

بررسی اثر لایه‌بندی خاک بر بزرگنمایی تپه‌های متناوب نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای

مسعود عامل سخی^{۱*} و آیدا هراتی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵)

چکیده

امروزه کاملاً آشکار است که ناهمواری‌های سطحی به دلیل تأثیرات زیادی که بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌ها دارند، باید در محاسبات لرزه‌ای مورد توجه قرار گیرند. در این مقاله، اثر توأم زاویه شیب لایه‌های مصالح تپه و ارتفاع در توپوگرافی‌های متناوب، تحت تأثیر زلزله‌های لاندرز و نورث‌ریج برای دو هندسه تپه نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای به کمک روش تفاضل محدود ارائه شده است. به دلیل برهم‌کنش دینامیکی بین تپه‌ها، دامنه‌های جابه‌جایی توپوگرافی متناوب بزرگتر از دامنه‌های توپوگرافی تک هستند. به عنوان مثال، تپه تکی با ارتفاع ۳۰ متر دارای بزرگنمایی تقریباً ۱/۷۹ در زاویه ۱۵ درجه است. در حالی که در همین ارتفاع و زاویه، تپه نیم دایره‌ای سه‌تایی، بزرگنمایی ۱/۹۷ را تجربه کرده است. در ادامه، تأثیر چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون مصالح بر روی بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای تپه‌های با مصالح لایه‌ای غیر افقی بررسی شده است. با افزایش چگالی و نسبت پواسون، به تنهایی، بزرگنمایی لرزه‌ای افزایش یافته اما تغییر در مقدار مدول الاستیسیته، به تنهایی، بر روی بزرگنمایی اثر ندارد. در مورد نسبت پواسون در زوایای مختلف بررسی شده باید اذعان نمود که در تمامی زوایا، یک بزرگنمایی مشاهده شده است، به عبارت دیگر، اثر تغییرات زاویه زمانی که نسبت پواسون مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج یکسانی بدست آمده است.

کلید واژه: توپوگرافی‌های متناوب، لایه‌بندی خاک، ارتفاع توپوگرافی، پاسخ لرزه‌ای

مقدمه

مشاهدات فراوان پس از زلزله‌های مخرب نشان داد که ساختمان‌های واقع بر بلندی‌ها نسبت به دیگر ساختمان‌ها دچار خرابی بیش‌تری شده‌اند. از جمله این شواهد می‌توان به زلزله سان فرناندو (Boore, 1973) ۱۹۷۱، زلزله فریولی ایتالیا (Armigliato and Tinti, 1980) ۱۹۷۶ اشاره کرد. حل تحلیلی شکست امواج SH صفحه‌ای و استوانه‌ای ناشی از تونل نعل اسبی با یک قوس معکوس توسط کاوا و همکاران (Cao et al., 2001) ارائه شد. بوکاوالاس (Bouckovalas, 2005) نتایجی از تحلیل‌های عددی برای پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌های موجود در خاک همگن و ویسکوالاستیک، تحت انتشار قائم امواج لرزه‌ای SV را به منظور کشف اثرات هندسه شیب، فرکانس تحریک، مدت زمان و هم‌چنین خواص دینامیکی خاک بر حرکت لرزه‌ای ارائه داد. از جمله نتیجه‌های اصلی این مطالعه این بود که این نوع توپوگرافی ممکن است منجر به تقویت شدید در تاج شیب و کوچکنمایی در نقاط همسایه (در عرض چند ده متر) پشت تاج شیب، به ویژه برای تحریکات فرکانس بالا شود. با این وجود، به نظر آمد یک روند کلی رزونانس در نزدیکی تاج و کوچکنمایی در نزدیکی پای شیب برای حرکت افقی اتفاق افتاده‌است. عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2014) به مطالعه رفتار در تپه ذورنقه‌ای پرداختند. در تحقیق دیگری عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2023) به بررسی اثرات لایه‌بندی در تپه نیم سینوسی پرداختند. ژئو و کی (Zhao and Qi, 2009) با استفاده از روش تابع مختلط و بسط تابع موج به بررسی پراکندگی امواج SH از یک محیط سطحی استوانه‌ای الاستیک در نیم‌فضا پرداختند. در فرکانس‌های پایین‌تر، بزرگنمایی کم‌تری نسبت به فرکانس‌های بالاتر، دیده شد. زاویه برخورد ($\alpha = 0$) موج SH، اثرات متمایزی بر جابه‌جایی سطحی دارد. در زاویه صفر درجه مقدار جابه‌جایی پیک، می‌تواند بزرگ‌تر از دیگر زاویه‌های

برخورد موج SH ورودی باشد. لیو و همکاران یک مطالعه از پراکندگی امواج SH را با دو تپه از هندسه‌های مختلف (مثالی و نیم‌دایره‌ای) ارائه دادند. این محققان نشان دادند که رأس‌های تپه‌ها به دلیل برخوردهای متعدد امواج، نسبت به بار دینامیکی بسیار حساس هستند. مثلاً رأس عارضه مثلثی، حداکثر دامنه را نشان داد و دارای بیش‌ترین حساسیت به بار خارجی بود (Liu et al., 2010). عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2017) به بررسی دقیق تأثیرات حرکات قائم زمین بر روی تپه‌های ذوزنقه‌ای شکل در نسبت شکل‌های مختلف پرداخته، الگوهای نسبت تقویت از نظر جابه‌جایی، سرعت و شتاب را استخراج و با یک‌دیگر مقایسه کردند. نتایج مربوط به دامنه زمانی نشان داد که افزایش اندازه تپه از ۲۰۰ تا ۶۰۰ متر هیچ اثر قابل توجهی بر الگوهای نسبت تقویت شتاب نداشته؛ با این حال، سرعت و جابه‌جایی را افزایش داد. نینگ و همکاران (Ning et al., 2018) پراکندگی امواج رایلی را در مدل نیم‌فضای توپوگرافی دره گاوسی شکل بررسی کردند. نتایج نشان داد امواج رایلی هنگامی که با توپوگرافی مواجه می‌شوند به امواج P و S تبدیل خواهند شد. انرژی امواج S تبدیل شده از موج رایلی بیش‌تر از امواج P تبدیل شده از موج رایلی است. سهرابی‌بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2018) به منظور ارزیابی پارامترهای حرکت پیک زمین در دامنه زمانی بر روی یک تپه دوبعدی گاوسی شکل در یک محیط صخره‌ای معمولی، پاسخ‌های دامنه زمانی جابه‌جایی، سرعت و شتاب در نقاط انتخاب شده تپه‌ها را محاسبه و تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نقش مهمی از هندسه بر الگوهای تقویت را نشان داد؛ بزرگنمایی حرکت در بالای تپه و کوچکنمایی حرکت در پای تپه. از دیگر نتایج این بود که پاسخ تپه در برابر طول موج بزرگ (بزرگ‌تر از شش برابر) کاملاً بزرگنمایی می‌شود و مقدار آن وابسته به محل آن نقطه بر روی تپه و میزان ارتفاع تپه است. در طول موج متوسط

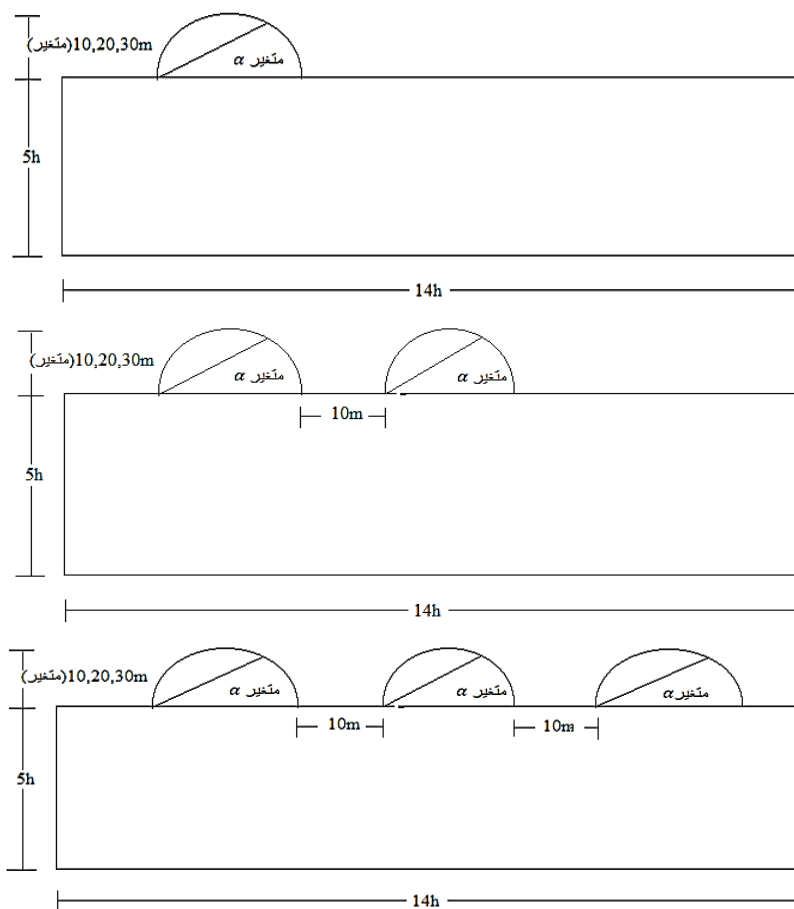
با این حال بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که تأکید اصلی عموماً بر محیط‌های همگن تپه‌های تکی و به ندرت با لایه‌های افقی ساده بوده‌است. توپوگرافی متناوب، باعث تغییر قابل توجه بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای زمین خواهد شد. در این مقاله بزرگنمایی حرکت زمین در تپه‌های سیکلی نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای لایه‌ای با زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به افق تحت شتاب‌نگاشت زلزله لاندرز بررسی شده‌اند.

