

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

اثر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای، مسئله‌ای چالش‌برانگیز در ژئوتکنیک لرزه‌ای است که پیچیدگی آن با وجود لایه‌های مختلف در تپه و زاویه‌ها و مشخصات متفاوت لایه‌بندی نسبت به یکدیگر افزایش می‌یابد. این پژوهش به بررسی عددی تأثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌ای دولایه با مشخصات، ضخامت و زاویه‌ی لایه‌بندی متغیر می‌پردازد. تاکنون، تأثیر توأمان این پارامترها در تپه‌های غیرهمگن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از روش تفاضل محدود، مدل‌های عددی متعددی از تپه با دولایه با مشخصات مختلف ایجاد و تحلیل شدند. ضخامت هر لایه، زاویه‌ی لایه‌بندی و موقعیت لایه‌ی سست به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده و اثر آنها بر بزرگ‌نمایی سه مؤلفه‌ی شتاب، سرعت و جابه‌جایی بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات در مشخصات مصالح لایه‌ها (به‌ویژه سست‌تر شدن لایه‌ی بالایی) تأثیر بسیار قابل توجهی بر بزرگ‌نمایی دارد، به‌مراتب بیشتر از آنچه از تغییر در ضخامت یا زاویه‌ی لایه‌بندی حاصل گردید. کمترین تغییر در مؤلفه‌های پاسخ به هنگام نصف شدن ضخامت لایه‌ی بالایی مشاهده شد. علاوه بر این، موقعیت لایه‌ی سست نیز به‌طور معنی‌داری بر پاسخ لرزه‌ای تپه اثر می‌گذارد. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن خصوصیات لایه‌بندی و مشخصات مصالح در ارزیابی دقیق پاسخ لرزه‌ای تپه‌ها را به‌روشنی نشان می‌دهد و برای بهبود تحلیل‌های خطر زلزله در مناطق تپه‌ای اهمیت دارد. این پژوهش نقش تعیین‌کننده‌ی مشخصات مصالح نسبت به هندسه در پاسخ لرزه‌ای تپه‌ها را آشکار می‌کند و می‌تواند به ارائه مدل‌های دقیق‌تر برای طراحی لرزه‌ای در مناطق تپه‌ای منجر شود.

واژگان کلیدی: اثرات ساختگاه، بزرگ‌نمایی، تپه نیم‌سینوسی، لایه‌بندی.

بررسی عددی اثر ضخامت و زاویه لایه‌بندی در بزرگ‌نمایی تپه نیم‌سینوسی دولایه

محمدحسین ناطقی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

مسعود عامل‌سخی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران،

amelsakhi@qut.ac.ir

۱- مقدمه

میزان واقعی اثر توپوگرافی بر حرکت زمین بسیار دشوار است. از سال ۱۹۷۴ که تریفوناک (Trifunac, 1971) مطالعات تئوری در مورد پاسخ دو بعدی یک دره نیم‌دایره‌ای تحت موج SH را آغاز نمود، مطالعات زیادی برای بررسی اثرات ساختگاه بر حرکت قوی زمین انجام شده است. سانچز-سسما (Sanchez-Sesma, 1987) از اولین محققانی بود که تپه‌های مثلثی شکل را تحت امواج مهاجم SH بررسی نمود. بوکووالاس و پاپادیمیتریو (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005) پاسخ لرزه‌ای شیب‌های پله‌ای در خاک ویسکوالاستیک همگن را تحت انتشار قائم امواج لرزه‌ای SV ارزیابی کرده و اثر هندسه شیب و

بررسی اثرات توپوگرافی یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای هستند که بررسی این موارد در تپه، یکی از مسائل قابل تأمل است. به علل مختلف، سازه‌ها در ارتفاع‌های بالای تپه و شیب‌ها ساخته می‌شوند که این مسئله باید در بررسی پاسخ چنین سازه‌هایی مدنظر قرار گیرد. مشخص است که مصالح خاک می‌تواند حرکت لرزه‌ای زمین را در محدوده بالای خاک که سازه‌ها بر روی آن ساخته می‌شوند تغییر دهد. ارزیابی زمین‌لرزه‌های بزرگ نشان داده است که شرایط محلی مانند توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه تأثیرات بسیاری بر ویژگی‌های حرکت زمین و پاسخ لرزه‌ای دارد. باید اذعان نمود که تعیین

است. سهرابی بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2010) به منظور ارزیابی پارامترهای حرکت رأس یک تپه گاوسی شکل دو بعدی، پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب را 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. شارقی و همکاران (Shareghi et al., 2014) در سال ۲۰۱۴ به بررسی بزرگ‌نمایی در تپه دوزنقه‌ای شکل در حالت‌های یک‌بعدی و دو بعدی پرداختند. در تحقیق دیگری عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2017) از رکوردهای قوی برای بررسی اثرات توپوگرافی در تپه دوزنقه‌ای شکل استفاده نمود. مدها و همکاران (Modha et al., 2020) 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 دست کم 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 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

فرکانس موج را به دست آوردند. 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. سهرابی بیدار و همکاران (Sohrabi-Bidar et al., 2009a, 2009b, 2010, 2019) مطالعات پارامتری متعددی انجام دادند تا پاسخ اثرات سه‌بعدی توپوگرافی ساده را نشان دهند. افزاریاد 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 ویسکوالاستیک 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 ویسکوالاستیک 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) پراکندگی امواج P و SV را در یک توپوگرافی سیکلی بررسی کرد. نتایج عددی نشان داد که پاسخ‌های توپوگرافی سیکلی 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) پراکندگی امواج رایلی در مدل دره گاوسی شکل را بررسی کرد. نتایج نشان داد که امواج رایلی هنگام مواجهه با توپوگرافی به امواج P و S تبدیل خواهند شد. انرژی موج S بیشتر از انرژی موج P ایجاد شده از موج رایلی

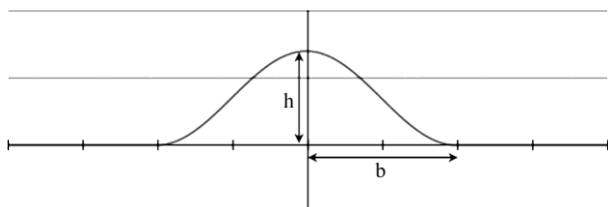
۲- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC استفاده گردید و موجک ریکر به‌عنوان محرک ورودی انتخاب شده است.

۲-۱- تشریح مدل توپوگرافی

در پژوهش حاضر، شکل نیم‌سینوسی به‌عنوان شکل متعارفی از عوارض تپه‌ای انتخاب شده است. شکل (۱) مشخصات هندسی تپه‌ی نیم‌سینوسی را نشان می‌دهد. پارامترهای b و h به ترتیب بیانگر نصف پهنا و ارتفاع تپه و پارامترهای x و y به ترتیب بیانگر طول و عرض از مبدأ نقاط روی یال تپه هستند. رابطه (۱) بیانگر رابطه‌ی ترسیمی هندسه‌ی این نوع تپه است. این پارامتر در تحقیق حاضر در مدل‌سازی تمامی تپه‌ها برابر 0.7 در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} |x| \leq b & \quad y(x) = 0.5h(1 + \sin(\pi x / b + \pi / 2)) \\ |x| > b & \quad y(x) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$



شکل (۱): مشخصات هندسی تپه نیم‌سینوسی.

با توجه به اینکه $\sin(\alpha + \pi / 2) = \cos \alpha$ ، به سهولت می‌توان از رابطه (۱) به رابطه‌ی ترسیمی ارائه شده توسط کامالیان و همکاران (Kamalian et al., 2007) که در رابطه (۲) بیان شده است، دست یافت.

$$\begin{aligned} |x| \leq b & \quad y(x) = 0.5h(1 + \cos(\pi x / b)) \\ |x| > b & \quad y(x) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

میرایی رایلی متداول‌ترین نوع میرایی مکانیکی در تحلیل‌های دینامیکی است. در مطالعاتی که در حوزه‌ی زمان صورت می‌گیرد، معمولاً از میرایی رایلی استفاده می‌شود. در تحلیل‌های دینامیکی، برای مصالح ژئوتکنیکی نسبت میرایی معمولاً برابر ۲

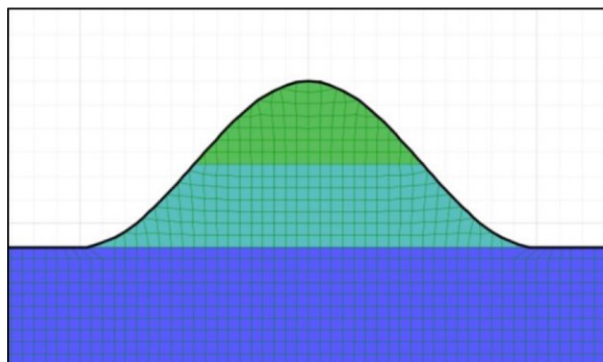
بر پاسخ پل می‌شود. هنگامی که زاویه موج دینامیکی بیشتر از ۴۵ درجه است، اثر تقویت توپوگرافی باید در طراحی لرزه‌ای پل در نظر گرفته شود.

عامل سخی و همکاران (Amelsakhi et al., 2023). به بررسی عددی اثر لایه‌بندی غیر افقی خاک بر پاسخ لرزه‌ای تپه نیم‌سینوسی پرداختند و به مطالعه زاویه لایه‌بندی خاک در پدیده تشدید پرداختند. در مطالعه‌ی دیگری نوبخت و همکاران (Nobakht et al., 2022) به بررسی اثرات توپوگرافی روی تپه‌های نیم‌سینوسی تحت اثر موج ریکر پرداختند. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که اثر زاویه شیب لایه و نیز ضخامت لایه در مطالعه بزرگ‌نمایی مورد توجه قرار نگرفته است. در مقاله حاضر به بررسی این پارامترها در بزرگ‌نمایی تپه پرداخته شده است.

