

مطالعه‌ی اثرات مشخصات مختلف لایه‌بندی بر پاسخ تپه‌های نیم‌سینوسی دولایه و سه‌لایه

محمدحسین ناطقی^۱، مسعود عامل سخی^{۲*} و مرتضی ناطقی^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

^۲استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳)

چکیده

بررسی پدیده بزرگنمایی توپوگرافی و پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، موضوعی مهم است که پیش‌تر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در زمینه اثرات توپوگرافی و همچنین پدیده بزرگنمایی امواج زلزله در عبور از لایه‌های سطحی نشان داده‌اند که توپوگرافی تأثیر زیادی بر میزان خسارت ناشی از زلزله‌ها دارد. مشخصات محلی توپوگرافی، حرکات شدید زمین را در طول زلزله تقویت کرده و در نهایت منجر به خسارات فراوان می‌شوند. در این مقاله، اثرات ساختگاه تپه نیم‌سینوسی شکل که یکی از رایج‌ترین اشکال توپوگرافی در طبیعت است، بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین که تحت تأثیر امواج عمودی برشی (SV) قرار دارد، با استفاده از برنامه FLAC 2D، نرم‌افزار تفاضل محدود دو بعدی، مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌سازی عددی، رفتار الاستیک خطی به کار رفته است. به منظور بررسی اثرات لایه‌بندی بر پاسخ تپه‌های نیم‌سینوسی، تپه‌های دولایه و سه‌لایه با مشخصات و ضخامت‌های مختلف لایه‌بندی به عنوان مبنای این مقاله در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق، تأثیر مشخصات خاک، ضخامت لایه‌بندی و موقعیت لایه سست مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که ویژگی‌ها و ضخامت لایه‌بندی و موقعیت لایه سست تأثیراتی بر روند کلی بزرگنمایی در بالای تپه‌ها و کاهش بزرگنمایی در نزدیکی پهنه‌ی تپه‌ها در پاسخ به حرکت افقی برای مؤلفه‌های شتاب، سرعت و جابجایی دارند.

کلید واژه: اثرات ساختگاه، بزرگنمایی، تپه نیم‌سینوسی، لایه‌بندی، موجک ریکر

۱ مقدمه

اثرات ساختگاه نقش حیاتی در تعیین شدت پاسخ‌های لرزه‌ای که در طول زلزله تجربه می‌شوند، ایفا می‌کند. به همین دلیل، بسیاری از متخصصان مانند سانچز-سسما (۱۹۸۷)، ترتولیانی (۱۹۹۹)، گونزالز و همکاران (۲۰۰۴)، ماسا و همکاران (۲۰۱۴)، پانزرا و همکاران (۲۰۱۸)، پاگلیارولی و همکاران (۲۰۱۸) و ایثاری و همکاران (۲۰۲۰) علاقه فزاینده‌ای به مطالعه در این زمینه نشان داده‌اند. با وجود اینکه مطالعات و تحقیقات زیادی درباره‌ی تأثیر توپوگرافی بر حرکات زمین در طول زلزله و خسارات ناشی از آن انجام شده است، خسارات قابل توجهی همچنان مشاهده می‌شود. این امر نیاز به تحقیقات بیشتر در خصوص شیوه‌های ساخت و ساز در طول زلزله‌های بزرگ را نشان می‌دهد. با تحلیل این مطالعات و خسارات ناشی از زلزله‌ها، می‌توان اهمیت تأثیرات توپوگرافی را مشخص نمود. در موارد متعددی، خسارات مشاهده شده ناشی از زلزله تأثیر قابل توجهی از بزرگنمایی توپوگرافی را نشان می‌دهند. بسیاری از مطالعات دیگر نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند، از جمله دراوینسکی و موسسیان (۱۹۸۷)، کاواس (۱۹۸۸)، گلی و بارد (۱۹۸۸)، کاواس (۱۹۹۶)، بوکوالاس و کورتزیس (۲۰۰۱)، بوکوالاس و پاپادیمیتریو (۲۰۰۵)، کمالیان و همکاران (۲۰۰۶)، سهرابی بیدار و کمالیان (۲۰۱۳)، مالکی و خداکرمی (۲۰۱۷)، پلکیس و همکاران (۲۰۱۷)، علی‌الهی و آدامپیرا، (۲۰۱۸)، سکستوس و همکاران (۲۰۱۸)، افضل‌راد و همکاران (۲۰۱۹)، براندو و همکاران (۲۰۲۰) و کیارادونا و همکاران (۲۰۲۳). اثرات عارضه‌های سطحی توپوگرافی مانند تپه‌ها و دره‌ها (بارد، ۱۹۸۲) و (آسیماسکی و همکاران، ۲۰۰۵)، همچنین اثرات ترکیبی آنها بر بزرگنمایی زلزله، به طور گسترده‌ای در ادبیات مهندسی ژئوتکنیک مورد بررسی قرار گرفته است (ترتولیانی و مارامای، ۱۹۹۸)، (پاتولوتی، ۲۰۰۲)، (کریبر و همکاران، ۲۰۱۵) و (پنجی و حبیبی‌وند، ۲۰۲۰).

