

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ارزیابی تشدید لرزه‌ای سایت و ارتباط آن با ساختارهای زمینی نقش مهمی در مهندسی زلزله و ارزیابی خطر دارد. امواج لرزه‌ای با تغییرات هندسی ناگهانی به دلیل اثرات توپوگرافی، به‌طور قابل توجهی، می‌تواند تشدید شود. با این حال، سؤالی که مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان تشدید ناشی از زلزله بر روی توپوگرافی را تخمین زد؟ در مقاله حاضر، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D، برای تحلیل توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی تحت رکورد زلزله لاندروز، استفاده شده است. نوآوری تحقیق حاضر، کاربرد لایه‌های خاک با زاویه‌ها و مصالح مختلف برای توپوگرافی می‌باشد که با هدف بررسی تأثیر زاویه لایه‌بندی غیر افقی خاک بر میزان تشدید حرکت لرزه‌ای تپه دنبال می‌شود. نتایج تحلیل به‌صورت بدون بعد نشان داده شده و الگوهای نسبت تشدید نظیر جابه‌جایی افقی مقایسه می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل شده، به این مهم دست یافته شد که هر یک از پارامترهای زاویه لایه‌بندی مصالح توپوگرافی، ارتفاع، تعداد لایه‌های مصالح و نحوه قرارگیری مصالح لایه‌های موجود در توپوگرافی تپه از مؤلفه‌های مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه هستند. با افزایش زاویه بین مصالح از ۱۵ تا ۴۵ درجه، میزان بزرگنمایی افزایش داشته و پس از آن، با بیشتر شدن زاویه از مقدار بزرگنمایی تا حدودی کاسته می‌شود.

واژگان کلیدی: تشدید توپوگرافی، لایه‌بندی خاک، اثرات توپوگرافی، تپه.

بررسی عددی اثر لایه‌بندی غیر افقی خاک بر پاسخ لرزه‌ای تپه نیم‌سینوسی

مسعود عامل‌سخی (نویسنده مسئول)

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

عبدالله سهرابی‌بیدار

دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

آیدا هراتی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

آرش شارق

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران

۱- مقدمه

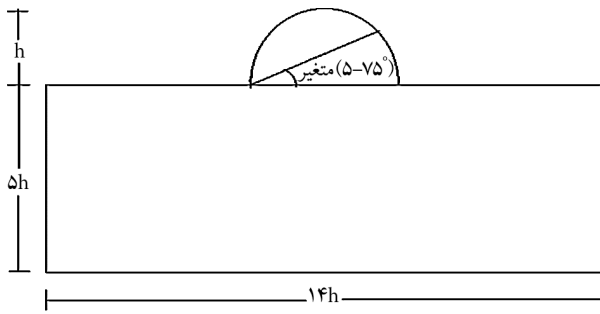
با توجه به ارزیابی عددی اثرات توپوگرافی بر حرکت زمین، بور (Boore, 1972) اولین کسی بود که از روش تفاضل محدود برای بررسی تپه مثلی تحت امواج SH استفاده کرد. بوشون (Bouchon, 1973) از اولین محققینی بود که تأثیر تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای زمین را بررسی کرد. وی در تحقیقات خود، تپه را با ضرایب شکل گوناگون تحت امواج SH در نظر گرفت. مشاهدات محققان در طول زلزله‌های ۱۹۸۵ شیلی (Celebi, 1987)، ۱۹۹۹ یونان (Athanasopoulos et al., 1999)؛ ۲۰۰۱ (Bouckvalas & Kouretzis, 2001)، شتاب‌های ثبت شده در سد پاکویما در طول زلزله ۱۹۷۱ سن‌فرناندو (Boore, 1973)؛ و تپه تارزانا در هنگام زلزله ۱۹۹۴ نورث‌ریج (Spudich et al, 1996) نمونه‌هایی از زلزله‌هایی

روزانه زلزله‌های متعددی در اقصی نقاط زمین رخ می‌دهد. از طرفی، به دلیل افزایش روزافزون جمعیت، گسترش ساخت‌وسازهای شهری تا حاشیه شهرها بدون در نظر گرفتن تمهیدات و قوانین لرزه‌ای، باعث خسارت‌های جانی و مالی خواهد شد. به دلیل این خسارت‌ها، پژوهش‌های کاربردی زیادی در زمینه مقابله با این بلای طبیعی و ایمن‌سازی شهرها انجام شده است. تأثیرات سایت می‌تواند باعث افزایش یا گاهی کاهش شتاب حرکت زمین شود و بنابراین مطالعه همه‌جانبه سایت، می‌تواند از بروز پیامدهای فاجعه‌بار حرکات لرزه‌ای قوی پیشگیری کند. در بررسی عوارض توپوگرافی پارامترهای متنوعی می‌تواند دخیل باشد. نهایتاً اثر همه این عوامل باید جمع‌بندی شده و در طراحی‌های لرزه‌ای لحاظ شود.

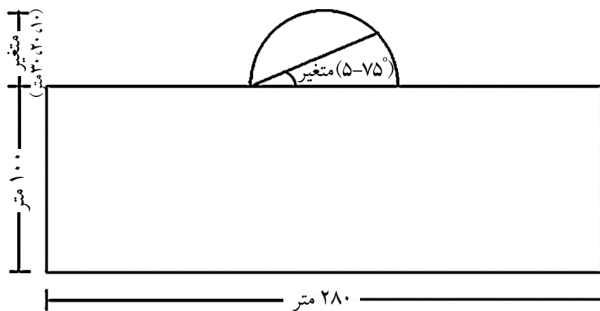
سهرابی‌بیدار (Sohrabi-Bidar, 2008) استفاده شد. سهرابی‌بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2009, 2010) و سهرابی‌بیدار و کامالیان (Sohrabi-Bidar & Kamalian, 2013) چند مطالعه پارامتری برای نشان دادن پاسخ اثرات سه‌بعدی توپوگرافی‌های ساده انجام دادند. عامل‌سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2014) به یک ارزیابی طیفی از اثرات توپوگرافی بر روی رفتار لرزه‌ای تپه دوزنقه‌ای پرداختند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2016) توزیع آسیب‌ها و خرابی‌های ناشی از زلزله ۲۰۱۵ گورخا در نپال و رابطه آن با توپوگرافی آن محل را مورد مطالعه قرار دادند. عامل‌سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2017) یک ارزیابی لرزه‌ای از تپه‌های دوزنقه‌ای شکل ناشی از رکوردهای حرکت قوی زمین انجام دادند. ژنینگ و همکاران (Zhenning et al., 2019) پراکنندگی امواج P و SV فضایی در یک توپوگرافی سیکلی را ارزیابی کردند. سانگ و همکاران (Song et al., 2020) تأثیر برهم‌کنش توپوگرافی و تشدید لایه خاک بر پاسخ لرزه‌ای توده لغزشی و جابه‌جایی شیب را بررسی کردند. یین و همکاران (Yin et al., 2021) اظهار کردند که جهت امواج لرزه‌ای می‌تواند حرکت‌های سطح توپوگرافی شیب را تغییر دهد؛ برای تأکید بر تأثیرات مسیرهای امواج لرزه‌ای، یک تحلیل دینامیکی از توپوگرافی شیب انجام شده است. تقویت حرکات زمین در توپوگرافی شیب دو طرفه با تغییر زوایای انتشار مورد بحث قرار گرفت. در همین حال، اجزای امواج لرزه‌ای (امواج P و SV)، مصالح شیب و هندسه‌های آن، همه با امواج زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در توپوگرافی شیب، به‌ویژه در زاویه بزرگ‌تر امواج حادثه، الگوی تقویت امواج SV قوی‌تر از امواج P است. مصالح نرم تقویت شتاب را بیشتر می‌کنند و امواج متفرق شده بیشتری در زیر امواج مایل زلزله ایجاد می‌شوند. تغییرات نسبت‌های تقویت شتاب بر روی تاج شیب در امواج مایل بسیار پیچیده‌تر بوده و حرکت‌های زمینی با در نظر گرفتن تنها امواج قائم حادثه دست‌کم گرفته شده‌اند.