علاوه بر بررسی ساختگاه، در نظر گرفتن تأثیر نوع لایه‌بندی و میزان شیب هر یک از لایه‌های خاک نیز اهمیت دارند و این مشخصات از ساختگاه تأثیر مستقیمی بر پاسخ لرزه‌ای خواهند داشت. پس از بررسی نوع توپوگرافی معرفی شده (تپه‌های نیم‌سینوسی شکل) و با انجام تحلیل عددی ساختگاه در شرایط مختلف، پارامترهایی از قبیل ضخامت و زاویه‌ی شیب در هندسه‌ی لایه‌بندی توپوگرافی، نتایج متفاوتی را از شتاب لرزه‌ای ارائه می‌دهند. این نتایج اطلاعاتی جزئی‌تر و همه‌جانبه‌تر از اثر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه به دست می‌دهند و در این حوضه آیین‌نامه‌ها و الزامات طراحی را توسعه می‌بخشند. نادیده گرفتن هر یک از این پارامترها در آیین‌نامه منجر به خسارات و تلفات پیش‌بینی‌نشده‌ای خواهد شد.

از گذشته تا کنون تعدادی از پژوهش‌ها در این حوزه، در مورد تأثیر هندسه توپوگرافی، وجود لایه‌هایی با جنس خاک متفاوت یا وجود ساختگاه‌های متفاوت بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه تحت اثر زلزله و یا بزرگ‌نمایی حرکات لرزه‌ای زمین صورت گرفته است. با توجه به اینکه در پژوهش‌های گذشته مطالبی برای بررسی اثر لایه‌بندی در این نوع توپوگرافی یعنی تپه‌های نیم‌سینوسی شکل ارائه نشده است، ضرورت و اهمیت مطالعات در این زمینه مشاهده می‌شود.

برابر لایه‌ی سخت (لایه‌ی پایین) در نظر گرفته شده است. ترسیم لایه‌ها با تقسیم‌بندی خط عمودی نیم‌ساز تپه به اندازه‌های تعریف شده برای هر لایه و با زاویه‌ی تعریف شده صورت پذیرفت.



شکل (۲): نمونه‌ای از مدل‌سازی تپه نیم‌سینوسی شکل شامل دو لایه‌ی افقی با ضخامت یکسان در محیط نرم افزار FLAC.

برای نمونه، شکل (۳-الف) مدل مربوط به تپه‌ی دولایه با لایه‌های سخت و سست برابر و زاویه‌ی ۲۰ درجه و شکل (۳-ب) مدل مربوط به تپه‌ی دو لایه با لایه‌ی سست به ضخامت نصف ضخامت لایه‌های سخت بالا و پایین با زاویه‌ی ۴۰ درجه را نشان می‌دهند. جدول (۲) همه‌ی مدل‌های قابل بررسی را در پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

۲-۲- شرایط مرزی و بارگذاری دینامیکی

در مرحله‌ی تحلیل استاتیکی، با درگیر کردن مرزهای انتهایی مدل می‌توان تکیه‌گاه‌های واقع در مرزهای محیط واقعی را به‌خوبی شبیه‌سازی نمود؛ اما در مرحله‌ی دینامیکی، مرزهای گیردار، امواج را به داخل مدل منعکس کرده و نهایتاً مسئله دچار خطا خواهد شد.

تا ۵ درصد میرایی بحرانی است (Itasca, 2005)، بنابراین جهت اختصاص میرایی رایلی در مطالعات تحقیق حاضر، نسبت میرایی $\gamma = 0.05$ انتخاب و فرکانس مرکزی هر مدل برابر فرکانس طبیعی آن در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، تمامی مدل‌ها در برابر تابش امواج ورودی SV به‌صورت قائم قرار گرفتند. موج ورودی از نوع موجک ریکر بوده است.

جهت بررسی اثر لایه‌بندی و وجود لایه‌ی سست و قرارگیری آن در موقعیت‌های مختلف در لایه‌بندی تپه، در تحقیق حاضر از چهار نوع مصالح استفاده شده است که مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه شده است؛ به این صورت که مدل تپه روی محیط سنگی قرار می‌گیرد و با دو نوع خاک به‌صورت افقی یا زاویه‌دار با ضخامت‌های مختلف مدل‌سازی می‌شود. در تمامی مدل‌ها یک لایه به‌عنوان لایه‌ی سست دارای مشخصات ضعیف‌تری نسبت به لایه‌ی دیگر در نظر گرفته شده است. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰، مصالح محیط سنگی از تیپ I و لایه‌های تپه از یک نوع مصالح از تیپ II (خیلی متراکم) و دو نوع مصالح از تیپ III (متراکم و متوسط) انتخاب شده است. مقدار سرعت موج برشی هر یک از لایه‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

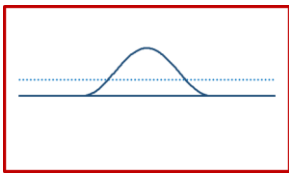
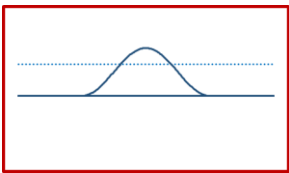
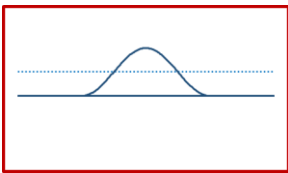
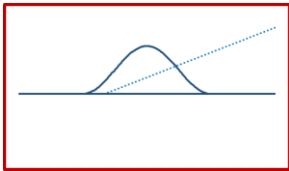
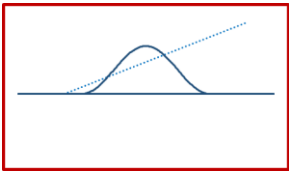
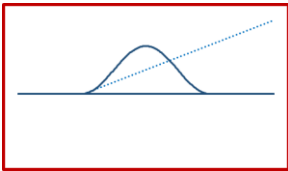
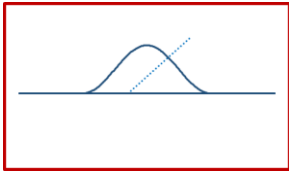
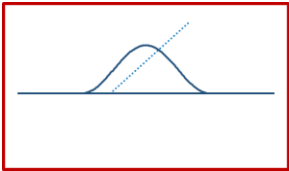
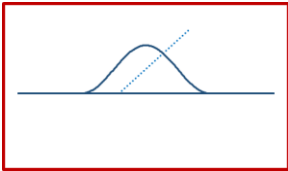
در هندسه‌ی تپه‌های دولایه، لایه‌ی سست با ضخامت‌های دو برابر، نصف و برابر با ضخامت لایه‌ی سخت به‌عنوان لایه‌ی بالاتر در نظر گرفته شده است. به‌عنوان نمونه، شکل (۲) مدلی از تپه‌ی دو لایه را نشان می‌دهد که شامل لایه‌های افقی با ضخامت یکسان است.

لایه‌بندی در تمامی مدل‌ها با زاویه‌های لایه‌بندی صفر (لایه‌های افقی)، ۲۰ و ۴۰ درجه مدل‌سازی شده‌اند. لایه‌ی سست در تپه‌های دو لایه (لایه‌ی بالا) در سه حالت دو برابر، نصف و

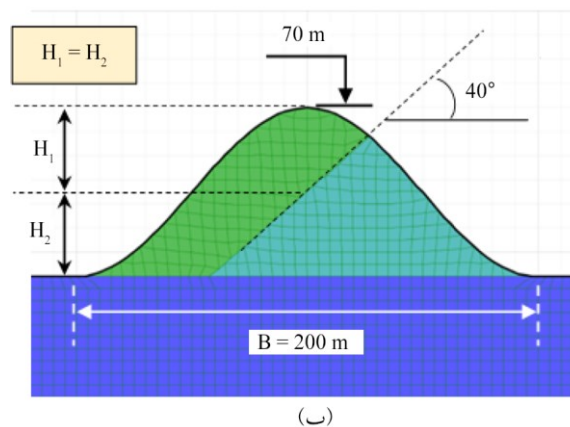
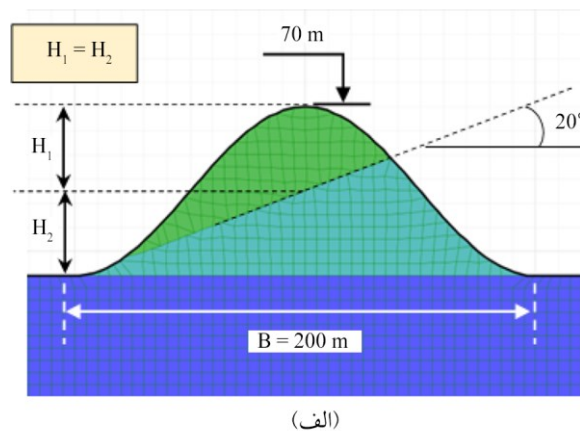
جدول (۱): مشخصات ژئوتکنیکی خاک در لایه‌بندی‌ها.

نوع خاک بر اساس تیپ	نسبت پوآسون	جرم مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
بستر سنگی - شبه سنگ (تیپ I)	۰/۴۵	۲۵۰۰	۸۰۰
لایه‌ی سخت - خیلی متراکم (تیپ II)	۰/۴۰	۲۰۰۰	۵۰۰
لایه‌ی سست - متراکم (تیپ III)	۰/۳۵	۱۸۰۰	۳۰۰
لایه‌ی سست (تر) - متوسط (تیپ III)	۰/۳۰	۱۶۰۰	۲۶۰

جدول (۲): مدل های مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

لایه های برابر	لایه ی سست نصف	لایه ی سست دو برابر
		
		
		

برای جلوگیری از انعکاس امواج به داخل مدل، از مرزهای آرام و جاذب انرژی استفاده می شود. مرز جاذب متشکل از میراگرهای مستقل در جهات عمودی و برشی است. این میراگرها از انعکاس امواج به درون محیط جلوگیری می کنند. با توجه به اینکه بارگذاری از نوع تنش به مدل وارد می شود، استفاده از مرزهای آرام ضرورت خواهد داشت. از طرفی به دلیل اعمال منبع انرژی دینامیکی از قسمت تحتانی مدل، مرزهای جانبی نباید با مرزهای آرام میرا شوند. در واقع انرژی امواج نباید از قسمت های جانبی هدر رود؛ بنابراین در این حالت باید از مرزهای میدان آزاد (منطقه آزاد) استفاده شود. در مرزهای میدان آزاد، مرزهای کناری توسط میراگرهای ویسکوز به شبکه ناحیه آزاد متصل می شوند و این امکان را به امواج می دهند که بدون تغییر در مرزها به سمت بالا منتشر شوند (Boukvalas & Papadimitriou, 2005). با اعمال مرزهای منطقه آزاد برای مرزهای کناری، انعکاس امواج به حداقل می رسد. این پژوهش، مشابه مطالعات پیشین در خصوص تأثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزه ای، از موجک ریکر به عنوان ورودی استفاده کرده و پاسخ

