

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

مشاهدات حاصل از زلزله‌های مخرب در سراسر دنیا حاکی از این است که عدم شناخت شرایط ساختگاه موجب خسارات زیان‌بار بسیاری شده است. تأثیر ساختگاه به‌نوبه خود به دو شاخه اصلی تأثیر آبرفت و یا به‌عبارتی دیگر خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی و تأثیر خصوصیات هندسی و ناهمواری‌های موجود در ساختگاه تقسیم می‌شود. شرایط ساختگاه^۱ و توپوگرافی^۲ می‌تواند بر تمام پارامترهای مهم یک جنبش نیرومند زمین از قبیل دامنه، محتوای فرکانس، مدت و غیره اثرگذار باشد. در این پژوهش به بررسی اثرات مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک و دامنه موج ورودی بر پاسخ لرزه‌ای شیب‌های خاکی تحت اثر موج مهاجم SV پرداخته شده است. بدین منظور، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D دو بعدی برای انجام تحلیل‌ها، با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی^۳ استفاده می‌شود. برای بررسی اثر سطح جنبش بر پاسخ لرزه‌ای، شیب ۳۰ درجه با ارتفاع ۳۰ متر تحت اثر موج ورودی ریکر^۴ با دامنه‌های ۰/۲ g، ۰/۲۵ g، ۰/۳ g و ۰/۳۵ g (مطابق آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰) و ویرایش چهارم) و فرکانس‌های مرکزی ۱، ۳، ۵ و ۱۰ هرتر مدل‌سازی و تحلیل شده است. همچنین از خاک تیپ I، II و III به‌منظور بررسی اثر مشخصات خاک استفاده شده است. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش سطح جنبش، ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی، کاهش می‌یابد و حضور لایه خاک با مصالح تیپ III (مصالح نسبتاً ضعیف) باعث افزایش کوچک‌نمایی^۵ ضریب شتاب افقی، خصوصاً در ناحیه حضور لایه نسبتاً ضعیف می‌شود و جابه‌جا شدن لایه نسبتاً ضعیف از ۱/۳ فوقانی ارتفاع شیب به ۱/۳ تحتانی، باعث افزایش این کوچک‌نمایی می‌شود. همچنین زمانی که فرکانس حرکت ورودی به فرکانس طبیعی لایه خاک نزدیک است، بزرگ‌نمایی^۶ در پاسخ سطح زمین مشاهده می‌شود.

واژگان کلیدی: توپوگرافی شیب، رفتار غیرخطی، بزرگ‌نمایی، اثرات مصالح، اثرات سطح جنبش ورودی.

بررسی اثرات لایه‌بندی و دامنه موج ورودی بر پاسخ لرزه‌ای شیب‌های خاکی

محمدحسین محمدیان

دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

مسعود عامل‌سخی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، amelsakhi@qut.ac.ir

عبدالله سهرابی بیدار

دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱- مقدمه

مشاهدات حاصل از زلزله‌های مخرب مانند سان‌فرانسیسکو ۱۹۷۱، شیلی ۱۹۸۵، نورتریج ۱۹۹۴ و بسیاری دیگر از زلزله‌های بزرگ مقیاس در سراسر دنیا حاکی از این است که عدم شناخت شرایط ساختگاه خسارات زیان‌بار بسیاری به بار آورده است [۱-۳]. تأثیر ساختگاه به‌نوبه خود به دو شاخه اصلی تأثیر آبرفت و یا به‌عبارتی دیگر خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی و

تأثیر خصوصیات هندسی و ناهمواری‌های موجود در ساختگاه تقسیم می‌شود. شرایط ساختگاه و توپوگرافی می‌تواند بر تمام پارامترهای مهم یک جنبش نیرومند زمین از قبیل دامنه، محتوای فرکانس، مدت و غیره اثرگذار باشد. مورد اول که همان تأثیر خصوصیات ژئوتکنیکی ساختگاه است در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای دنیا از جمله آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰ ایران (ویرایش

چهارم) قید شده است ولی تأثیر ناهمواری‌های موجود زیرسطحی و رو سطحی در بسیاری از آیین‌نامه‌های معتبر دنیا نیامده است [۴].

اگرچه توپوگرافی سطحی و زیرسطحی از جمله عواملی به شمار می‌آیند که بر بزرگ‌نمایی مشخصه‌های حرکتی زمین و محتوای فرکانسی زلزله ثبت شده در سطح زمین تأثیر می‌گذارند، با این وجود اغلب آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای موجود اثرات ساختگاه را به صورت یک‌بعدی بررسی کرده و در طراحی سازه‌ها استفاده می‌کنند [۵-۷]. در تحقیقات گذشته، اکثر محققان خاک را یک نیم‌فضای همگن در نظر گرفته بودند. درحالی که در پژوهش‌های اخیر با در نظر گرفتن اثرات مربوط به لایه‌بندی خاک، مشاهده می‌شد که الگوی پاسخ تغییر خواهد کرد و اثرات مربوط به لایه‌بندی خاک بر روی ضریب تقویت توپوگرافی کل حکم‌فرما خواهد بود. نتایج پژوهش تراپ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۳ نشان داد، در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس توده خاک، اثرات مربوط به توده خاک (A_s) یا ضریب تقویت ناشی از اثرات لایه‌بندی خاک) بر روی پاسخ سطح زمین حکم‌فرما بوده و در فرکانس‌های خارج از این محدوده، اثرات مربوط به تقویت توپوگرافیک (A_h) یا ضریب تقویت توپوگرافی) ناشی از شکل عارضه، بر روی پاسخ حکم‌فرماست. همچنین نتایج آنها نشان داد که اثرات مربوط به لایه‌بندی خاک و اثرات ناشی از توپوگرافی محض را نمی‌توان جدا و مستقل از یکدیگر پنداشت. در واقع این دو اثر کاملاً با یکدیگر در ارتباط و بر روی یکدیگر، تأثیر متقابل دارند. این یافته با نتایج آشفورد و همکاران [۹] که این دو پدیده را مستقل از یکدیگر می‌دانستند در تناقض است. در پژوهش انجام شده توسط پلکیس و همکاران [۱۰] که در آن از روش ساده شده‌ای برای پیش‌بینی اثرات توپوگرافی مبنی بر جمع اثرات یک‌بعدی (لایه‌بندی خاک) و دو بعدی (با فرض شرایط همگن) بنا شده بود، برای یک شیب خاص مشاهده شد که در بازه پریود $T = 0.15s - 0.25s$ با جمع نتایج آنالیزهای یک‌بعدی و دو بعدی (خاک همگن)، می‌توان به نتایج حاصل از آنالیز دو بعدی مربوط به خاک لایه‌بندی شده رسید (۳ درصد تخمین بیشتر برای روش