باین حال بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که تأکید اصلی عموماً بر محیط‌های همگن و به‌ندرت لایه‌های افقی ساده بوده

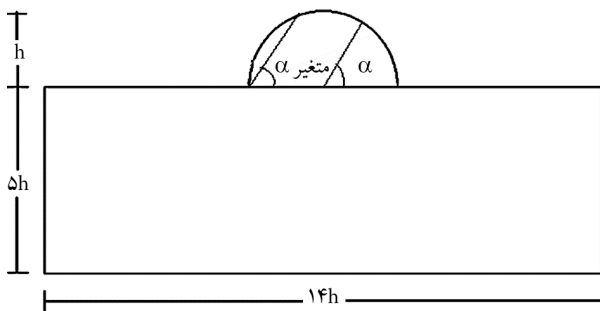
هستند که در آنها، توپوگرافی نقش مؤثری در خرابی‌ها دارد. بارد (Bard, 1982) پراکنندگی و انتشار امواج P و SV را روی بی‌نظمی‌های سطحی ارزیابی کرد. سانچز‌سسما (Sanchez-Sesma, 1987) نیز، از اولین محققینی بود که به بررسی تپه‌های تیز گوشه یا همان مثلثی شکل تحت امواج مهاجم SH پرداخت. زلی و همکاران (Geli et al., 1988) اثر لایه‌بندی زیرسطحی و ناهم‌واری‌های هم‌جوار تپه نیم‌سینوسی با ضرایب شکل ثابت را، تحت امواج SH بررسی کردند. سانچز‌سسما و کامپیلو (Sanchez-Sesma & Campillo, 1991) تأثیر تپه‌های نیم‌بیضوی بر پاسخ لرزه‌ای زمین تحت موج P و SV را برای اولین بار بررسی نمودند. موکزو و همکاران (Moczo et al., 1997) پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دوزنقه‌ای شکل را تحت امواج SV با یک ضریب شکل، زاویه یال و نسبت پواسون بررسی کردند. آشفورد و همکاران (Ashford et al., 1997) یک مطالعه پارامتریک برای ارزیابی اهمیت اثر توپوگرافی بر روی شیب‌های تند انجام دادند و توانستند تشدید ناشی از توپوگرافی را از تشدید فرکانس طبیعی جدا کرده که می‌توان از آن برای توسعه یک روش ساده برای تخمین اثرات توپوگرافی استفاده کرد. بوکواوالاس و پاپادیمتریو (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005) پاسخ لرزه‌ای شیب‌های پله‌ای در خاک ویسکوالاستیک همگن تحت انتشار عمودی امواج لرزه‌ای SV را ارزیابی کرده و به تأثیر هندسه شیب و فرکانس موج مهاجم توجه کردند. انواع توپوگرافی تپه، دره و شیب تحت امواج SV توسط نگوین و گنمیری (Nguyen & Gatmiri, 2007) ارزیابی شد. کامالیان و همکاران (Kamalian et al., 2007) اولین گروهی بودند که به بررسی پارامتری رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای شکل (Kamalian et al., 2003) تحت امواج P و SV پرداختند. علاوه بر این، کامالیان و همکاران (Kamalian et al., 2008) پارامترهای مختلف از قبیل طول موج، نسبت شکل، نسبت پواسون و شکل تپه بر روی تشدید زمین در اثر انتشار عمودی موج SV ریکر را بررسی کردند. از روش المان مرزی سه‌بعدی برای شکل‌های مختلفی از بی‌نظمی سطحی در حوزه زمان توسط



شکل (۱): توپوگرافی‌های با شکل نیم‌سینوسی (ارتفاع ثابت، زاویه لایه‌بندی متغیر).



شکل (۲): توپوگرافی‌های با شکل نیم‌سینوسی (ارتفاع متغیر، زاویه لایه‌بندی متغیر).



شکل (۳): افزایش تعداد لایه‌های توپوگرافی‌های با شکل نیم‌سینوسی (ارتفاع ثابت، زاویه لایه‌بندی متغیر).

۲-۲- مدل رفتاری و انتخاب مصالح

تشدید امواج لرزه‌ای توأم با شرایط توپوگرافی، اثرات سایت و برهم کنش خاک-سازه لرزه‌ای، عامل اصلی خرابی و خسارات اقتصادی در زمان زلزله‌های بزرگ در مناطق مرتفع است. ساختمان‌هایی که در مناطق مرتفع در معرض زلزله‌های مخرب قرار می‌گیرند، نسبت به آنهایی که در زمین مسطح قرار دارند، دچار خرابی بیشتری می‌شوند. بدین ترتیب، عوامل کلیدی مانند هندسه سطح زمین، لایه‌بندی، غیرخطی بودن خاک، ویژگی‌های لرزه‌ای حرکت (به‌عنوان نمونه دامنه، محتوای فرکانس و

است. ضمن آن‌که در بیشتر بررسی‌ها از موجک‌های ساده برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای استفاده شده است.

در این مقاله تشدید حرکت زمین در تپه‌های نیم‌سینوسی لایه‌ای با زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به افق تحت شتاب‌نگاشت زلزله لاندروز بررسی شده‌اند. سپس، جابه‌جایی‌های بی‌بعد افقی در نقاط مختلف روی تپه و اطراف آن ارزیابی شده است.

۲- مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار FLAC2D، یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم‌افزارهای ایتاسکا می‌باشد که برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. FLAC2D بر اساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ نیز مناسب است. در فرمولاسیون لاگرانژی، ماتریس سختی ساخته نمی‌شود و در حالت کرنش بزرگ، مختصات هریک از گره‌ها، در هر گام زمانی به‌روز می‌شود. جابه‌جایی‌های رخ داده به مختصات قبلی نقاط افزوده می‌شود. در نتیجه، المان‌ها جابه‌جا شده و هندسه مدل دچار تغییر شکل می‌شود. با توجه به اینکه در فرآیند تحلیل نیازی به ساخت ماتریس‌های سختی نخواهد بود، محاسبات طولانی بدون نیاز به حافظه بیشتر قابل انجام است.

۲-۱- مشخصات هندسی

توپوگرافی مورد مطالعه در این مقاله، تپه‌های نیم‌سینوسی است. هریک از توپوگرافی‌ها برای بررسی اثر لایه‌بندی مصالح عارضه در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه با ارتفاع ۲۰ متر لایه‌بندی شده (شکل ۱) و جهت بررسی اثر ارتفاع در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر و همچنین همراه با تغییر زاویه از ۱۵ تا ۷۵ درجه ترسیم شده‌اند (شکل ۲).

در ادامه مدل‌سازی‌ها، افزایش تعداد لایه‌های موجود در توپوگرافی با زوایای مختلف ۱۵ تا ۷۵ درجه (شکل ۳) و بررسی اثر نحوه قرارگیری لایه‌های با مصالح سست و متراکم در نظر گرفته شده‌اند.

توزیع مناسبی داشته باشد و مقادیر منطقی برای ابعاد زون‌ها تعیین شود تا بتوان مناسب‌ترین شبکه را برای مدل خاصی ساخت. بهینه بودن ابعاد زون‌ها تأثیر بسزایی در زمان حل مدل و دقت جواب‌های به‌دست آمده دارد. کلیه مدل‌ها به‌صورت دو بعدی تعریف شده‌اند. کولمایر و لایزمر (Kuhlemeyer and Lysmer, 1973). نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج در یک مدل مش‌بندی شده، بزرگ‌ترین ابعاد المان (Δl) باید کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد. به عبارتی:

$$\Delta l \leq \lambda/10 \quad (1)$$

که در آن λ طول موج ایجاد شده توسط بزرگ‌ترین مؤلفه فرکانس امواج ورودی به سیستم است که قادر به تولید انرژی می‌باشد (مؤلفه فرکانسی که اعمال آن به سیستم فرصت تولید انرژی نداشته باشد، چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد). به عبارتی، اگر موج ورودی به سیستم، دارای یک مؤلفه فرکانس بالا باشد، با در نظر گرفتن معیار فوق نیاز به یک شبکه با المان‌های بسیار ریز است و در نتیجه گام‌های زمانی محاسبات نیز توسط برنامه بسیار کوچک خواهد شد و محاسبات به‌طور غیرمعقولی زمان‌بر می‌شود. در چنین مواردی می‌توان فرض کرد چون انرژی سیستم از طریق مؤلفه فرکانس پایین با طول مدت قابل توجه ایجاد می‌گردد، این فرکانس مورد بحث قابل حذف شدن است، لذا می‌توان یک شبکه با ابعاد بزرگ‌تر معرفی نمود و محاسبات را با دقت مناسب و در زمان کوتاه‌تری انجام داد (ITASCA, 2005). برای هر محیط شبکه‌بندی شده، یک حد بالایی فرکانس وجود دارد که سیستم (با توجه به اندازه مخصوص المان‌های مدل) قادر به انتقال آن می‌باشد. این حد برای منطقی بودن پاسخ‌های مدل، باید مورد توجه قرار گیرد.

مدت‌زمان)، هندسه و خواص مصالح سازه به‌صراحت در شبیه‌سازی‌ها باید در نظر گرفته شود (Mayoral et al., 2019). در این مطالعه، با در نظر گرفتن مدل‌های ناهمگن که از سه نوع خاک تشکیل شده است، هندسه تپه با زوایای مختلف، برای تخمین اثر توپوگرافی در نظر گرفته شده است که نوع جنس مصالح هر لایه متفاوت از لایه کناری آن می‌باشد. خاک مورد استفاده در تمام مدل‌ها، مصالح تعریف شده در جدول (۱) می‌باشد؛ با این ترتیب که پایه مدل خاک نوع I، لایه زیرین تپه خاک II و لایه بالایی نیز خاک تیپ III می‌باشد. اغلب اوقات تحلیل عددی یک مسئله جدید همواره با ساده‌ترین مدل رفتاری آغاز می‌شود.