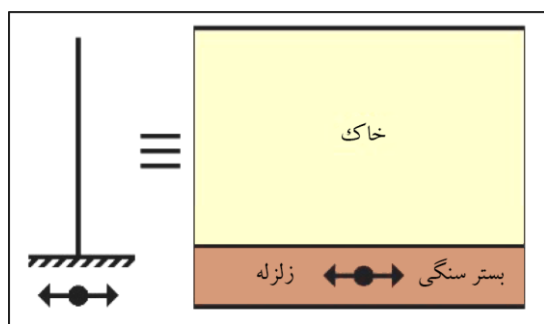


شکل (۳): نمونه ای از تپه نیم سینوسی شکل شامل دولایه با ضخامت یکسان و زوایای ۲۰ و ۴۰ درجه در محیط نرم افزار FLAC.

$$f_1 = \frac{V_s}{4H} \quad (4)$$

در روابط بالا f_1 فرکانس اصلی، H ارتفاع لایه خاک و V_s سرعت موج برشی محیط است.

$$f_{min} = f_1 = \frac{V_s}{4H} \quad (5)$$



شکل (۴): شبیه‌سازی زلزله اعمالی به بستر سنگی در آزمایشگاه (Shoari-Shoar, 2020)

نهایتاً برای هر یک از مدل‌ها، فرکانس طبیعی به‌دست آمده از رابطه (۳) با نتایج حاصل از نرم‌افزار مطابقت داده شد و در نتیجه، تنها اختلاف ناچیزی در نتایج مشاهده شد. این اختلاف ممکن است ناشی از محیط ناهمگن لایه‌بندی و یا به عبارتی تفاوت در سرعت موج برشی در لایه‌ها باشد.

۴-۲- فرآیند مدل‌سازی

همان‌طور که پیش‌تر پیشنهاد گردید، در تحلیل‌های دینامیکی جهت جلوگیری از مواجهه با خطای ناشی از انعکاس امواج به درون محیط، ترجیحاً از مرزهای آرام و جاذب انرژی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای حل این مشکل از مدل‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر نیز می‌توان استفاده نمود. در چنین مدل‌هایی، میرایی مصالح امکان استهلاک مناسب انرژی را فراهم می‌نماید و اثرات انعکاس امواج پس از برخورد به مرزهای گیردار به‌اندازه کافی کاهش می‌یابد. از سویی دیگر نمی‌توان ابعاد مدل را بی‌نهایت یا بسیار بزرگ در نظر گرفت. تعیین ابعاد بسیار بزرگ برای مدل ممکن است منجر به حجم بسیار زیادی از محاسبات و افزایش زمان تحلیل شود.

لرزه‌ای تپه‌های دولایه را در فرکانس ثابت ۴ هرتز بررسی می‌کند. بارگذاری دینامیکی، به‌صورت تاریخچه‌ی تنش اعمال شده و هدف اصلی، بررسی اثر ساختگاه در فرکانس‌های مختلف نیست. مطالعاتی نظیر (Kamalian et al., 2007)، (Bakavoli et al., 2012) و (Afzalirad et al., 2019)، اغلب برای بررسی پاسخ ساختگاه از موج ریکر با فرکانس غالب ۲ یا ۳ هرتز استفاده می‌کنند.

۳-۲- میرایی و فرکانس طبیعی

در تحلیل‌های دینامیکی، برای مصالح ژئوتکنیکی نسبت میرایی معمولاً برابر ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی است (Itasca, 2005)؛ بنابراین، جهت اختصاص میرایی ریلی در مطالعات تحقیق حاضر، نسبت میرایی $\beta = 0.05$ انتخاب و فرکانس مرکزی هر مدل برابر فرکانس طبیعی آن در نظر گرفته شد. در مطالعات پژوهش حاضر، جهت تعیین فرکانس طبیعی هر یک از مدل‌های مورد بررسی در محیط نرم‌افزار، هر یک از مدل‌ها با صرف‌نظر از اثر میرایی، تحت نیروی گرانش دینامیکی قرار گرفت و دچار نوسان نامیرا شد. در این حالت، به دلیل عدم وجود میرایی، ارتعاش مدل تا تعداد گام‌های تعریف شده ادامه یافت. آنگاه با خروجی گرفتن از نمودار جابه‌جایی قائم (تحت گرانش) در برابر زمان برای یک نقطه از مدل، پیرو و به‌مراتب فرکانس طبیعی خاک از روی نوسان به‌دست آمده مشخص گردید (Itasca, 2005).

از طرفی در محیط آزمایشگاهی، انتشار موج در یک میله، می‌تواند ضمن شبیه‌سازی محیط خاکی روی بستر سنگی و تحت ارتعاش زلزله، رابطه‌ای را برای تعیین فرکانس طبیعی سیستم نیز ارائه دهد. با توجه به شکل (۴)، در این شبیه‌سازی انتهای گیردار معرف بستر سنگی، میله معرف خاک و بارگذاری سینوسی قاعده معرف زلزله است. در این حالت فرکانس طبیعی سیستم از رابطه (۱) به دست می‌آید (Shoari-Shoar, 2020):

$$f_n = \frac{2n-1}{4H} V_s \quad (3)$$

و فرکانس اصلی (فرکانس مربوط به مود اول $n=1$) از رابطه (۲) تعیین می‌شود:

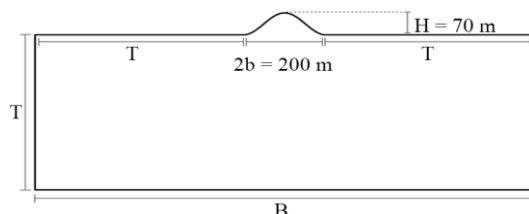
مشخص شده است، فاصله‌ی دامنه‌ی تپه از طرفین و ارتفاع پی که با حرف T نامیده شده است، در هفت مرحله با اندازه‌های ۳ تا ۹ برابر ارتفاع تپه ($H = 70$ متر) لحاظ گردید. نهایتاً با مقایسه‌ی مقادیر جابه‌جایی حداکثر در هر هفت مدل و با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که از مدل پنجم ($7H$) به بعد، تغییر چندانی دیده نمی‌شود و ابعاد پی متناظر این مدل را می‌توان به‌عنوان عرض و ارتفاع پی در مدل‌سازی در نظر داشت.

عرض و ارتفاع مش‌بندی مدل را بوکووالاس و پاپادیمتریو (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005) را به ترتیب ۵ و ۲۰ برابر ارتفاع عارضه (H) در نظر گرفته‌اند. به همین منظور، جهت تعیین ابعاد (عرض و ارتفاع) پی متناسب با تپه‌ای با نسبت شکل ۰/۷ (پهنای ۲۰۰ متر و ارتفاع ۷۰ متر)، مثالی با خاک همگن با مشخصات ارائه شده در جدول (۳) در زیر در هفت مدل به شرح جدول (۲) مدل‌سازی شد. همان‌طور که در جدول (۴)

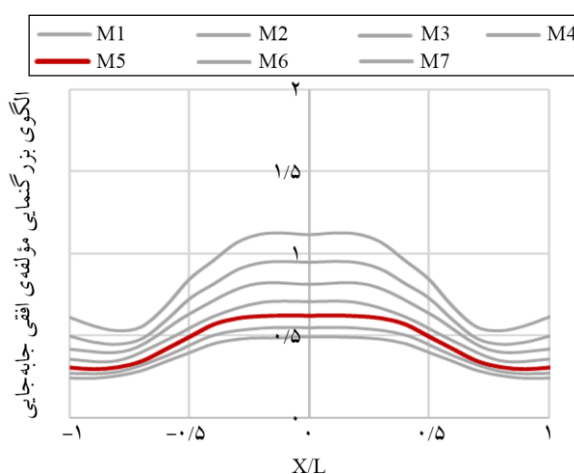
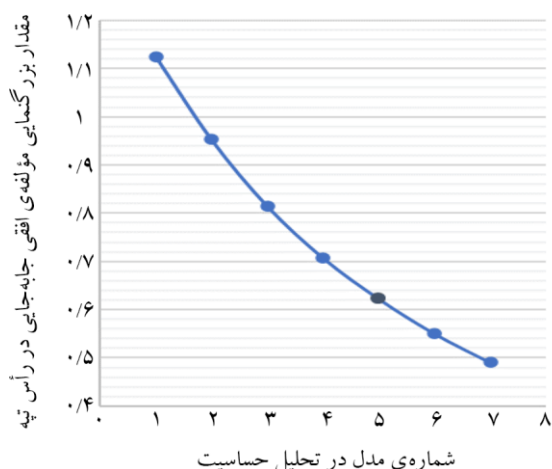
جدول (۳): مشخصات تعریف شده جهت تعیین ابعاد (عرض و ارتفاع) پی مدل.

نوع خاک	مش‌بندی	فرکانس	سرعت موج برشی (V_s)	نسبت پوآسون (ν)	جرم مخصوص (ρ)
تیپ I	۵×۵	۴ هرتر	۸۰۰ متر بر ثانیه	۰/۴۵	۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

جدول (۴): نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در تعیین ابعاد (عرض و ارتفاع) پی مستطیلی مدل‌سازی.



مدل	ارتفاع پی یا فاصله دامنه تپه از دو طرف (T)	نسبت T/H	عرض پی (B)	نسبت B/H
۱	۲۱۰	۳	۶۲۰	۸/۸۶
۲	۲۸۰	۴	۷۶۰	۱۰/۸۶
۳	۳۵۰	۵	۹۰۰	۱۲/۸۶
۴	۴۲۰	۶	۱۰۴۰	۱۴/۸۶
۵	۴۹۰	۷	۱۱۸۰	۱۶/۸۶
۶	۵۶۰	۸	۱۳۲۰	۱۸/۸۶
۷	۶۳۰	۹	۱۴۶۰	۲۰/۸۶

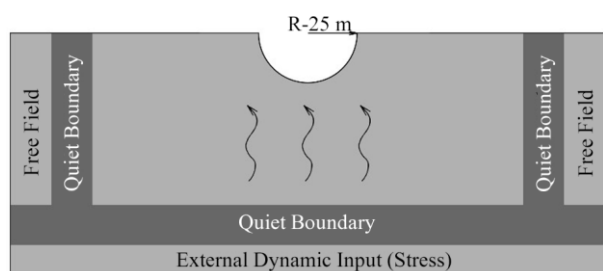


شکل (۵): نتایج حاصل از تحلیل حساسیت: مقادیر بزرگ‌نمایی نظیر مؤلفه افقی جابه‌جایی توپوگرافی در هفت مدل‌سازی (نمودار سمت راست)؛ نمودار تحلیل حساسیت بر اساس مقدار بزرگ‌نمایی نظیر مؤلفه افقی جابه‌جایی در رأس توپوگرافی (نمودار سمت چپ).