ساده شده). با این حال، برای بازه پریود $T = 0.25s - 0.35s$ ، کاهش چشمگیری در نتایج مربوط به جمع آنالیزهای یک‌بعدی و دو بعدی (خاک همگن)، نسبت به آنالیز دو بعدی با شرایط خاک لایه‌بندی شده مشاهده می‌شود (۳۵ درصد پاسخ کمتر در تاج شیب)؛ بنابراین می‌توان گفت بسته به بازه پریود مورد نظر، جمع آثار ناشی از نتایج یک‌بعدی و دو بعدی (خاک همگن)، نسبت به نتایج آنالیزهای دو بعدی با شرایط خاک لایه‌بندی شده، می‌تواند محافظه کارانه یا غیرمحافظه کارانه باشد. در تحقیق انجام شده توسط ژانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸، اثرات مربوط به انحنای لبه شیب بر روی پاسخ مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شده که با افزایش انحنای لبه‌های شیب، پاسخ (ضرایب تقویت شتاب) در لبه‌های مورد نظر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد زمانی که زاویه شیب از $22/3$ درجه بیشتر شود، موج P بازتاب شده از سطح مورب شیب می‌تواند مستقیماً به قسمت بالایی شیب برسد و باعث تقویت حرکت شود. برای زوایای بزرگ‌تر از $32/3$ درجه، معادلات پیچیده‌ای بر حرکت موج‌ها حکم‌فرما شده و باعث به وجود آمدن پیک‌های ثانویه در ضرایب تقویت شتاب در ناحیه پشت تاج شیب می‌شوند. مطالعات پارامتریک بوکاوالاس و پادامیترو [۱۲] در سال ۲۰۰۵ بر روی متغیرهای زاویه شیب، ارتفاع نرمالیزه شده، تعداد سیکل‌های تحریک و میرایی نشان داد، زاویه شیب و ارتفاع نرمالیزه شده اثر زیادی بر روی حرکات افقی و قائم زمین دارد و همچنین بر روی فاصله‌ی اثرگذاری توپوگرافی بر پاسخ، اثرگذار است درحالی که تعداد سیکل و میرایی بر روی پاسخ لرزه‌ای اثر چندانی نداشت. همچنین نتایج تحقیق آنان منتهی به ارائه روابطی برای تعیین ضرایب تقویت و فاصله تأثیر توپوگرافی بر پاسخ شد که نیاز به انجام آنالیزهای عددی را برطرف می‌کرد. بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط ریزیتانو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴، ضرایب تقویت توپوگرافیک (A_h , A_v) با فرض رفتار خطی مستقل از دامنه حرکت ورودی هستند؛ اما زمانی که رفتار غیرخطی در نظر گرفته می‌شود، مقادیر سطح جنبش ورودی (a_0)، بر تغییرات ضرایب تقویت توپوگرافی مؤثر است. می‌توان گفت در نظر

در این معادله t_0 ، f_p و A به ترتیب فرکانس غالب، زمان نظیر بیشینه دامنه و بیشینه دامنه را بیان می‌کند. در تعریف شرایط ساختگاه، وزن مخصوص ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۳ و مدول برشی ۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد که معادل با سرعت موج برشی ۵۰۰ متر بر ثانیه است. شکل (۱) مقایسه نتایج حاصل از این تحلیل‌ها را با نتایج ارائه شده توسط وونگ [۱۴] در سال ۱۹۹۸ نشان می‌دهد.

در شکل (۱) محور قائم بیانگر نسبت ماکزیمم پاسخ مؤلفه افقی جابه‌جایی در نقاط مختلف سطح زمین بر ماکزیمم دامنه جابه‌جایی موج ریکر محرک ورودی می‌باشد. محور افقی نیز بیانگر نسبت بی‌بعد شده فاصله نقاط از مرکز دره (x) بر نصف عرض دره (L) است.

۳- مشخصات مصالح، هندسه و حرکت ورودی

سنگ بستر مدل‌سازی شده در تحلیل‌ها از جنس مصالح خیلی سخت با سرعت موج برشی ۸۰۰ متر بر ثانیه و وزن مخصوص ۲۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (تیپ I) در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح شیب‌ها مطابق جدول (۱) می‌باشد.

با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بررسی اثر سطوح جنبش بر پاسخ لرزه‌ای شیب‌های همگن می‌باشد، شیب‌های

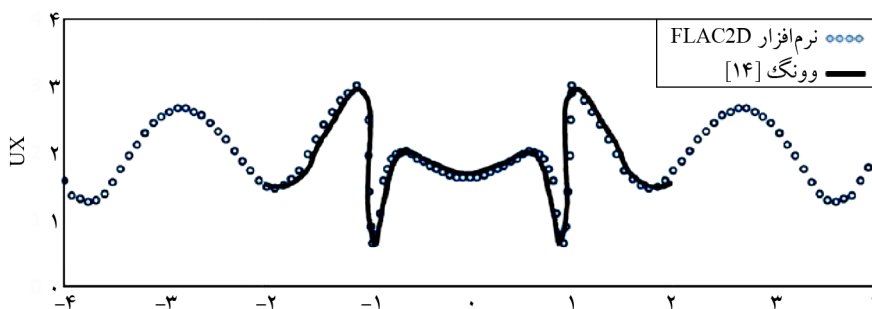
گرفتن رفتار خطی، باعث تخمین کم نتایج نسبت به حالت واقعی شده و برای در نظر گرفتن اثرات مزدوج توپوگرافی و لایه خاک، آنالیزهای دو بعدی باید با فرض رفتار غیرخطی انجام شود.