علاوه بر این، با در نظر گرفتن ارزیابی عددی اثرات ساختگاه بر حرکات زمین، بوشون (۱۹۷۳) برای اولین بار تپه‌ای با شکل نیم‌سینوسی را با استفاده از نسبت‌های مختلف شکل بررسی نمود. این کار از طریق پراکنده کردن امواج SH انجام شد. بارد (۱۹۸۲) تحقیقاتی در مورد پراکنندگی و انتشار امواج P و SV ناشی از ناهنجاری‌های سطحی انجام داد. سانچز-سسما و کامپیو (۱۹۹۱) رفتار لرزه‌ای تپه‌های با شکل نیمه‌بیضوی و مثلثی و دره‌های نیمه‌دایره‌ای، نیمه‌بیضوی و مثلثی را تحت انتشار امواج P، SV و ریلی مورد مطالعه قرار دادند. سپس سانچز-سسما و کامپیو (۱۹۹۳) به بررسی دره‌ها و تپه‌های نیمه‌بیضوی و مثلثی پرداختند. آشفورد و همکاران (۱۹۹۷) دامنه کاملی از زوایای شیب را بررسی کرده و به بررسی انتشار عمودی امواج SH و SV پرداختند. ژانگ و همکاران (۱۹۹۸) فرمولاسیون ترکیبی از مسئله 2.5D را ارائه دادند که شامل روش‌های المان محدود و المان مرزی برای مطالعه دره‌ها و دره‌های نیمه‌دایره‌ای بود. کمالیان و همکاران (۲۰۰۳) از یک فرمولاسیون تقویت شده از روش المان مرزی دو بعدی در دامنه زمان برای انجام تحلیل پاسخ سایت ساختارهای توپوگرافی در معرض امواج P، SV و رایلی استفاده کردند. بوکوالاس و پاپادیمیتریو (۲۰۰۵) نتایج تجزیه و تحلیل‌های عددی را که برای بررسی پاسخ لرزه‌ای شیب‌های زمین به صورت پله‌ای در خاک و اسکوالاستیک یکنواخت تحت تأثیر امواج SV عمودی انجام شده بود، مطالعه کردند. کمالیان و همکاران (۲۰۰۶) دیدگاه‌های روشنی از الگوهای تقویت 2D را برای دره‌های نیمه‌سینوسی همگن تحت تأثیر امواج SV و P عمودی ارائه کردند که از طریق یک تحلیل عددی پارامتریک گسترده به دست آمده بود. نگوین و گتمیری (۲۰۰۷) انواع مختلف توپوگرافی مانند شیب‌ها، دره‌ها و قله‌ها را در نظر گرفته و تأثیر قابل توجه شرایط محلی توپوگرافی را بر تغییر حرکات لرزه‌ای زمین درون ویژگی نامنظم و منطقه اطراف

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات جامع در مورد رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیمه‌سینوسی 2D تحت تأثیر امواج SV ورودی با ویژگی‌های لایه‌ای متنوع بسیار کم است. برخلاف کارهای منتشر شده قبلی که عمدتاً تپه‌های همگن را در دامنه فرکانس بررسی کرده‌اند، این مقاله نتایج یک مطالعه پارامتریک عددی را ارائه می‌دهد که الگوی بزرگنمایی تپه‌های نیم‌سینوسی ناهمگن دوبعدی را مورد بررسی قرار می‌دهد. این مطالعه بر پاسخ به امواج SV ورودی عمودی از نوع ریکر متمرکز شده و به طور خاص حداکثر مقادیر پارامترهای حرکتی زمین در دامنه زمان، از جمله شتاب اوج زمین (PGA)، سرعت اوج زمین (PGV) و جابجایی اوج زمین (PGD) را در نظر می‌گیرد.

۲ صحت‌سنجی

تحلیل مسأله در این مطالعه با استفاده از روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار FLAC انجام شده است. مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن یک دره نیم‌دایره‌ای با شعاع ۲۵ متر در یک محیط الاستیک بدون میرایی انجام شده است. شکل ۱ هندسه و شرایط مرزی مدل را نشان می‌دهد. خاک در مدل دارای سرعت موج برشی $V_s = 500 \text{ m/s}$ ، نسبت پواسون $\nu = 1/3$ و چگالی جرم $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ است. برای شبیه‌سازی محیط نیمه‌بی‌نهایت، شرایط مرزی منطقه آزاد و مرزهای آرام استفاده شده است. علاوه بر این، فاصله بین مرزها و ناهمواری‌ها به‌دقت انتخاب شده است تا اطمینان حاصل شود که میرایی مرزهای جاذب تأثیری بر نتایج مورد نظر در نقاط خاص نداشته باشد و از هرگونه انعکاس نادرست موج‌ها در سطوح مورد نظر جلوگیری شود.

مدل مورد نظر در معرض موجک ریکر SV قرار گرفت.

