

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

توپوگرافی و خصوصیات زمین‌شناسی تأثیرات معنی‌داری در پاسخ لرزه‌ای زمین دارند. بیشتر مطالعات بر تقویت ناشی از یک توپوگرافی واحد متمرکز شده‌اند. تحقیقات محدودی در مورد توپوگرافی‌های هم‌جوار انجام شده است. در این مقاله، تشدید تپه‌های همگن و غیر همگن با هندسه نیم‌دایره‌ای در حالت متناوب بررسی شده است. جهت مطالعه تشدید تپه‌های متناوب قرار گرفته در کنار یکدیگر از تپه‌ها با فواصل صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ برابر ارتفاع تپه مبنا شده است. از سوی دیگر به منظور بررسی اثرات ارتفاع تپه مجاور بر پاسخ لرزه‌ای تپه مبنا، ارتفاع تپه مجاور ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ برابر ارتفاع تپه مبنا در نظر گرفته شد و پاسخ لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به ذکر است مقایسه‌ها برای حالتی که تپه به صورت تنها قرار گرفته باشد مورد مقایسه و تحقیق قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش فاصله بین تپه‌های مجاور یکدیگر، تقویت را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع تپه کناری تا سه برابر ارتفاع تپه پایه مورد مطالعه، تقویت را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق بیانگر این مطلب است که هندسه تپه مجاور بر پاسخ لرزه‌ای تپه پایه تأثیر می‌گذارد.

واژگان کلیدی: اثرات ساختگاه، تپه‌های نیم‌دایره‌ای، تحلیل پاسخ لرزه‌ای دو بعدی.

مطالعه تشدید تپه‌های متناوب مجاور

آیدا هراتی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران،
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

۱- مقدمه

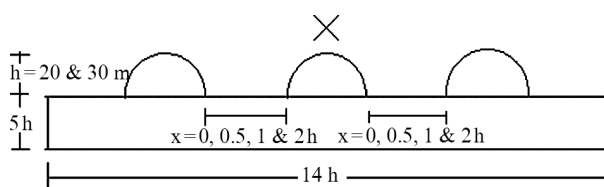
که تریفوناک مطالعات تئوری در مورد پاسخ دو بعدی یک دره نیم‌دایره‌ای تحت موج SH را آغاز کرد، مطالعات زیادی برای بررسی اثرات ساختگاه بر حرکت قوی زمین انجام شده است (Trifunac, 1971). سانچز-سسما (Sanchez-Sesma, 1987) نیز یکی از اولین محققانی بود که تپه‌های مثلثی شکل را تحت امواج مهاجم SH بررسی کرد. حل تحلیلی شکست موج SH صفحه‌ای و استوانه‌ای ناشی از تونل نعل اسبی با قوس معکوس توسط کائو و همکاران (Cao et al., 2001) ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه تونل عمیق‌تر تعبیه شود تأثیر کمتری بر حرکت‌های زمینی خواهد داشت. بخش میانی تونل و سطح افقی زمین درست روی دو شانه تونل، مناطق تشدید شده‌ای هستند که باید مسلح شوند و در طول طراحی به آنها توجه بیشتری شود. بوکوالاس و پادامیتریو (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005)

از آنجا که بزرگی و تنوع جنبش لرزه‌ای زمین ورودی‌های اصلی طراحی لرزه‌ای سازه‌های مهم است، تأثیرات ساختگاه یک منطقه یکی از موضوعات مهندسی زلزله و دینامیک خاک بوده است. در مهندسی ژئوتکنیک تمرکز اصلی بر این است که چگونه مصالح خاک می‌تواند حرکت لرزه‌ای زمین را در محدوده بالای خاک که سازه‌ها بر روی آن ساخته می‌شوند تغییر دهد. ارزیابی زمین‌لرزه‌های مخرب نشان می‌دهد که شرایط محلی مانند توپوگرافی (شیب‌ها، برآمدگی‌ها و دره‌ها) و زمین‌شناسی (آبرفت‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها) تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های حرکت زمین و شدت لرزه‌ای دارد. با این حال، هیچ ثبت دقیقی از جزئیات حرکت زمین در امتداد ناهمواری‌های سطح زمین وجود ندارد؛ لذا، تعیین میزان واقعی اثر توپوگرافی بر حرکت زمین بسیار دشوار است. از سال ۱۹۷۴

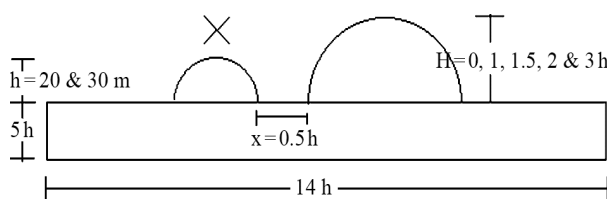
کاملاً متفاوت از توپوگرافی‌های واحد و چندگانه است و مشخص که به دست آوردن نتایج دقیق با انتخاب تعداد مشخصی از توپوگرافی‌ها بسیار دشوار است. نینگ و همکاران (Ning et al., 2018) پراکنندگی امواج ریلی در مدل دره گاوسی شکل را بررسی کرد. نتایج نشان داد که امواج ریلی هنگام مواجهه با توپوگرافی به امواج P و S تبدیل خواهند شد. انرژی موج S بیشتر از انرژی موج P ایجاد شده از موج ریلی است. سهرابی‌بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2010) پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب را به‌منظور ارزیابی پارامترهای حرکت پیک یک تپه گاوسی شکل دو بعدی محاسبه کردند. تقویت در بالای تپه و تشدید حرکت در پای تپه دیده شد. همچنین پاسخ تپه در طول موج‌های بزرگ (بزرگ‌تر از شش برابر) تقویت شد. در طول موج‌های متوسط (برابر با عرض تپه تا کمتر از چهار برابر عرض تپه) پاسخ لرزه‌ای در بالای تپه تشدید و در پای تپه تضعیف می‌شود. برای طول موج‌های کوتاه (کمتر از عرض تپه)، پاسخ لرزه‌ای در بیشتر نقاط تپه ضعیف شده و تقویت لرزه‌ای تنها بر روی و نزدیک نقاط بالای تپه وجود دارد. مدها و همکاران (Modha et al., 2018) به بررسی تقویت حرکت لرزه‌ای بر روی تپه‌های دارای هندسه مثلثی، پارابولیک و دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ در چهار عرض ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر پرداختند. بیشترین تقویت امواج در بالای تپه به دلیل به دام افتادن انرژی و تضعیف در پای تپه به دلیل پراکنده شدن امواج مشاهده شد. یین و همکاران (Yin et al., 2021) نشان دادند که جهت امواج لرزه‌ای می‌تواند حرکات سطح توپوگرافی شیب را تغییر دهد. مصالح سست تقویت شتاب را افزایش می‌دهند و امواج پراکنده بیشتری تحت امواج مایل زلزله ایجاد می‌شوند. تغییرات نسبت‌های تقویت شتاب در بالای شیب در امواج مایل بسیار پیچیده‌تر است و بررسی حرکات زمینی تنها با امواج عمودی دست‌کم گرفته می‌شوند. وقایع لرزه‌ای گذشته نشان داده‌اند که پل‌های ساخته شده بر روی دره به دلیل اثرات توپوگرافی آسیب‌پذیرتر هستند. ارزیابی عوامل مهم در طراحی