در این پژوهش با استفاده از روش تفاضل محدود به حل مسئله انتشار موج در شیب‌های همگن و ناهمگن و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی پرداخته شده و تأثیر سطح جنبش حرکت ورودی و مشخصات مصالح شیب بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- روش مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

به منظور مدل‌سازی از الگوریتم تفاضلات محدود در قالب نرم‌افزار FLAC2D استفاده شده است که از روش صریح (Explicit) برای حل مسائل دینامیکی استفاده می‌کند. به منظور اطمینان از صحت نتایج نرم‌افزار و تعیین شرایط مناسب مرزی در مدل‌سازی دینامیکی، پاسخ لرزه‌ای یک دره نیم‌دایره‌ای به شعاع ۲۵ متر، تحت تابش قائم موج ریکر SV با نسبت طول موج $\lambda/R=2$ قرار گرفت. امواج مهاجم مورد استفاده از نوع موج ریکر با معادله زیر است:

$$F(t) = A \left[1 - 2(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2 \right] \cdot e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \quad (1)$$



شکل (۱): اعتبارسنجی نتایج تحلیل عددی نرم‌افزار FLAC2D برای توپوگرافی دره ($\lambda/R=2$ ، $R=25m$) موج قائم (SV).

جدول (۱): مشخصات مصالح.

نوع خاک	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	زاویه اصطکاک	نسبت پواسون
تیپ I	۸۰۰	۲۱	۳۰	۴۶	۰/۴
تیپ II	۶۰۰	۲۰	۵	۴۲	۰/۴
تیپ III	۳۷۰	۱۹	۱	۳۹	۰/۴

همچنین فرکانس‌های طبیعی لایه خاک در حالت‌های مختلف لایه‌بندی در جدول (۳) آمده است. برای این کار ستون‌های یک‌بعدی خاک با در نظر گرفتن لایه‌بندی‌های مختلف در نرم‌افزار DEEPSOIL مدل‌سازی شدند. تاریخچه زمانی شتاب افقی در سطح هر یک از ستون‌های یک‌بعدی به صورت فایل ذخیره شده و در نرم‌افزار SeismoSignal فراخوانی می‌شوند و اولین فرکانسی که تشدید در آن رخ می‌دهد، به عنوان فرکانس اصلی لایه خاک برداشت می‌شود.

جدول (۳): فرکانس‌های طبیعی لایه خاک در حالت‌های مختلف لایه‌بندی.

فرکانس طبیعی لایه خاک (شیب) (هرتز)	حالت‌های مختلف لایه‌بندی
۶/۶۹	شیب همگن با مصالح تیپ I
۴/۵	شیب همگن با مصالح تیپ II
۵/۲	لایه نسبتاً ضعیف در ۱/۳ بالایی
۳/۹	لایه نسبتاً ضعیف در ۱/۳ میانی
۳	لایه نسبتاً ضعیف در ۱/۳ پایینی

در این نرم‌افزار برای بیان میزان میرایی سیستم‌های دینامیکی از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که در این مطالعه از میرایی رایلی استفاده شده است. میرایی رایلی در ابتدا برای تحلیل سازه‌ها در محیط‌های الاستیک برای میرا نمودن نوسان‌های طبیعی در سیستم مورد استفاده قرار گرفت. یک ماتریس میرایی مانند C با استفاده از ضرایب α و β با مؤلفه ماتریس جرم M و ماتریس سختی K مرتبط می‌شود $(C = \alpha M + \beta K)$.

در این نرم‌افزار میرایی رایلی با اختصاص دادن پارامترهای f_{min} و ζ_{min} تعریف می‌شود. در اینجا f_{min} برابر با فرکانس طبیعی ساختگاه در نظر گرفته شده است. میرایی استفاده شده در بخش دینامیکی مدل این مطالعه از نوع رایلی با نسبت میرایی $\zeta = 0.05$ است و مقدار فرکانس مرکزی (f_{min}) اختصاص داده شده به آن نیز از آنالیز مودال انجام شده (البته برای مدل‌های دو بعدی) برای هر شیب با لایه‌بندی‌های مختلف در نرم‌افزار ABAQUS به دست آمده است (شکل ۲).

با ارتفاع ۳۰ متر تحت اثر موجک ریکر با فرکانس‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۰ هرتز در چهار سطح جنبشی ۰/۲ g، ۰/۲۵ g، ۰/۳ g و ۰/۳۵ g مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد برای مدل‌سازی حالت free field یا سطح آزاد (بدون حضور توپوگرافی) از مصالح تیپ I استفاده می‌شود. با حضور توپوگرافی، لایه‌بندی شیب به پنج حالت زیر تقسیم می‌شود:

الف) شیب‌های همگن:

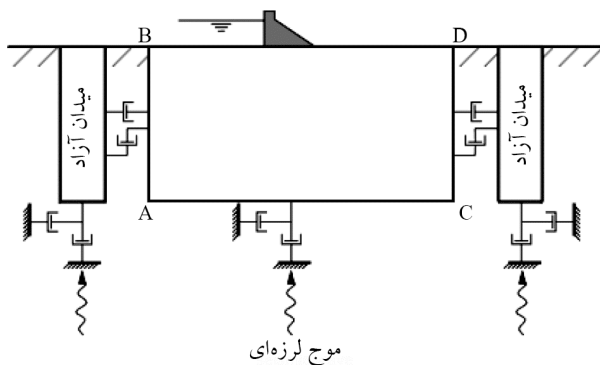
شیب همگن با مصالح تیپ I و شیب همگن با مصالح تیپ II
ب) شیب‌های ناهمگن:

شیب به سه لایه با ضخامت ۱۰ متر تقسیم می‌شود که دو لایه آن را مصالح تیپ II و یک لایه را مصالح تیپ III تشکیل می‌دهد و در هر حالت موقعیت لایه ضعیف تر نسبت به بقیه (لایه خاک با مصالح تیپ III) جابه‌جا می‌شود؛ لایه خاک با مصالح تیپ III در ۱/۳ بالایی، ۱/۳ میانی و ۱/۳ پایینی قرار می‌گیرد. برای بررسی اثرات غیرخطی بودن رفتار خاک، از مدل رفتاری موه‌ر-کلمب استفاده می‌شود. خاک عمدتاً دانه‌ای فرض شده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی بر اساس تیپ‌بندی خاک (توصیفاتی که برای خاک‌های دانه‌ای در آئین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم ذکر شده است) و از کتاب باولز [۱۵] استخراج شده است (جدول ۲). برای نزدیک شدن ویژگی‌های خاک به شرایط طبیعی و موجود در طبیعت، مقادیر کمی چسبندگی نیز برای خاک در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲): تعیین زاویه اصطکاک داخلی بر اساس تراکم خاک.

شرح	خیلی سست	سست	متوسط	متراکم	خیلی متراکم
چگالی نسبی D_r	۰	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۸۵
SPT N_{70}	خوب	۲-۱	۶-۳	۱۵-۷	۳۰-۱۶
	متوسط	۳-۲	۷-۴	۲۰-۸	۴۰-۲۱
	درشت	۶-۳	۹-۵	۲۵-۱۰	۴۵-۲۶
ϕ	خوب	۲۸-۲۶	۳۰-۲۸	۳۴-۳۰	۳۸-۳۳
	متوسط	۲۸-۲۷	۳۲-۳۰	۳۶-۳۲	۴۲-۳۶
	درشت	۳۰-۲۸	۳۴-۳۰	۴۰-۳۳	۵۰-۴۰
γ_{wet} (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۶-۱۱	۱۸-۱۴	۲۰-۱۷	۲۲-۱۷	۲۳-۲۰

انرژی دینامیکی از قسمت تحتانی یا فوقانی محیط اعمال شود، مرزهای جانبی نباید با استفاده از مرزهای آرام مدل شوند؛ به این دلیل که انرژی امواج از قسمت جانبی نشت پیدا کرده و هدر می‌رود. در این حالت از مرزهای منطقه آزاد برای شبیه‌سازی مرزهای جانبی استفاده می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، برای شبیه‌سازی مرزهای منطقه آزاد در قسمت‌های کناری از میراگرهای ویسکوز استفاده می‌شود.



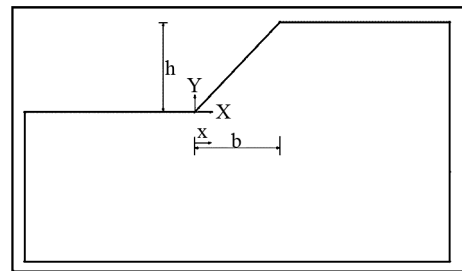
شکل (۳): استفاده از مرزهای منطقه آزاد در قسمت‌های جانبی و مرز آرام در قسمت تحتانی مدل.

در فرآیند مدل‌سازی عددی، سائز المان نقش مهمی را در دقت تحلیل ایفا می‌کند. ما در این تحقیق برای ناحیه free field سائز المان‌ها را ۳ متر و برای شیب، بعد افقی و قائم المان‌ها را به ترتیب ۳ متر و ۲ متر فرض کرده‌ایم. اگر بخواهیم قانون کوهلمیر و لیسمر [۱۶] را نیز بررسی کنیم، مقدار قابل قبولی است. به‌عنوان مثال برای کمترین سرعت موج برشی و بیشترین بسامد (این حالت، کنترل‌کننده ابعاد المان‌ها است و در سایر حالت‌ها، بعد المان، بزرگ‌تر از مقادیر یاد شده خواهد شد) داریم:

$$\lambda = CT = C/f = 370/10 = 37 \text{ m}$$

$$\Delta L \leq \lambda/10 \rightarrow \Delta L \leq 37/10 = 3.7 \rightarrow 3 \leq 3.7, 2 \leq 3.7. \text{OK}$$

همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، چنانچه بار ورودی زلزله به‌صورت تنش یا نیرو به‌بستر زمین اعمال شود، هم‌مرزهای کناری و هم‌مرز تحتانی باید با استفاده از مرزهای آرام مدل‌سازی شوند. درحالی‌که چنانچه بار ورودی به‌صورت سرعت یا شتاب باشد، مرز تحتانی مشابه تحلیل استاتیکی گیردار می‌گردد و مرزهای آرام صرفاً در مرزهای کناری مدل استفاده می‌شود.



شکل (۲): مختصات در نظر گرفته شده برای عارضه.

در FLAC2D ورودی بارگذاری دینامیکی می‌تواند به یکی

از چهار طریق زیر به مدل اعمال شود:

- تاربخچه شتاب
- تاربخچه سرعت
- تاربخچه تنش یا فشار
- تاربخچه نیرو

چنانچه اعمال بارگذاری از طریق شتاب یا سرعت باشد،

نباید در مرز اعمالی از سطوح میرا استفاده شود؛ زیرا در این صورت شتاب یا سرعت اعمالی دچار میرایی شده و اثر بارگذاری آن بر مدل از بین می‌رود. به‌طور کلی توصیه می‌شود که بارگذاری زمین لرزه‌ها به‌صورت تنش برشی برای امواج برشی و تنش قائم برای امواج فشاری، به‌بستر زمین اعمال شود. از این‌رو چون در این تحقیق موج ریکر از جنس موج برشی است از تنش برشی در محاسبات استفاده شده است.