رفتار مصالح در اینجا مانند اکثر مطالعات پیشین که مدل رفتاری مصالح را مدل الاستیک خطی در نظر گرفته‌اند، فرض شده است. حل مسئله با این مدل رفتاری، از لحاظ زمانی سریع‌تر اجرا می‌شود و تنها نیازمند جرم مخصوص و دو پارامتر مقاومتی مدول حجمی و مدول برشی است. البته شایان ذکر است که در این مدل تا مدل‌سازی رفتار واقعی مصالح در طبیعت فاصله بسیار است و تقویت لرزه‌ای عارضه توپوگرافی، دست‌کم تخمین زده می‌شود مطالعات پارامتری به‌منظور بررسی جزئیات تأثیرات لایه‌بندی تپه بر روی تشدیدهای نظیر جابه‌جایی‌های سطح انجام می‌شود (Rizzitano et al., 2014).

۳-۲- هندسه‌سازی مدل

اولین گام در اجرای یک مدل ساخت هندسه آن است. زون‌بندی در این نرم‌افزار هم‌زمان با هندسه‌سازی انجام می‌گیرد و تعیین چگالی المان‌بندی به عهده کاربر می‌باشد. همواره باید مطابق با اصول و قواعد حاکم بر این نرم‌افزار، یک شبکه‌بندی بهینه را پیشنهاد داد. برای این منظور چگالی زون‌بندی مدل باید

جدول (۱): مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل.

نوع زمین	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (پاسکال)	نسبت پواسون (ν)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	مدول برشی (پاسکال)
I	۲۴۰۰	4×10^9	۰/۴۵	۷۶۰	$1/38 \times 10^9$
II	۱۸۴۰	39×10^6	۰/۳۵	۵۰۰	$1/44 \times 10^7$
III	۱۴۷۰	15×10^6	۰/۲۷	۱۷۵	$5/9 \times 10^6$

مدل را می‌توان به قدری بزرگ در نظر گرفت که وقتی موج بازتاب کرده و به مرزها رسید؛ تا موج به منطقه مورد مطالعه برسد، تقریباً میرا شده و روی نتایج منطقه مورد نظر، تأثیر چندانی نداشته باشد. از طرفی وقتی مرزهای مدل تا این اندازه بزرگ در نظر گرفته شود، مدت زمانی که مدل برای تحلیل نیاز دارد به شدت افزایش می‌یابد و اصلاً برای پروژه‌های با تعداد آنالیزهای زیاد، این مدت‌زمان قابل قبول نخواهد بود. روشی که نرم‌افزار برای برطرف کردن این مسئله ارائه می‌دهد استفاده از مرزهای میراگر است. این ارتفاع و عرض پی در مقاله بوکاوالاس نهایتاً به ترتیب ۵ و ۲۰ برابر عرض توپوگرافی در نظر گرفته شده است (Bouckovalas & Kouretzis, 2001). در مطالعه حاضر یکسری تحلیل‌ها برای رسیدن به عرض و ارتفاع بهینه که هم از بازتاب امواج به درون محیط مورد مطالعه جلوگیری کرده و هم خیلی بزرگ نباشد که مدت‌زمان تحلیل را به‌طور نامعقول افزایش دهد، انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها در جدول‌های (۲) و (۳) آمده است. در نهایت ارتفاع و عرض پایه مدل به ترتیب ۵ و ۱۴ برابر ارتفاع تپه در نظر گرفته شد.

۲-۵- تحلیل دینامیکی مدل

مطابق استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام زلزله، باشند (BHRC, 2014). از میان چند رکورد یافت شده از پایگاه اطلاعاتی Peer با این مشخصات، رکورد زلزله لاندز ۱۹۹۲ به دلیل هم‌خوانی بیشتر ویژگی‌های آن با شرایط پروژه انتخاب گردیده است (PEER, 2014). این نکته قابل توجه است که این رکورد مربوط به شتاب‌نگاشت سنگ‌بستر ($V_s > 760$ متر بر ثانیه) است.

جدول (۲): تعیین عرض پی مدل‌های مورد مطالعه.

تغییرات عرض پی	۵ H و ۵ H	۵ H و ۱۰ H	۵ H و ۱۲ H	۵ H و ۱۴ H	۵ H و ۴۰ H
پارامتر مینا (جابه‌جایی)	$3/145 \times 10^{-4}$	$2/27 \times 10^{-4}$	$1/889 \times 10^{-4}$	$1/37 \times 10^{-4}$	$1/12 \times 10^{-4}$

جدول (۳): تعیین ارتفاع پی مدل‌های مورد مطالعه.

تغییرات ارتفاع پی	۱ H و ۱۴ H	۲ H و ۱۴ H	۳ H و ۱۴ H	۴ H و ۱۴ H	۵ H و ۱۴ H	۱۰ H و ۱۴ H
پارامتر مینا (جابه‌جایی)	$4/403 \times 10^{-4}$	$2/897 \times 10^{-4}$	$2/212 \times 10^{-4}$	$1/888 \times 10^{-4}$	$1/37 \times 10^{-4}$	$1/693 \times 10^{-4}$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

که در آن G مدول برشی و ρ نیز چگالی سنگ می‌باشد. طبق اطلاعات FIAC، اگر بزرگ‌ترین ابعاد مش ۱۰ متر فرض شود، f_{max} که می‌تواند مدول‌سازی را با دقت بالایی انجام دهد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{max} = \frac{C_s}{10\Delta l} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{1+\nu} \quad (4)$$

در نتیجه:

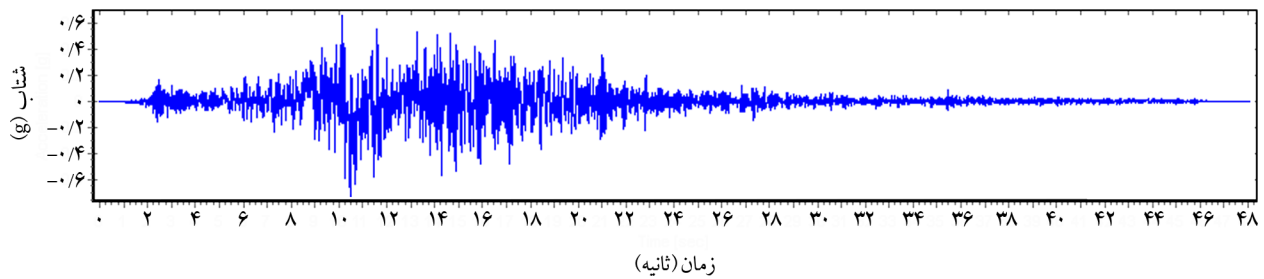
$$\lambda = \frac{V_{Smin}}{f_{max}} \quad (5)$$

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} = 2.3 \rightarrow \Delta l = 2m \quad (6)$$

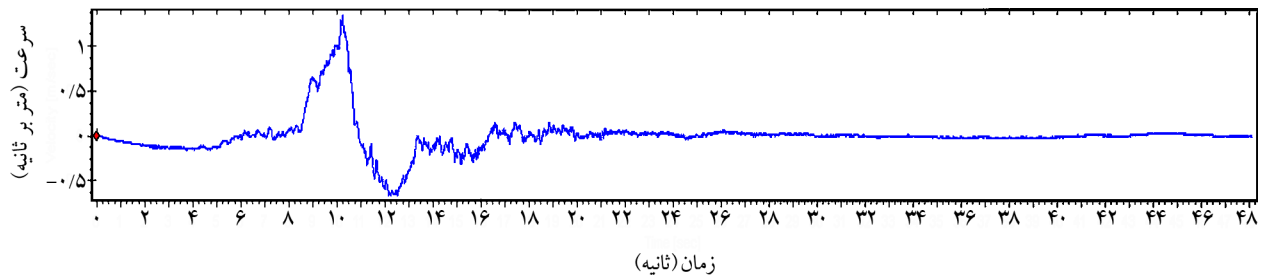
که در آن f_{max} بزرگ‌ترین فرکانسی که موج در آن دارای توان است و Δl بزرگ‌ترین ابعاد المان مش‌بندی است.

۲-۴- عرض و ارتفاع پایه مدل

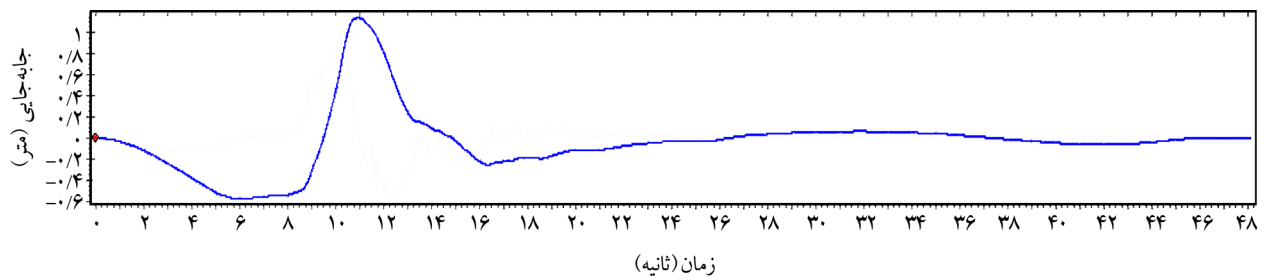
اگر مدل و سازه‌ای روی یک لایه خاک در نظر گرفته شود، معمولاً برای تحلیل استاتیکی؛ عرض خاک اطراف مدل ۴ تا ۵ برابر عرض مدل در نظر گرفته خواهد شد. اگر به این مدل یک بار دینامیکی اعمال شود، بار دینامیکی از لایه‌های خاک عبور کرده و به سازه می‌رسد، از آنجا بازتاب کرده و به مرزهای قائم برخورد می‌کند و چون مرزهای قائم Fix در نظر گرفته شده است، این بازتاب کمانه کرده و به داخل مدل باز خواهد گشت؛ اما در حقیقت؛ وقتی بار دینامیکی به سازه می‌رسد، در هنگام بازگشت از مرزهای مدل خارج می‌شود. به علت محدودیت حافظه رایانه، در نرم‌افزار، نمی‌توان ابعاد مدل را بی‌نهایت در نظر گرفت. مرزهای



شکل (۴): نمودار شتاب - زمان زلزله لاندروز.