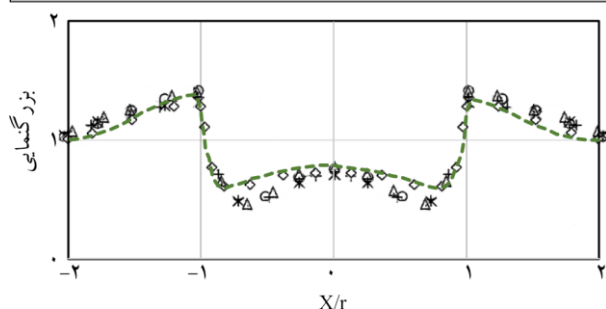
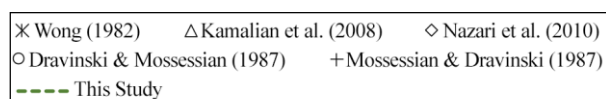
نیز نشان دهندهی نسبت بیشینه پاسخ مؤلفه افقی جابه‌جایی در نقاط مختلف در سطح زمین بر بیشینه مقدار دامنه جابه‌جایی موج ریکر محرک ورودی است.

جدول (۵): مشخصات مصالح در مدل‌سازی دره.

سرعت موج برشی (V_s)	نسبت پواسون (ν)	چگالی (ρ)
۲۲۳/۳۳ متر بر ثانیه	۰/۳۳	۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب



شکل (۶): هندسه و شرایط مرزی مدل.



شکل (۷): بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی جابه‌جایی‌های سطحی برای یک دره‌ی نیم‌دایره در فرکانس بی‌بعد ۰/۵.

۴- نتایج عددی

۴-۱- اثر ضخامت خاک

جهت بررسی اثر ضخامت لایه‌بندی خاک و مطابق آنچه مطرح گردید، تپه‌های دولایه به ضخامت‌های متفاوت مدل‌سازی شدند. لایه‌ی بالایی به‌عنوان لایه‌ی سست (تر) به ضخامت برابر، نصف و دو برابر ضخامت لایه‌ی پایینی انتخاب شد.

با بررسی ضخامت‌های متفاوت از لایه‌بندی در تپه‌های دولایه در شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضخامت لایه‌ی سست بیشتر می‌شود و از ضخامت برابر فاصله می‌گیرد، در

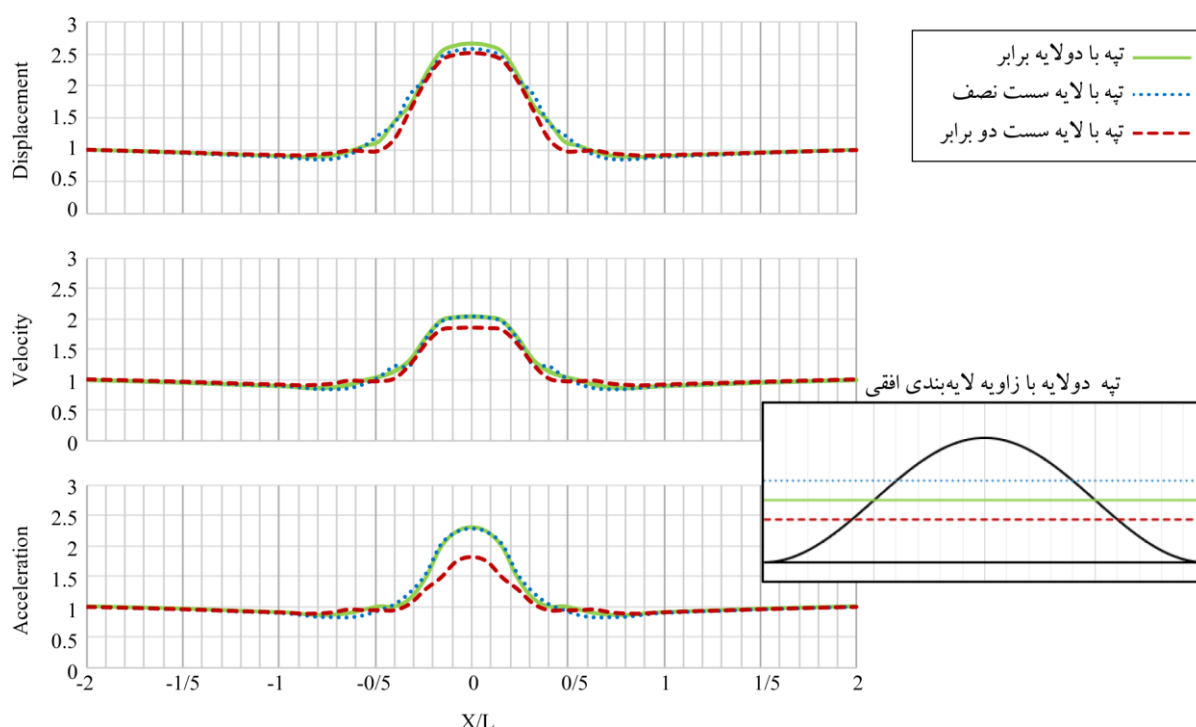
مدل‌سازی در سه مرحله انجام شد. ابتدا، مدل زمین طبیعی بدون تپه با مش‌بندی مناسب، مشخصات لایه‌بندی و مصالح الاستیک و شرایط مرزی گیردار ایجاد و تحلیل استاتیکی آن با اعمال شتاب ثقل انجام شد. سپس تپه با مشخصات مشخص به مدل اضافه شد. در مرحله‌ی آخر، تحلیل دینامیکی با شرایط اولیه صفر، میرایی و مرزهای تعریف شده انجام شد.

نتایج به‌صورت الگوهای بزرگ‌نمایی ارائه شدند. بزرگ‌نمایی، نسبت حداکثر دامنه‌ی پارامترهای حرکتی (جابه‌جایی، سرعت، شتاب) در سطح مدل با تپه به حداکثر دامنه در مدل بدون تپه (میدان آزاد) است. در این الگوها، محور عمودی نشان‌دهنده‌ی بزرگ‌نمایی و محور افقی نشان‌دهنده‌ی نسبت فاصله افقی از مرکز تپه به عرض آن است. این روش محاسبه‌ی بزرگ‌نمایی که نشان‌دهنده‌ی میزان تشدید است، پیش‌تر از این در مطالعات دیگری مثل (Shoari-Shoar, 2020) تأیید شده است.

۳- اعتبارسنجی مدل

بررسی صحت و اعتبار جواب‌های حاصل از هر مدل عددی در تحقیق حائز اهمیت است. بدین منظور، در محیط نرم‌افزار با در نظر گرفتن دره‌ای نیم‌دایره به شعاع ۱۰ متر مدل‌سازی عددی دیگری صورت پذیرفت. مشخصات مصالح تعریف شده در مدل‌سازی این مسئله در جدول (۵) ارائه شده است. این دره در معرض انتشار عمودی امواج SV ریکر با فرکانس مرکزی ۵/۵۸ هرتز (فرکانس بدون بعد ۰/۵) و پارامتر شیفت زمانی ۰/۲۶ ثانیه قرار گرفت (شکل ۶). نتایج تحلیل برای رفتار لرزه‌ای این دره در شکل زیر آمده است. محور افقی بیانگر نسبت بی‌بعد شده‌ی فاصله‌ی افقی از مرکز دره (X) بر شعاع دره (r) است. میزان بزرگ‌نمایی روی محور عمودی از نسبت بیشینه پاسخ مؤلفه افقی جابه‌جایی در نقاط مختلف در سطح زمین بر حداکثر دامنه پارامتر جابه‌جایی ناشی از زلزله روی بستر سنگی تعیین گردید.

در شکل (۷) محور افقی بیانگر نسبت بی‌بعد شده‌ی فاصله‌ی نقاط از مرکز دره (X) بر نصف عرض دره (L) است. محور قائم



شکل (۸): مقایسه‌ی اثر ضخامت لایه‌ها بر مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی جابه‌جایی، سرعت و شتاب برای توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی دو لایه با لایه‌ی سست و زاویه‌ی لایه‌بندی افقی.

بی‌بعد ۰/۵ از رأس تپه و در مؤلفه‌ی شتاب از دیگر مؤلفه‌ها بیشتر و با فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۴ از رأس تپه به دست آمده است. درحالی‌که با سست‌تر بودن لایه‌ی بالایی، مدل با ضخامت کمتر از لایه‌ی سست‌تر در هر سه مؤلفه مقادیر بزرگ‌نمایی بیشتری را تجربه نموده و می‌توان از شکل (۹) نتیجه گرفت که هرچه ضخامت لایه‌ی سست‌تر کمتر شود، در مؤلفه‌ی شتاب مقادیر بزرگ‌نمایی بیشتر از سرعت و سرعت نیز بیشتر از جابه‌جایی تغییر می‌پذیرد و افزایش می‌یابد.