۲ روش پژوهش (مدل‌سازی عددی)

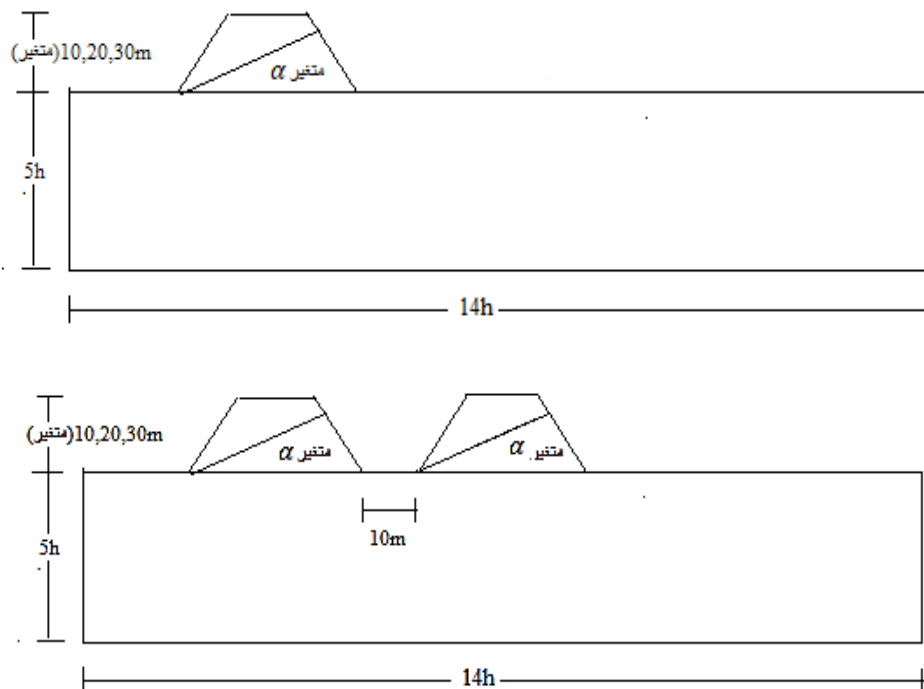
نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ، یک نرم‌افزار تفاضل محدود برای محاسبات مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر میزان بزرگنمایی لرزه‌ای یک نامنظمی توپوگرافی واحد (تپه یا دره) توسط محققان زیادی مطالعه شده‌است و در بهترین حالت، مطالعات بسیار محدود در ارتباط با اثر متقابل نامنظمی‌های توپوگرافی وجود دارد. هدف از این مطالعه، این است که معین شود چگونه مجموعه‌ای از نامنظمی‌ها در مقایسه با یک نامنظمی، اثر متقابل می‌گذارد. هر یک از تپه‌های متناوب نیم‌دایره‌ای و دوزنقه‌ای به منظور بررسی اثر توأم لایه‌بندی مصالح عارضه و اثر ارتفاع در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر و نسبت شکل برابر با ۱ ترسیم شده‌اند (اشکال ۱ و ۲). فاصله بین هر دو تپه، نیز ۱۰ متر در نظر گرفته شده‌است.

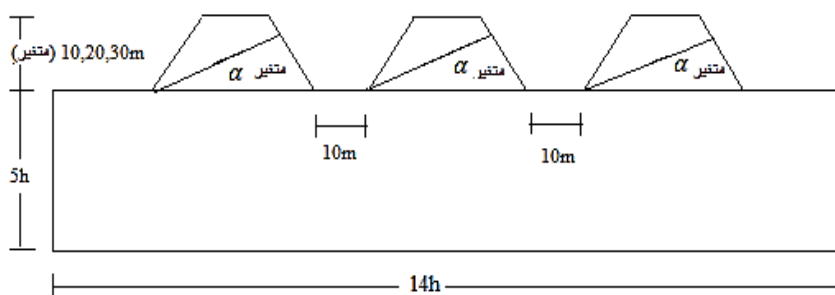
مش‌بندی در این نرم‌افزار هم‌زمان با هندسه‌سازی انجام می‌گیرد. بهینه بودن ابعاد زون‌ها تأثیر بسزایی در زمان حل مدل و دقت جواب‌های به دست آمده دارد. کولیمر و لایزمر (۱۹۷۳) نشان دادند برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج در یک مدل مش‌بندی شده، بزرگ‌ترین ابعاد المان (Δl) باید کوچک‌تر از یک دهم تا یک هشتم طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد به عبارتی $\Delta l \leq \lambda / 10$.

(برابر با عرض تپه تا کم‌تر از چهار برابر عرض تپه) پاسخ لرزه‌ای در تاج تقویت و در پای تپه تضعیف می‌شود، جایی که تقویت با افزایش ارتفاع تپه افزایش می‌یابد. برای طول موج‌های کوتاه (کم‌تر از پهنای تپه)، پاسخ لرزه‌ای در بیش‌تر قسمت‌های تپه تضعیف شده و تقویت تنها بر روی نقاط تاج و نزدیک تاج وجود دارد. حداکثر تقویت یا کوچکنمایی لزوماً متعلق به تپه‌های بلند نیست. مدها و همکاران (Modha, et al. 2020) تقویت حرکت لرزه‌ای توپوگرافی بر روی تپه‌های با هندسه‌های مختلف مثلثی، سهمی و دوزنقه‌ای شکل با نسبت‌های شکل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در چهار عرض ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر بررسی نمودند. بیش‌ترین تقویت امواج حادثه‌ای در رأس تپه به دلیل به دام انداختن انرژی و کوچکنمایی در پای تپه به دلیل پراکنده شدن امواج مشاهده شد. یین و همکاران (Yin et al. 2021) اظهار کردند که جهت امواج لرزه‌ای می‌تواند حرکت‌های سطح توپوگرافی شیب را تغییر دهد. تقویت حرکات زمین در توپوگرافی شیب دو طرفه با تغییر زوایای انتشار مورد بحث قرار گرفت. به این منظور، 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، به ویژه در زوایای بزرگ‌تر امواج حادثه، الگوی تقویت امواج SV قوی‌تر از امواج P است. مصالح نرم تقویت شتاب را بیش‌تر می‌کنند و امواج متفرق شده بیش‌تری تحت 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 می‌شوند. هراتی و عامل سخی در یک مطالعه عددی به بررسی اثرات تپه‌های مجاور بکدیگر بر روی پاسخ لرزه‌ای و بزرگنمایی تپه مبنا پرداختند (Harati and Amelsakhi 2024).



شکل ۱. مدل‌های بررسی تأثیر ارتفاع توأم با تغییر زاویه لایه‌بندی مصالح شامل یک تا سه عارضه توپوگرافی نیم‌سینوسی (ارتفاع متغیر، زاویه لایه‌بندی متغیر).





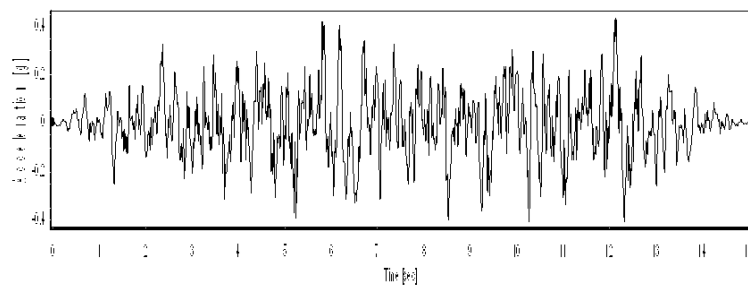
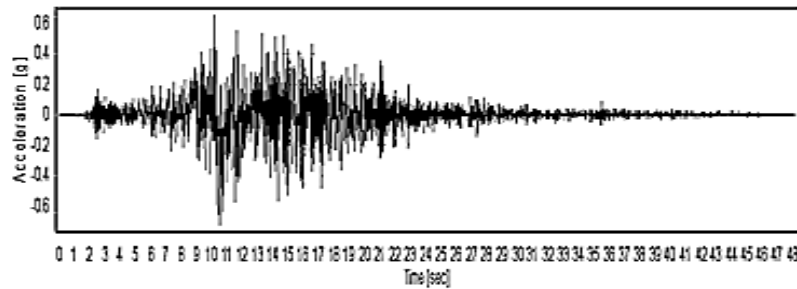
شکل ۲. مدل‌های بررسی تأثیر ارتفاع توأم با تغییر زاویه لایه‌بندی مصالح شامل یک تا سه عارضه توپوگرافی دوزنقه‌ای (ارتفاع متغیر، زاویه لایه‌بندی متغیر).