پاسخ لرزه‌ای شیب‌های پله‌ای در خاک و اسکوالاستیک همگن را تحت انتشار قائم امواج لرزه‌ای SV ارزیابی کرده و اثر هندسه شیب و فرکانس موج را به دست آوردند. انواع توپوگرافی تپه، دره و شیب تحت امواج SV توسط کمالیان و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت (Kamalian et al., 2007). کمالیان و همکاران (Kamalian et al., 2003) اولین گروهی بودند که رفتار لرزه‌ای پارامتری تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای شکل (Kamalian et al., 2008) را تحت امواج P و SV بررسی کردند. مشاهده شد که پتانسیل تقویت این تپه‌ها به شدت تحت تأثیر طول موج، شکل تپه و به میزان کمتر، نسبت پوآسون محیط است. سهرابی‌بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2009a, 2009b, 2010) و سهرابی‌بیدار و کمالیان (Sohrabi-Bidar & Kamalian, 2013) مطالعات پارامتری متعددی انجام دادند تا پاسخ اثرات سه بعدی توپوگرافی ساده را نشان دهند. افصلی‌راد و همکاران (Afzalirad et al., 2019) فرمولاسیون پیشرفته دامنه زمانی را با استفاده از روش المان مرزی دو بعدی همراه با میرایی مصالح ارائه کردند. این روش برای تحلیل پاسخ ساختگاه توپوگرافی و اسکوالاستیک تحت امواج مهاجم SV و P به کار گرفته شد. پاسخ‌های لرزه‌ای از ساختگاه‌های با لایه‌های افقی، دره‌های نیم‌دایره‌ای، توپوگرافی شیب و بخش‌های تپه تحت این امواج تهاجمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا دقت و کاربرد الگوریتم المان مرزی و اسکوالاستیک ارائه شده را نشان دهد. نتایج عددی تأیید کرد که نسبت میرایی بر الگوی کلی پتانسیل تقویت توپوگرافی تأثیر نمی‌گذارد، بلکه می‌تواند نقش کلیدی در کنترل شدت آن داشته باشد. عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2014) ارزیابی لرزه‌ای از تپه‌های دوزنقه‌ای ناشی از رکوردهای قوی حرکت زمین انجام دادند. یک روند کلی تشدید در بالای تپه‌ها و تضعیف در نزدیکی پای تپه‌ها در طیف‌های پاسخ شتاب، سرعت و جابه‌جایی حرکت افقی ظاهر شده است. ژنینگ و همکاران (Zhenning et al., 2019) پراکنندگی امواج P و SV را در یک توپوگرافی سیکلی بررسی کردند. نتایج عددی نشان داد که پاسخ‌های توپوگرافی سیکلی

تپه نیم‌دایره‌ای متمایز است. به منظور بررسی اثر فاصله بین توپوگرافی، تپه‌های نیم‌دایره‌ای متناوب در فواصل ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ برابر ارتفاع تپه در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱). به منظور بررسی اثر ارتفاع تپه جانبی بر تقویت لرزه‌ای توپوگرافی مورد مطالعه، ارتفاع تپه کناری ۰/۰، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ برابر ارتفاع تپه مورد مطالعه است. فاصله بین تپه‌ها نصف ارتفاع تپه مورد مطالعه است (شکل ۲). به منظور بررسی هندسه تپه کناری بر روی نتایج تشدید تپه مورد بررسی، تپه کناری در هندسه مثلثی، نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. هندسه تپه مورد بررسی به صورت نیم‌دایره و ارتفاع هر دو تپه برابر است (شکل ۳). تپه‌ها با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به هندسه نیم‌دایره، نسبت ارتفاع (h)، به نصف عرض تپه (l)، برابر است با $(h/l = 1)$.



شکل (۱): مدل‌های مطالعه تأثیر فاصله بین توپوگرافی‌های تکرار شونده (تپه‌هایی با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر، تپه همگن).



شکل (۲): مدل‌های مطالعه اثر ارتفاع تپه جانبی بر تپه مورد مطالعه (تپه‌هایی با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر، تپه همگن).

به منظور ارزیابی اثر تپه‌های اطراف غیرهمگن بر روی پاسخ تپه پایه (مشخص شده توسط X)، تپه‌های مجاور با مصالح مختلف لایه‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است که تپه مورد مطالعه، همگن تلقی می‌شود. فاصله بین تپه‌ها، ارتفاع و دیگر ویژگی‌های هندسی توپوگرافی‌ها، در بالا آمده است. ارتفاع تپه‌ها ۳۰ متر است (شکل‌های ۴ تا ۶).

لرزه‌ای این پل‌ها توسط لی و همکاران (Li et al., 2022) انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه موج و نسبت عمق به نصف عرض دره منجر به اثرات معنی‌داری بر پاسخ پل می‌شود. هنگامی که زاویه موج دینامیکی بیشتر از ۴۵ درجه است، اثر تقویت توپوگرافی باید در طراحی لرزه‌ای پل در نظر گرفته شود (Li et al., 2022). عامل سخی و همکاران (Amelsakhiet al., 2023) به بررسی عددی اثر لایه‌بندی غیر افقی خاک بر پاسخ لرزه‌ای تپه نیم‌سینوسی و مطالعه زاویه لایه‌بندی خاک در پدیده تشدید پرداختند. در مطالعه دیگری نوبخت و همکاران (Nobakht et al., 2022) به بررسی اثرات توپوگرافی روی تپه‌های نیم‌سینوسی تحت اثر موج ریکر پرداختند. با این حال، مطالعه ادبیات فنی نشان می‌دهد که تأکید اصلی به‌طور کلی بر تپه‌های تکی همگن است. برخی توپوگرافی‌ها به‌طور متناوب در طبیعت توزیع می‌شوند و این تغییر توپوگرافی باعث تغییر قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای تپه خواهد شد. در مطالعه حاضر، تقویت در تپه‌های متناوب نیم‌دایره‌ای همگن و غیرهمگن تحت رکورد زلزله لاندرز بررسی شده است.

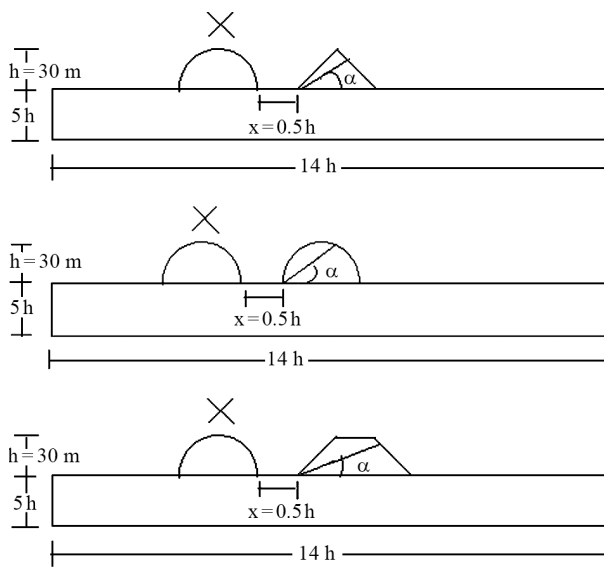
۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC2D که مبتنی بر روش تفاضل محدود است و به‌طور صریح مسائل را تحلیل می‌کند، انجام شده است. این روش، علاوه بر مشکلاتی که در حین مدل‌سازی مسئله دارد؛ در حل مسائل دینامیکی جواب دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

۱-۲- شرح مدل‌سازی توپوگرافی

پارامترهای مؤثر در مورد تشدید لرزه‌ای یک تپه یا دره، توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است، اما مطالعات زیادی در رابطه با توپوگرافی‌های هم‌جوار وجود ندارد.

