافته زمین روی سطح شیروانی تا عمق بیشتری نفوذ می کنند و این موجب ایجاد نیروهای اینرسی بزرگ تری در توده لغزنده می شود. به عبارت دیگر، با کاهش فرکانس بارگذاری جابجایی های دائمی بزرگ تری در اثر ناپایداری لرزه ای شیروانی ها بوجود می آید.
- (۳) همچنین با افزایش فرکانس بارگذاری تناوبی، عمق گوه لغزنده شیروانی کاهش می یابد.
- (۴) طبیعت وابسته به فرکانس ناپایداری شیروانی ها در این تحقیق نشان داده و نتیجه گرفته شد که روابطی که این واقعیت را برای تخمین میزان جابجایی لرزه ای شیروانی های ناپایدار در نظر می گیرند، پیش بینی دقیق تری ارائه می کنند.

مراجع

جعفرزاده ف، شهرابی م م و فرحی جهرمی ه (۱۳۹۲) مدلسازی عددی ناپایداری شیروانی های خاکی تحت بارگذاری دینامیکی، مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ژئوتکنیک، کرمانشاه، ایران

درخشان غازانی ر (۱۳۹۲) مدلسازی فیزیکی اثر عمق دفن لوله های مدفون در شیروانی های خاکی تحت بارگذاری دینامیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

Ambraseys NN and Menu JM (1988) Earthquake-induced ground displacements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 985–1006

Assimaki D and Gazetas G (2004) Soil and topographic amplification on canyon banks and the 1999 Athens earthquake, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (1): 1-43

Cai Z and Bathurst RJ (1996) Deterministic sliding block methods for estimating seismic displacements of earth structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, 255–268

Ebeling RM, Fong MT, Yule DE, Chase A and Kala RV (2009) Permanent seismically induced displacement of rock-founded structures computed by the Newmark program. ERDC TR-09-2, U.S. Army Corps of Engineers, Flood and Coastal Storm Damage Reduction Research and Development Program

Electric Power Research Institute (EPRI) (1996) Guidelines for determining design basis ground motions, Final Rep. No. TR-102293, Palo Alto, California

Farahi Jahromi H, Joshaghani M, Sehi-Zadeh M and Yousefi S (2013) Comparaison des deformations experimentale sur la pente dynamiquement induite la theorie des blocs glissants de Newmark, *Proceedings of 5th International Young Geotechnical Engineering Conference*, Paris, France

Franklin AG and Chang FK (1977) Permanent displacements of earth embankments by Newmark sliding block analysis, *Earthquake Resistance of Earth and Rock-fill Dams*, Rept. 5, Misc. Paper No. S-71-17, U.S. Army Engr. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss

Jibson R (1987) Summery of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability, Open-File Report 87-268, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California

Kramer SL (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall

Kramer SL and Smith MW (1997) Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123, 635-644

Makdisi FI, Seed HB (1978) Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 104, 849–867

Meek JW and Wolf JP (1992) Cone models for homogeneous soil, I. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 118, 667-685

Ohtsuki A and Harumi K (1983) Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 441-462

Sanchez-Sesma F and Campillo M (1993) Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves, *Tectonophysics*, 218, 113-125

Yegian MK, Murciano EA and Ghahraman VG (1991) Seismic risk analysis for earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 18-34