تپه‌های متفاوت از نوع مصالح استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده‌است. مصالح تپه مورد مطالعه از خاک‌های با سرعت موج برشی کم‌تری نسبت به پایه مدل هستند. مصالح مورد استفاده در تمام مدل‌ها، در جدول ۱ تعریف شده‌است. 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. 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 گردیده‌است. این نکته قابل توجه است که این رکورد مربوط به شتاب‌نگاشت سنگ بستر ($V_s > 760 \text{ m/s}$) است. چرا که شتاب‌نگاشت‌هایی که در سطح لایه‌های آبرفتی ثبت شده‌اند خود دربرگیرنده تأثیرات ساختگاه و رفتارهای دینامیکی آبرفت هستند. رکورد زلزله به صورت تاریخچه زمانی تنش از سنگ بستر به مدل اعمال می‌شود تا از انعکاس کاذب امواج در سطوح اعمالی جلوگیری شود. نمودار شتاب - زمان زلزله لاندز حاصل شده از نرم‌افزار SeismoSignal در شکل ۳ مشاهده می‌شود. به منظور بررسی نتایج بدست آمده در این تحقیق، شتاب‌نگاشت نورتریج نیز مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج دارای روند یکسانی بوده‌اند. بدیهی است که استفاده از هر شتاب‌نگاشت جداگانه منجر به نتایج متفاوتی خواهد شد. اما نتایج دارای روند کلی و مشابهی بوده‌اند، بنابراین به منظور

که در آن λ طول موج ایجاد شده توسط بزرگ‌ترین مؤلفه فرکانس امواج ورودی به سیستم است که قادر به تولید انرژی می‌باشد. در نهایت اندازه مش‌بندی مدل‌ها، 2×2 متر در نظر گرفته شده‌است. در واقعیت، وقتی بار دینامیکی به سازه می‌رسد، در هنگام بازگشت، از مرزهای مدل خارج می‌شود. در مدل‌سازی می‌توان مرزهای مدل را 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. روشی که نرم‌افزار برای برطرف کردن این مسئله ارائه می‌دهد استفاده از مرزهای میراگر است. در مطالعه حاضر یک‌سری تحلیل‌ها برای رسیدن به ارتفاع و عرض بهینه که هم از بازتاب امواج به درون محیط مورد مطالعه جلوگیری کرده و هم خیلی بزرگ نباشد که مدت زمان تحلیل را به‌طور نامعقول افزایش دهد، انجام شده‌است. در نهایت ارتفاع و عرض پایه مدل به ترتیب ۵ و ۱۴ برابر ارتفاع تپه در نظر گرفته شده‌است. رفتار مصالح در این‌جا مانند اکثر مطالعات پیشین که مدل رفتاری مصالح را مدل الاستیک خطی در نظر گرفته‌اند، فرض شده‌است. اکثر تپه‌های موجود در طبیعت از مصالح سنگی هستند. مطابق ویرایش چهارم استاندارد لرزه‌ای ۲۸۰۰، این مصالح در تپ I زمین قرار می‌گیرند. در این مطالعه، ترکیبی از

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌ها.

نوع زمین	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (Pa)	نسبت پواسون ν	سرعت موج برشی m/s
I	۲۴۰۰	4×10^9	۰/۴۵	۷۶۰
II	۱۸۴۰	39×10^6	۰/۳۵	۵۰۰
III	۱۴۷۰	15×10^6	۰/۲۷	۱۷۵



شکل ۳. نمودار شتاب - زمان زلزله لاندروز (شکل بالا)، نمودار شتاب - زمان زلزله نورتریج (شکل پایین).

شده است. برای یافتن فرکانس طبیعی سازه در نرم افزار، ابتدا لازم است مدلی با فرض الاستیک بودن و میرایی صفر ساخته شود. سپس مرزهای اطراف، آزاد و کف مدل ثابت شود. آن گاه برای یک نقطه در داخل مدل، تحت یک تحریک دینامیکی (مثلاً تحریک سیستم تحت شتاب جاذبه)، تابع سرعت یا جابه‌جایی نسبت به زمان رسم و تعداد نوسان در یک ثانیه محاسبه شود.

۳ اعتبارسنجی و دقت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی روش کار عددی در محیط نرم افزار FLAC^{2D}، دره‌ای نیم‌دایره به شعاع ۲۵ متر در محیط ویسکوالاستیک در حالت بدون میرایی بررسی شده است.

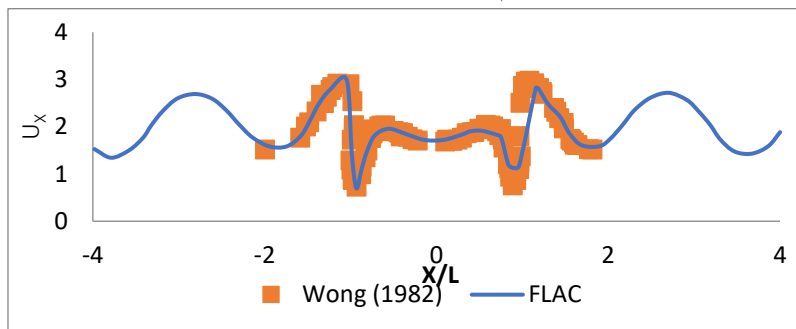
رعایت اختصار در ارائه نتایج، پس از مقایسه نتایج بدست آمده از دو شتابگاشت مذکور، تنها به ارائه نتایج حاصل از شتابگاشت لندرز در مقاله حاضر بسنده شده است. به دلیل مرزهای جاذب، سیگنال ورودی سرعت یا شتاب در پایین مدل خنثی می‌شود؛ بنابراین، موج سرعت به عنوان سیگنال ورودی با استفاده از فرمول زیر به یک موج تنش تبدیل شده است:

$$\sigma_s = 2(\rho \times C_s)V_s \quad (1)$$

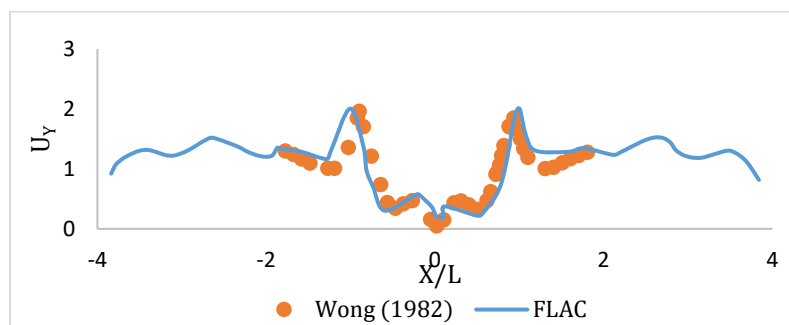
که σ_s تنش برشی اعمالی، ρ چگالی سنگ پایه، C_s سرعت موج S در محیط و V_s سرعت برشی ورودی در مرز هستند. نسبت میرایی سیستم خاکی ۵٪ و فرکانس مرکزی در هر مدل برابر با فرکانس طبیعی آن ساختگاه در نظر گرفته

تحلیل‌های دینامیکی است، ولی در این تحلیل به منظور جلوگیری از بازتاب مصنوعی موج در سطوح مرزی از تنش به عنوان محرک دینامیکی استفاده شده‌است. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از مطالعه وانگ (۱۹۸۲) مقایسه شده و چنان‌که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود این دو تطابق خوبی با هم دارند.

مشخصات مصالح استفاده شده عبارتند از: سرعت موج برشی $V_s = 500$ متر بر ثانیه، نسبت پواسون $\nu = 0.33$ و چگالی 2000 کیلوگرم بر مترمکعب. سپس مدل ساخته شده تحت تابش قائم موج ریکر SV با نسبت طول موج $\lambda/R = 2$ قرار گرفته است. اعمال نیروی دینامیکی تاریخچه شتاب، سرعت یا جابه‌جایی امری مرسوم در



شکل ۴. صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار FLAC برای توپوگرافی دره ($\lambda/R = 2$, $R = 25m$ ، موج قائم SV).