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) V_s \quad (2)$$

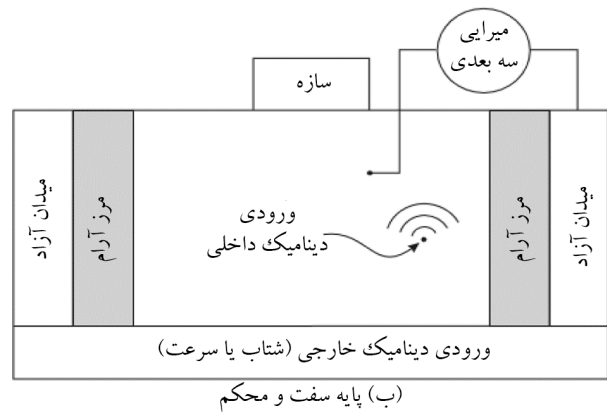
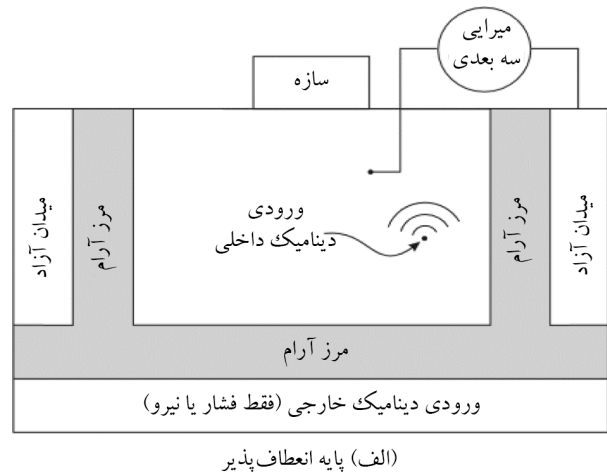
$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

در روابط بالا ρ جرم مخصوص، C_s سرعت موج برشی در محیط پیوسته، V_s سرعت ورودی موج برشی و G مدول برشی می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد برای مرزهای تحتانی چنانچه بارگذاری از نوع تنش یا نیرو باشد، استفاده از مرزهای آرام لازم بوده و چنانچه بارگذاری به‌صورت سرعت یا شتاب باشد، مرزهای تحتانی صرفاً باید گیردار گردد. در مورد مرزهای جانبی، هنگامی که منبع انرژی دینامیکی در داخل شبکه مش‌بندی شده باشد، استفاده از مرزهای آرام مناسب است؛ اما اگر منبع

۴-۱- بررسی اثر سطوح جنبش در فرکانس‌های مختلف

به منظور بررسی اثر سطوح جنبش بر پاسخ لرزه‌ای، شیب ۳۰۰ در فرکانس ۳ هرتز، در حالت‌های مختلف لایه‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی با افزایش سطح جنبش، مقادیر A_h کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش سطح جنبش می‌توان انتظار داشت که جابه‌جایی‌های بزرگی بر روی شیب اتفاق بیافتد و وجود جابه‌جایی‌های بزرگ، حاکی از آن است که سیستم (مجموعه) مورد نظر نتوانسته که جابه‌جایی را به نیرو (برای فهم بهتر بخوانید: کرنش را به تنش) تبدیل کند و از آنجایی که نیرو و شتاب با یکدیگر متناسب هستند (طبق قانون دوم نیوتن)، شاهد مقادیر شتاب‌های (و در نتیجه A_h) کوچکی خواهیم بود. لازم به ذکر است که روند گفته شده برای اثرات سطح جنبش در حالت شیب همگن با مصالح تپ I، به دلیل سخت بودن مصالح، به خوبی نمایان نیست؛ اما با ضعیف‌تر شدن مصالح و حضور لایه بر روی دامنه شیب و نواحی پشت تاج ($0 \leq x/b \leq 1$) به خوبی نمایان است، شکل‌های (۵) تا (۹).



شکل (۴): شرایط مرزی در بارگذاری دینامیکی.

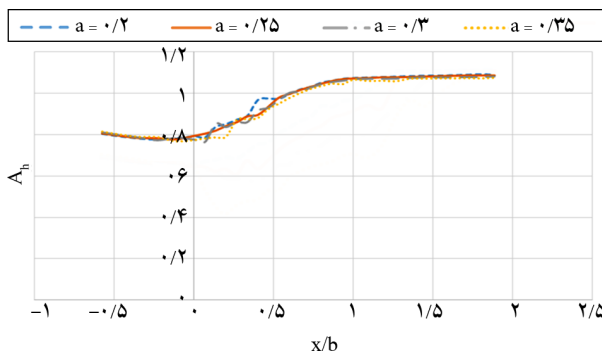
۴-۲- پاسخ لرزه‌ای شیب‌های خاکی

بررسی‌های انجام شده در این پژوهش شامل بررسی اثر سطح جنبش ورودی بر پاسخ در شیب‌های خاکی و اثر مشخصات ژئوتکنیکی مختلف در حالت رفتاری غیرخطی می‌باشد. بدین منظور مطابق رابطه (۴)، پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلفی از عارضه بر اساس مؤلفه افقی شتاب حرکت استخراج شده و نسبت به مؤلفه متناظر در مدل میدان آزاد بی‌بعد شده است.

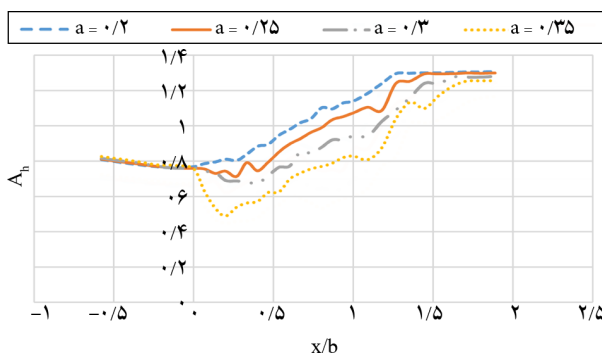
$$A_h = \frac{a_h}{a_{h,ff}} \quad (3)$$

$a_{h,ff}$ بیشینه شتاب در نقاط مختلف سطح عارضه و $a_{h,ff}$ بیشینه شتاب سطح زمین در مدل میدان آزاد می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی مدل‌های مورد بررسی در قالب نمودارهای بزرگ‌نمایی ارائه می‌گردد. در این نمودارها محور قائم، بیانگر مقادیر بزرگ‌نمایی A_h بوده و محور افقی نسبت بی‌بعد شده فاصله افقی نقاط عارضه (x) به طول افقی شیب b می‌باشد.