هدف این مطالعه بررسی تأثیر فاصله توپوگرافی، ارتفاع و هندسه توپوگرافی جانبی بر تقویت یا تضعیف پاسخ لرزه‌ای یک



شکل (۶): مدل برای بررسی اثر هندسه تپه مجاور بر تپه مورد مطالعه (تپه با ارتفاع ۳۰ متر، تپه غیر همگن).

به عبارتی، اگر موج ورودی به سیستم، دارای یک مؤلفه فرکانس بالا باشد، با در نظر گرفتن معیار فوق نیاز به یک شبکه بالمان‌های بسیار ریز است و در نتیجه گام‌های زمانی محاسبات نیز توسط برنامه بسیار کوچک خواهد شد و محاسبات به‌طور غیرمعقولی زمان بر 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 طبق اطلاعات FIAC، اگر بزرگ‌ترین ابعاد مش ۱۰ متر فرض شود، f_{max} که می‌تواند مدل‌سازی را با دقت بالایی انجام دهد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

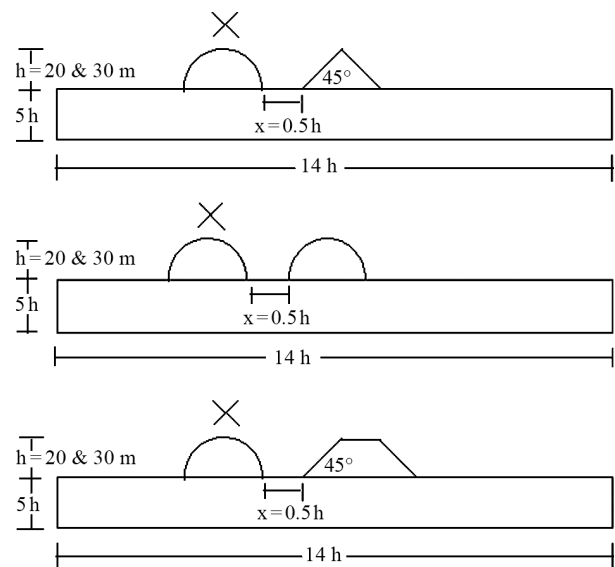
$$f_{max} = \frac{C_s}{10\Delta l} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{1+\nu} \quad (3)$$

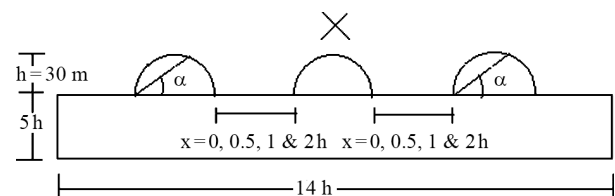
در نتیجه:

$$\lambda = \frac{V_{Smin}}{f_{max}} \quad (4)$$

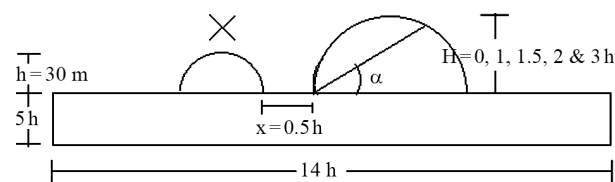
$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} = 2 \times 3 \rightarrow \Delta l = 2m \quad (5)$$



شکل (۳): مدل‌های برای مطالعه اثر هندسه تپه جانبی بر تپه مورد مطالعه (تپه‌هایی با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر، تپه همگن).



شکل (۴): مدل برای بررسی اثر فاصله بین تپه‌های تکرار شونده (تپه با ارتفاع ۳۰ متر، تپه غیر همگن).



شکل (۵): مدل برای بررسی اثر ارتفاع تپه مجاور بر تپه مورد مطالعه (تپه با ارتفاع ۳۰ متر، تپه غیر همگن).

کولمایر و لایزمر (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973)

پیشنهاد کردند که برای اطمینان از انتقال صحیح امواج در یک مدل مش‌بندی شده، بزرگ‌ترین بعد المان (Δl) باید کوچک‌تر از $1/8$ تا $1/10$ طول موج تولید شده توسط بالاترین فرکانس موج حرکت ورودی باشد؛ به عبارت دیگر:

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

که در آن λ طول موج ایجاد شده توسط بزرگ‌ترین جزء فرکانس از موج حرکت ورودی است که قادر به تولید انرژی است.

K و M سختی و جرم کل و At_{crit} زمان بحرانی است. پس از محاسبه گام زمانی مورد استفاده در رابطه (۲)، یک سری تحلیل با گام‌های زمانی مختلف انجام شده است.

نتایج به دست آمده در جدول (۳) یکسان هستند که نشان می‌دهد نتایج این بررسی‌ها برای طیف گسترده‌ای از گام‌های زمانی معتبر هستند. تحلیل عددی یک مسئله جدید همواره با ساده‌ترین مدل رفتاری آغاز می‌شود. رفتار مصالح مانند بیشتر مطالعات قبلی که مدل الاستیک خطی را در نظر گرفته‌اند، فرض می‌شود. اکثر تپه‌ها که در طبیعت هستند، از مصالحی با سرعت موج برشی بالا تشکیل شده‌اند.

ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در همه مدل‌ها عبارتند از: سرعت موج (V_s) ۷۶۰ متر بر ثانیه، نسبت پواسون (ν) ۰/۴۵ و چگالی جرم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب. رکورد زلزله استفاده شده، نگاشت زلزله لاندروز ۱۹۹۲ است (شکل ۷). لازم به ذکر است که این رکورد مربوط به شتاب‌نگاشت ثبت شده در سنگ بستر ($V_s < ۷۶۰$ متر بر ثانیه) است.

با توجه به اعمال مرزهای جاذب، حرکت ورودی سرعت یا شتاب در پایین مدل خنثی می‌شود؛ بنابراین سرعت موج به عنوان حرکت ورودی با استفاده از رابطه زیر به تنش موج تبدیل می‌شود:

$$\sigma_s = 2(\rho \times C_s) V_s \quad (۷)$$

که در آن f_{max} بزرگ‌ترین فرکانسی که موج در آن دارای توان است و Δl بزرگ‌ترین ابعاد المان مش‌بندی است. در نهایت اندازه مش مدل‌ها ۲×۲ متر گرفته شده است. در مدل‌سازی نرم‌افزار، مرزهای مدل باید به قدری بزرگ در نظر گرفته شود که امواج منعکس شده از مرزها، تقریباً میرا شده و تأثیری بر نتایج نداشته باشد. از سوی دیگر، زمانی که مرزهای مدل تا این اندازه بزرگ در نظر گرفته شود، مدت زمانی که مدل برای تجزیه و تحلیل نیاز دارد به شدت افزایش می‌یابد. روشی که نرم‌افزار برای رفع این مشکل ارائه می‌دهد استفاده از مرزهای میراگر است. در مطالعه حاضر مجموعه‌ای از تحلیل‌ها برای دستیابی به ارتفاع و عرض مطلوب انجام شده است که هم از انعکاس امواج به محیط مطالعه جلوگیری می‌کند و هم خیلی بزرگ نیست تا مدت زمان تجزیه و تحلیل را به طور غیر معقولی افزایش دهد (جداول ۱ و ۲).