شکل ۵. صحت‌سنجی نتایج تحلیلی نرم‌افزار برای توپوگرافی دره.

ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر با عارضه یک، دو و سه عدد مورد بررسی قرار گرفته‌است. نقطه‌ای در رأس توپوگرافی، به عنوان نقطه مورد بررسی در تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌است. با مشاهده نتایج موجود در شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود که ارتفاع، یک پارامتر مؤثر در مقدار بزرگنمایی می‌باشد. 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. در عوارض سیکلی، اثر پارامترهای تعداد، ارتفاع و تغییرات زاویه لایه‌بندی مصالح

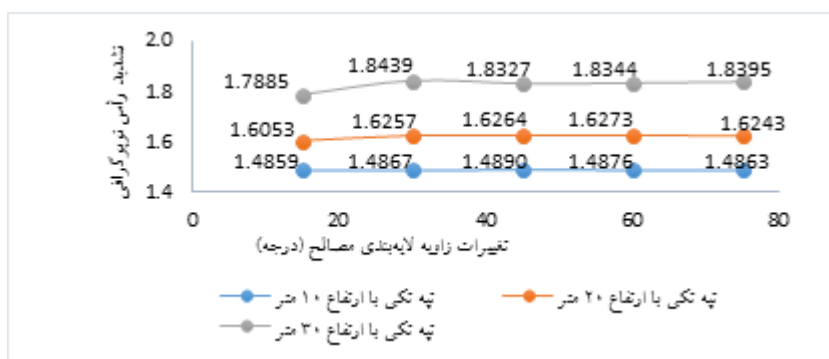
در اشکال ۴ و ۵ محور قائم به ترتیب بیان‌گر نسبت حداکثر پاسخ مؤلفه افقی و قائم جابه‌جایی دره در نقاط مختلف بر حداکثر دامنه جابه‌جایی موج ریکر است. محور افقی نیز بیان‌گر نسبت بی‌بعد شده فاصله نقاط از مرکز دره (X) بر نصف عرض دره (L) است.

۴ بحث

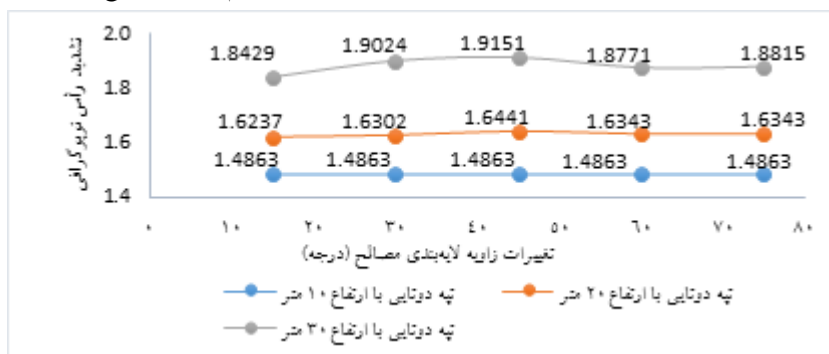
۴-۱ اثر لایه‌بندی خاک بر بزرگنمایی تپه‌های متناوب نیم‌سینوسی در ارتفاع‌های متغیر
چهل و پنج مدل تپه با هندسه نیم‌سینوسی (شکل ۱)، در زاویه‌های بین لایه‌ای مصالح ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و

زاویه‌ها به همراه دارد. همان‌طور که دیده می‌شود اثر تغییرات زاویه مصالح تپه، تحت تأثیر ارتفاع تپه است. با افزایش ارتفاع تپه، تأثیر تغییرات زاویه لایه‌بندی هم بیش‌تر می‌شود. مشاهده می‌شود که در ارتفاع ۳۰ متر اثر تغییرات زاویه مصالح به خوبی مشهود است در صورتی که در ارتفاع ۱۰ متر، تغییر در زاویه تأثیر چندان زیادی بر روی بزرگنمایی حرکت دینامیکی ندارد.

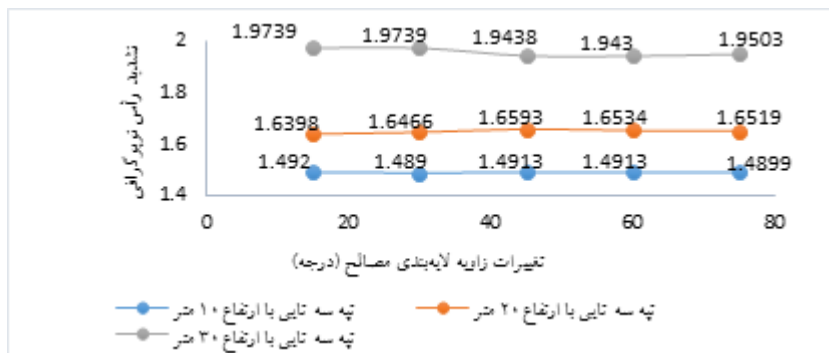
تشکیل دهنده تپه‌ها با هم تداخل داشته و افزایش بزرگنمایی در نقطه مذکور را به دنبال دارد. یک تعامل پیچیده بین اثرات توپوگرافی (تعداد و ارتفاع تپه‌ها) و اثرات چینه‌شناسی (زاویه بین لایه‌های مصالح) وجود دارد که به سختی این اثرات را می‌توان از یک‌دیگر تفکیک کرد. با افزایش مقدار ارتفاع، الگوی بزرگنمایی در توپوگرافی‌های تک، دو و سه‌تایی تغییر نکرده‌است اما افزایش هم‌زمان ارتفاع و تعداد تپه‌ها، افزایش مقدار بزرگنمایی را در تمام



شکل ۶. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی تکی نیم‌سینوسی با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.



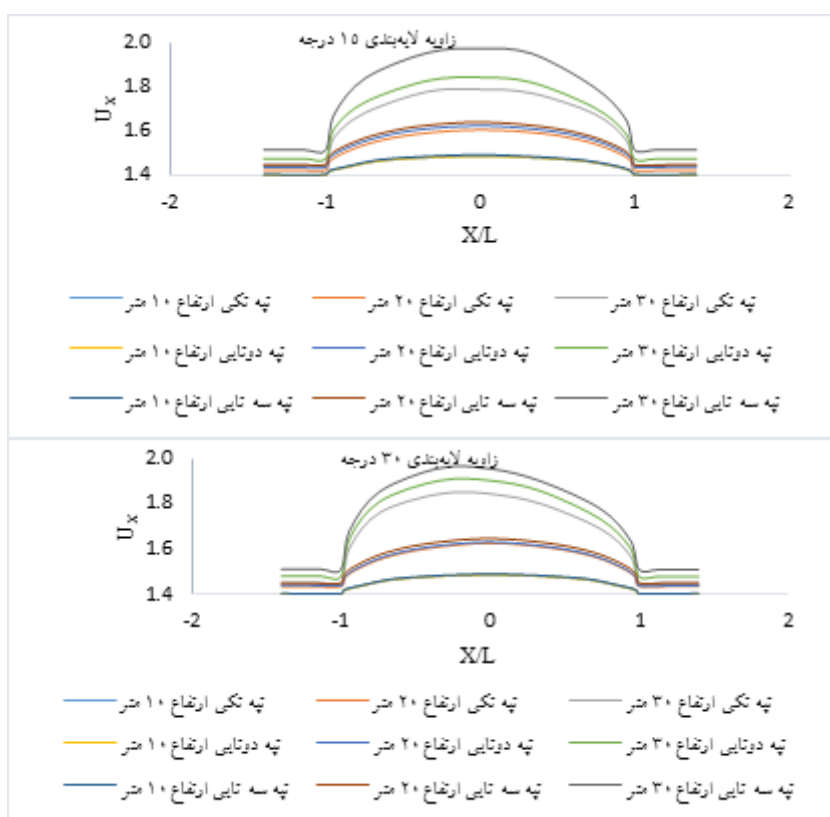
شکل ۷. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی دوتایی نیم‌سینوسی با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.