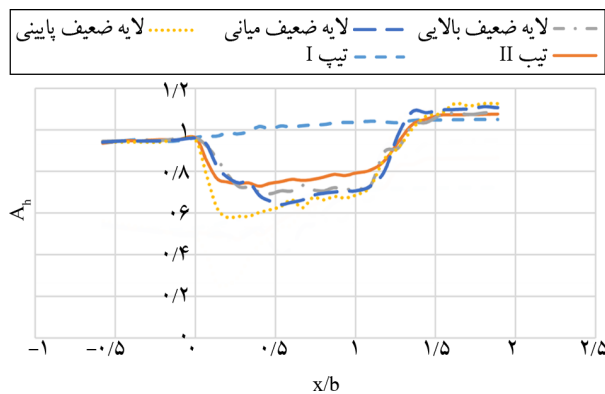


شکل (۵): شیب همگن ۳۰ درجه، فرکانس ۳ هرتز و مصالح تپ I.



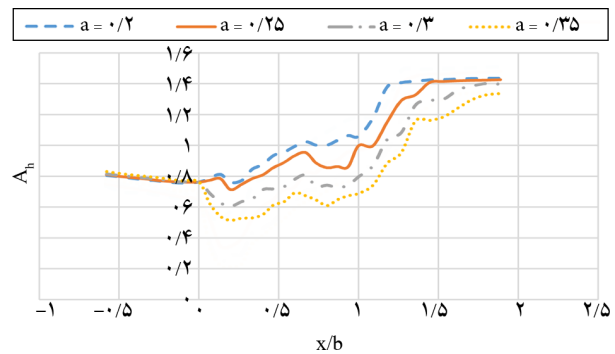
شکل (۶): شیب همگن ۳۰ درجه، فرکانس ۳ هرتز و مصالح تپ II.

$(0 \leq x/b \leq 1)$ ؛ حالت شیب همگن با مصالح تیپ I، درصد بزرگ‌نمایی اندکی را برای پاسخ گزارش می‌کند و بقیه حالت‌های لایه‌بندی، کوچک‌نمایی در این ناحیه $(0 \leq x/b \leq 1)$ را گزارش می‌کنند. حداکثر مقدار بزرگ‌نمایی در یک سطح جنبش ورودی مشخص و برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی، تقریباً با یکدیگر برابر و در $x/b \leq 1/5$ رخ می‌دهد. ذکر این نکته قابل توجه است که حضور لایه نسبتاً ضعیف، باعث افزایش کوچک‌نمایی (خصوصاً در ناحیه‌ای که لایه نسبتاً ضعیف حضور دارد) شده و جابه‌جا شدن لایه نسبتاً ضعیف از $1/3$ بالایی به سمت $1/3$ پایینی باعث افزایش این کوچک‌نمایی می‌شود، شکل (۱۰).

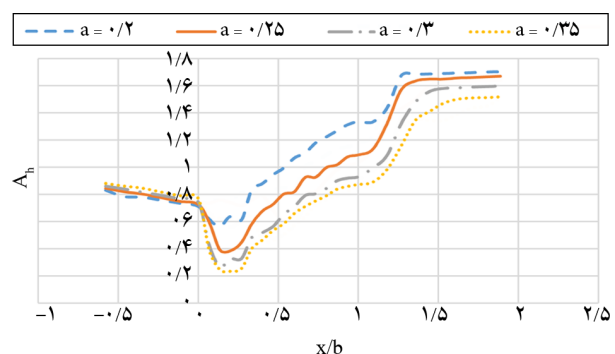


شکل (۱۰): شیب ۳۰ درجه، سطح جنبش $g/25$ و فرکانس ۱ هرتز.

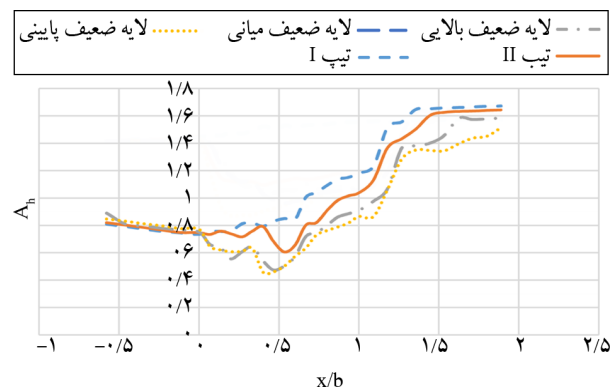
در فرکانس ۳ هرتز همان‌طور که انتظار می‌رود حداکثر تقویت توگرافیک (A_h) در ناحیه پشت تاج، برای حالت‌های حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ پایینی و میانی رخ می‌دهد؛ زیرا در این دو حالت، فرکانس موج ورودی به فرکانس طبیعی لایه خاک بسیار نزدیک است و پس از آن حالت‌های حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ بالایی و شیب همگن با مصالح تیپ II که فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی خاک دارند، بیشترین مقدار A_h را به خود اختصاص داده‌اند. همانند حالت قبل می‌توان ذکر کرد که حضور لایه نسبتاً ضعیف، باعث کاهش A_h و افزایش کوچک‌نمایی، خصوصاً در ناحیه حضور لایه نسبتاً ضعیف می‌شود و جابه‌جا شدن لایه نسبتاً ضعیف از $1/3$ بالایی به سمت $1/3$ پایینی باعث افزایش این کوچک‌نمایی می‌شود، شکل (۱۱).



شکل (۷): شیب ناهمگن ۳۰ درجه، فرکانس ۳ هرتز و لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ بالایی.



شکل (۸): شیب ناهمگن ۳۰ درجه، فرکانس ۳ هرتز و لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ پایینی.