سرانجام، ارتفاع و عرض بستر مدل به ترتیب ۵ و ۱۴ برابر ارتفاع تپه در نظر گرفته شد.

منظور از پارامتر مبنا، حداکثر جابه‌جایی در قله تپه می‌باشد. برای پایداری محاسباتی، گام زمانی باید کمتر از مقدار زمان بحرانی باشد. با توجه به اطلاعات نرم‌افزار، زمان بحرانی توسط رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$At_{crit} = 2\sqrt{\frac{M}{K}} \quad (۸)$$

جدول (۱): عرض بستر مدل‌های مورد مطالعه.

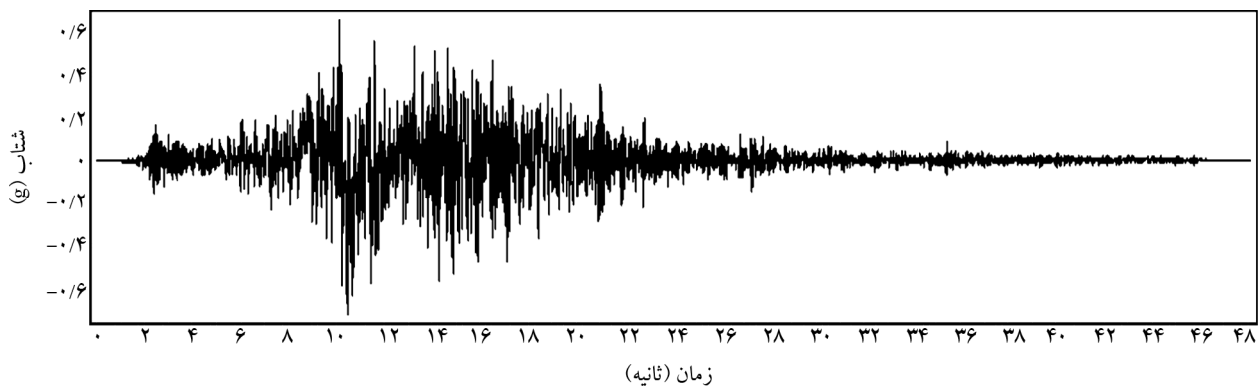
| عرض بستر مدل | ۵h و ۱۰h | ۵h و ۱۲h | ۵h و ۱۴h | ۵h و ۱۵h | ۵h و ۲۵h |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| پارامتر مبنا (جابه‌جایی بر حسب متر) | $۲/۵۳۱ \times ۱۰^{-۴}$ | $۲/۰۲۴ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۸۲۹ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۹۴ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۴۲ \times ۱۰^{-۴}$ |

جدول (۲): تعیین ارتفاع بستر مدل‌های مورد مطالعه.

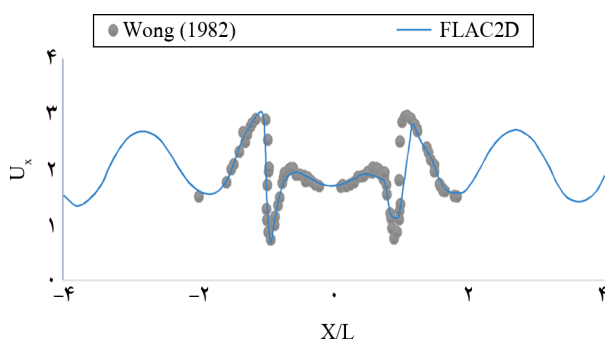
| ارتفاع بستر مدل | ۱h و ۱۴h | ۲h و ۱۴h | ۴h و ۱۴h | ۵h و ۱۴h | ۱۰h و ۱۴h |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| پارامتر مبنا (جابه‌جایی بر حسب متر) | $۴/۲۶۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۲/۸۱۵ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۹۰۳ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۸۲۹ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۹۷ \times ۱۰^{-۴}$ |

جدول (۳): نتایج به دست آمده در گام‌های زمانی مختلف.

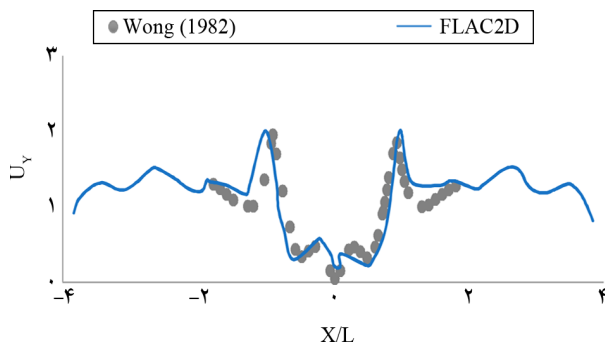
| تغییرات گام‌های زمانی | ۲×۱۰^{-۳} | ۲×۱۰^{-۴} | $۲ \times ۱۰^{-۴/۸}$ | ۲×۱۰^{-۵} | ۲×۱۰^{-۶} | ۲×۱۰^{-۷} |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| پارامتر مبنا (جابه‌جایی بر حسب متر) | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ | $۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۴}$ |



شکل (۷): نمودار شتاب - زمان زلزله لاندروز.



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



شکل (۹): اعتبارسنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار FLAC برای توپوگرافی دره، $R = 25$ متر، $(\lambda/R = 2)$ دره، موج قائم SV.

۴- نتایج عددی

۴-۱- نتایج تپه‌های همگن

۴-۱-۱- تأثیر فاصله بین تپه‌ها بر تشدید تپه مورد مطالعه

مدل‌های با هندسه نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ثابت ۲۰ و ۳۰ متر با نسبت شکل با $(h/l = 1)$. در فواصل بین تپه‌های ۰/۰، ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ برابر ارتفاع تپه مورد مطالعه، بررسی شد. "h" ارتفاع تپه و

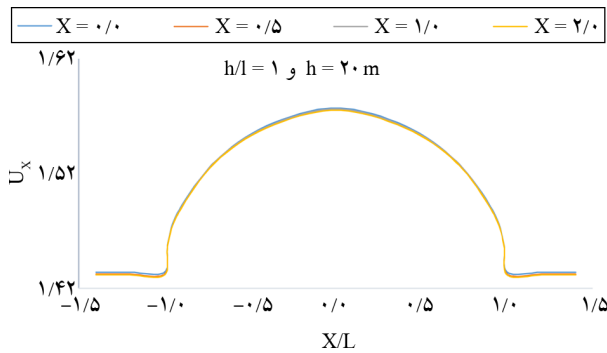
که σ_s تنش برشی اعمال شده، ρ چگالی سنگ پایه، C_s سرعت موج S در دامنه و V_s سرعت موج برشی ورودی در مرز است. میرایی رایلی در نظر گرفته شده برای سیستم زمین نیز ۵ درصد است.