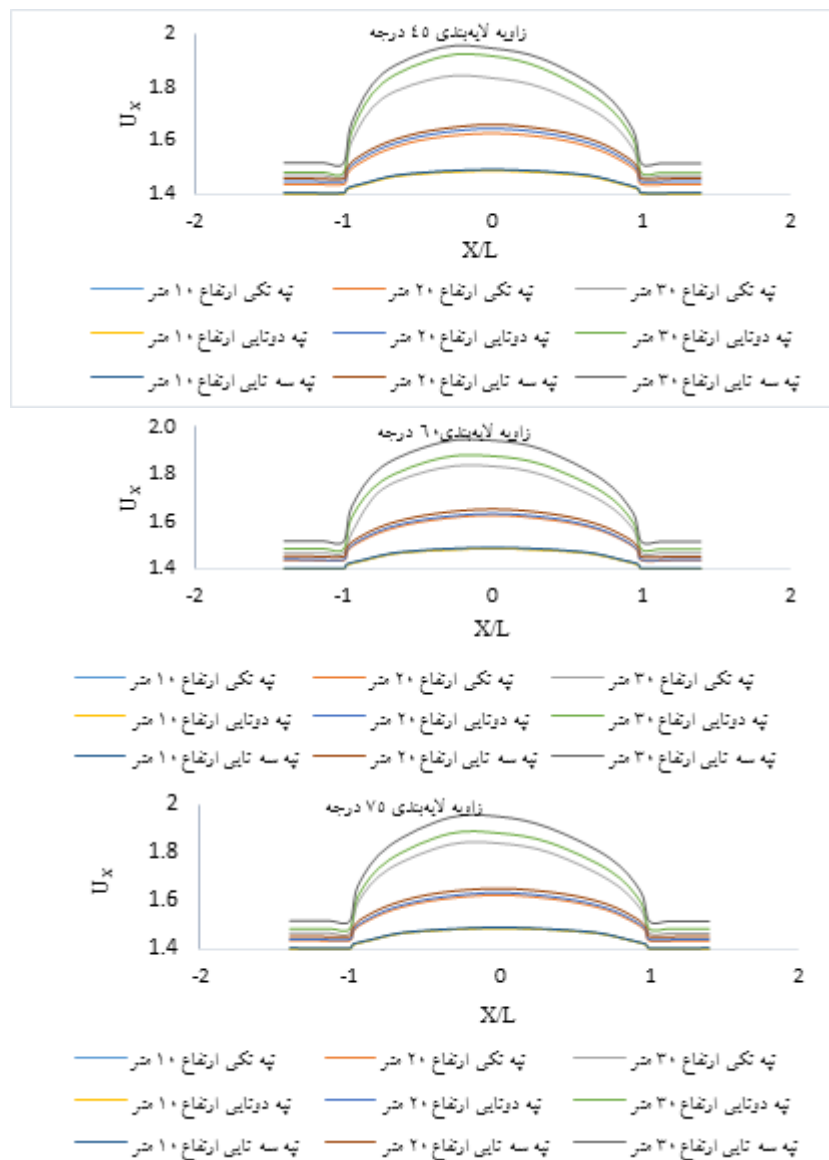


شکل ۸. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی سه‌تایی نیم‌سینوسی با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.

پیچیده و جدایی‌ناپذیر بین اثرات توپوگرافی و زمین‌شناسی که برای رأس توپوگرافی بیان شد، نیز در تمام نقاط موجود در روی تپه مشاهده می‌شود. در همه نقاط ملاحظه می‌شود که بزرگنمایی‌های جابه‌جایی، تحت تأثیر ارتفاع مختلف توپوگرافی هستند. الگوی منحنی‌های ضریب بزرگنمایی جابه‌جایی از نظر شکل، مشابه ولی از نظر مقدار متفاوت هستند. به طور کلی، حداکثر ضریب بزرگنمایی برای توپوگرافی‌های با ارتفاع بلندتر، بیش‌تر است. با تحلیل داده‌های لرزه‌ای محاسبه شده در تپه و اثرات بزرگنمایی سایت، نقش تنهایی هر کدام از عوامل مختلف در میزان تقویت لرزه‌ای هنوز مشخص نیست؛ زیرا جدا کردن اثرات توپوگرافی و ویژگی‌های زمینی به راحتی امکان‌پذیر نیست (آن‌ها اثر ترکیبی را نشان می‌دهند).

شکل ۹ دامنه جابه‌جایی توپوگرافی‌های با تعداد، ارتفاع و زاویه‌های مختلف لایه‌بندی مصالح را نشان داده‌است. در تمام زاویه‌ها، به دلیل برهم‌کنش دینامیکی بین تپه‌ها، دامنه‌های جابه‌جایی توپوگرافی متناوب بزرگ‌تر از دامنه‌های توپوگرافی واحد هستند و می‌توان دریافت که توپوگرافی متناوب، دارای اثر بزرگنمایی قابل توجه‌تری در حرکت زلزله است. اثر تغییرات تعداد توپوگرافی و ارتفاع فقط در داخل توپوگرافی تپه ($1 < X/L < 1$) (قابل توجه است و در قسمت‌های مسطح اطراف عارضه‌ها تأثیر چندان زیادی ندارد. مقدار پاسخ‌های دینامیکی از تپه تناوبی، به طور قابل توجهی، متفاوت از تپه‌های واحد هستند. تفاوت مقدار بزرگنمایی مدل تپه‌های واحد و تپه سیکلی با افزایش تعداد و ارتفاع تپه، در همه زوایا، بزرگ‌تر می‌شود. تعامل





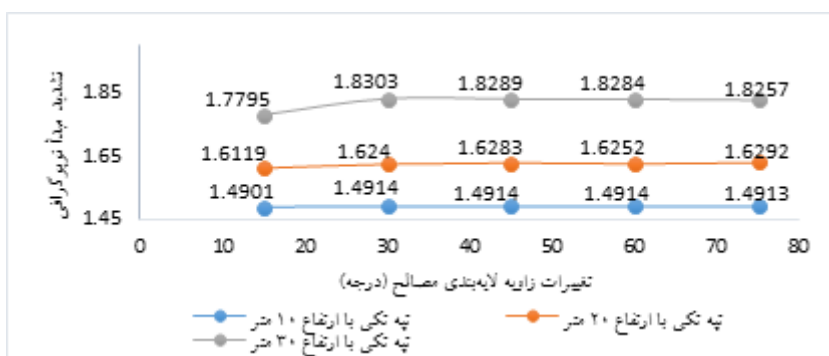
شکل ۹. نمودار مقایسه اثر تعداد توپوگرافی محیط اطراف برای تپه نیم‌سینوسی در زاویه‌های بین لایه‌ای و ارتفاع متغیر.

چهل و پنج مدل تپه با هندسه دوزنقه‌ای و زاویه شیب طبیعی تپه ۶۰ درجه (شکل ۲)، در زاویه‌های بین لایه‌ای مصالح ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر با یک، دو و سه عارضه مورد بررسی قرار گرفته‌است. نقطه‌ای در مبدأ تپه ($X/L = 0$)، به عنوان نقطه مورد بررسی در تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده‌است. همان‌طور که در نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ملاحظه می‌شود در هر زاویه

در شکل ۹، 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 عرض تپه (L) است.

۴-۲ اثر لایه‌بندی خاک بر بزرگنمایی تپه‌های متناوب دوزنقه‌ای در ارتفاع‌های متغیر

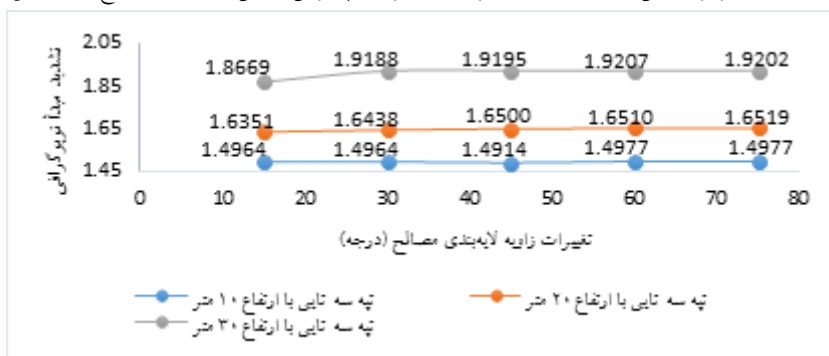
لایه‌بندی، افزایش ارتفاع و تعداد توپوگرافی، معادل با افزایش بزرگنمایی PGD است. به این صورت که مدلی با ارتفاع ۳۰ متر و سه توپوگرافی، در تمام زوایا، بیش‌ترین پاسخ جابه‌جایی را دارد (همانند هندسه نیم‌سینوسی).



شکل ۱۰. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی تکی دوزنقه‌ای با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.



شکل ۱۱. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی دوتایی دوزنقه‌ای با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.