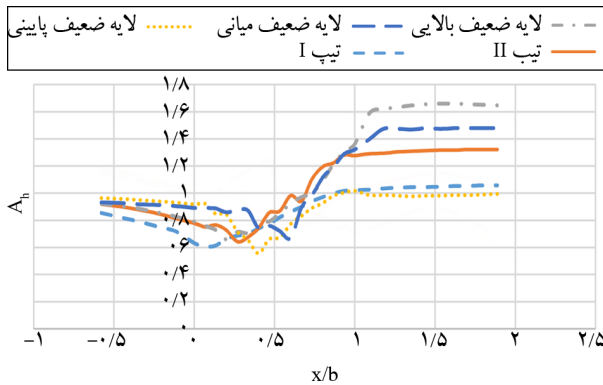


شکل (۹): شیب ناهمگن ۳۰ درجه، فرکانس ۳ هرتز و لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ میانی.

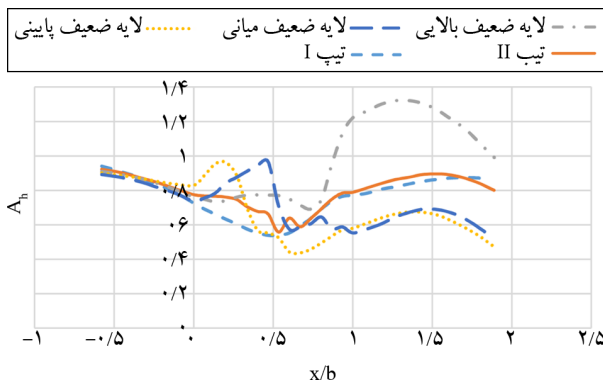
۴-۲- بررسی اثر مشخصات مصالح (لایه‌بندی)

به‌منظور بررسی اثر مشخصات مصالح، شیب ۳۰۰ در معرض موج ریکر با فرکانس مرکزی ۳ هرتز و سطح جنبش $g/25$ می‌گیرد و نتایج در پنج حالت مختلف لایه‌بندی بررسی می‌شود. در فرکانس پایین (۱ هرتز) به‌طور کلی بر روی دامنه شیب

می‌دهد، از بقیه حالت‌ها بیشتر است و می‌توان استدلال مشابهی را برای حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ بالایی به کار برد. نکته جالب توجه دیگر این است که در این فرکانس روند سطح جنبش $\uparrow A_h \leftarrow$ برای برخی حالت‌ها قابل مشاهده نیست، شکل (۱۳).

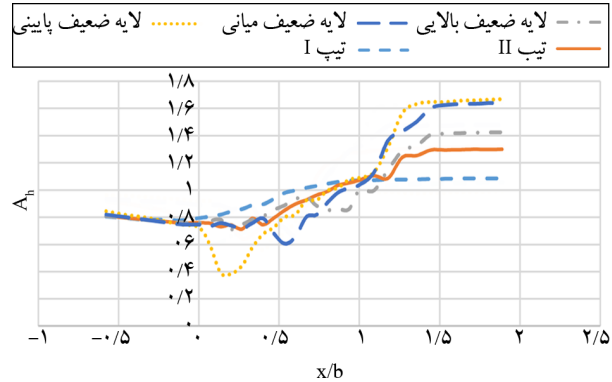


شکل (۱۱): شیب ۳۰ درجه سطح جنبش $0.25g$ و فرکانس ۳ هرتز.



شکل (۱۲): شیب ۳۰ درجه سطح جنبش $0.25g$ و فرکانس ۵ هرتز.

۵- نتیجه‌گیری
به‌طور کلی با افزایش سطح جنبش، مقادیر A_h کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش سطح جنبش می‌توان انتظار داشت که جابه‌جایی‌های بزرگی بر روی شیب اتفاق بیافتند و وجود جابه‌جایی‌های بزرگ حاکی از آن است که سیستم (مجموعه) مورد نظر نتوانسته که جابه‌جایی را به نیرو (برای فهم بهتر بخوانید: کرنش را به تنش) تبدیل کند و شاهد مقادیر شتاب‌های کوچکی هستیم (طبق قانون دوم نیوتن نیرو با شتاب متناسب است).
بیشترین مقدار ضرایب تقویت (بزرگ‌نمایی) شتاب افقی در



شکل (۱۳): شیب ۳۰ درجه سطح جنبش $0.25g$ و فرکانس ۱۰ هرتز.

در فرکانس ۵ هرتز همان‌طور که انتظار می‌رود حداکثر تقویت توگرافیک (A_h) در ناحیه پشت تاج، برای حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ بالایی رخ می‌دهد؛ زیرا $f = 5 \approx f_n = 5/2$ در $1/3$ میانی و شیب همگن با مصالح تپ II که فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی دارند، بیشترین مقدار A_h را به خود اختصاص می‌دهند. همانند حالت قبل می‌توان ذکر کرد که حضور لایه نسبتاً ضعیف، باعث کاهش A_h و افزایش کوچک‌نمایی، خصوصاً در ناحیه حضور لایه نسبتاً ضعیف می‌شود، شکل (۱۲).

در فرکانس ۱۰ هرتز حداکثر تقویت توگرافیک (A_h) در ناحیه پشت تاج، برای حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ بالایی (که فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی خاک دارد) اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه این است که حضور لایه نسبتاً ضعیف باعث کاهش A_h و افزایش کوچک‌نمایی نمی‌شود. بلکه روندی عکس حالت‌های قبل ارائه می‌دهد؛ برای مثال در حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ پایینی شیب، مقادیری که نمودار مربوط به این حالت لایه‌بندی در $1/3$ پایینی شیب ارائه می‌دهد، از بقیه حالت‌ها بیشتر است. روندی مشابه برای حالت‌های حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ میانی و بالایی دیده می‌شود؛ یعنی در حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ میانی شیب، مقادیری که نمودار مربوط به این حالت لایه‌بندی در $1/3$ میانی شیب ($0 \leq x/b \leq 2/3$) ارائه

6. Building Seismic Safety Council (BSSC) (2003) *The NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1: Provisions (FEMA 368).
7. International Code Council of Building Officials (IBC) (2012) *International Building Code*.
8. Tripe, R., Kontoe, S., and Wong, TKC. (2013) Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **50**, 72-84.
9. Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., and Deng, N. (1997) Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 701-709.
10. Pelekis, P., Batilas, A., Pefani, E., Vlachakis, V., and Athanasopoulos, G. (2017) Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6.4 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **100**, 538-554.
11. Zhang, Z., Fleurisson, J.A., and Pellet, F. (2018) The effects of slope topography on acceleration amplification and interaction between slope topography and seismic input motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **113**, 420-431.
12. Bouckovalas, G.D. and Papadimitriou, A.G. (2005) Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 547-558.
13. Rizzitano, S., Cascone, E., and Biondi, G. (2014) Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **67**, 66-84.
14. Wong, H.L. (1982) Effect of Surface Topography on the Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves. *Bulletin of Seismological Society of America*, **72**(4), 1167-83.
15. Bowles, J.E. (1997) *Foundation Analysis and Design*. Fifth Edition.
16. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 99(Tech Rpt).