۳- اعتبارسنجی مدل

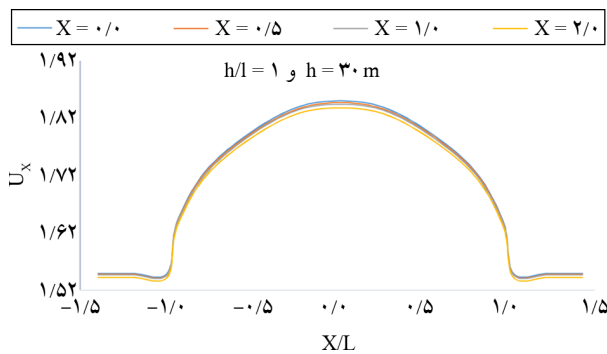
به منظور اعتبارسنجی روش عددی در نرم‌افزار، یک دره نیم‌دایره‌ای با شعاع ۲۵ متر در مدل ویسکوالاستیک در یک وضعیت بدون میرایی مورد بررسی قرار گرفت (Wong, 1982). پارامترهای مصالح استفاده شده عبارتند از: سرعت موج برشی (V_s) ۵۰۰ متر بر مجذور ثانیه، نسبت پوآسون (ν) ۰/۳۳ و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

موج ریکر SV با نسبت طول موج $\lambda/R = 2$ بر روی مدل اعمال شد. برای جلوگیری از انعکاس موج مصنوعی در مرزها از تنش به عنوان موج مهاجم ورودی استفاده شده است. سرانجام، نتایج تجزیه و تحلیل عددی با نتایج مطالعات وانگ (۱۹۸۲) مقایسه شده است. نتایج مقایسه‌ها در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.

در شکل‌های (۸) و (۹) محور عمودی (U_x) و (U_y) ، نسبت حداکثر پاسخ جابه‌جایی‌های افقی و عمودی مدل دارای توپوگرافی به حداکثر دامنه جابه‌جایی موج ریکر اعمال شده به مدل است. محور افقی نیز نسبت بی‌بعد فاصله نقاط از مرکز دره (X) به نصف عرض دره (L) است.



شکل (۱۰): نسبت مقادیر تشدید PGD برای مقایسه تغییر فاصله بین توپوگرافی، توپوگرافی نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ثابت ۲۰ متر، تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن). (توضیح اینکه منظور از $X = 0/0$ این است که فاصله‌ای بین دو تپه نیست).



شکل (۱۱): نسبت مقادیر تشدید PGD برای مقایسه تغییر فاصله بین توپوگرافی، توپوگرافی نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ثابت ۳۰ متر، تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن).

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) محور قائم (U_x)، نسبت حداکثر جابه‌جایی افقی در مدل دارای توپوگرافی به جابه‌جایی همان نقطه در مدل میدان آزاد است. محور افقی نشان دهنده نسبت بی‌بعد فاصله نقاط از مرکز تپه (X) به نصف عرض تپه (L) است.

۴-۱-۲- تأثیر ارتفاع تپه مجاور بر تشدید تپه مورد مطالعه

تپه پایه با هندسه نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر بررسی شده است (شکل ۲). هندسه تپه مجاور نیز نیم‌دایره‌ای است. دو تپه در یک نیم‌فضای همگن در نظر گرفته شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر ارتفاع تپه مجاور بر تقویت تپه پایه، ارتفاع تپه مجاور ۰/۰، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰ و ۳/۰ برابر ارتفاع تپه مورد مطالعه است. ارتفاع ۰/۰ برای تپه جانبی به این معنی است که هیچ

"۱" نصف عرض تپه است. فاصله بین تپه‌ها در شکل (۱) توسط "X" نشان داده شده است. سه تپه در یک نیم‌فضای همگن در نظر گرفته شده است. تپه مورد مطالعه در شکل (۱) با علامت \times مشخص شده است. حداکثر جابه‌جایی یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی شدت زلزله است که به عنوان پارامتر متغیر پاسخ لرزه‌ای در توپوگرافی در نظر گرفته شده است. تشدید در تپه به این صورت تعریف می‌شود: نتایج جابه‌جایی هر نقطه از مدل دارای تپه برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای تپه در نظر گرفته شده است. مدل مرجع برای هر نقطه از تپه به عنوان یک مدل میدان آزاد با ارتفاع معادل ارتفاع پروفایل دو بعدی در نقطه ذکر شده در نظر گرفته شده است. نسبت حداکثر جابه‌جایی نقطه مورد نظر در مدل با تپه ($PGD_{Response}$) به حداکثر جابه‌جایی همان نقطه در مدل مرجع ($PGD_{Reference}$) در اینجا به صورت تقویت تپه (U_x) تعریف می‌شود. محور افقی نسبت بی‌بعد فاصله بین نقاط از مرکز تپه (X) بر نصف عرض تپه (L) است.

$$U_x = \frac{PGD_{Response}}{PGD_{Reference}} \quad (8)$$

شکل (۱۰) تشدید جابه‌جایی برای تپه وسط، ارتفاع ۲۰ متر را نشان می‌دهد. نتایج تپه‌های با فاصله‌های مختلف بین آنها تا حدودی به یکدیگر نزدیک است؛ اما افزایش فاصله بین تپه‌ها، باعث کاهش تقویت می‌شود. با افزایش ارتفاع تپه، تغییرات در تشدید تپه واضح‌تر می‌شود (شکل ۱۱)؛ به عبارت دیگر، اثر تغییرات تقویت، در فواصل مختلف بین تپه‌ها، با ارتفاع تپه تعامل دارد. با افزایش فاصله بین تپه‌ها به دو برابر ارتفاع تپه، حدود ۲ درصد از میزان تقویت کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین تپه‌ها، برهم‌کنش دینامیکی بین آنها کاهش یافته و تشدید کاهش می‌یابد.

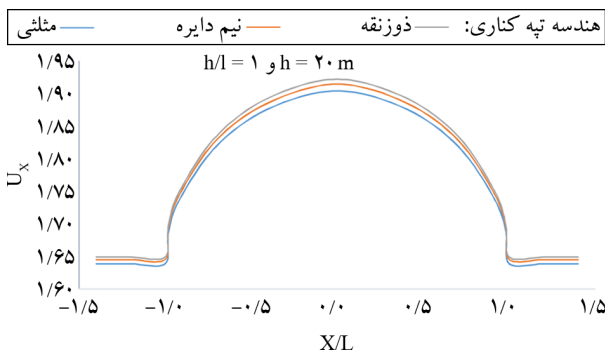
اثرات توپوگرافی به‌طور کلی با فاصله از تاج تپه کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به دلیل تجمع امواج در بالای تپه تقویت در بالای شیب بیشتر از نقاط دیگر شیب است. با افزایش فاصله از بالای تپه، امواج پراکنده می‌شوند و تقویت کاهش می‌یابد.