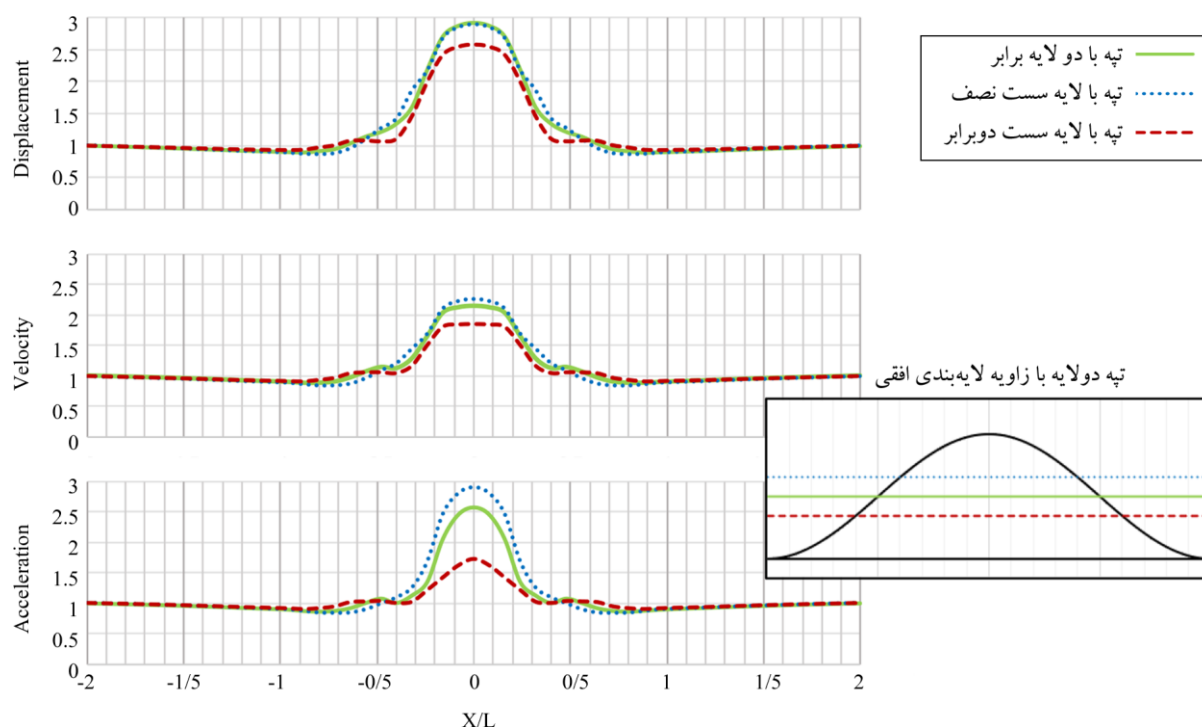
با توجه به جدول (۶)، در هر زاویه‌ی لایه‌بندی، نصف شدن ضخامت لایه‌ی بالایی نسبت به لایه‌بندی برابر تأثیر چندانی بر مؤلفه‌ی جابه‌جایی بزرگ‌نمایی حاصل از رأس تپه نداشت. این مقدار بیشتر از ۳ درصد نبوده است. دو برابر شدن ضخامت لایه‌ی بالایی در زوایای کمتر باعث کاهش در مؤلفه‌ی جابه‌جایی بزرگ‌نمایی شد. این کاهش در لایه‌ی سست ۶ درصد و در لایه‌ی سست‌تر ۱۲ درصد بوده است اما این مقادیر در زاویه‌ی لایه‌بندی بیشتر به ترتیب ۴ درصد و ۸ درصد کاهش بوده است. همچنین در مورد مؤلفه‌ی سرعت و شتاب در زاویه‌ی

پنج‌جه‌ی تپه تا فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۴ از رأس تپه کوچک‌نمایی بیشتری و در میانه‌ی بالایی تپه در هر سه مؤلفه بزرگ‌نمایی کمتری حاصل می‌شود. در صورتی‌که برای مدل با لایه‌ی سست به ضخامت برابر یا کمتر کوچک‌نمایی در دو مؤلفه جابه‌جایی و سرعت تا حداکثر فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۵ از رأس تپه ولی در مؤلفه‌ی شتاب تا فاصله‌ی بی‌بعد نزدیک‌تری به رأس تپه ادامه دارد. در مدل با ضخامت بیشتری از لایه‌ی سست (ضخامت دو برابر لایه‌ی دیگر) از دامنه‌ی تپه تا مرز بین دو لایه کوچک‌نمایی رخ داده و تا میانگین فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۴ از رأس تپه بزرگ‌نمایی با مقدار ثابت و نزدیک به یک و در قسمت‌های بالایی بزرگ‌نمایی بیشتری مشاهده می‌شود.

در مدل با لایه‌ی سست به ضخامت برابر یا کمتر، در جایی که خاک لایه‌ی بالایی خیلی سست (تر) نیست (شکل ۸)، در حد فاصل دامنه‌ی تپه تا مرز بین دو لایه نتایج کوچک‌نمایی تقریباً نزدیک به هم هستند.

بازه‌ی نتایج کوچک‌نمایی در مؤلفه‌ی جابه‌جایی کمتر و با فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۶ از رأس تپه، در مؤلفه‌ی سرعت با فاصله‌ی

کم لایه بندی، دو برابر شدن ضخامت لایه ی سست باعث ۹ درصد کاهش در مؤلفه ی سرعت و حدود ۲۰ درصد کاهش در مؤلفه ی شتاب و با دو برابر شدن ضخامت لایه ی سست تر، ۳۱ درصد کاهش یافته است اما نصف شدن لایه ی سست یا سست تر، به ازای زاویه ی بیشتر از لایه بندی باعث افزایش بزرگ نمایی شد.



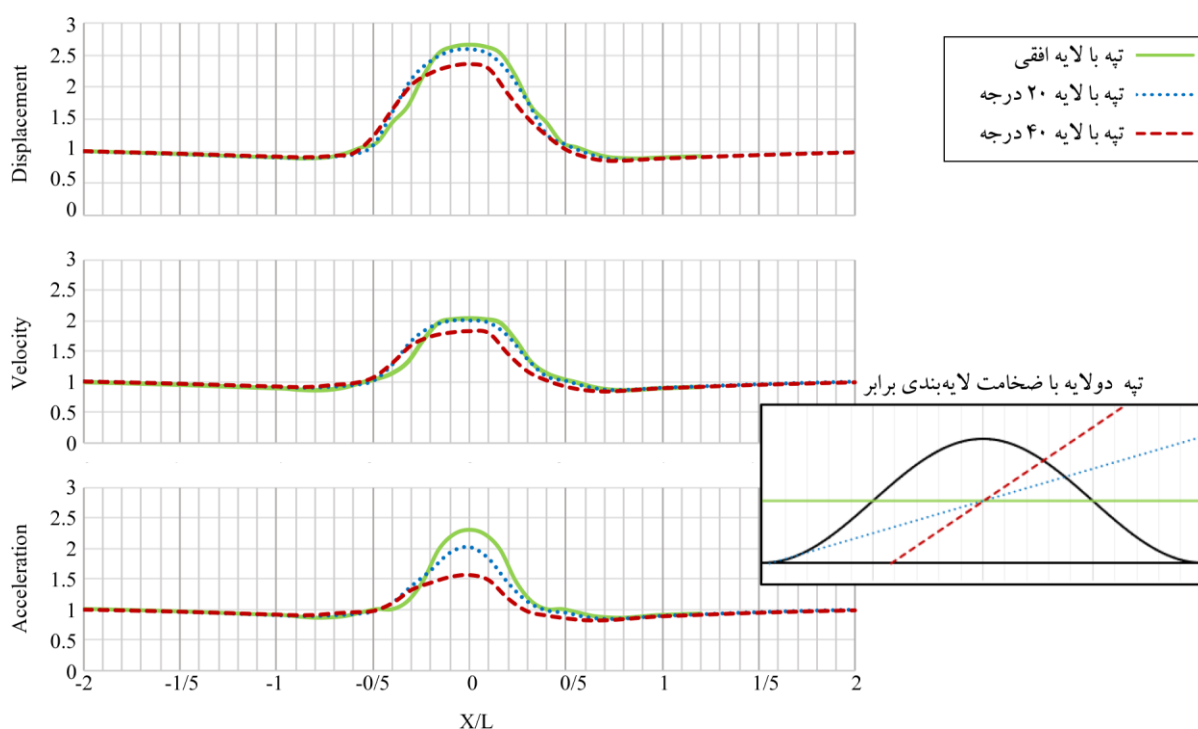
شکل (۹): مقایسه ی اثر ضخامت لایه ها بر مقادیر بزرگ نمایی مؤلفه افقی جابه جایی، سرعت و شتاب برای توپوگرافی تپه نیم سینوسی دو لایه با لایه ی سست تر و زاویه ی لایه بندی افقی.

جدول (۶): مقادیر تشدید در رأس تپه نیم سینوسی شکل دو لایه برای هر سه مؤلفه جابه جایی، سرعت و شتاب و درصد تغییرات در ضخامت لایه ی سست (تر) در بالا با مشخصات و زوایای لایه بندی متفاوت.

لایه بندی افقی	تشدید در رأس توپوگرافی با لایه ی سست تر	جابه جایی			سرعت			شتاب		
		دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
		۲/۵۷۹	۲/۹۰۹	۲/۹۰۰	۱/۸۵۲	۲/۱۴۷	۲/۲۶۵	۱/۷۳۸	۲/۵۸۵	۲/۹۰۹
		۱۱- درصد	۰ درصد	۱۴- درصد	۵ درصد	۳۳- درصد	۱۳ درصد			
لایه بندی ۲۰ درجه	تشدید در رأس توپوگرافی با لایه ی سست تر	جابه جایی			سرعت			شتاب		
		دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
		۲/۵۱۵	۲/۶۶۴	۲/۵۷۸	۱/۸۵۹	۲/۰۳۴	۲/۰۴۸	۱/۸۲۰	۲/۳۰۷	۲/۲۷۸
		۶- درصد	۳- درصد	۹- درصد	۱ درصد	۲۱- درصد	۱- درصد			
لایه بندی ۴۰ درجه	تشدید در رأس توپوگرافی با لایه ی سست تر	جابه جایی			سرعت			شتاب		
		دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
		۲/۴۶۴	۲/۷۹۶	۲/۸۰۶	۱/۷۹۹	۲/۱۰۹	۲/۲۱۳	۱/۵۶۲	۲/۲۵۱	۲/۶۱۶
		۱۲- درصد	۰ درصد	۱۵- درصد	۵ درصد	۳۱- درصد	۱۶ درصد			
لایه بندی ۶۰ درجه	تشدید در رأس توپوگرافی با لایه ی سست تر	جابه جایی			سرعت			شتاب		
		دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
		۲/۴۱۹	۲/۵۸۲	۲/۵۲۷	۱/۸۲۴	۲/۰۰۱	۲/۰۱۸	۱/۶۱۲	۲/۰۲۶	۲/۱۲۵
		۶- درصد	۲- درصد	۹- درصد	۱ درصد	۲۰- درصد	۵ درصد			

ادامه جدول (۶).