شکل (۵): نمودار سرعت - زمان زلزله لاندروز.



شکل (۶): نمودار جابه‌جایی - زمان زلزله لاندروز.

که σ_s تنش برشی اعمالی، ρ چگالی سنگ پایه، C_s سرعت موج S در محیط و V_s سرعت برشی ورودی در مرز هستند.

۲-۶- میرایی و فرکانس طبیعی سازه

میرایی سیستم خاکی به‌طور پیش‌فرض ۵٪، اما فرکانس‌های هر مدل به‌علت تغییر در نوع مصالح لایه‌ها متفاوت است. مقدار فرکانس اختصاص داده شده به هر مدل، از آنالیز دینامیکی همان مدل که فقط تحت شتاب ثقل قرار گرفته است، توسط FLAC، به دست آمده است. برای یافتن فرکانس طبیعی سازه در این نرم‌افزار، باید به این صورت عمل کرد که ابتدا مدلی با فرض الاستیک بودن و میرایی صفر ساخته شود. سپس مرزهای اطراف آزاد و کف مدل ثابت شود. آنگاه برای یک نقطه در داخل مدل، تحت یک تحریک

زیرا شتاب‌نگاشت‌هایی که در سطح لایه‌های آبرفتی ثبت شده‌اند خود دربرگیرنده تأثیرات ساختگاه و رفتارهای دینامیکی آبرفت هستند. رکورد زلزله به‌صورت تاریخچه زمانی تنش از سنگ بستر به مدل اعمال می‌شود تا از انعکاس کاذب امواج در سطوح اعمالی جلوگیری شود. نمودارهای شتاب-زمان، سرعت-زمان و جابه‌جایی-زمان زلزله لاندروز حاصل شده از نرم‌افزار SeismoSignal در شکل‌های (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود. مدت تداوم این زلزله ۴۸/۱۲ ثانیه و حداکثر شتاب افقی ۰/۷۲۵g است که در لحظه ۱۰/۴۷ ثانیه ثبت شده است.

به دلیل مرزهای جاذب، سیگنال ورودی سرعت یا شتاب در پایین مدل ختشی می‌شود؛ بنابراین، موج سرعت به‌عنوان سیگنال ورودی با استفاده از فرمول زیر به یک موج تنش تبدیل شده است:

$$\sigma_s = (\rho \times C_s) V_s \quad (7)$$

در شکل‌های (۷) و (۸) محور قائم به ترتیب بیان گر نسبت حداکثر پاسخ مؤلفه افقی و قائم جابه‌جایی دره در نقاط مختلف بر حداکثر دامنه جابه‌جایی موج ریکر است. محور افقی نیز بیان گر نسبت بی‌بعد شده فاصله نقاط از مرکز دره (X) بر نصف عرض دره (L) است.

۴- تحلیل و بررسی هندسه‌های با شکل نیم‌سینوسی

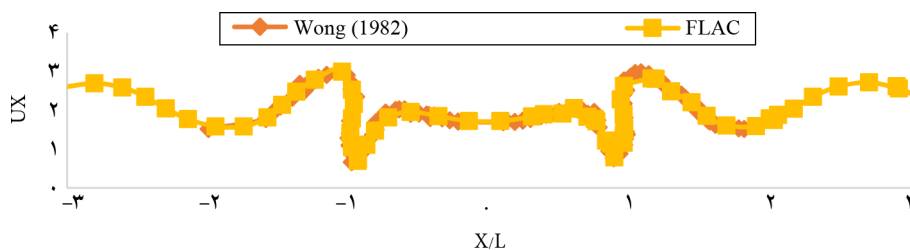
۴-۱- بررسی تأثیر زاویه شیب لایه‌ها بر تشدید توپوگرافی

پنج مدل با هندسه‌های نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت ۲۰ متر و زاویه لایه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. رأس توپوگرافی، به عنوان یک نقطه مهم در تمام مدل‌ها در نظر گرفته شده است. این نقطه در شکل (۹) نمایش داده شده است. جابه‌جایی ماکزیمم زمین (PGD) یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی بزرگی شدت زلزله است که به عنوان پارامتر متغیر پاسخ لرزه‌ای در توپوگرافی‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای تعریف تشدید توپوگرافی این گونه عمل شده است که: رأس توپوگرافی به عنوان نقطه مرجع در تمامی مدل‌ها جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای تأثیر لایه‌بندی توپوگرافی در نظر گرفته شده است. مدل مرجع برای هر نقطه از توپوگرافی به صورت یک مدل میدان آزاد و با ارتفاعی معادل ارتفاع پروفیل

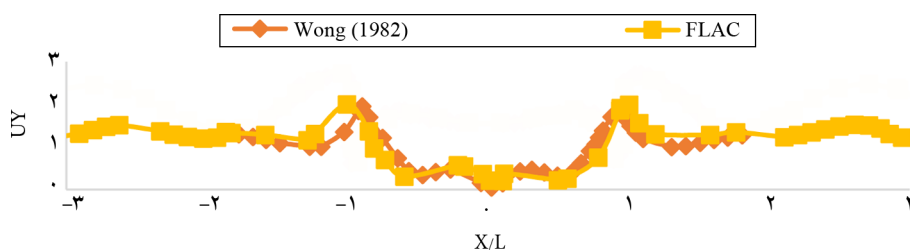
دینامیکی (در این مطالعه، شتاب ثقل به عنوان تحریک دینامیکی در نظر گرفته شده است)، تابع سرعت یا جابه‌جایی نسبت به زمان رسم و تعداد نوسان در یک ثانیه محاسبه شود.

۳- اعتبارسنجی مدل

نکته اساسی و اولیه هر پژوهشی قبل از تحلیل نتایج، صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده و روش مدل‌سازی است. به منظور صحت‌سنجی روش کار عددی در محیط این نرم‌افزار، دره‌ای نیم‌دایره به شعاع ۲۵ متر در محیط ویسکوالاستیک در حالت بدون میرایی بررسی شد (Wong, 1982; Bouckovalas & Papadimitriou, 2005). مشخصات مصالح استفاده شده عبارتند از: سرعت موج برشی $V_s = 500$ متر بر ثانیه، نسبت پواسون $\nu = 0.33$ و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب. سپس مدل ساخته شده تحت تابش قائم موج ریکر V_s با نسبت طول موج $\lambda/R = 2$ قرار گرفت. به منظور جلوگیری از بازتاب مصنوعی موج در سطوح مرزی از تنش به عنوان محرک دینامیکی استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از تحلیل وونگ (Wong, 1982) مقایسه شد و چنانکه در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود این دو مطابقت خوبی با هم دارند.



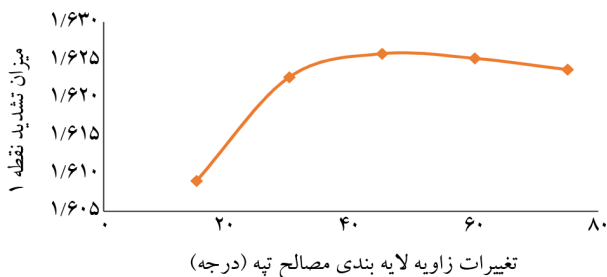
شکل (۷): صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار FLAC برای توپوگرافی دره ($R = 25$ متر، $\lambda/R = 2$ موج قائم SV).



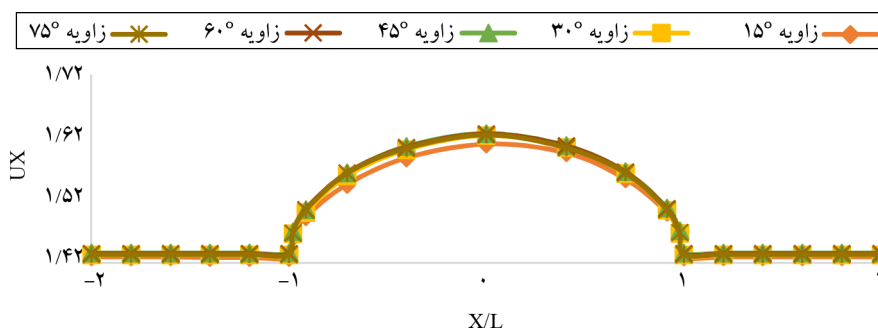
شکل (۸): صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار FLAC برای توپوگرافی دره ($R = 25$ متر، $\lambda/R = 2$ موج قائم SV).