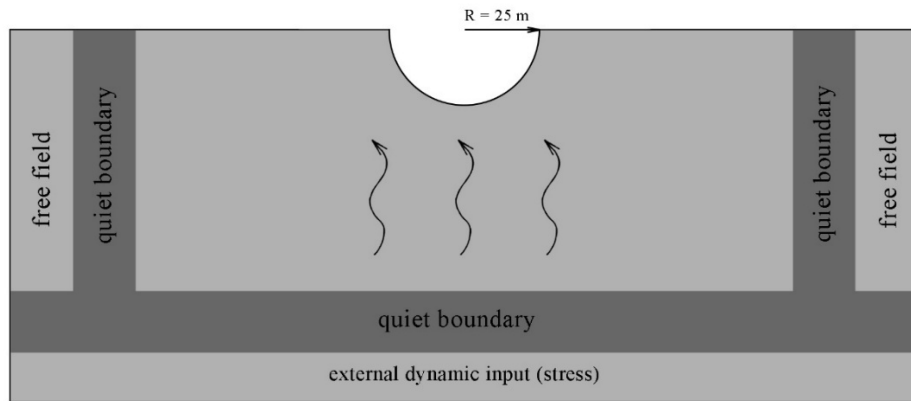
رابطه (۱) معادله جابجایی موجک را نشان می‌دهد.

$$f(t) = A_{max} \left[1 - 2 \left(\pi f_p (t - t_0) \right)^2 \right] e^{-\left(\pi f_p (t - t_0) \right)^2} \quad (1)$$

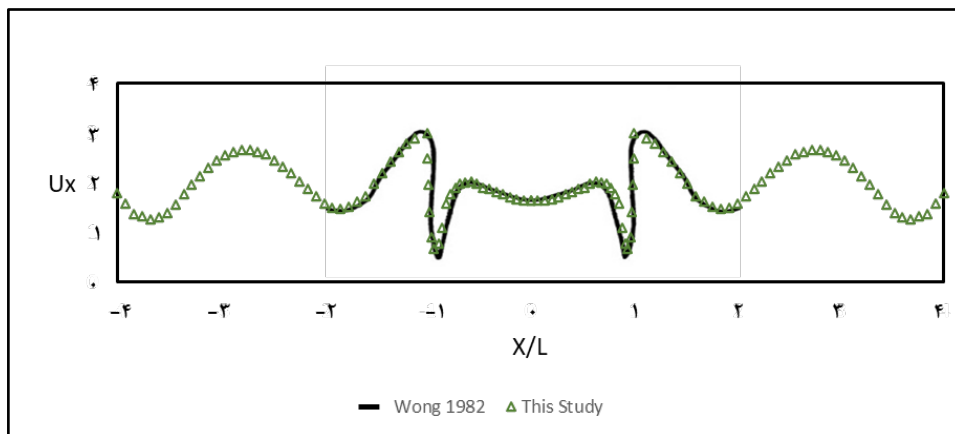
آن بررسی کردند. کمالیان و همکاران (۲۰۰۸) نتایج یک مطالعه پارامتریک عددی در مورد رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی دو بعدی را تحت تأثیر امواج ورودی عمودی ارائه کردند. سهرابی-بیدار و همکاران (۲۰۱۰) از تحلیل عددی پارامتریک گسترده‌ای با استفاده از روش المان مرزی در دامنه زمان برای یک دره به شکل گاوسی سه بعدی در معرض امواج S و P عمودی استفاده کردند. لیو و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر تعامل بین تپه‌های مثلثی و نیمه‌دایره‌ای تحت امواج SH ورودی را بررسی و ارزیابی کردند. این تعامل منجر به تقویت قابل توجهی در دامنه‌ها در منطقه ارتباطی بین آنها شده است. عامل‌سختی و همکاران (۲۰۱۴) پاسخ لرزه‌ای اندازه‌های مختلف تپه‌های ذوزنقه‌ای را با تحلیل انتشار عمودی امواج زلزله ثبت شده مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه دیگری عامل‌سختی و همکاران (۲۰۱۷) رفتار لرزه‌ای چنین تپه‌هایی را بررسی کردند. افضل‌راد و همکاران (۲۰۱۹) مدل تقویت تپه‌های نیمه‌سینوسی همگن 2D را که از طریق تحلیل‌های عددی به دست آمده بود، مطالعه کردند. سهرابی بیدار و همکاران (۲۰۱۹) دیدگاه‌های متفاوتی در مورد بزرگنمایی شتاب زمین، سرعت و جابجایی اوج برای تپه‌های گاوسی دو بعدی تحت تأثیر موج ریکر SV عمودی ارائه کردند. ایثاری و تارینجاد (۲۰۲۱) به تحلیل دقیقی از تحریک غیر یکنواخت بر روی توپوگرافی V شکل با استفاده از روش المان مرزی در دامنه زمان پرداختند. این تحلیل بر پراکندگی امواج متمرکز بود و بر روی توپوگرافی در معرض امواج SV در فرکانس‌های غالب و نسبت‌های شکلی مختلف انجام شد. سهرابی بیدار و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی دوبعدی نرم‌افزاری، اثرات توپوگرافی را بر اساس جابجایی، سرعت و شتاب مطالعه کردند. عامل‌سختی و هراتی (۲۰۲۴) بر روی تپه‌های ذوزنقه‌ای اثرات توپوگرافی را مورد تحقیق قرار دادند.

تاریخچه زمانی موج ورودی است، در حالی که f_p نمایانگر فرکانس غالب موجک ریکر است. در نهایت، t_0 زمان

که در آن جابجایی افقی موجک ریکر را در زمان معین t نمایش می‌دهد. A_{max} نشان‌دهنده حداکثر دامنه



شکل ۱. هندسه مدل و شرایط مرزی.



شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج حل عددی در نرم‌افزار FLAC با نتایج حل تحلیلی وانگ (۱۹۸۲)

خوبی بین نتایج برنامه FLAC و نتایج وانگ (۱۹۸۲) وجود دارد.

در شکل ۲، محور افقی نسبت بدون بعد فاصله نقاط از مرکز دره (X) به نصف عرض دره (L) را نشان می‌دهد. محور عمودی نیز حداکثر نسبت پاسخ مؤلفه جابجایی افقی در نقاط مختلف سطح زمین را به حداکثر دامنه جابجایی موج ریکر ورودی نمایان می‌کند.

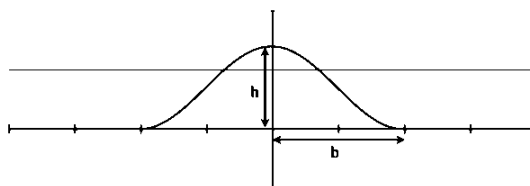
وقوع حداکثر دامنه را نشان می‌دهد. معادله سرعت به عنوان مشتق رابطه (۱) به دست می‌آید. پس از آن، تاریخچه تنش برشی با جایگزینی سرعت در معادله تنش برشی رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\sigma_{xy} = 2(\rho C_s) V_s \quad (2)$$

که در آن σ_{xy} تنش برشی، ρ چگالی محیط، C_s سرعت موج برشی در محیط و V_s معادله سرعت (یا تاریخچه سرعت) است. در نهایت، نتایج تحلیل دینامیکی با نتایج حل وانگ (۱۹۸۲) مقایسه شد. شکل ۲ نشان می‌دهد که توافق

۳ مدل‌سازی

تحقیقات در این مطالعه با استفاده از روش تنش صفحه‌ای و با کمک نرم‌افزار FLAC دوبعدی انجام شده است. این مطالعه تأثیر سرعت موج پرشی، ضخامت لایه‌ها و موقعیت لایه‌ی سست در خاک را بررسی می‌کند و به تحلیل بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر جابجایی زمین (PGD) در دامنه زمانی می‌پردازد. برای مدل‌سازی تمام تپه‌ها در این مطالعه، نسبت شکل h/b برابر با مقدار ثابت 0.7 تعیین شده است. این پارامتر هندسی نسبت ارتفاع تپه به نصف عرض آن را نشان می‌دهد. در این مطالعه، شکل نیم‌سینوسی به‌عنوان یک شکل متعارف برای نمایش ساختگاه‌های تپه‌ای انتخاب شده است. شکل ۳ ویژگی‌های هندسی تپه نیم‌سینوسی را نشان می‌دهد و رابطه (۳) هندسه تپه را توصیف می‌کند.



شکل ۳. مشخصات هندسی تپه نیم‌سینوسی.

از آنجا که $\sin(\alpha + \pi/2) = \cos\alpha$ ، معادله هندسی به سادگی قابل استخراج است، که توسط کمالیان و همکاران (۲۰۰۸) نیز ارائه شده است.

(۳)

$$y(x) = \frac{0}{5}h \left(1 + \sin\left(\frac{\pi x}{b} + \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad |x| \leq b$$

$$y(x) = 0 \quad |x| > b$$

که در آن پارامترهای b و h به ترتیب نمایانگر نصف عرض و ارتفاع تپه هستند و پارامترهای x و y به ترتیب نمایانگر طول و عرض از مبدا تا نقطه‌ی در امتداد راس تپه هستند.

مطالعات متعددی مانند کمالیان و همکاران (۲۰۰۶)، کمالیان و همکاران (۲۰۰۶)، کمالیان و همکاران (۲۰۰۷)، کمالیان و همکاران (۲۰۰۸)، سهرابی بیدار و کمالیان (۲۰۱۳) و احمدی شیروانی و همکاران (۲۰۱۴) دامنه‌ی پریرود

را بین $0.25/0.33$ تا $0.33/0.33$ تعیین کرده‌اند. این دامنه شامل امواجی است که طول موج‌های آن‌ها $0.25/0.33$ تا $0.33/0.33$ برابر عرض توپوگرافی است. در مطالعه حاضر، پریرود بدون بعد برابر با $0.325/0.33$ تنظیم شده است که معادل فرکانس بدون بعد $0.33/0.33$ است.

میرایی رایلی، رایج‌ترین نوع میرایی مکانیکی در تحلیل‌های دینامیکی است. میرایی رایلی معمولاً در مطالعات دامنه زمانی استفاده می‌شود (قنبری و حسینی، ۱۳۹۵). در تحلیل‌های دینامیکی، برای مصالح ژئوتکنیکی، نسبت میرایی معمولاً برابر با 2 تا 5 درصد از میرایی بحرانی است (ایتاسکا، ۲۰۰۵). برای تخصیص میرایی رایلی در این مطالعه، نسبت میرایی $0.5/0.5$ انتخاب و فرکانس مرکزی هر مدل برابر با فرکانس طبیعی آن در نظر گرفته شد. برای محاسبه فرکانس طبیعی مدل‌های تحلیل شده، هر مدل بدون در نظر گرفتن اثرات میرایی در معرض نیروی دینامیکی جاذبه قرار گرفت و منجر به ارتعاش بدون میرایی شد. از آنجا که میرایی وجود نداشت، ارتعاش مدل برای تعداد مشخصی از گام‌ها ادامه یافت. در ادامه، با بررسی جابجایی عمودی در طول زمان برای یک نقطه مشخص روی مدل، فرکانس طبیعی خاک بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از نوسانات تعیین شد (ایتاسکا، ۲۰۰۵).