تشدید در رأس توپوگرافی با لایه‌بندی سست‌تر	جابه‌جایی			سرعت			شتاب		
	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
	۲/۲۳۷	۲/۴۳۰	۲/۵۱۱	۱/۶۳۳	۱/۸۳۰	۱/۹۴۰	۱/۳۰۶	۱/۵۸۶	۱/۸۳۴
۸- درصد	۳- درصد	۱۱- درصد	۶- درصد	۱۸- درصد	۱۶- درصد				
تشدید در رأس توپوگرافی با لایه‌بندی سست	جابه‌جایی			سرعت			شتاب		
	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف	دو برابر	برابر	نصف
	۲/۲۷۶	۲/۳۶۴	۲/۳۷۴	۱/۷۱۳	۱/۸۳۴	۱/۸۷۵	۱/۴۵۶	۱/۵۶۷	۱/۶۶۶
۴- درصد	۷- درصد	۷- درصد	۲- درصد	۷- درصد	۶- درصد				



شکل (۱۰): مقایسه‌ی اثر زاویه در لایه‌بندی بر مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی جابه‌جایی، سرعت و شتاب برای توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی دو لایه با لایه‌ی سست برابری.

۴-۲- اثر زاویه‌ی لایه‌بندی خاک

و به عبارتی در مقایسه با لایه‌بندی افقی (بدون زاویه) بزرگ‌نمایی بیشتری را در این ناحیه تجربه نموده است. درصد کاهش بزرگ‌نمایی به ازای افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی در مؤلفه‌ی شتاب بیشتر از دو مؤلفه‌ی دیگر است. این ادعا با توجه به شکل (۱۰) مورد تأیید است. این تفاوت در ضخامت‌های کمتر لایه‌ی سست (تر) بیشتر مشاهده می‌شود. به ازای افزایش زاویه در لایه‌بندی، سهم لایه‌ی بالایی (سست تر)) از یال سمت راست کمتر می‌شود. این موضوع باعث شد تا مقادیر کوچک‌نمایی متمایل به سمت چپ شدت یابند. به‌عنوان مثال با توجه به شکل (۱۰) تا جایی که زاویه‌ی

مطابق فرضیات مدل‌سازی که قبل از این تفصیل شد لایه‌بندی در تمامی مدل‌ها با زاویه‌های لایه‌بندی صفر (لایه‌های افقی)، ۲۰ و ۴۰ درجه مدل‌سازی شدند. با توجه به الگوهای بزرگ‌نمایی حاصل در شکل (۱۰) می‌توان گفت افزایش زاویه در لایه‌بندی به‌طور کلی باعث می‌شود مقادیر بزرگ‌نمایی کمتر شوند. به دلیل آنکه زاویه‌ی لایه‌بندی در مدل‌سازی طوری صورت گرفته است که در زوایای بالاتر سهم لایه‌ی بالایی (سست تر)) سمت چپ تپه را شامل می‌شود. بر اساس این تمایل الگوهای به‌دست آمده در لایه‌بندی زاویه‌دار به همین سمت بوده

جابه‌جایی و در مؤلفه‌ی شتاب بیشتر از دو مؤلفه‌ی دیگر است. به ازای افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی تا ۲۰ درجه سست یا سست‌تر شدن لایه‌ی بالایی تغییر چندانی تجربه نکرده است. این مقدار بنا به ضخامت‌های مختلف در مؤلفه‌ی شتاب بین ۷ تا ۱۳ درصد، در مؤلفه‌ی سرعت بین ۱ تا ۳ درصد و در مؤلفه‌ی جابه‌جایی بین ۲ تا ۴ درصد است. به عبارتی سست‌تر شدن لایه‌ی بالایی در زوایای بالاتر (زاویه ۴۰ درجه) باعث کاهش بزرگ‌نمایی در رأس تپه شد. این درصد تغییر ناشی از اثر زاویه‌ی لایه‌بندی برای ضخامت کمتر از لایه‌ی بالایی نسبتاً کمتر است. از طرفی مشخص گردید به ازای ضخامت بیشتر از لایه‌ی بالایی نیز درصد تغییر ناشی از اثر زاویه‌ی لایه‌بندی کمتر شده است.

لایه‌بندی ۲۰ درجه است مقادیر کوچک‌نمایی از پنجه‌ی تپه تا فاصله‌ی بی‌بعد ۰/۵ از رأس تپه در مؤلفه‌ی جابه‌جایی و ۰/۴ از رأس تپه در مؤلفه‌ی سرعت و ۰/۳ از رأس تپه در مؤلفه‌ی شتاب ادامه یافتند. در نتیجه‌ی مقایسه‌ی شکل‌ها به‌طور کلی می‌توان گفت اثر زاویه در مؤلفه‌ی شتاب بیشتر از دو مؤلفه‌ی دیگر است. با توجه به جدول (۷)، تشدید رأس تپه به ازای افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی کمتر شده است. مقدار درصد و روند تغییرات برای زاویه‌ی ۲۰ درجه و ۴۰ درجه هرکدام نسبت به لایه‌بندی افقی به دست آمده است. در ضخامت مشخصی از لایه‌ی وسطی، افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی باعث کاهش در تشدید رأس تپه شده است. این درصد کاهش در مؤلفه‌ی سرعت کمتر از مؤلفه‌ی

جدول (۷): مقادیر تشدید در رأس تپه نیم‌سینوسی شکل دو لایه برای هر سه مؤلفه جابه‌جایی، سرعت و شتاب و درصد تغییرات در زاویه‌ی لایه‌بندی با مشخصات و ضخامت لایه‌بندی متفاوت.

ضخامت لایه‌بندی برای تشدید در رأس تپه	تشدید در رأس تپه	لایه‌ی سست‌تر	جابه‌جایی			سرعت			شتاب		
			افقی	۲۰ درجه	۴۰ درجه	افقی	۲۰ درجه	۴۰ درجه	افقی	۲۰ درجه	۴۰ درجه
۱/۵۸۶	۲/۹۰۹	۲/۷۹۶	۲/۴۳۰	۲/۱۴۷	۲/۱۰۹	۱/۸۳۰	۲/۵۸۵	۲/۲۵۱	۱/۵۸۶	۲/۲۵۱	۱/۵۸۶
۱/۵۶۷	۲/۶۶۴	۲/۵۸۲	۲/۳۶۴	۲/۰۳۴	۲/۰۰۱	۱/۸۳۴	۲/۳۰۷	۲/۰۲۶	۱/۵۶۷	۲/۰۲۶	۱/۵۶۷
۱/۸۳۴	۲/۹۰۰	۲/۸۰۶	۲/۵۱۱	۲/۲۶۵	۲/۲۱۳	۱/۹۴۰	۲/۹۰۹	۲/۶۱۶	۱/۸۳۴	۲/۶۱۶	۱/۸۳۴
۱/۶۶۶	۲/۵۷۸	۲/۵۲۷	۲/۳۷۴	۲/۰۴۸	۲/۰۱۸	۱/۸۷۵	۲/۲۷۸	۲/۱۲۵	۱/۶۶۶	۲/۱۲۵	۱/۶۶۶
۱/۵۷۹	۲/۵۷۹	۲/۴۶۴	۲/۲۳۷	۱/۸۵۲	۱/۷۹۹	۱/۶۳۳	۱/۷۳۸	۱/۵۶۲	۱/۵۷۹	۱/۵۶۲	۱/۵۷۹
۱/۴۵۶	۲/۵۱۵	۲/۴۱۹	۲/۲۷۶	۱/۸۵۸	۱/۸۲۴	۱/۷۱۳	۱/۸۲۰	۱/۶۱۲	۱/۴۵۶	۱/۶۱۲	۱/۴۵۶

۳-۴- اثر توأم ضخامت و زاویه‌ی لایه‌بندی

به ازای کم شدن ضخامت لایه‌ی بالایی با زاویه‌ی لایه‌بندی نتایج زیر حاصل شد:

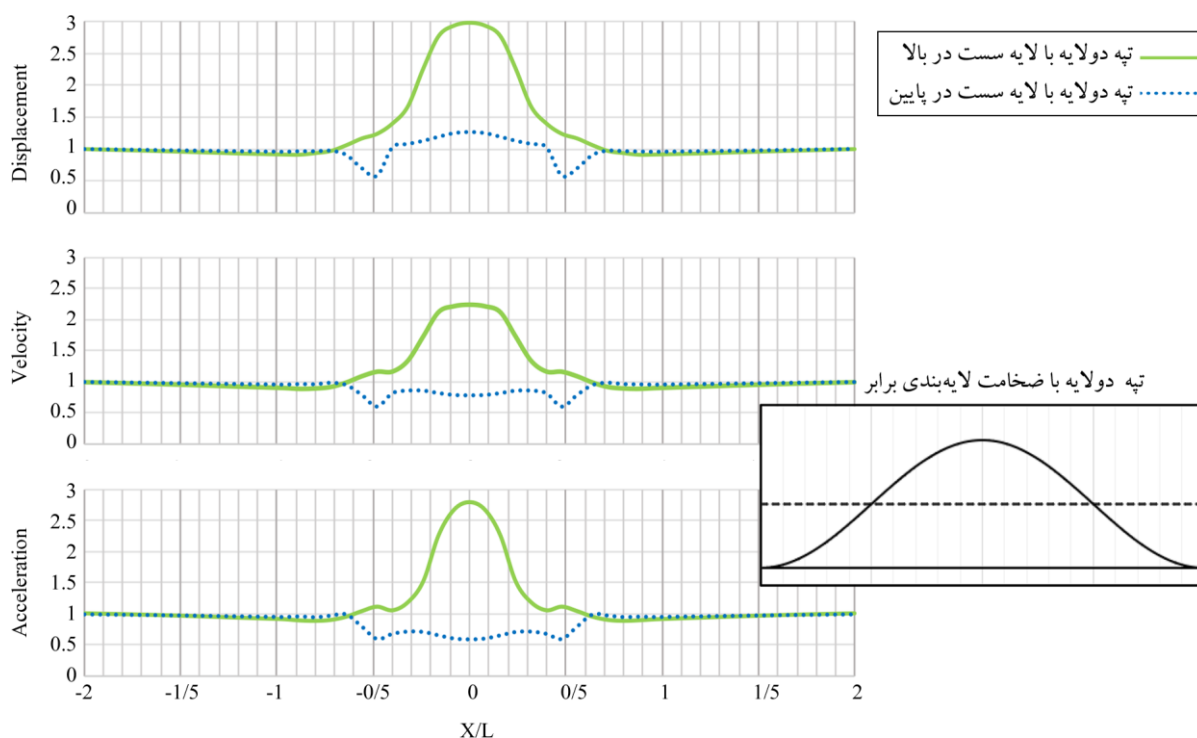
- مقادیر کوچک‌نمایی تغییر زیادی نداشتند و تنها درصد ناچیزی افزایش یافتند.
- افزایش نسبی بزرگ‌نمایی در ناحیه‌ی مرز دو لایه به سمت بالا روی یال سمت راست و افزایش بزرگ‌نمایی در ناحیه‌ی لایه‌ی بالایی حاصل شد.
- افزایش بزرگ‌نمایی مؤلفه‌ی شتاب نسبت به دو مؤلفه‌ی دیگر به میزان ۵ درصد بیشتر بوده است.
- به ازای افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی تا ۴۰ درجه تغییرات کاهش ضخامت لایه‌بندی اثر کمتری داشت.