۴-۱-۳- تأثیر هندسه تپه مجاور بر تشدید تپه مورد مطالعه

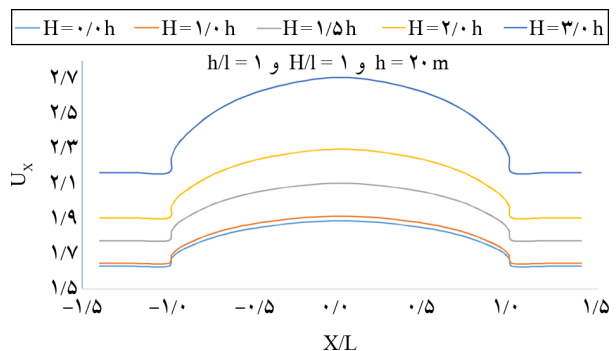
تپه‌های با هندسه نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ۲۰ و ۳۰ متر در این تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۳). هندسه تپه مجاور سه شکل مختلف است؛ مثلی، نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای. ارتفاع هر دو تپه برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده است. زاویه شیب برای هر دو تپه مثلی و دوزنقه‌ای ۴۵ درجه است. فاصله بین دو تپه نصف ارتفاع تپه‌ها است. تپه مورد مطالعه در شکل (۳) با علامت × مشخص شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود، هندسه تپه مجاور بر تقویت حرکت لرزه‌ای تپه مورد نظر تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که تپه مجاور دوزنقه بیشترین تأثیر را دارد و تپه مجاور مثلی کمترین تأثیر را در تقویت تپه مورد مطالعه دارد. از آنجا که تمرکز امواج، به ترتیب، بیشتر در هندسه‌های مثلی، نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای (در تپه مجاور) رخ می‌دهد، بنابراین کمترین تقویت در تپه مورد مطالعه در کنار تپه مثلی رخ می‌دهد و همچنین بیشترین

توپوگرافی در اطراف تپه مورد مطالعه وجود ندارد. فاصله بین دو تپه نصف ارتفاع تپه مورد مطالعه است. تپه پایه مورد مطالعه در شکل (۲) با علامت × مشخص شده است. نسبت شکل (h/l) برای هر دو تپه ۱ است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، ارتفاع تپه مورد مطالعه (h) و ارتفاع تپه مجاور (H) است. نتایج به‌دست آمده در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در تپه با ارتفاع ۲۰ متر، افزایش ارتفاع تپه مجاور، تقویت تپه مورد نظر را افزایش می‌دهد. تقویت تپه تکی و دو تپه با ارتفاع یکسان، نزدیک به یکدیگر است. تپه مجاور که بلندتر از تپه مورد مطالعه می‌شود، تأثیر بیشتری در تقویت پایه تپه دارد.

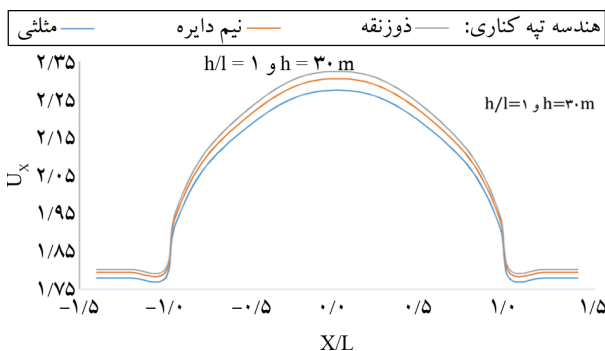
افزایش ارتفاع تپه مجاور، تمرکز امواج لرزه‌ای را افزایش می‌دهد. هنگامی که امواج به سطح داخلی تپه برخورد می‌کنند، با توجه به زاویه تابش موج و ارتفاع تپه محدب، امواج با زوایای مختلف بازتاب می‌شوند. این وضعیت انرژی موج را در یک منطقه کوچک متمرکز می‌کند که منجر به افزایش تقویت می‌شود.



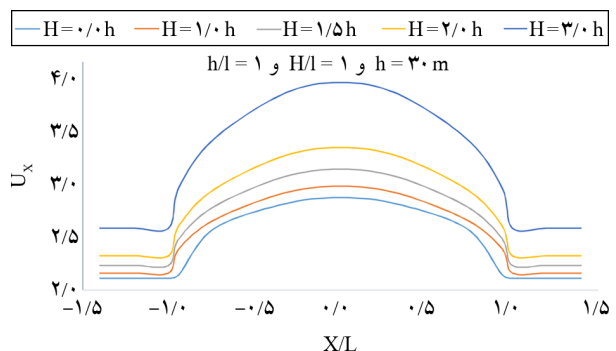
شکل (۱۴): تشدید PGD برای مقایسه تغییر در ارتفاع تپه مجاور، ارتفاع ۲۰ متر، تپه نیم‌دایره‌ای تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن).



شکل (۱۲): تشدید PGD برای مقایسه تغییر در ارتفاع تپه مجاور، تپه نیم‌دایره با ارتفاع ۲۰ متر تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن).

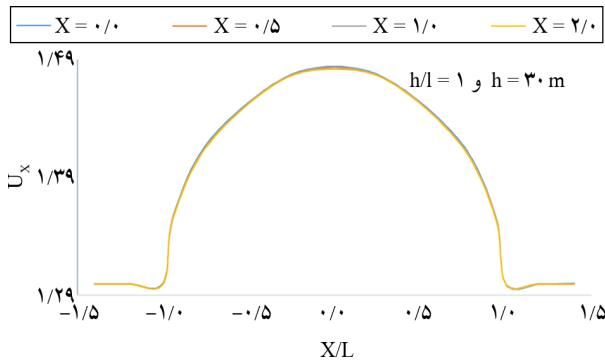


شکل (۱۵): تشدید PGD برای مقایسه تغییر در هندسه تپه مجاور، ارتفاع ۳۰ متر، تپه نیم‌دایره‌ای تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن).



شکل (۱۳): تشدید PGD برای مقایسه تغییر ارتفاع تپه مجاور، تپه نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ۳۰ متر تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های همگن).

شدن مصالح آنها و همچنین افزایش تمرکز امواج در این تپه‌ها در مقایسه با تپه‌های همگن است.



شکل (۱۶): تشدید PGD برای مقایسه تغییر در فاصله تپه مجاور، ارتفاع ۳۰ متر، تپه نیم‌دایره‌ای تحت رکورد زلزله لاندروز (تپه‌های غیر همگن).

۴-۲-۲- تأثیر ارتفاع تپه مجاور بر تشدید تپه مورد مطالعه

در این بخش از تحقیق، تپه نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ۳۰ متر مورد مطالعه قرار می‌گیرد (شکل ۵). تپه مجاور نیز نیم‌دایره‌ای است. تپه مورد مطالعه همگن و تپه مجاور غیر همگن است. به منظور بررسی تأثیر ارتفاع تپه مجاور بر تقویت تپه پایه، ارتفاع تپه جانبی ۱/۵، ۱/۵ و ۲/۰ برابر ارتفاع تپه پایه است. فاصله بین دو تپه نصف ارتفاع پایه تپه است. تپه مورد مطالعه در شکل (۵) با علامت \times مشخص شده است. نسبت شکل (h/l) هر دو تپه ۱ است. زاویه بین دو لایه تپه غیر همگن نسبت به افق ۳۰ درجه است. خصوصیات مصالح در بخش قبلی (۴-۲-۱) تعریف شده است. افزایش ارتفاع تپه غیر همگن مجاور، تقویت تپه پایه را افزایش می‌دهد. هنگامی که در تپه مجاور $(H = 3h)$ می‌شود، تقویت تپه مورد مطالعه در مقایسه با $(H = 1h)$ تا ۸ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر اینکه نتایج عددی بیانگر مطلب مورد اشاره است، می‌توان چنین استدلال نمود که هنگامی که مصالح تپه‌های مجاور سست است، تمرکز امواج بیشتر در این تپه‌ها اتفاق می‌افتد، بنابراین تقویت در تپه همگن پایه خیلی زیاد نیست. کاهش سرعت موج برشی در ساختگاه غیر همگن، تقویت را در مقایسه با محیط کاملاً همگن کاهش می‌دهد. علت تفاوت تقویت بین همگن و غیر همگن مربوط به اثرات چینه‌شناسی است (شکل ۱۷).