تحلیل‌های دینامیکی در مطالعات عددی می‌تواند گاهی منجر به اختلالاتی ناشی از شرایط مدل‌سازی شود. کوهلمایر و لیسمر (۱۹۷۳) بیان می‌کند که برای اطمینان از شرایط دقیق انتقال موج در یک محیط سنگی، بایستی نواحی با ابعاد کوچکتر از یک دهم یا یک هشتم طول مدل ایجاد شود (رابطه ۴).

$$\Delta l = \frac{\lambda}{8} \sim \frac{\lambda}{10} \quad (4)$$

که در آن Δl اندازه بزرگ‌ترین المان و λ طول موج است. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و در نظر گرفتن لایه‌بندی با مشخصات متنوع در مدل‌های تپه، کوچکترین ابعاد نواحی برای تمام مدل‌های تحت بررسی به کار گرفته شد.

شیه‌سازی می‌شود. در تمام مدل‌ها، شامل مدل‌های دولایه و سه‌لایه، یک لایه به‌عنوان لایه ضعیف با سرعت موج برشی پایین‌تر نسبت به لایه‌های دیگر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۴)، مصالح در بستر سنگی از تیپ I و لایه‌های تپه از تیپ II (بسیار متراکم) و دو نوع دیگر مصالح از تیپ III-A (متراکم) و تیپ III-B (متوسط) برای لایه‌های سست و سست‌تر در نظر گرفته شد. مقادیر سرعت موج برشی (V_c) برای هر لایه در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک در لایه‌ها.

V_c (m/s)	ρ (kg/m ³)	v	نوع خاک
۸۰۰	۲۵۰۰	۰/۴۵	تیپ I (سنگ بستر)
۵۰۰	۲۰۰۰	۰/۴۰	تیپ II (بسیار متراکم)
۳۰۰	۱۸۰۰	۰/۳۵	تیپ III-A (متراکم)
۲۶۰	۱۶۰۰	۰/۳۰	تیپ III-B (متوسط)

علاوه بر این، ایتاسکا (۲۰۰۵) سازگاری نسبت پواسون (ν) و چگالی (ρ) لایه‌های خاک فرض شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. ناوارت و همکاران (۲۰۱۳)، به‌عنوان مثال، می‌تواند مشخصات انتخاب‌شده بستر سنگی را بر اساس مطالعات موردی تأیید کند. علاوه بر این، مقادیر سرعت موج برشی بر اساس طبقه‌بندی ذکر شده در راهنماها یا استانداردهایی مانند ویر و همکاران (۲۰۱۲) و استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۴) انتخاب شده است. در نتیجه، مشخصات لایه‌های خاک به‌عنوان فرضیه‌ها و مثال‌هایی از انواع مختلف خاک تعیین شدند. این موارد بر اساس مطالعات مذکور به‌دست آمده و برای مدل‌سازی استفاده خواهند شد. شایان ذکر است که در این تحقیق، تمام مدل‌ها بدون حضور آب زیرزمینی در نظر گرفته شده‌اند. این بدان معناست که مدل‌سازی لایه‌های خاک همه به‌صورت خشک صورت پذیرفت.

بنابراین، ابعاد نواحی بر اساس حداقل سرعت موج برشی در محیط انتخاب شد (رابطه ۵).

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} = \frac{V_s}{10 f_{max}} = \frac{260}{10 \times 4} = 6.5 \quad (5)$$

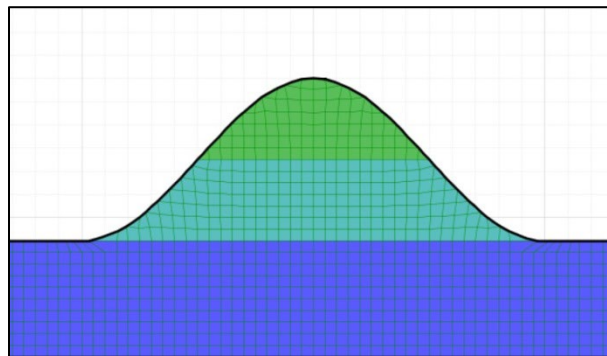
برای بررسی اثر لایه‌بندی و حضور یک لایه سست در موقعیت‌های مختلف در لایه‌بندی تپه، چهار نوع مصالح استفاده شده است. مشخصات این مصالح در جدول ۱ ارائه گردید. مدل تپه سپس بر روی محیط بستر سنگی قرار می‌گیرد و با ۲ یا ۳ لایه خاک با ضخامت‌های متغیر