۴-۴- اثر موقعیت لایه‌ی سست

در بخش‌های قبلی بر اساس فرضیات مطالعه، در تپه‌های دولایه، لایه‌ی سست فقط به‌عنوان لایه‌ی بالایی مورد مطالعه قرار گرفت؛ بنابراین، در این بخش اثر وجود لایه‌ی سست در بالا با

حالتی که لایه‌ی سست در شرایط مشابه روی بستر سنگی قرار گیرد، مقایسه گردید. به همین منظور تپه‌ی دو لایه یک‌بار با لایه‌ی سست در بالا و باری دیگر با لایه‌ی سست در پایین مدل‌سازی شد و در ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۱۱)، اثر موقعیت لایه‌ی سست در تپه‌ی دو لایه در ضخامت‌های متفاوت را نشان می‌دهند و نتایج حاصل از محصورشدگی لایه‌ی سست بین بستر سنگی و لایه‌ی سخت را نیز بررسی می‌نمایند. به‌طور کلی می‌توان مدعی شد که با وجود لایه‌ی سست در بالا، در نزدیکی دامنه‌ی تپه تا روی پنجه‌ی آن نتایج نزدیک به یک حاصل شده است. روی یال تپه، اگر مرز بین دو لایه به دامنه‌ی تپه نزدیک‌تر باشد، نتایج تقریباً نزدیک به یک باقی می‌ماند اما با فاصله گرفتن مرز بین دو لایه از بستر، مقادیر بزرگ‌نمایی با الگوی ملایم ادامه می‌یابند. در نهایت در نزدیکی رأس تپه، نتایج به‌صورت بیشینه‌ی مقادیر بزرگ‌نمایی به دست می‌آیند. درحالی‌که با قرار گرفتن لایه‌ی سست در پایین، در نزدیکی دامنه‌ی تپه نتایج نزدیک به یک رو به کوچک‌نمایی حاصل شده است.



شکل (۱۱): مقایسه‌ی اثر موقعیت لایه‌ی سست بر مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی جابه‌جایی، سرعت و شتاب برای توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی دو لایه با ضخامت لایه‌بندی برابر و زاویه‌ی لایه‌بندی افقی.

برابر بزرگ‌نمایی (تشدید) ناشی از زلزله است. به عبارتی دیگر، هر چه شاخص امپدانس کوچک‌تر باشد، تشدید بزرگ‌تر خواهد بود. شاخص امپدانس (α_z) به صورت زیر تعریف می‌شود (Shoari-Shoar, 2020):

$$\alpha_z = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \quad (5)$$

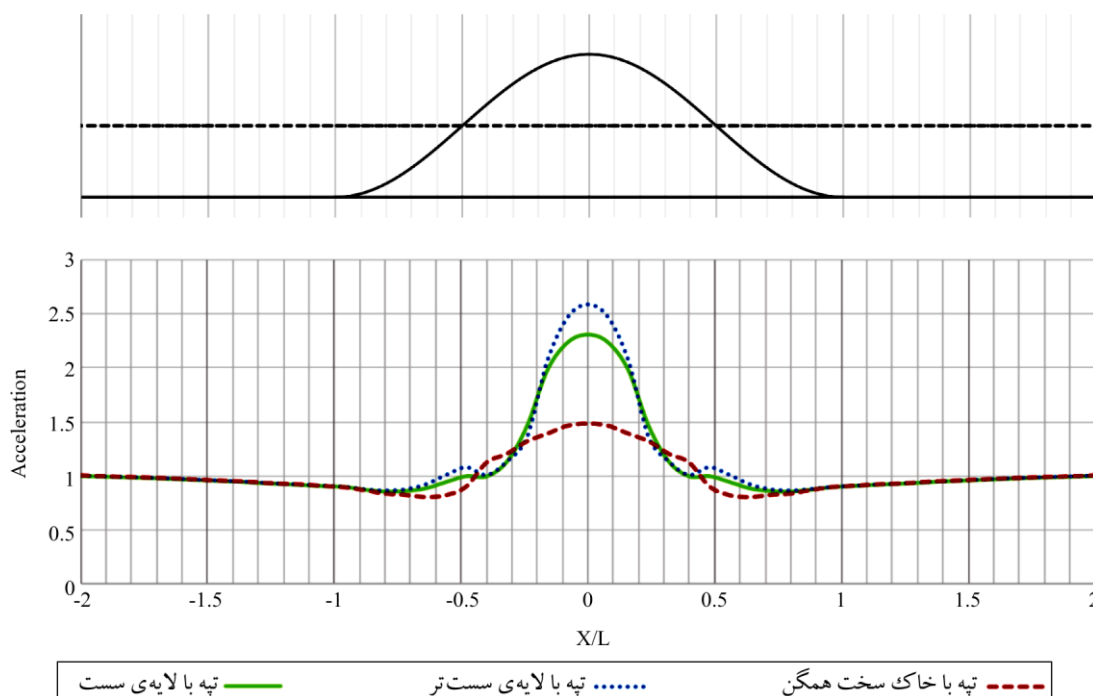
که در آن ρ_1 و v_1 چگالی و سرعت موج در لایه‌ی پایینی و ρ_2 و v_2 چگالی و سرعت موج در لایه‌ی بالایی هستند (Shoari-Shoar, 2020). با توجه به تعریف شاخص امپدانس و مشخصات ژئوتکنیکی ارائه شده در پژوهش، امپدانس در مدل‌هایی با لایه‌ی سست (تیپ III - متراکم) برابر ۰/۵۴ و در مدل‌هایی با لایه‌ی سست‌تر (تیپ III - متوسط) برابر ۰/۴۱ حاصل شده است. چون امپدانس مدل با لایه‌ی سست‌تر کوچک‌تر است، بنابراین بیشترین تشدید در این مدل رخ داده است. این موضوع در شکل (۱۲) و با مقایسه‌ی اثر مشخصات دینامیکی خاک قابل استناد است. شکل (۱۲) تشدید بیشتری را برای ویژگی‌های سست‌تر از لایه‌ی بالایی با شاخص امپدانس کمتر نشان می‌دهد.

روی یال تپه، الگوی کوچک‌نمایی به بیشینه مقدار خود می‌رسد و در نزدیکی رأس تپه، نتایج به صورت کوچک‌نمایی ادامه می‌یابد.

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با قرار گرفتن لایه‌ی سست در پایین و یا به عبارتی با محصور شدن این لایه بین لایه‌ی سخت بالا و بستر سنگی نتایج عمدتاً به صورت کوچک‌نمایی حاصل شده است و بزرگ‌نمایی تنها در مؤلفه‌های جابه‌جایی در حد فاصل بی بعد ۰/۴ از رأس تپه روی لایه‌ی سخت بالایی از طرفین اتفاق افتاده است. در فاصله‌ای از دامنه‌ی تپه تا پنجه‌ی آن نتایج نزدیک به مقدار یک و در مرز بین دولایه کمترین مقادیر حاصل شده است. به طریق مشابه، در نیمه‌ی بالایی تپه در مؤلفه‌های سرعت و شتاب مقادیر به دست آمده کمتر از یک (کوچک‌نمایی) هستند؛ درحالی که اگر لایه‌ی سست در بالا قرار گیرد، نتایج بیشتر به صورت بزرگ‌نمایی حاصل می‌شوند.

۴-۵- بررسی کمی پدیده‌ی تشدید

به منظور بررسی کمی پدیده‌ی تشدید در مدل‌های بررسی شده، شاخص امپدانس ارائه شد. در واقع امپدانس مقاومت در



شکل (۱۲): مقایسه‌ی اثر مشخصات دینامیکی خاک بر مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی شتاب برای تپه نیم‌سینوسی دو لایه با ضخامت لایه‌بندی برابر و زاویه‌ی لایه‌بندی افقی.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی اثرات لایه‌بندی مختلف بر نوع خاصی از ساختگاه یعنی تپه‌های نیم‌سینوسی شکل، پاسخ لرزه‌ای این تپه‌ها در شرایط متفاوت از لایه‌بندی تحت انتشار قائم موج ریکر مورد بررسی قرار گرفت. در اثر تغییر در مشخصات خاک در لایه‌ها میزان اثرات ضخامت و زاویه‌ی لایه‌بندی و موقعیت لایه‌ی سست در هر سه مؤلفه‌ی حرکتی جابه‌جایی، سرعت و شتاب مشاهده شد. نتایج حاصل در ذیل بیان شده است:

تحقیقات ارزشمندی در مورد اثرات بزرگ‌نمایی توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای در حوزه فرکانس وجود دارد؛ با این حال، سؤال این است که چگونه می‌توان بزرگ‌نمایی شتاب زمین در اوج زمان (PGA)، سرعت زمین در اوج (PGV) و جابه‌جایی زمین در اوج (PGD) را در ساختار توپوگرافی تپه نیم‌سینوسی تخمین زد. در مطالعه‌ی حاضر، پاسخ‌های زمانی جابه‌جایی‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها در نقاط انتخابی تپه‌ها محاسبه و تحلیل شده‌اند. نتایج ارائه شده در جداول، اثر هندسه بر الگوهای بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد و اینکه تقریباً در بالای تپه، حرکت بزرگ‌نمایی و در پای تپه، حرکت کوچک‌نمایی می‌شود. به نظر می‌رسد که می‌توان با استفاده از نتایج به‌دست آمده به‌صورت جدول یا شکل ارائه شده تخمینی قابل اعتماد از بزرگ‌نمایی حوزه زمانی مقادیر PGA، PGV و PGD داشت.