تقویت در تپه پایه در کنار تپه دوزنقه‌ای رخ می‌دهد. تمرکز امواج، مربوط به هندسه توپوگرافی و همچنین بازتاب امواج است. تمرکز امواج در نزدیکی بالای تپه مثلثی شکل بیشتر از تپه‌های نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای است، بنابراین تقویت بیشتر در تپه شکل مثلثی رخ می‌دهد. افزایش تقویت در بالای تپه مثلثی مجاور، باعث تمرکز امواج کمتری برای تپه مورد مطالعه می‌شود؛ بنابراین کمترین تقویت برای تپه پایه هنگامی اتفاق می‌افتد که تپه شکل مثلثی در مجاورت تپه پایه قرار دارد. واضح است که اثرات توپوگرافی به طور کلی با افزایش فاصله از قله تپه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع تپه‌ها در تمام هندسه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، تقویت را افزایش می‌دهد.

۴-۲-۳- نتایج توپوگرافی‌های غیر همگن

۴-۲-۱- تأثیر فاصله بین تپه‌ها بر تشدید تپه مورد مطالعه

مدل‌های تپه‌های نیم‌دایره‌ای با ارتفاع ثابت ۳۰ متر با نسبت شکل $(h/l = 1)$ در فاصله بین تپه‌های ۰/۵، ۱/۰، ۲/۰ برابر ارتفاع تپه مورد بررسی قرار می‌گیرند. تپه مورد مطالعه در شکل (۴) با علامت \times مشخص شده است. تپه‌های مجاور غیر همگن و تپه مورد مطالعه همگن است. لایه زیرین تپه مجاور دارای سرعت موج برشی (V_s) ۵۰۰ متر بر ثانیه، نسبت پوآسون (ν) ۰/۳۵ و چگالی جرم ۱۸۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. لایه فوقانی نیز دارای سرعت موج برشی (V_s) ۱۷۵ متر بر ثانیه، نسبت پوآسون (ν) ۰/۲۷ و چگالی جرم ۱۴۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. زاویه بین دو لایه تپه غیر همگن نسبت به افق ۳۰ درجه است. شکل (۱۶) تقویت جابه‌جایی تپه میانه با ارتفاع ۳۰ متر را نشان می‌دهد. نتایج تقویت برای تپه نیم‌دایره میانی همگن با فاصله‌های مختلف بین تپه‌ها مشابه است. بنابراین ترکیب هم‌زمان ناهمگن شدن تپه مجاور و فاصله بین تپه‌ها هیچ تأثیری در تپه پایه ندارد.

مقایسه بین نتایج در شکل‌های (۱۱) و (۱۶) نشان می‌دهد که ناهمگنی تپه‌های مجاور باعث کاهش تقویت در تپه مورد مطالعه می‌شود. دلیل این امر، مربوط به ناهمگنی تپه‌های مجاور و سست

۵- نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای مختلف توپوگرافی تپه‌های نیم‌دایره‌ای با رفتار الاستیک با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D بر اساس روش تفاضل محدود مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مورد مطالعه عبارتند از: فاصله بین تپه‌ها، تغییر ارتفاع، شکل هندسی تپه مجاور در توپوگرافی همگن و غیر همگن. نتایج اصلی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

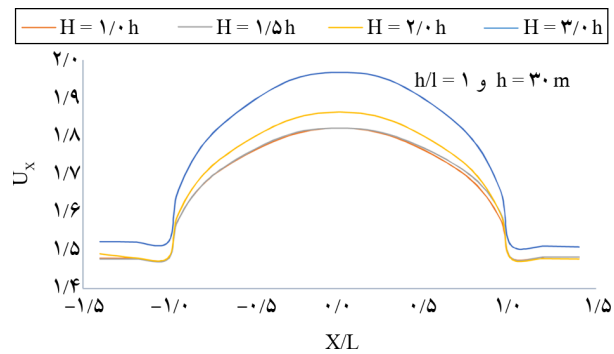
- افزایش فاصله بین تپه‌ها، تعامل بین تپه‌ها را کاهش و در نتیجه تقویت کاهش می‌یابد.

- افزایش ارتفاع تپه مجاور، تقویت تپه مورد مطالعه را افزایش می‌دهد. تپه مجاور بلندتر تأثیر بیشتری بر تقویت تپه مورد نظر دارد. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع تپه مجاور از ۱ تا ۳ برابر ارتفاع تپه پایه، تقویت می‌تواند تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

- شکل هندسی تپه مجاور بر تقویت تپه پایه تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که تپه مجاور با شکل دوزنقه بیشترین اثر را دارد و تپه مجاور مثلثی شکل کمترین تأثیر را در تقویت می‌کند، بنابراین این تپه کمترین تأثیر را بر تشدید تپه پایه مجاور خود دارد.

- افزایش ارتفاع تپه مجاور غیر همگن، تقویت تپه پایه را افزایش می‌دهد. هنگامی که برای تپه مجاور $H = 3h$ ، تقویت تپه پایه تا ۸ درصد در مقایسه با $H = 1h$ افزایش می‌یابد.

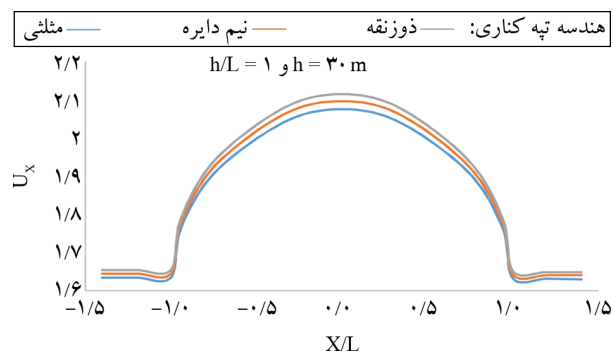
- کاهش سرعت موج برشی در تپه غیر همگن، تقویت تپه پایه را در مقایسه با تپه همگن کاهش می‌دهد. نتایج مطالعه عددی پژوهش حاضر نشان می‌دهد که برای تپه‌های غیر همگن مجاور، تقویت افزایش می‌یابد، بنابراین تقویت در تپه پایه همگن کاهش می‌یابد. در توجیه این مطلب می‌توان گفت که غیر همگنی تپه‌های مجاور باعث جذب بیشتر نیروهای لرزه‌ای در تپه ناهمگن مجاور شده که نتیجه آن، کاهش تقویت در تپه پایه بوده است. نکته مهم و قابل ذکر دیگر وجود خاک سست در مصالح تپه است، به طوری که وجود



شکل (۱۷): تقویت PGD بر اساس تغییرات ارتفاع تپه مجاور، ارتفاع ۳۰ متر، تپه نیم‌دایره‌ای تحت زلزله لاندردز (تپه‌های غیر همگن).