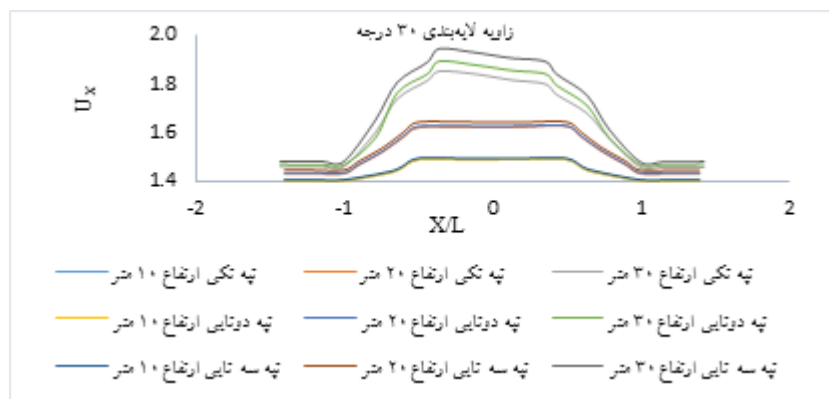
شکل ۱۲. نمودار نسبت مقادیر بزرگنمایی PGD نسبت به تغییرات زاویه برای توپوگرافی سه‌تایی دوزنقه‌ای با ارتفاع و زاویه بین لایه‌ای متغیر.

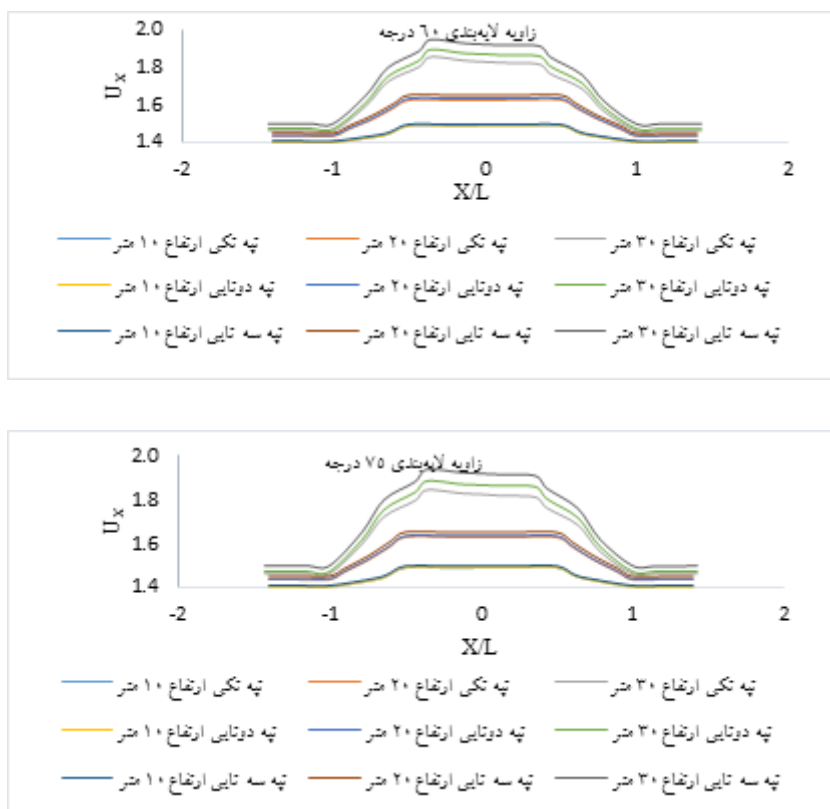
مصالح، با افزایش ارتفاع و تعداد توپوگرافی اثر تغییر هندسه در میزان بزرگنمایی قابل توجه‌تر می‌شود. به طوری که یک تفاوت مشهود در مقدار بزرگنمایی با تغییر نوع هندسه در تپه‌های سه‌گانه با بیش‌ترین ارتفاع مشاهده می‌شود. مقدار فرکانس در تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای

در هندسه دوزنقه‌ای نیز، مشاهده می‌شود که تغییر بزرگنمایی در زاویه‌های مختلف مصالح تپه، تحت تأثیر ارتفاع تپه است. با افزایش ارتفاع تپه، تأثیر تغییرات زاویه لایه‌بندی هم افزایش می‌یابد. با مقایسه اشکال ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که در همه زوایای لایه‌های بین

بزرگنماییهای کمتری را تجربه می‌کند. به دلیل تفاوت مصالح لایه‌ها در دو طرف مبدأ توپوگرافی ($X/L=0$)، بزرگنماییهای دو طرف مدل نیز نامتقارن هستند. در سمت چپ مبدأ، مصالح سست‌تر، تقویت شتاب را بیش‌تر می‌کنند.

یکسان بوده و این تغییر در محتوای بزرگنمایی، به تغییر نوع هندسه توپوگرافی باز می‌گردد. دامنه جابه‌جایی افقی سطح توپوگرافی تپه دوزنقه‌ای با ارتفاع‌های متفاوت برای مدل‌های با زوایای مختلف بین لایه‌های مصالح در شکل ۱۳ نشان شده‌است. اثر ارتفاع، فقط در عارضه قابل توجه است و قسمت‌های مسطح اطراف توپوگرافی،





شکل ۱۳. نمودار مقایسه اثر تعداد توپوگرافی محیط اطراف برای تپه دوزنقه‌ای در زاویه‌های بین لایه‌ای و ارتفاع متغیر.

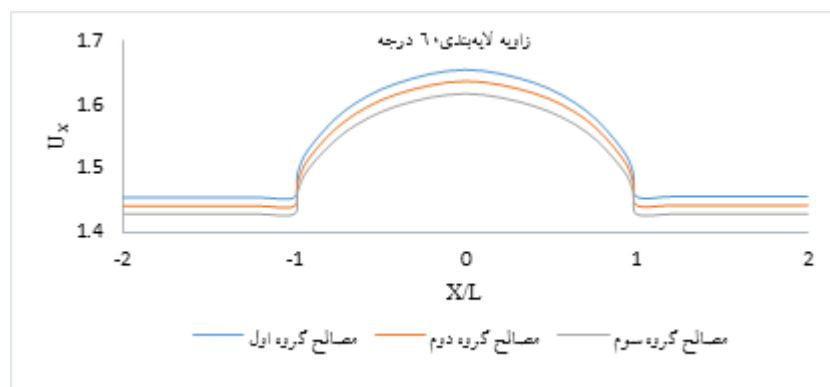
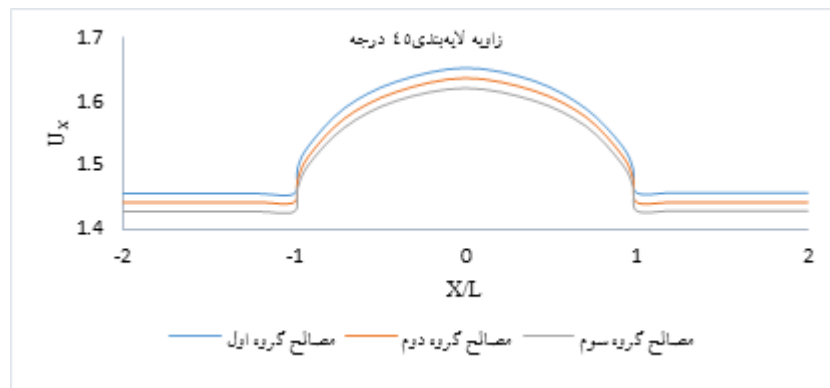
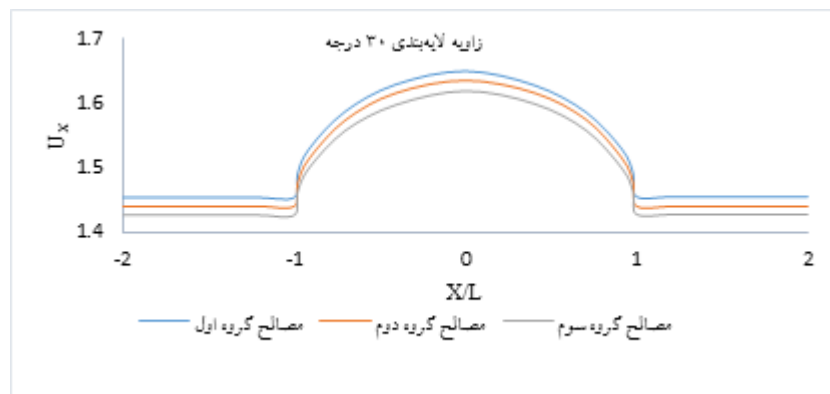
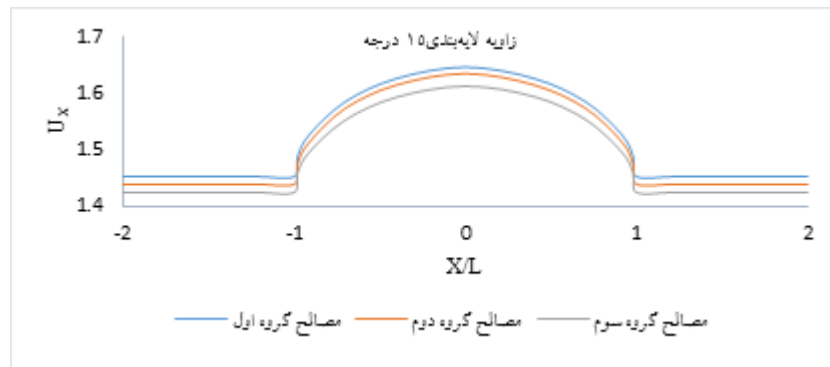
بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای را کاهش می‌دهد. این نتایج، در تمام نقاط سطح تپه برای زوایای مختلف، نیز دیده می‌شود.