مقادیر سرعت موج برشی، چگالی و نسبت پواسون مربوط به لایه‌های خاک به‌عنوان فرضیه‌های تحقیق در نظر گرفته شده و بر اساس مطالعات، راهنماها و مثال‌های حل شده توسط محققان قبلی انتخاب شده‌اند. مقادیر چگالی (ρ) و نسبت پواسون (ν) از طبقه‌بندی ارائه شده توسط داس (۱۹۹۴)، آشتو (۲۰۱۲) و ایتاسکا (۲۰۰۵) به دست آمده است. بر اساس آشتو (۲۰۱۲)، نسبت پواسون (ν) برای ماسه متراکم و ماسه سست از ۰/۳۰ تا ۰/۴۰ و از ۰/۲۰ تا ۰/۳۶ متغیر است. به‌طور مشابه، ایتاسکا (۲۰۰۵) و داس (۱۹۹۴) هر دو مقادیر مشابهی از نسبت پواسون (ν) را در دامنه ۰/۳۰ تا ۰/۴۵ برای ماسه متراکم و ۰/۲۵ تا ۰/۴۰ برای ماسه سست در نظر گرفته‌اند. همچنین جرسک (۲۰۰۷) و حسین و همکاران (۲۰۲۲) پیشنهاد کرده‌اند که دامنه ۰/۰۵ تا ۰/۴۵ نسبت پواسون را برای اکثر سنگ‌ها پوشش می‌دهد. این موضوع تأییدکننده بالاترین مقدار نسبت پواسون انتخاب شده در این تحقیق است (جدول ۱).

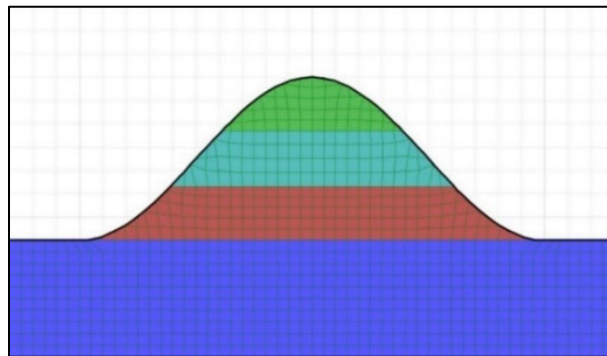
لایه‌های افقی با ضخامت یکسان را نشان می‌دهد. با توجه به منبع انرژی دینامیکی که از قسمت پایینی مدل اعمال می‌شود، مرزهای جانبی نباید توسط مرزهای جاذب انرژی میرا شده باشند؛ بلکه باید از مرزهای میدان آزاد استفاده شود تا از هدر رفتن انرژی موج از بخش‌های جانبی جلوگیری شود. این مرزهای میدان آزاد، مرزهای جانبی را به شبکه میدان آزاد با استفاده از میراگرهای ویسکوز متصل می‌کنند و اجازه می‌دهند امواج بدون هیچ گونه تغییری در مرزها به سمت بالا منتشر شوند. با اعمال مرزهای میدان آزاد به مرزهای جانبی، بازتاب امواج به حداقل می‌رسد (ایتاسکا، ۲۰۰۵) و (آیین‌نامه شماره ۶۲۴، ۱۳۹۱). شکل ۶ شرایط مرزی مدل‌سازی و اعمال تنش از بستر سنگی را نشان می‌دهد.

در هندسه تپه‌های دولایه، لایه بالایی به‌عنوان لایه سست با ضخامت دو برابر، نصف یا برابر با ضخامت لایه بسیار متراکم در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال، شکل ۴ مدلی از یک تپه نیم‌سینوسی دولایه با لایه‌های افقی با ضخامت یکسان را نشان می‌دهد. در تپه‌های سه‌لایه، لایه سست به‌عنوان لایه میانی قرار گرفته است. این پیکربندی رفتار متمایزی نسبت به تپه‌های دولایه ایجاد می‌کند. اساساً، در تپه‌های سه‌لایه، تأثیر لایه بسیار متراکم بر لایه سست بررسی و نتایج حاصله با حالتی که لایه سست در قسمت بالایی تپه دولایه قرار می‌گیرد، نیز مقایسه می‌شود.

به‌طور مشابه، در تمام مدل‌های سه‌لایه، لایه نرم دارای ضخامت دو برابر، نصف یا برابر با ضخامت لایه‌های متراکم است. به‌عنوان مثال، شکل ۵ مدلی از یک تپه سه‌لایه با



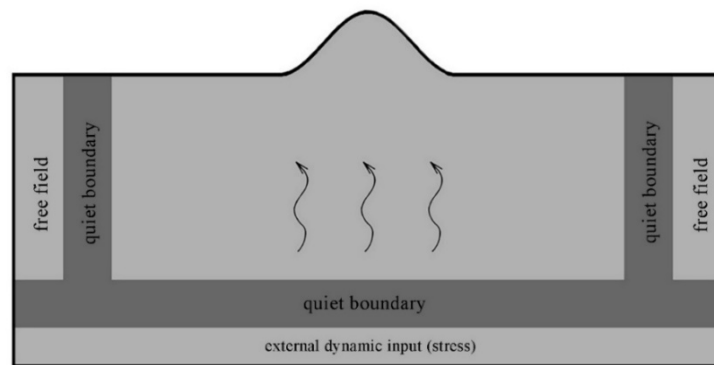
شکل ۴. نمونه‌ای از مدل‌سازی یک تپه نیم‌سینوسی با دولایه افقی و ضخامت لایه‌بندی برابر در FLAC.