ماکزیمم تشدید جابه‌جایی رأس توپوگرافی می‌شود. با تغییر نوع خاک در مرز فونداسیون مدل و تپه و همچنین سست‌تر شدن مصالح توپوگرافی نسبت به پایه مدل، میزان تشدید افزایش می‌یابد. می‌توان علت این افزایش تشدید را در دو موضوع جست‌وجو کرد. نخست، افزایش مساحت لایه زیرین توپوگرافی که مرتبط با پایه مدل می‌باشد؛ به صورتی که زیادتر شدن زاویه بین دو لایه موجود در تپه، سبب بیشتر شدن مساحت لایه در تماس با فونداسیون می‌شود. دوم، در مرز بین دو لایه توپوگرافی هم با کاهش سرعت موج برشی مصالح مواجه بوده که این تغییر سرعت هم در میزان افزایش تشدید نقش دارد. البته می‌توان اظهار داشت که موضوع دوم، نقش بیشتری داشته زیرا در زاویه ۶۰ و ۷۵ درجه که مساحت لایه بالایی چندان قابل ملاحظه نیست، به دام افتادن امواج بین دو لایه کمتر شده و بالطبع از میزان تشدید هم کاسته می‌شود.

شکل (۱۲) دامنه جابه‌جایی افقی سطح توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی با ارتفاع ۲۰ متر را برای مدل‌های با زوایای مختلف نشان می‌دهد. دیده می‌شود که پاسخ تپه در طول موج‌های بزرگ



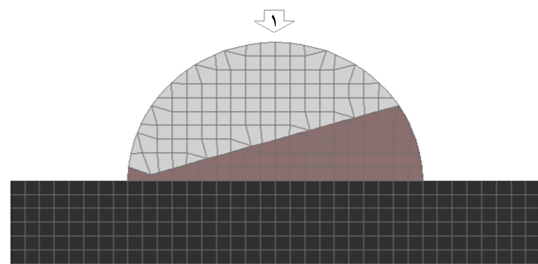
شکل (۱۱): نمودار نسبت مقادیر تشدید PGD نسبت به تغییرات زاویه برای نقطه ۱، توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت و زاویه لایه‌های متغیر.



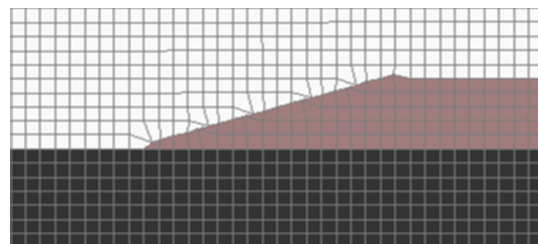
شکل (۱۲): نمودار نسبت مقادیر تشدید PGD نسبت به تغییرات زاویه برای سطح توپوگرافی، توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت و زاویه لایه‌های متغیر.

دو بعدی در نقطه مذکور و الگوی لایه‌های خاک مدل مرجع، مانند الگوی خاک لایه‌های مدل‌های توپوگرافی در نظر گرفته شده است (شکل ۱۰). نسبت حداکثر جابه‌جایی نقطه مورد نظر در مدل دارای توپوگرافی ($PGD_{response}$)، به حداکثر جابه‌جایی نقطه مورد نظر در مدل مرجع ($PGD_{reference}$) در اینجا با عنوان بزرگنمایی (a_h) بیان می‌شود.

$$a_h = \frac{PGD_{response}}{PGD_{reference}} \quad (8)$$



شکل (۹): موقعیت نقطه مورد بررسی در رأس توپوگرافی یکی از مدل‌ها.



شکل (۱۰): مدل هموار و بدون توپوگرافی مربوط به شکل (۹).

همان‌طور که در شکل (۱۱) رؤیت می‌شود، حضور لایه‌بندی با اختلاف امپدانس در ساختگاه (اختلاف بین سختی لایه‌ها)، باعث گیر افتادن امواج لرزه‌ای شده و اثرات ساختگاهی را به مراتب افزایش می‌دهد. افزایش زاویه لایه‌ها باعث افزایش

عرض تپه (L) است.

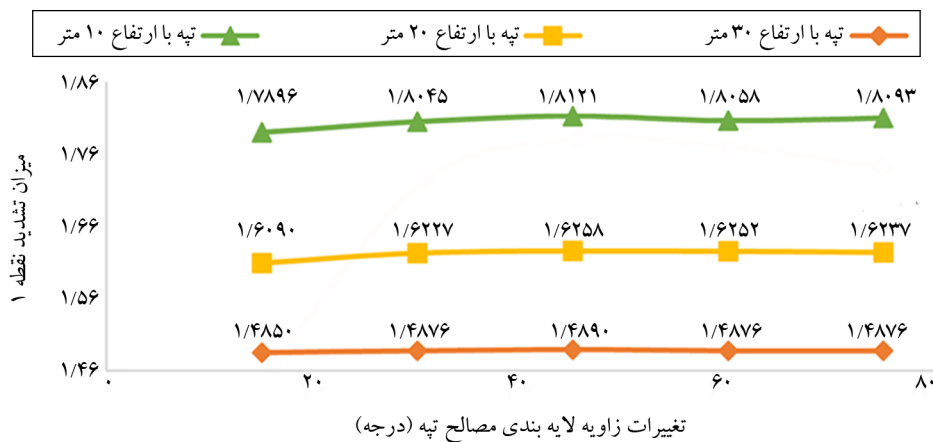
۴-۲- بررسی تأثیر ارتفاع شیب بر تشدید توپوگرافی

پانزده مدل با هندسه نیم‌سینوسی، در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر مورد بررسی قرار گرفته است؛ مانند قسمت قبل، نقطه‌ای در رأس توپوگرافی، به عنوان نقطه مورد بررسی در تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. این نقطه در شکل (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار موجود در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود در هر زاویه لایه‌بندی، افزایش ارتفاع، معادل با افزایش بزرگنمایی PGD است. به این صورت که مدلی با ارتفاع ۳۰ متر، در تمام زوایا، بیشترین پاسخ جابه‌جایی را دارد. دامنه جابه‌جایی افقی سطح توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی با ارتفاع‌های متفاوت برای مدل‌های با زوایای مختلف در شکل‌های (۱۴) تا (۱۸) نشان شده است.

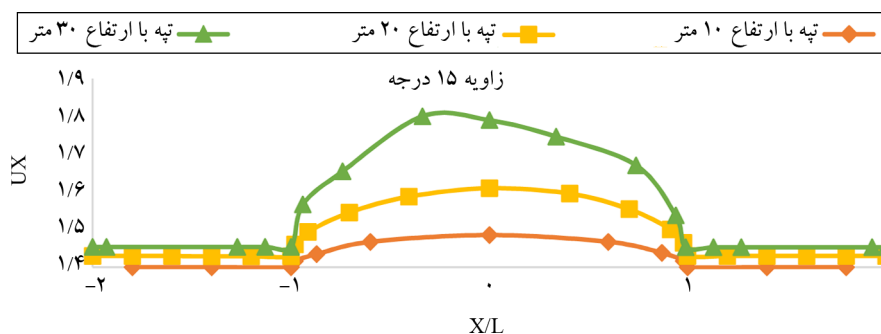
در سراسر تپه کاملاً تشدید می‌شود. مقادیر اثرات توپوگرافی، به‌طور کلی، با فاصله از تاج تپه کاهش می‌یابند. تحلیل نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش شیب لایه‌ها، ضرایب بزرگنمایی بیشتر می‌شود که این مقدار برای زاویه ۴۵ درجه به ماکزیمم مقدار خود، می‌رسد.

با مشاهده نمودارها می‌توان دریافت که ضرایب بزرگنمایی در تاج شیب بیشتر از دیگر نقاط روی سطح می‌باشد. تجمع امواج در رأس تپه، توجیه این امر بوده است. البته با افزایش فاصله از رأس، امواج پراکنده شده و طبیعتاً از میزان تشدید هم کاسته می‌شود. روند تغییرات تشدید در همه قسمت‌های مختلف تپه مشابه رأس آن می‌باشد.