با بررسی اثر ضخامت لایه‌بندی بر پاسخ تپه‌های نیم‌سینوسی دو لایه مشخص شد که در لایه‌بندی افقی، با کمتر شدن ضخامت لایه‌ی بالایی، به ترتیب مؤلفه‌ی جابه‌جایی در فاصله‌ی بی‌بعد بیشتری از رأس تپه نسبت به مؤلفه‌ی سرعت و در سرعت بیشتر از شتاب بزرگ‌نمایی و با دور شدن از پنجه‌ی تپه از طرفین کوچک‌نمایی رخ داد. در مقایسه با اثر مشخصات خاک در شرایط متناظر، اثر ضخامت باعث گردید تا کوچک‌نمایی با اختلاف ۰/۱ فاصله‌ی بی‌بعد از رأس تپه کوچک‌نمایی در فاصله‌ی نزدیک‌تری رخ دهد. در فاصله‌ی پنجه‌ی تپه تا نزدیکی مرز دو لایه روی میانه‌ی یال تپه کوچک‌نمایی افزایش و در

نیمه‌ی بالایی تپه بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد و در ضخامت بسیار کمتری از لایه‌بندی، بزرگ‌نمایی مؤلفه‌ی جابه‌جایی در بالای تپه کمی کاهش می‌یابد. بزرگ‌نمایی در بالای تپه در مؤلفه‌ی سرعت کمتر از شتاب و در شتاب کمتر از جابه‌جایی حاصل شد. علاوه بر این با بررسی اثر زاویه‌ی لایه‌بندی بر پاسخ تپه‌های نیم‌سینوسی دو لایه مشخص گردید که در ضخامت لایه‌بندی برابر به ازای زاویه‌دار شدن لایه‌بندی، کوچک‌نمایی در پنجه‌ی سمت چپ که لایه‌ی سست‌تر سهم بیشتری دارد بدون تغییر و در ناحیه‌ی پنجه‌ی سمت راست کمتر شد. زاویه‌دار شدن لایه‌بندی با ضخامت برابر باعث شد کاهش بزرگ‌نمایی در یال سمت چپ در زاویه‌ی ۲۰ در فاصله‌ی ۰/۳ و در زاویه‌ی ۴۰ در فاصله‌ی کمتری مشاهده شود.

در اثر توأم زاویه و ضخامت لایه‌بندی در تپه‌های دو لایه به ازای کم شدن ضخامت لایه‌ی بالایی با زاویه‌ی لایه‌بندی، مقادیر کوچک‌نمایی در صد ناچیزی افزایش یافتند. افزایش نسبی بزرگ‌نمایی در ناحیه‌ی مرز دو لایه به سمت بالا روی یال سمت راست و افزایش بزرگ‌نمایی در ناحیه‌ی لایه‌ی بالایی حاصل شد. درصد افزایش بزرگ‌نمایی در مؤلفه‌ی شتاب بیشتر بوده است. به ازای افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی تا ۴۰ درجه تغییرات کاهش ضخامت لایه‌بندی اثر کمتری داشت.

با قرارگیری لایه‌ی سست در بالا، در نزدیکی رأس تپه، نتایج به‌صورت بیشینه‌ی مقادیر بزرگ‌نمایی به دست می‌آیند و با قرارگیری لایه‌ی سست در پایین، در نزدیکی دامنه‌ی تپه نتایج به‌صورت کوچک‌نمایی حاصل شد و بزرگ‌نمایی تنها در مؤلفه‌های جابه‌جایی در حد فاصل بی‌بعد ۰/۴ از رأس تپه روی لایه‌ی سخت بالایی از طرفین حاصل شد. در فاصله‌ای از دامنه‌ی تپه تا پنجه‌ی آن نتایج نزدیک به مقدار یک و در مرز بین دو لایه کمترین مقادیر حاصل شده است و نیمه‌ی بالایی تپه در مؤلفه‌های سرعت و شتاب مقادیر کوچک‌نمایی را تجربه نمود. این پژوهش به بررسی تأثیر لایه‌بندی تپه‌های نیم‌سینوسی در مطالعات ژئوتکنیکی لرزه‌ای پرداخته است و نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد. علی‌رغم این موضوع، تحقیق حاضر

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., Gatmiri, B., & Sohrabi-Bidar, A. (2007). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 23, 871-887.

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.

Li, S., Zhang, F., Wang, M., Cheng, Z., 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. *The 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japan.

Mossessian, T.K. & Dravinski, M. (1987). Application of a hybrid method for scattering of P, SV and rayleigh waves by near irregularities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77(1), 784-803.

Nazari, A., Baziar, M. H., and Shahnazari, H. (2010). Seismic effects of two-dimensional semi-sine shaped hills on ground motion response. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1159-1170.

Ning, L., Dai, T., Wang, L., Yuan, S., & 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).

محدودیت‌هایی دارد که می‌تواند زمینه مطالعات آتی را فراهم کند. این مطالعات می‌توانند شامل بررسی ضخامت‌ها و زوایای لایه‌بندی متفاوت، استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک (شامل روانگرایی)، تحلیل با استفاده از داده‌های واقعی زلزله و بررسی تأثیرات ارتفاع و شکل تپه، فرکانس و میرایی باشند.

References

مراجع

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

Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., & Shareghi, A. (2014). Spectral assessing of topographic effects on seismic behavior of trapezoidal hill. *World Academy of 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. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 19(4), 285-298.

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).

Bakavoli, M. K., Haghshenas, E., Bolouri Bazzaz, J., & Bakavoli, M. K. (2012). Effect of nearby topography on amplification of seismic motion in topographic irregularities: The case of a hilly site in Tehran. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.

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.

Dravinski, M. & Mossessian, T.K. (1987). Scattering of harmonic P, SV and rayleighWaves by dipping layers of arbitrary shape. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 212-235.

Itasca Consulting Group. (2005). *Fast Lagrangian Analysis of Continua – User's manual*.

topography: Modeled by a PIBEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 320-333.

Sanchez-Sesma, F. J. (1987). Site effects on strong ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 6(3), 124-132.

Shareghi, A., Amelsakhi, M., & Sohrabi-Bidar, A. (2014). Evaluation of earthquake waves amplification due to trapezoidal hill by 1D and 2D time domain analysis. *Engineering Geology*, 8(4), 2389-2413 (in Persian).

Shoari-shoar, M. (2020). *Soil Dynamics: Description and Lessons* (3rd ed.). Noavar Publication (in Persian).

Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., & Jafari, M. K. (2009a). Seismic waves scattering in three-dimensional homogeneous media using time-domain boundary element method. *Earth and Space Physics*, 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. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1429-1442.

Sohrabi-Bidar, A., Amelsakhi, M., Shareghi, A., & Maghami, S. (2019). Seismic amplification of peak ground acceleration, velocity, and displacement by two-dimensional hills. *Iranian Journal of Geophysics*, 12(5), 68-81.

Trifunac, M. D. (1971). Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(6), 1755-1770.

Wong, H. L. (1982). Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 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

Numerical Study of the Effect of Layering Thickness and Angle on the Amplification of the Two-layered Semi-Sine Hill

Mohammad Hossein Nateqi¹ and Masoud Amelsakhi^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran,

*Corresponding Author, email: amelsakhi@qut.ac.ir

When seismic waves travel from the bedrock into soil layers, resonance occurs. Generally, the concept of resonance means that the level of damage to surface structures increases. The closer the characteristics of soil layers are to each other, the less resonance occurs; conversely, the more different these layers are from one another, the greater the resonance. Therefore, the presence of soft soil over bedrock causes amplified acceleration to be transferred to the foundation of the structure, increasing the likelihood of damage to the structure. Topographic amplification refers to the phenomenon where seismic waves are enhanced or altered as they interact with the topography of a site, such as hills, valleys, and ridges. This amplification can significantly influence the seismic response of structures, leading to increased ground motion and potentially greater damage during an earthquake. Investigating topographic amplification and its effects on the seismic response of topographic sites is an important issue that has attracted considerable interest from many researchers. Studies in the area of topographical influences have shown that the nature of the terrain is instrumental in influencing the level of damage caused by earthquakes. Local topographical formations can enhance intense ground movements during earthquakes, resulting in significant damage.

Iran is located in a seismically active region, with many areas in the country adjacent to various topographies, especially hills. Given the presence of active faults in the country and a history of significant earthquakes, it is essential that the design and construction of structures are carried out in a way that provide sufficient resistance to these influential factors. Studies and research conducted on the effects of topography and the phenomenon of seismic wave amplification as they pass through surface layers have shown that topography has a considerable impact on the extent of earthquake damage.

In this research, the hill model in the form of a semi-sinusoidal shape is examined in two layers, as well as the effects of this type of site on the amplification of ground response. By modeling several semi-sine hills with different stratifications using FLAC software under Rayleigh wave conditions, the impact of topography is investigated. Before conducting the modeling, the accuracy of the analytical method must be verified. For this purpose, validation studies from Wang (1982) and results from other researchers will be used to authenticate the analysis of two problems. Finally, to ensure the accuracy of the FLAC software, a similar model will be constructed, and by applying a Rayleigh wave, the desired parameters will be determined at various points of the site (semi-sinusoidal hills) and compared with the graphs from the article. This research examines how a frequently found topographical feature, particularly semi-sinusoidal hills, influences the seismic reaction of the Earth's surface when exposed to vertically propagating SV waves.

The main objective of this research is to examine the effects of various layering at a specific type of site, namely semi-sinusoidal hills. The study aims to model and analyze the seismic response of this type of site, investigating the impact of surface topography on seismic behavior and comparing the results obtained from the analysis under different conditions. In this research, efforts have been made to investigate the seismic behavior of sinusoidal hills under different layering conditions to determine the effects of soil characteristics in the layers, as well as the thickness and angle of the layers on the results obtained.

This study investigated how layering affects the response of semi-sinusoidal hills by analyzing hills with two layers, each featuring different layering characteristics and thicknesses. The study also examines the impact of soil

characteristics, layering thickness and angle as well as the position of the looser layer. Different features in layering have an impact on the overall trend of amplification on the top of hills and de-amplification near the toes of hills in response to the horizontal components of displacement, velocity, and acceleration. The study revealed that in two-layer hills, the effects of soil characteristics are greater compared to the thickness and angle of layering. Overall, the most significant change in the acceleration component was observed when the upper layer was loosened in two-layer hills. Conversely, the smallest change in all three components occurred when the upper layer was halved.

Keywords: Site Effect, Amplification, Semi-Sinusoidal Hill, Layering.