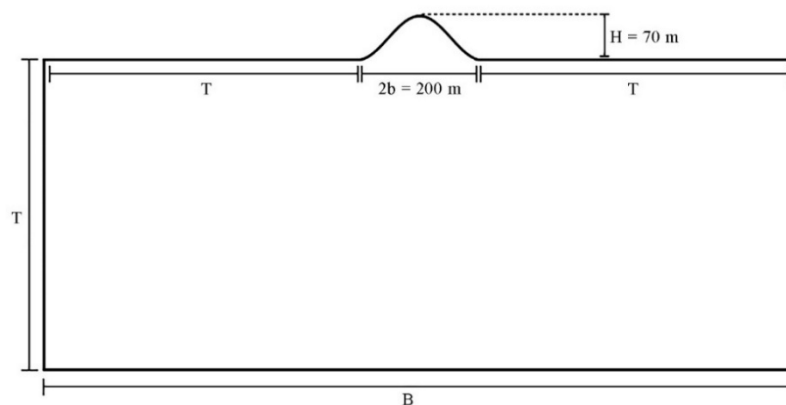
شکل ۵. نمونه‌ای از مدل‌سازی یک تپه نیم‌سینوسی با سه‌لایه افقی و ضخامت لایه‌بندی برابر در FLAC.

جدول ۲. مشخصات مدل در تحلیل حساسیت.

نوع خاک	ν	ρ (kg/m ³)	V_c (m/s)	f_p (Hz)
تیپ I	۰/۴۵	۲۵۰۰	۸۰۰	۴



شکل ۶. شرایط مرزی مدل‌سازی اعمال تنش از بستر سنگی.



شکل ۷. ابعاد مدل به کار رفته در تحلیل حساسیت.

وجود دارد. بنابراین، ابعاد پی برای این مدل خاص می‌تواند از نظر عرض و ارتفاع تعریف شود، همان‌طور که در طول فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، مشابه بسیاری از مطالعات ذکر شده در ادبیات پژوهش، موجک ریکر به عنوان موج تحریک ورودی استفاده شده است. پاسخ لرزه‌ای تپه‌های چندلایه در فرکانس ۴ هرتز بررسی شده است. مهم است توجه شود که هدف اصلی این مطالعه شامل بررسی اثرات ساختگاه در فرکانس‌های مختلف نیست. در بسیاری از مطالعات قبلی مانند کمالیان و همکاران (۲۰۰۶a)، باکاوولی و همکاران (۲۰۱۲) و افصلی راد و همکاران (۲۰۱۹)، توپوگرافی تحت تأثیر انتشار عمودی امواج SV و P از نوع موج Ricker قرار

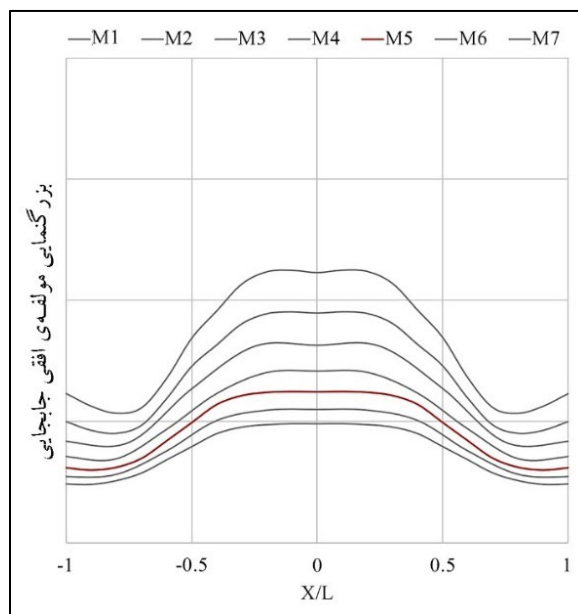
بوکوالاس و پاپادیمتریو (۲۰۰۵) عرض و ارتفاع مشبندی را به ترتیب ۵ و ۲۰ برابر ارتفاع مدل (H) تعیین نموده است. برای تعیین ابعاد مناسب (عرض و ارتفاع) پی برای یک تپه با عرض ۲۰۰ متر و ارتفاع ۷۰ متر (با نسبت ۰/۷)، مدلی با استفاده از خاک همگن با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ ایجاد شد. این مدل شامل یک فرآیند ۷ مرحله‌ای بود که شامل فاصله تپه از کناره‌ها و ارتفاع پی (T) بود، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است. مراحل از ۳ تا ۹ برابر ارتفاع تپه ($H = 70m$) متغیر بود.