فرکانس‌های طبیعی لایه خاک (شیب) و یا در فرکانس‌های نزدیک به آن اتفاق می‌افتد. همچنین در ناحیه حضور لایه نسبتاً ضعیف، فرکانس بالا (۱۰ هرتز) مقدار بیشتری را نسبت به سایر فرکانس‌ها برای A_h گزارش می‌کند.

اثرات مربوط به لایه‌بندی خاک به‌طور قابل توجهی به فرکانس موج ورودی و فرکانس طبیعی لایه خاک بستگی دارد؛ در صورتی که فرکانس موج ورودی به فرکانس طبیعی لایه خاک در هر حالت لایه‌بندی، نزدیک باشد، آن حالت لایه‌بندی بیشترین مقدار را برای A_h گزارش می‌کند. همچنین می‌توان گفت حضور لایه نسبتاً ضعیف باعث کاهش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی و افزایش کوچک‌نمایی، خصوصاً در ناحیه حضور لایه نسبتاً ضعیف می‌شود. البته فرکانس ۱۰ هرتز از این قاعده مستثنا بوده و روندی عکس را نمایش می‌دهد. برای مثال در حالت حضور لایه نسبتاً ضعیف در $1/3$ پایینی شیب، مقادیری که نمودار مربوط به این حالت لایه‌بندی در $1/3$ پایینی شیب ($0 \leq x/b \leq 1/3$) برای A_h ارائه می‌کند، نسبت به بقیه حالت‌های لایه‌بندی بیشتر است.

مراجع

1. Trifunac, M.D. and Hudson, D.E. (1971) Analysis of the Pacoima dam accelerogram San Fernando, California, earthquake of 1971. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **61**(5), 1393-1411.
2. Celebi, M. (1987) Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**(4), 1147-1167.
3. Spudich, P., Hellweg, M., and Lee, W.H.K. (1996) Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: implications for mainshock motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(1B), S193-S208.
4. Code 2800 (Fourth Edition, 2012) *Earthquake Design Regulations for Buildings* (in Persian).
5. International Council of Building Officials (UBC), *Uniform Building Code* (2000).

واژه‌نامه

Site Effect	۱- شرایط ساختگاه
Topography	۲- توپوگرافی
Non-Linear Behaviour	۳- رفتار غیرخطی
Ricker Wave	۴- موج ریکر
Deamplification	۵- کوچک‌نمایی
Amplification	۶- بزرگ‌نمایی

Evaluation of Layering and Input Motion Amplitude on Seismic Response of Earth Fills

Mohammadhosein Mohammadian¹, Masoud AmelSakhi^{2*} and Abdollah Sohrabi Bidar³

1. M.Sc. Graduate of Geotechnical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran, *Corresponding Author, email: amelsakhi@qut.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Engineering Geology, School of Geology, Tehran University, Tehran, Iran

This is a study of the seismic behavior of earth slopes exposed to vertical Ricker shear waves. Two-dimensional FLAC2D software based on the finite difference method was used for modeling. Layering in earth fill exists in natural situation, and the seismic response of the earth fills is mostly dependent on these different soil layers. When the situation of the weak layer changes in height of the earth fills, we expect to see different responses in seismic behavior of the system. The Mohr-Coulomb criterion is used to investigate the nonlinear soil behavior. To investigate the effects of the input wave frequency on the horizontal acceleration amplification coefficient (considered in this study as the response), four different frequencies, to investigate the effects of the input movement level on the response, four acceleration amplitudes, to investigate the effects of angle, three slopes with various angles and five layering modes are considered for the layering effects. This study presents the results of a numerical study on the seismic behavior of two-dimensional semi-sine shaped hills that were subjected to vertically propagating incident SV wave of the Ricker wavelet. The finite difference software is used to model and analyze the different sizes of the hills. Concentration is on topographic effects, so parameters such as shape factor (the ratio of the height to half width of the hill) and the type of ground took into account in this research. Another variable is the soil type that the difference being in ρ and ν . Therefore, according to the by Code 2800, three soil types have been investigated, each of which has been affected by the Ricker wave. The results show that the horizontal acceleration amplification coefficient overlay decreases with increasing movement and angle. Four different frequencies 1, 3, 5 and 10 Hz are studied in input motion Ricker wave. These different input motion frequencies are selected to evaluate the response of system to these frequencies when natural frequencies of soil layers differ. The effects of the frequency and the layering of the soil are also correlated so that if the input wave frequency is close to the natural frequency of the soil, in each layering mode, that layering mode reports the maximum value for the horizontal acceleration amplification coefficient. Generally, in the presence of a relatively weak layer (with Type III material), the response decreases. However, the high frequency does not follow this trend and offers significant responses. The highest amplification in horizontal acceleration happens in high frequency of soil layers or frequencies like them. The obtained responses are sharply dependent on input motion frequencies and also natural frequencies of soil layers. As it can be seen, when natural frequencies of soil layers and input motion frequencies are near each other, the highest responses are evaluated, which we can say that the resonance is happened. In this case, the highest horizontal acceleration in response results is evaluated. When weak layer exists in different soil layers, the de-amplification happens. The results show that the most de-amplification happens due to the weak soil layer. Also, results show that this high de-amplification happens in weak soil layer, and refers to the horizontal acceleration response.

Keywords: Topography, Non Linear Behavior, Amplification, Input Motion.