۲-۲-۳- تأثیر هندسه تپه مجاور بر تشدید تپه مورد مطالعه

هندسه نیم‌دایره با ارتفاع ۳۰ متر مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۶). هندسه تپه مجاور مثلثی، نیم‌دایره‌ای و دوزنقه است. ارتفاع هر دو تپه با یکدیگر برابر فرض شده است. شیب هر دو تپه مثلثی و دوزنقه‌ای ۴۵ درجه است. فاصله بین دو تپه نصف ارتفاع تپه است. تپه پایه مورد مطالعه در شکل (۶) با علامت \times مشخص شده است. تپه مجاور غیر همگن و تپه مورد مطالعه همگن است. زاویه بین دو لایه برای مصالح تپه غیر همگن ۳۰ درجه است. نتایج ارائه شده در شکل (۱۸) نشان می‌دهد که شبیه به نتایج همگن، حداکثر و حداقل اثرات به ترتیب مربوط به تپه مجاور دوزنقه‌ای و مثلثی است. مقایسه شکل‌های (۱۵) و (۱۸) نشان می‌دهد که تپه‌های همگن تقویت بیشتری را تجربه می‌کنند؛ به عنوان مثال تپه دوزنقه‌ای مجاور همگن در مقایسه با تپه دوزنقه‌ای مجاور غیر همگن حدود ۱۰ درصد بیشتر تشدید شده است.



شکل (۱۸): تشدید PGD برای مقایسه تغییر در هندسه تپه مجاور، ارتفاع ۳۰ متر، تپه نیم‌دایره‌ای تحت زلزله لاندردز (تپه‌های غیر همگن).

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.

Li, sh., Zhang, F., Wang, M., Cheng, Zh., Zhang, Y., Zhang, N., Wang, J., & Gao, Y. (2022). Seismic response sensitivity of a V-shaped canyon-crossing bridge considering the near-source canyon topographic effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107205.

Modha, K.G., Raj, D., Singh, Y., & Lang, D.H. (2020). Topographic amplification of earthquake ground motion on different hill geometry. *17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020*.

Ning, L., Dai, T., Wang, L., Yuan, Sh., & Pang, J. (2018). Numerical investigation of Rayleigh-wave propagation on canyon topography using finite-difference method. *Journal of Applied Geophysics*.

Nobakht, M., Amelsakhi, M., & Sheshpari, F. (2022). Evaluation of the effects of topography on the horizontal and vertical displacement of semi-sine shaped hills against ricker waves. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(4), 85-92 (in Persian).

Sanchez-Sesma, F.J. (1987). Site effects on strong ground motion. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 6, 124-132.

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. (2009a). 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. (2009b). 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.

خاک سست، باعث تقویت پاسخ‌ها در مقایسه با تمام شرایط یکسان دیگر و صرفاً متراکم‌تر بودن خاک است. در یک نگاه کلی، اثرات مختلفی بر تقویت پاسخ لرزه‌ای تپه‌ها مؤثر است که بررسی تمام پارامترها به صورت توأمان، امری پیچیده است. بر این اساس است که محققین مختلف هر کدام به بررسی بخشی از این اثرات پرداخته‌اند.

مراجع

Afzalirad, M., Naghizadehrokni, M., & Khosravi, I., (2019). Dynamic behavior of double and triple adjacent 2D hills using boundary element method. *Heliyon* 5, e01114.

Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., Haraty, A., & Shareghi, A. (2023). Numerical study of the effect of non-horizontal soil layering on seismic response of semi-sine hill. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 10(3) 15-29 (in Persian).

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).

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.

Cao, X.R., Song, T.S., & Liu, D.K. (2001). Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of arbitrary shape. *Appl. Math. Mech.* 22(9), 1082- 1089.

Kamalian, M., Gatmiri, B., & Sohrabi-Bidar, A. (2007). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys 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

Geophysical Journal International, 183(3), 1429-1442.

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.

Trifunac, M.D. (1971). Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61(6), 1755-1770.

Wong, H.L. (1982). Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves. *Bull. Seismol. 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., Xu, G., & 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.

Amplification Study of Adjacent Alternating Hills

Ayda Haraty¹ and Masoud Amelsakhi^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of 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

Topography and geological characteristics have significant effect on seismic response of structures. Most studies have focused on the amplification caused by a single topography. Limited research has been conducted on adjacent topographies. The main aims in this paper are studying the most important factors that affect the amplification ration in the hill topography. The angle between the layers one hill, have a distinct effect of this ratio. In this research, this angle and its effect on the amplification ratio is studied. Another important issue is the adjacent hills and their interaction on each other. In the other word, the distance between the adjacent hills, the geometry shape of the hills, homogenous and non-homogenous soil parameters are the most important factors. These factors are studied in this research with a vast numerical analysis based on Finite Difference Method. It should be mentioned that all the models are in dry condition, so the water table level is neglected in the numerical analyses. The effects of these parameters are studied on the amplification ratio of the base hill. The base hill is assumed the hill without any topographic situation near it, for example hill or valley topography near the base hill. In this paper, the amplification of homogenous and non-homogenous hills with semicircular and alternating geometry has been investigated. FLAC2D software is a finite difference program of Itasca software that is used for continuous environments. In order to investigate the effect of the distance between topography, intermittent semicircular hills are located at distances of 0.0, 0.5, 1.0 and 2.0 times the height of the hill. In order to investigate the effect of lateral hill height on the seismic amplification of the studied topography, the height of the side hill is 0.0, 0.0, 1.5, 2.0 and 3.0 times the height of the studied hill. The distance between the hills is half the height of the studied hill. In order to study the geometry of the side hill on the results of the resonance of the studied hill, the side hill is considered in triangular, semicircular and trapezoid geometry. The geometry of the studied hill is semicircular and the height of both hills is equal. Due to the semicircular geometry, ratio of height (h) to half the width of the hill (l), equal to (h/l=1). The mesh sizes of the models are taken 2× 2 meters. In software modeling, the model boundaries should be considered so large that the waves reflected from the borders are almost dumped and have no effect on the results. The ratio of maximum displacement of the desired point in the model with topography (PGD response) (Peak Ground Displacement) to the maximum displacement of the desired point in the reference model (PGD reference) is expressed as magnification in displacement (UX). The obtained results in this research show that increasing the distance between the hills, decreases the amplification. The results show that increasing the height of the side hill up to 3 times the height of the studied base hill, increases the amplification up to 40%. The results indicate that geometry of the adjacent hill affects the seismic response of the base hill. Reducing the shear wave speed in the non-homogeneous hill reduces the amplification of the base hill compared to the homogenous hill. For adjacent non-homogenous hills, resonance increases, so amplification decreases in the homogeneous base hill. The obtained numerical results show that the adjacent hill's geometry shape, its distance to the base hill, the non-homogenous soil properties of the adjacent hill and also the layering in the adjacent hill, have distinct effects on the amplification ratio of the base hill.

Keywords: Site Effects, Periodic Topography, Semicircular Hills, 2D Seismic Response Analysis.