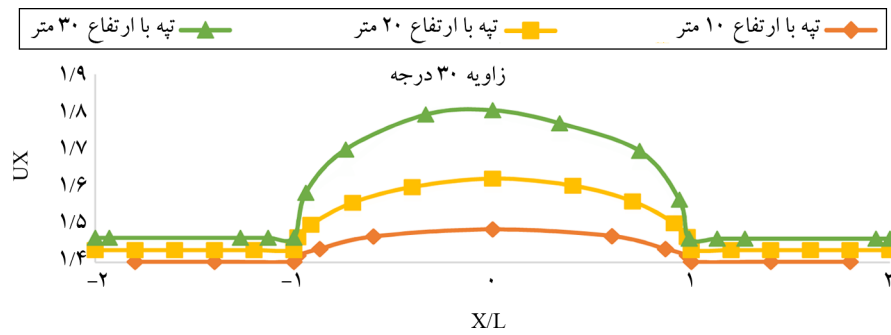
در شکل (۱۲) محور قائم بیان‌گر نسبت حداکثر پاسخ مؤلفه افقی جابه‌جایی تپه در نقاط مختلف بر حداکثر دامنه جابه‌جایی همان نقطه در مدل مرجع (میدان آزاد) است. محور افقی نیز بیان‌گر نسبت بی‌بعد شده فاصله نقاط از مرکز تپه (X) بر نصف



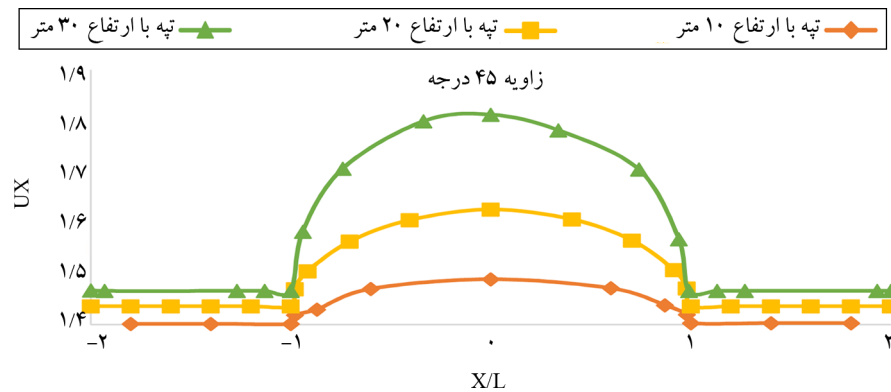
شکل (۱۳): نمودار نسبت مقادیر تشدید PGD نسبت به تغییرات زاویه برای نقطه ۱، توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی با ارتفاع متغیر (۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر) و زاویه لایه‌های متغیر.



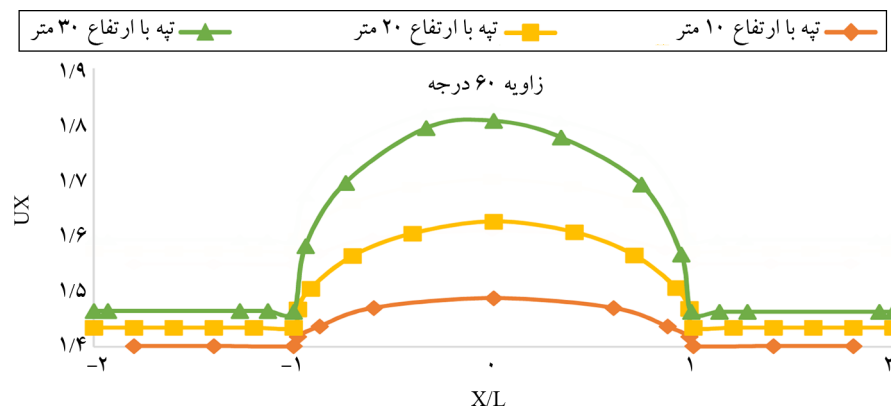
شکل (۱۴): نمودار مقایسه اثر ارتفاع متفاوت برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌های ۱۵ درجه.



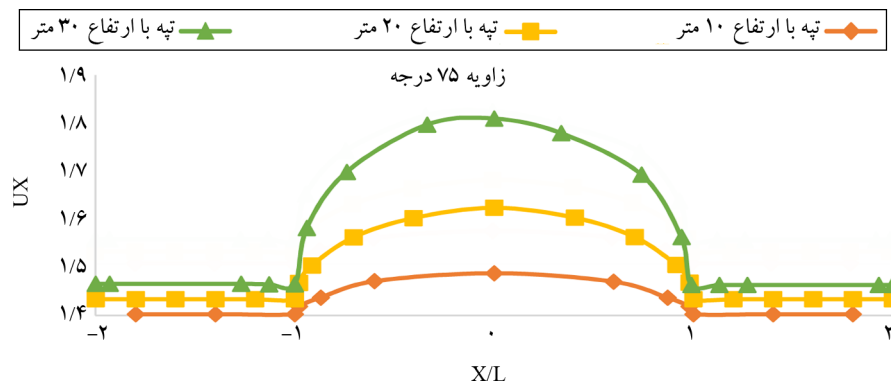
شکل (۱۵): نمودار مقایسه اثر ارتفاع متفاوت برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای ۳۰ درجه.



شکل (۱۶): نمودار مقایسه اثر ارتفاع متفاوت برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای ۴۵ درجه.



شکل (۱۷): نمودار مقایسه اثر ارتفاع متفاوت برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای ۶۰ درجه.



شکل (۱۸): نمودار مقایسه اثر ارتفاع متفاوت برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای ۷۵ درجه.

زمانی که موج از یک محیط پرسرعت (پایه مدل) وارد یک محیط کم‌سرعت (تپه) می‌شود پرتوی موج به‌طور پیوسته به شکل منحنی به یکدیگر نزدیک شده و باعث تمرکز انرژی در یک منطقه خاص می‌شود.

با تغییر متناوب سرعت برشی مصالح تپه در هنگام برخورد موج‌ها، بازتاب‌هایی با زوایای متفاوت ایجاد می‌شود که می‌تواند انرژی پرتوهای موج را در یک ناحیه خاص متمرکز نماید. در تپه‌های سه لایه با افزایش زاویه، سطح وسیع‌تری از تپه از مصالح با کم‌ترین سرعت موج برشی تشکیل می‌شود که همین امر در کنار پیچیدگی لایه‌بندی این تپه‌ها سبب افزایش بیشتر بزرگنمایی آنها شده است.

با افزایش تعداد لایه، علاوه بر نقطه رأس، دیگر نقاط موجود در سطح تپه نیز دچار بزرگنمایی بیشتری می‌شوند که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود.

۴-۴- بررسی تأثیر نحوه قرارگیری لایه‌های شیب‌دار بر میزان تشدید

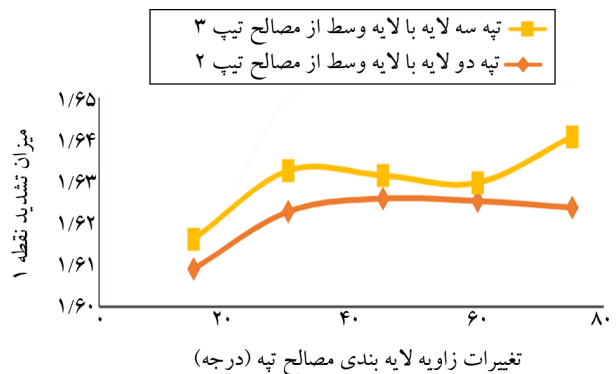
به‌منظور مشاهده تأثیر نحوه قرارگیری لایه‌های شیب‌دار سست و متراکم بر تشدید حرکت لرزه‌ای، مصالح لایه رویی و زیری در بخش ۴-۱ جابه‌جا شده است. به این صورت که در آن بخش، لایه زیری از خاک تپ ۲ تعریف شده در جدول (۱) بوده و در این بخش، لایه زیری شامل خاک نوع III است. ارتفاع و تغییرات زاویه، یکسان است.

همان‌طور که در شکل (۲۱) دیده می‌شود می‌توان ادعا کرد که رابطه‌ای بین تشدید توپوگرافی و چینه‌شناسی وجود دارد و به‌ویژه، اثرات چینه‌ای تأثیر بیشتری بر خصوصیات حرکت زمین نسبت به اثرات توپوگرافی دارد. مصالح سبک‌تر و سست‌تر، به معنای چگالی کمتر، میزان تشدید حرکت لرزه‌ای را افزایش می‌دهد (زاویه ۳۰ درجه). تغییر در نوع مصالح، باعث تغییر شدید محتوای فرکانسی می‌شود؛ به صورتی که فرکانس‌های بیشتر، بزرگنمایی زیادتری را تجربه می‌کند. در زاویه ۶۰ درجه و ۷۵ درجه که تفاوت فرکانس زیاد است تغییر بزرگنمایی

به‌طور کلی، عارضه‌های کوتاه‌تر توسط فرکانس بالاتر تقویت می‌شوند و توپوگرافی‌های بلندتر نیز، توسط فرکانس پایین‌تر تقویت می‌شوند. اثر ارتفاع، فقط در عارضه قابل توجه است و قسمت‌های مسطح اطراف توپوگرافی تشدیدهای کمتری را تجربه می‌کند. به دلیل تفاوت مصالح لایه‌ها در دو طرف مبدأ توپوگرافی ($X/L=0$)، تشدیدهای دو طرف مدل نامتقارن بوده؛ به طوری که در همه آنها در قسمتی که ناهمگن‌تر است مقدار تشدید بیشتری نسبت به سمت مقابل خود دیده می‌شود. توجه این امر به پراکنش امواج به دلیل محیط لایه‌ای ناهمگن در اطراف مبدأ که باعث تشدید بیشتر در آن سمت تپه شده است، برمی‌گردد.