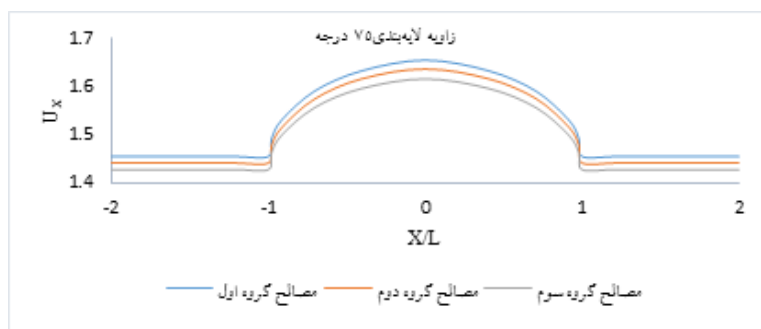
۲-۳-۴ بررسی تأثیر مدول الاستیسیته
 به منظور بررسی اثر مدول الاستیسیته، پانزده مدل توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت ۲۰ متر در زاوایای ۱۵ تا ۷۵ درجه با مدول‌های الاستیسیته مختلف برای مصالح تپه در نظر گرفته شده‌است. بستر تمام مدل‌ها و جرم مخصوص انواع خاک تپه یکسان و فقط مدول الاستیسیته مصالح تپه تغییر کرده‌است. مشخصات سه گروه مصالح در نظر گرفته شده در جدول ۳ آمده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، افزایش مقدار مدول الاستیسیته انواع خاک‌ها، به تنهایی، تأثیری بر میزان بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای در زاوایای مختلف ندارد.

۳-۴ بررسی اثر مصالح در پاسخ لرزه‌ای تپه‌های لایه‌ای

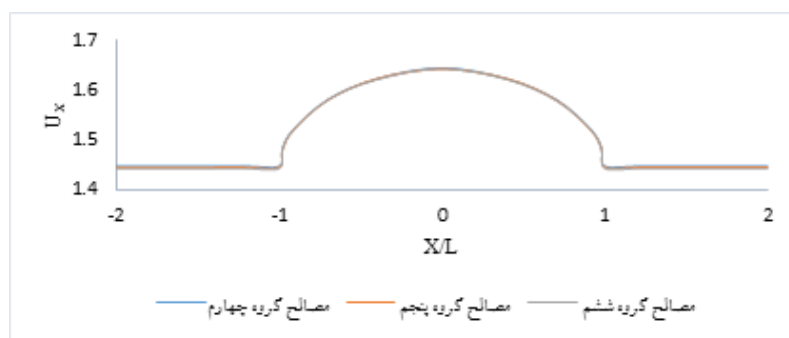
۱-۳-۴ بررسی تأثیر جرم مخصوص

به منظور بررسی تأثیر مصالح بر روی بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای تپه‌های با مصالح لایه‌ای غیر افقی، پانزده مدل با گروه‌های مختلف مصالح تعریف شده در جدول ۲ برای توپوگرافی تکی تپه نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت ۲۰ متر در زاوایای ۱۵ تا ۷۵ درجه تحلیل شده‌است. بستر تمام مدل‌ها یکسان و فقط جرم مخصوص مصالح توپوگرافی‌ها تغییر کرده‌است. شکل ۱۴ دامنه بزرگنمایی جابه‌جایی در زاوایای مختلف لایه‌بندی مصالح نسبت به جرم مخصوص این مدل‌ها را نشان می‌دهد. تغییر جرم مخصوص بر نتایج مدل‌ها تأثیر آشکار داشته‌است. با افزایش مقدار جرم مخصوص انواع خاک‌ها، میزان بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای افزایش می‌یابد و برعکس، توپوگرافی با جرم مخصوص کم‌تر





شکل ۱۴. نمودار مقایسه اثر تغییرات جرم مخصوص مصالح برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زوایای بین لایه‌ای مختلف.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه اثر تغییرات مدول الاستیسیته مصالح برای توپوگرافی با شکل نیم‌سینوسی در زوایای بین لایه‌ای مختلف.

۳-۳-۴ بررسی تأثیر نسبت پوآسون

به منظور بررسی اثر نسبت پوآسون، پانزده مدل توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی با ارتفاع ثابت ۲۰ متر در زوایای ۱۵ تا ۷۵ درجه با نسبت پوآسون مختلف برای خاک‌های تپه در نظر گرفته شده‌است. پایه تمام مدل‌ها، جرم مخصوص و مدول الاستیسیته مصالح انواع خاک تپه یکسان و فقط نسبت پوآسون مصالح تپه تغییر کرده‌است. مشخصات سه گروه مصالح در نظر گرفته شده در جدول ۴ آمده‌است. شکل ۱۶ نرخ بزرگنمایی جابه‌جایی در زوایه‌های مختلف لایه‌بندی مصالح نسبت به مقادیر نسبت پوآسون این مدل‌ها را نشان

می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود نسبت پوآسون تأثیر ثانویه‌ای بر پتانسیل تقویت تپه در مقایسه با دیگر خصوصیات مصالح تپه دارد؛ برای تمام زوایه‌های لایه‌بندی تپه، میزان بزرگنمایی یکسان است. در طول موج بزرگ و ثابتی که برای تمام مدل‌ها در نظر گرفته شده‌است، با افزایش نسبت پوآسون مقدار بزرگنمایی به میزان محدود افزوده می‌شود. این قضیه، در تمام نقاط سطح تپه برای زوایای مختلف، نیز دیده می‌شود (شکل ۱۷). قابل ذکر است چون در تمام زوایا میزان بزرگنمایی یکسان است، نمودار مورد نظر فقط برای یک زاویه رسم شده‌است.

جدول ۲. مشخصات مصالح انتخاب شده برای بررسی تأثیر جرم مخصوص (خاک به عنوان عامل متغیر).

گروه اول		
نسبت پوآسون (ν)	مدول الاستیسیته (Pa)	چگالی (kg/m ³)
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۳۵	39×10^6	۲۴۰۰
۰/۳۵	39×10^6	۲۰۰۰

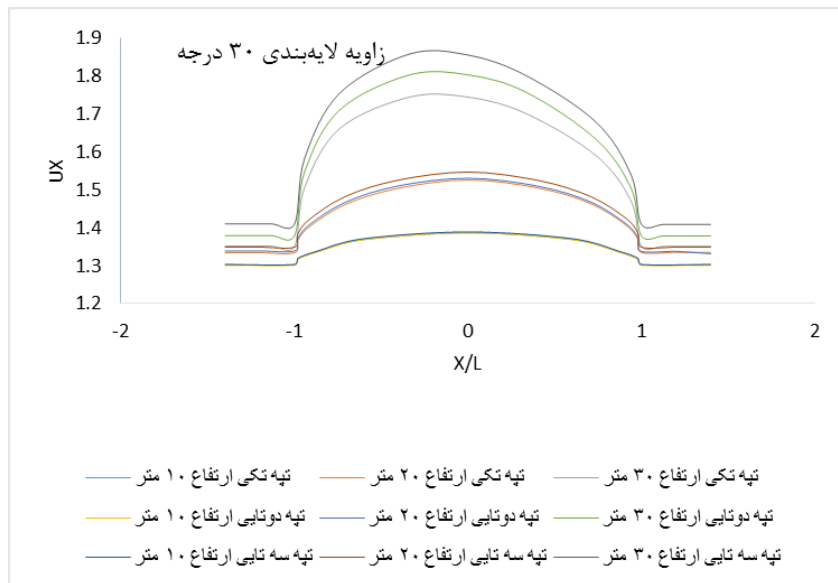
گروه دوم		
۲۴۰۰	4×10^9	۰/۴۵
۲۰۰۰	39×10^6	۰/۳۵
۱۶۰۰	39×10^6	۰/۳۵
گروه سوم		
۲۴۰۰	4×10^9	۰/۴۵
۱۶۰۰	39×10^6	۰/۳۵
۱۲۰۰	39×10^6	۰/۳۵

جدول ۳. مشخصات مصالح انتخاب شده برای بررسی تأثیر مدول الاستیسیته (خاک به عنوان عامل متغیر).