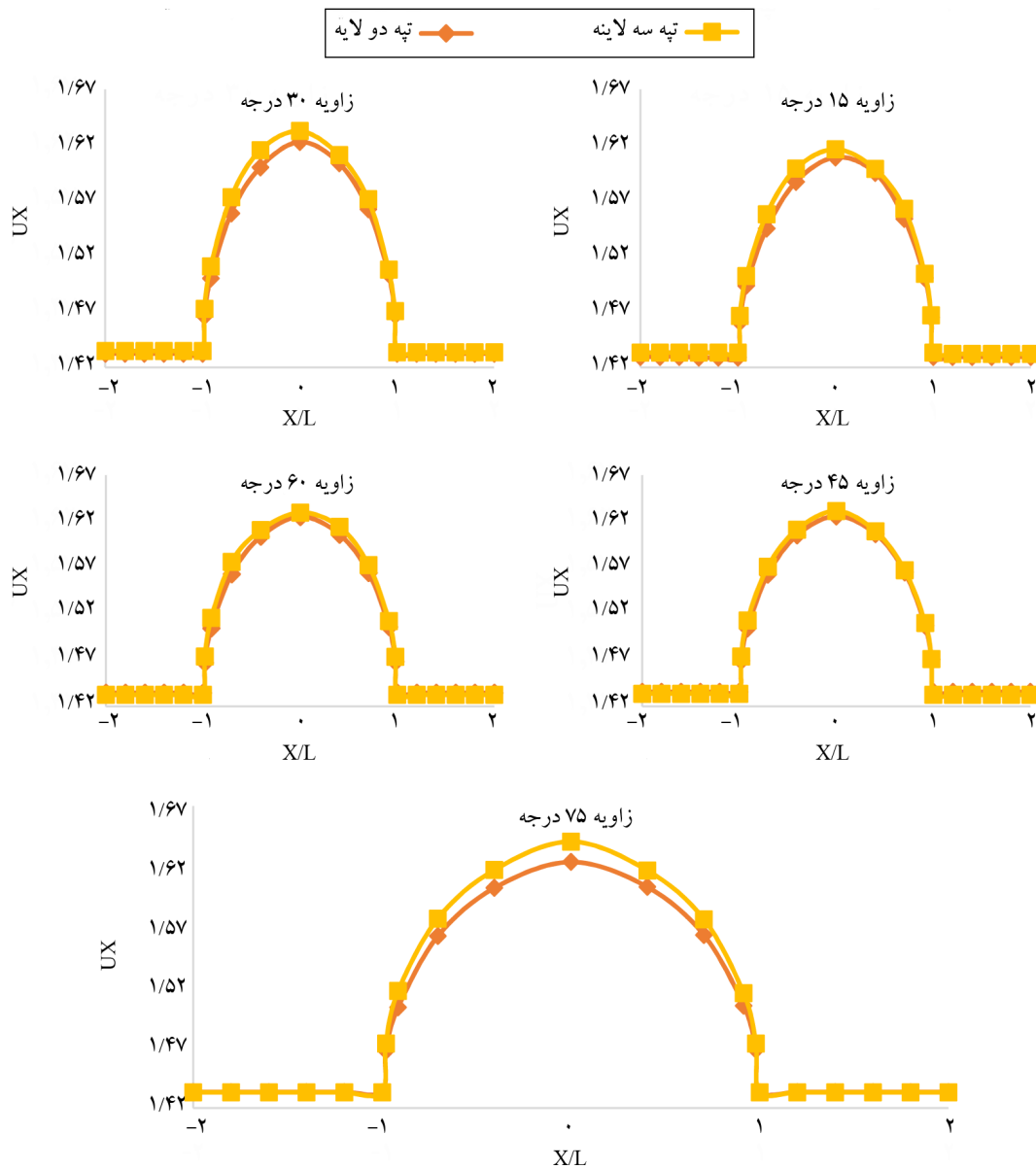
۴-۳- بررسی تأثیر تعداد لایه‌های شیب‌دار بر تشدید

به‌منظور بررسی تعامل بین تعداد لایه‌ها با میزان تشدید، پنج تپه نیم‌سینوسی مدل شده در بخش ۴-۱ (تپه با دو لایه زاویه‌دار) با پنج تپه نیم‌سینوسی (تپه با سه لایه زاویه‌دار) در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و ارتفاع ثابت ۲۰ متر مقایسه شده است. لایه وسط تپه‌های سه لایه از مصالح تپ III تشکیل شده است. این بار نیز، نقطه رأس توپوگرافی، به‌عنوان نقطه مهم (شکل ۹) مورد بررسی در تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۹) ملاحظه می‌شود، در تمام زاویه‌ها، با افزایش تعداد لایه‌ها بر میزان بزرگنمایی توپوگرافی‌ها افزوده می‌شود.

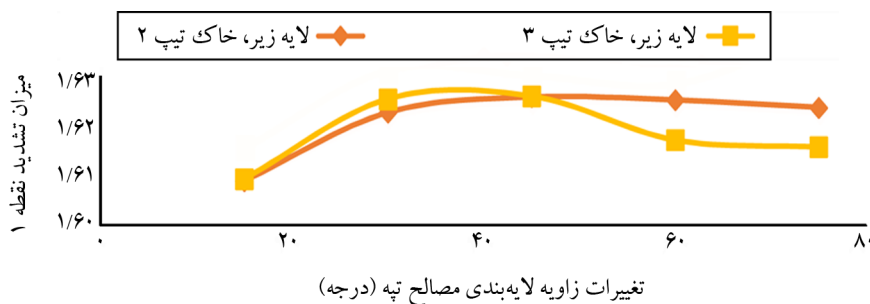


شکل (۱۹): نمودار نسبت مقادیر تشدید PGD نسبت به تغییرات زاویه برای نقطه ۱، توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی با تعداد لایه‌های متغیر (دو و سه لایه) و زاویه لایه‌های متغیر.

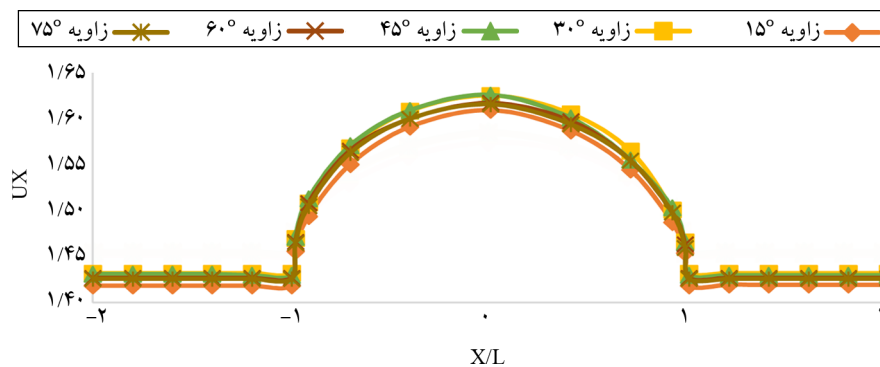
ملموس تر است. نشان می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل (۱۲) مؤید تأثیر شکل (۲۲) میزان تغییرات نتایج بزرگنمایی در سطح تپه را قابل توجه نوع مصالح لایه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای است.



شکل (۲۰): نمودار مقایسه اثر تعداد لایه برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای متفاوت.



شکل (۲۱): نمودار مقایسه اثر نحوه قرارگیری لایه‌های شیب‌دار برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زاویه بین لایه‌ای متفاوت.



شکل (۲۲): نمودار نسبت مقادیر تشدید PGD نسبت به تغییرات زاویه برای سطح توپوگرافی، توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت و زاویه لایه‌های متغیر.

۵- نتیجه‌گیری

سرعت برشی مصالح تپه در هنگام برخورد موج‌ها، بازتاب‌هایی با زوایای متفاوت ایجاد می‌شود که می‌تواند انرژی پرتوهای موج را در یک ناحیه خاص متمرکز نماید. همین امر در کنار پیچیدگی لایه‌بندی این تپه‌ها سبب افزایش بیشتر بزرگنمایی آنها شده است.

۴. تأثیر نحوه قرارگیری لایه‌های شیب‌دار سست و متراکم بر تشدید حرکت لرزه‌ای، آخرین پارامتر مورد مطالعه در این مقاله است. با جابه‌جا کردن مصالح دو لایه موجود در تپه، دیده می‌شود که میزان تشدید هم تغییر می‌کند. می‌توان اذعان داشت که رابطه‌ای بین تشدید توپوگرافی و چینه‌شناسی وجود دارد و به‌ویژه، اثرات چینه‌ای تأثیر بیشتری بر خصوصیات حرکت زمین نسبت به اثرات توپوگرافی دارد.

مراجع

- Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., & Shareghi, A. (2014). Spectral assessing of topographic effects on seismic behavior of trapezoidal hill. *World Academy Science Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Earth Science and Engineering*, 8(4).
- Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., & Shareghi, A. (2017). Seismic assessment of trapezoidal-shaped hills induced by strong ground motion records. *JSEE*, 19(4).
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., & Deng, N. (1997). Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 701-709.

در این مقاله به اهم مطالعات انجام شده پیرامون انتشار موج زلزله لاندردز به توپوگرافی‌های تپه نیم‌سینوسی با لایه‌های مختلف غیر افقی بین مصالح تپه، همراه با فرض یک محیط الاستیک پرداخته شده است. بدین منظور از نرم‌افزار FLAC2D بر پایه روش تفاضل محدود جهت مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های عددی بهره گرفته شده است. در ابتدا، مثال اعتبارسنجی جهت ارزیابی دقت نرم‌افزار انتخابی، ارائه شده است. سپس، در چارچوب یک مطالعه عددی در گستره فرکانس و با در نظر گرفتن پارامترهای زاویه لایه‌بندی مصالح، ارتفاع، تعداد لایه‌های غیر افقی و نحوه قرارگیری لایه‌های غیر افقی متراکم و سست تپه مقدار بزرگنمایی در سطح تپه و مخصوصاً در رأس تپه بررسی شده است:

۱. تغییر در زاویه لایه‌بندی مصالح تپه، باعث تغییر در میزان بزرگنمایی شده است. با افزایش زاویه بین مصالح از ۱۵ تا ۴۵ درجه، میزان بزرگنمایی افزایش داشته و پس از آن، با بیشتر شدن زاویه از مقدار بزرگنمایی کاسته می‌شود.
۲. افزایش هم‌زمان زاویه لایه‌ها و ارتفاع تپه، باعث بزرگ‌تر شدن میزان تشدید شده است. در ارتفاع‌های کوچک‌تر، تأثیر زاویه لایه‌بندی کمتر است؛ اما با بیشتر شدن ارتفاع، تأثیر این زاویه هم بیشتر می‌شود.
۳. با افزایش تعداد لایه‌های غیر افقی تپه، در تمام زاویه‌های لایه‌بندی، میزان بزرگنمایی افزایش می‌یابد. با تغییر متناوب

- subjected to vertically propagating incident waves. *Commun. Numer. Meth. Engng.*, 23, 871-887.
- Kamalian, M., Jafari, M.K., Dehghan, K., Sohrabi-Bidar, A., & Razmkhah, A. (2003). Two-dimensional hybrid response analysis of trapezoidal shaped hills in time domain. *Advances in Boundary Element Techniques IV*, 231-236.
- Kamalian, M., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., Taghavi, A., & Rahmani, I. (2008). Considerations on seismic microzonation in areas with two-dimensional hills. *Journal of Earth System Science*, 117(2), 783-796.
- Kuhlemeyer, R.L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Dynamics Division*, 99, 421-427.
- Mayoral, J.M., De la Rosa, D., & Tepalcapa, S. (2019). Topographic effects during the September 19, 2017 Mexico City earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125.
- Moczo, P., Bystricky, E., Kristek, J., Carcione, J.M., & Bouchon, M. (1997). Hybrid modeling of P-SV seismic motion at inhomogenous viscoelastic topographic structures. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 1305-1323.
- Nguyen, Kh., & Gatmiri B. (2007). Evaluation of seismic ground motion by topographic irregularity. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 27, 183-188.
- PEER [online] Peer Ground Motion Database. <http://ngawest2.berkeley.edu/spectras/21326/searches/20106/edit>. (Accessed 2 March 2014).
- Rizzitano, S., Cascone, E., & 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.
- Sanchez-Sesma, F.J. (1987). Site Effects on Strong Ground Motion. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 6, 124-132.
- Sanchez-Sesma, F.J., & Campillo, M. (1991). Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by topographic features: a boundary integral formulation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 234-253.
- Sohrabi-Bidar, A. (2008). *Seismic Behavior Assessment* Athanasopoulos, G., Pelekis, P., & Leonidou, E. (1999). Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(2), 35-149.
- Bard, P.Y. (1982). Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 71(3), 731-760.
- BHRC (2014). *Building Design Regulations against Earthquakes, Standard 2800*, Fourth edition. Road, Housing and Urban Development Research Center, in Persian.
- Boore, D.M. (1972). A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(1), 275-284.
- Boore, D.M. (1973). The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(5), 1603-1609.
- Bouchon, M. (1973). Effect of Topography on Surface Motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 615-632.
- Bouckovalas, G., & Kouretzis, G. (2001). Stiff soil amplification effects in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(8), 671-687.
- Bouckovalas, G.D., & Papadimitriou, A.G. (2005). Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7), 547-558.
- 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.
- Geli, L., Bard, P.V., & Julien, B. (1988). The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 42-63.
- Itasca Consulting Group Inc., Flac2D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions, Version 5.00, User's Manual, 2005.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., & Sohrabi-Bidar, A. (2007). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys

- Soc. Am., 72(4), 1167-1183.
- Yin, C., Li, W., & Wang, W. (2021). Evaluation of ground motion amplification effects in slope topography induced by the arbitrary directions of seismic waves. *Energies*, 14, 6744.
- Zhenning, B.A., Gao, X., & Lee, V.W. (2019). Scattering of plane P- and SV-waves by periodic topography: Modeled by a PIBEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 320-333.
- of Surface Topographies Using Time-Domain 3D Boundary Elements Method. Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
- Sohrabi-Bidar, A., & Kamalian, M. (2013). Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 1-12.
- Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., & Jafari, M.K. (2009). Seismic waves scattering in three dimensional homogeneous media using time-domain boundary element method. *Earth Space Phys.*, 38(1), 23-40.
- Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., & Jafari, M.K. (2009). Time-domain BEM for three-dimensional site response analysis of topographic structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(12), 1467-1492.
- Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., & Jafari, M.K. (2010). Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1429-1442.
- Song, J., Gao, Y., & Feng, T. (2020). Influence of interactions between topographic and soil layer amplification on seismic response of sliding mass and slope displacement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105901.
- Spudich, P., Hellweg, M., & Lee, W. (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.
- Trifunac, M.D., & 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.
- Wang, F., Miyajima, M., Dahal, R., Timilsina, M., Li, T., Fujiu, M., Kuwada, Y., & Zhao, Q. (2016). Effects of topographic and geological features on building damage caused by 2015.4. 25 Mw 7.8 Gorkha earthquake in Nepal, a preliminary investigation report. *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 1-17.
- Wong, H.L. (1982). Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves. *Bull. Seismol.*

Numerical Study of the Effect of Non-Horizontal Soil Layering on Seismic Response of Semi-Sine Hill

Masoud AmelSakhi^{1*}, Abdollah Sohrabi-Bidar², Ayda Haraty³ and Arash Shareghi⁴

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

Seismic resonance assessment of the site and its relationship with ground structures play an important role in earthquake engineering and risk assessment. Seismic waves can be exacerbated by sudden geometric changes due to topographical effects, significantly. Various parameters can be involved in the evaluation of topographical complications. Finally, the effect of all these factors should be summed up and considered in seismic designs. Boore was the first to use the Finite difference method to examine the triangular hill under SH waves. In this paper, FLAC2D software is used to analyze the topography of semi-sine hill under Landers earthquake record. FLAC2D software is a Finite difference program of Itasca software that is used for continuous environments. Each topography is drawn to investigate the effect of layering of complication materials at angles of 15, 30, 45, 60 and 75 degrees with a height of 20 m layered and to investigate the effect of height at heights of 10, 20 and 30 m and also with changing the angle from 15 to 75 degrees. Also, increasing the number of layers in topography with different angles of 15 to 75 degrees and investigating the effect of placing layers with loose and dense materials is considered. Most of the time, numerical analysis of a new problem always begins with the simplest behavioral model. Material behavior here is assumed like most previous studies that considered the behavioral model of materials as linear elastic model. An important factor that affects numerical results is the layering angle of the hills. Therefore, semi-sine hills with different layering angles (15 to 75 degrees) exposed to the Landers earthquake with alluvial frequency related to each model are modeled with layers that have different properties in terms of density and shear wave velocity and Poisson ratio. The ratio of maximum displacement of the desired point in the model with topography to the maximum displacement of the desired point in the reference model here is expressed as amplification (ah). Increasing the angle of the layers increases the topographic displacement amplification. The presence of layering with impedance difference in the site causes seismic waves to be caught and increases the effects of the site. At each layering angle, the height increase is equivalent to an increase in amplifications. In this way, a model with a height of 30 m, in all angles, has the most displacement response. At all angles, as the number of layers increases, the amplification of the topography is added. In the three-layer hills with increasing angle, a wider surface area of the hill is composed of materials with the lowest shear wave speed, which along with the complexity of layering these hills, has increased their amplification. The impact of how to place loose and dense non-horizontal layers on seismic motion intensification is the last parameter studied in this paper. It can be said that there is a relationship between topographical and stratigraphy resonance, and in particular, stratigraphic effects have a greater impact on the characteristics of earth's motion than topographical effects. By comparing the obtained results, it was found that each of the parameters of layering angle of topographic materials, height, and number of layers and the positioning of loose and dense layers in semi-sine geometry are the components affecting the seismic response of the site.

Keywords: Topographic Amplification, Soil Layering, Topographic Effects, Semi-Sine Hills.