گروه چهارم		
نسبت پواسون (ν)	مدول الاستیسیته (Pa)	چگالی (kg/m^3)
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۳۵	69×10^6	۱۸۴۰
۰/۳۵	60×10^6	۱۸۴۰
گروه پنجم		
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۳۵	59×10^6	۱۸۴۰
۰/۳۵	50×10^6	۱۸۴۰
گروه ششم		
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۳۵	49×10^6	۱۸۴۰
۰/۳۵	40×10^6	۱۸۴۰

جدول ۴. مشخصات مصالح انتخاب شده برای بررسی تأثیر نسبت پواسون (خاک به عنوان عامل متغیر).

گروه هفتم		
نسبت پواسون (ν)	مدول الاستیسیته (Pa)	چگالی (kg/m^3)
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۲	39×10^6	۱۸۴۰
۰/۱	39×10^6	۱۸۴۰
گروه هشتم		
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۳۳	39×10^6	۱۸۴۰
۰/۲	39×10^6	۱۸۴۰
گروه نهم		
۰/۴۵	4×10^9	۲۴۰۰
۰/۴	39×10^6	۱۸۴۰
۰/۳۳	39×10^6	۱۸۴۰



شکل ۱۸. مقایسه نتایج برای زلزله لندرز (شکل بالا) و زلزله نورثریج (شکل پایین) در زاویه لایه بندی ۳۰ درجه.

۵ نتیجه گیری

به طور خلاصه نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر می باشد:

۱- ارتفاع، یک پارامتر مؤثر در مقدار بزرگنمایی می باشد. در هر زاویه لایه بندی، افزایش ارتفاع، معادل با افزایش بزرگنمایی PGD است.

۲- یک تعامل پیچیده بین اثرات توپوگرافی (تعداد و ارتفاع تپه ها) و اثرات چینه شناسی (زاویه بین لایه های مصالح) وجود دارد که به سختی این اثرات را می توان از یکدیگر تفکیک کرد. به عبارت دیگر، اثرات این پارامترها بر یکدیگر زیاد است.

۳- در عوارض متناوب، اثر پارامترهای تعداد، ارتفاع و تغییرات زاویه لایه بندی مصالح تشکیل دهنده تپه ها با هم تداخل داشته و افزایش بزرگنمایی در نقطه مذکور را به دنبال دارد. تفاوت مقدار بزرگنمایی مدل تپه های واحد و سیکلی با افزایش تعداد و ارتفاع تپه، در همه زوایا، بزرگ تر می شود.

۴- تغییرات زاویه مصالح تپه، تحت تأثیر ارتفاع تپه است. با افزایش ارتفاع تپه، تأثیر تغییرات زاویه لایه بندی هم بیش تر می شود.

۵- در همه زوایای بین لایه های مصالح، با افزایش ارتفاع و تعداد توپوگرافی اثر تغییر هندسه در میزان بزرگنمایی قابل توجه تر می شود. برای مثال، در ارتفاع ۱۰ متری و زاویه ۳۰ درجه بین لایه های مصالح، بزرگنمایی تپه های تکمی نیم سینوسی و دوزنقه ای به ترتیب ۱/۴۸ و ۱/۴۹ است. در حالی که، در ارتفاع ۳۰ متری و همین زاویه، بزرگنمایی تپه های سه تایی نیم سینوسی و دوزنقه ای به ترتیب ۱/۹۷ و ۱/۹۱ است.

۶- در همه زوایا، با افزایش مقدار جرم مخصوص انواع خاک ها، میزان بزرگنمایی حرکت لرزه ای افزایش می یابد.

۷- افزایش مقدار مدول الاستیسیته انواع خاک ها، به تنهایی، تأثیری بر میزان بزرگنمایی حرکت لرزه ای در زوایای مختلف ندارد.

۸- نسبت پوآسون تأثیر ثانویه ای بر پتانسیل تقویت تپه در مقایسه با دیگر خصوصیات مصالح تپه دارد؛ با افزایش

- Earthquake Science and Engineering, 11(1), 1-12.
- Itasca, F. L. A. C. Fast Lagrangian analysis of continua. User's manual. Minneapolis: Itasca Consulting Group (2005).
- Liu, G., Chen, H., Liu, D., and Khoo, B.C. 2010. Surface motion of a half-space with triangular and semicircular hills under incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(3), 1306-1319.
- Modha, K. G., Raj, D., Singh, Y., Lang, D. H., 2020. topographic amplification of earthquake ground motion on different hill geometrie, 17 th 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*.
- Sohrabi-Bidar, A., Amelsakhi, M., Shareghi, A., Maghami, Sh., 2019. Seismic Amplification of peak Ground Acceleration, Velocity, and Displacement by Two-Dimensional Hills, *Iranian Journal of Geophysics*, Page 68-81.
- 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.
- Zhao, J.X., and Qi, H., 2009. Scattering of plane SH-wave from a partially debonded shallow cylindrical elastic inclusion, *Journal of Mechanics*, 25(4), 411-4
- نسبت پوآسون مقدار بزرگنمایی افزوده می‌شود. برای تمام زوایه‌های لایه‌بندی مصالح تپه، مقدار بزرگنمایی یکسان است. به عبارت دیگر در تمام زوایا مقادیر یکسان بدست آمده است.
- ۹- با توجه به استفاده از شتابنگاشت‌های مختلف در این مقاله، روند کلی تغییرات پارامترها بر نتایج دارای اثرات مشابه هستند و این نتایج دارای عمومیت می‌باشند.
- ### منابع
- Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., and Shareghi, A., 2014. Spectral assessing of topographic effects on seismic behavior of trapezoidal hill, *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(4), 245-252.
- Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., and Harati, A., 2023. Numerical evaluation of the effect of soil non-horizontal layering on seismic response of semi-sin alternating hills, *Iranian Journal of Engineering Geology*, 16(1), 111-128.
- Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., Shareghi, A., 2017. Seismic Assessment of Trapezoidal-Shaped Hills Induced by Strong Ground Motion Records, *JSEE /Vol. 19, No.4*.
- Armigliato, A., Tinti, S., 2003. Influence of topography on coseismic displacements induced by the Friuli 1976 and the Irpinia 1980 earthquakes (Italy) analyzed through a two-dimensional hybrid model, *Journal of Geophysical Research*, 108, 2552-2566.
- Boore, D.M., 1973. The effect of simple topography on seismic waves: Implication for the acceleration recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California, *Bull. Seism. Soc. Am.* 63, 1603-1609.
- Bouckovalas G. D., and Papadimitriou, A. G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 25, pp. 547-558.
- Cao, X.-R., Song, T.-S., and Liu, D.-K., 2001. Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of arbitrary shape, *Appl. Math. Mech.*, 22(9), 1082- 1089.
- Building design regulations against earthquakes, standard 2800, fourth edition. Road, Housing and Urban Development Research Center, in persian.
- Harati, A. and Amelsakhi, M., 2024. Amplification Study of Adjacent Alternating Hills, *Bulletin of*

Effect of soil layering on resonance of alternating semi-circle and trapezoidal Hills

Masoud Amelsakhi ^{1*} and Ayda Haraty ²

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

²M.Sc. Student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

(Received: 24 February 2024, Accepted: 15 September 2024)

Summary

It is obvious that surface roughness should be considered in seismic calculations due to their many effects on seismic response of sites. In this paper, the combined effect of slope angle of hill material layers and height in alternating topography under the influence of Landers earthquake for two geometry of semi-circle and trapezoidal hills is using finite difference method is presented. Due to dynamic interaction between the hills, alternating topographic displacement is larger than single topography. For example, a single hill with a height of 30 meters has an amplification of approximately 1.79 at an angle of 15 degrees while at the same height and angle, the triple sine hill has experienced an amplification of 1.97. Then, the effect of density, elasticity modulus and Poisson ratio of materials on seismic motion of hills with non-horizontal layered materials is investigated. With increasing density and Poisson ratio, alone, seismic amplification increased but changes in the amount of elasticity modulus alone did not affect the magnification. Differences in layering due to Poisson Ratio had negligible effect on amplification. The hill's height is an important parameter that effects on amplification responses. As height increases, the amplification increases too. Another important parameters are number of adjacent hills, height of adjacent hill and also the distance between the hills. The more height hill adjacent to the base hill, the more amplification for the base hill. The obtained results demonstrate that as the height of the hill increases, the effect of different angles of layering increases on amplification of the base hill. It means that although the hill's height is an important parameter, but also this parameter directly increases the effect of the angle between layers of the hill on amplification and seismic response of the hill. It is very important to consider these effects for design the structures located on these hills. Another important parameter that is studied in this research is the mass density of the hill's material. The mass density has an increasing effect on seismic response of the hill; as the mass density of the hill material increases, the amplification increases. This means that as the weight of the hill increases, the amplification increases; as it is also an important matter in seismic behavior of different buildings in seismic codes. Obtained results show that elasticity modulus of the soil does not have any important effect when the angle between the soil layers are investigated.

Keywords: Alternating topography, soil Layering, topography height, seismic response