در نتایج تحلیل حساسیت، پس از مقایسه مقادیر جابجایی حداکثر در تمامی هفت مدل بر اساس شکل ۸، می‌توان نتیجه گرفت که از مدل پنجم ($7H$) به بعد، تغییرات کمی

شتاب) در مدل توپوگرافی به حداکثر دامنه پارامترهای حرکتی در مدل میدان آزاد تعریف می‌شود. به زبان ساده، اگر حرکتی که ناشی از شتاب زمین در بستر سنگی است به‌عنوان U_1 و حرکتی که ناشی از شتاب منتقل شده در سطح خاک است به‌عنوان U_2 نشان داده شود، بزرگنمایی به‌عنوان نسبت این دو مقدار محاسبه می‌شود، همان‌طور که در رابطه ۶ توصیف شده است (شعاری شعار، ۱۳۹۹).

$$AMP = \frac{U_2}{U_1} \quad (6)$$

دارد و موج ریکر با فرکانس غالب (f_p) ۲ یا ۳ هرتز به کار گرفته شده است. در تمام مدل‌های بررسی شده در پژوهش حاضر، موج ریکر دارای فرکانس غالب ۴ هرتز، پارامتر جابجایی زمانی ۱/۰ ثانیه و حداکثر دامنه ۰/۰۰۱ متر است. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه بزرگنمایی مولفه‌های جابجایی، سرعت و شتاب را ارائه می‌دهد. به‌طور خاص، الگوی بزرگنمایی به منحنی تولید شده توسط مقادیر بزرگنمایی اشاره دارد. بزرگنمایی به‌عنوان نسبت حداکثر دامنه پارامترهای حرکتی (مولفه‌های جابجایی، سرعت و



شکل ۸. نتایج تحلیل حساسیت: مولفه افقی جابجایی توپوگرافی در ۷ مدل‌سازی.

جابگذاری شد. نتایج نشان داد که از راس تپه تا نیمه‌ی یال، بزرگنمایی کمتر از یک (کوچکنمایی) مشاهده شد (شکل‌های ۹ و ۱۰). با نزدیک شدن به بالای توپوگرافی، بزرگنمایی به حداکثر مقدار بدون بعد ۳ برای تمامی مولفه‌های جابجایی، سرعت و شتاب رسید. الگوی بزرگنمایی برای این مولفه‌ها تا فاصله بدون بعد ۰/۴ از راس ادامه داشت و در نزدیکی راس الگوی ملایمی را نشان داد. با بررسی مدل همگن بدون در نظر گرفتن تأثیر لایه‌بندی،

۴ بحث

۴-۱ اثرات مشخصات خاک

به منظور بررسی تأثیر مشخصات خاک، مقایسه‌هایی بین تپه‌های دولایه و سه‌لایه با نسبت پواسون، چگالی و سرعت موج برشی متفاوت انجام شد و این مدل‌ها با یک مدل خاک همگن (بدون لایه‌بندی) مقایسه شدند. در تپه‌های دولایه، خاک با سرعت موج برشی پایین‌تر در لایه بالایی قرار گرفت و در تپه‌های سه‌لایه، این خاک در لایه میانی

جابجایی، حدود ۰/۶ برای سرعت و ۰/۶ برای شتاب از راس تپه مشاهده شد.

در فاصله بین راس تپه و مرز دو لایه، الگوی کوچکنمایی از مقادیر کمتر از یک به الگوی بزرگنمایی و مقادیر بیشتر از یک منتقل می‌شود. اثر مرز بین دو لایه بعد از نیمه یال که به سمت راس تپه است، به وضوح قابل مشاهده است. با حرکت از نیمه یال (مرز بین دو لایه) به سمت راس تپه، تا فاصله ۰/۳ از راس، مقادیر بزرگنمایی در مؤلفه جابجایی نسبت به شرایط خاک همگن کمتر است. در همین فاصله، تغییرات مشخصات خاک در لایه بالایی در مؤلفه جابجایی بیشتر مشهود است. جالب اینجاست که تضعیف مشخصات خاک در این فاصله منجر به کاهش بزرگنمایی مؤلفه جابجایی می‌شود. از سوی دیگر، مؤلفه‌های سرعت و شتاب مقادیر بزرگنمایی مشابهی را برای هر دو لایه سست و سست‌تر حفظ می‌کنند. در فاصله ۰/۲ از راس، بزرگنمایی بیشتری رخ می‌دهد و با ضعیف‌تر شدن لایه بالایی، مقدار بزرگنمایی افزایش می‌یابد. این افزایش بزرگنمایی در مؤلفه‌های جابجایی و شتاب نسبت به مؤلفه سرعت بیشتر است. همچنین، تأثیر وجود لایه سست یا سست‌تر در راس تپه بیشتر در مؤلفه‌های جابجایی و شتاب نسبت به مؤلفه سرعت مشهود است. بنابراین، تأثیر تغییر مشخصات خاک در راس تپه در مؤلفه سرعت نسبت به دو مؤلفه دیگر کمتر است. با مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل سه مؤلفه در شکل ۹، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که الگوهای بزرگنمایی جابجایی و سرعت که با تمرکز موج در راس تپه مشخص می‌شوند، در بازه ۰/۱ تا ۰/۲ از راس تپه نسبتاً ثابت باقی می‌مانند. اما در مقایسه، مقدار بزرگنمایی در مؤلفه شتاب تنها در راس تپه به اوج خود می‌رسد.

بر اساس جدول ۳، می‌توان گفت که با سست‌تر شدن لایه بالایی تپه دولایه در ضخامت‌های مختلف، درصد افزایش بزرگنمایی مدل‌ها بیشتر از مدل همگن است، به جز در برخی موارد. با توجه به شکل ۱۰، کوچکنمایی در پنجه

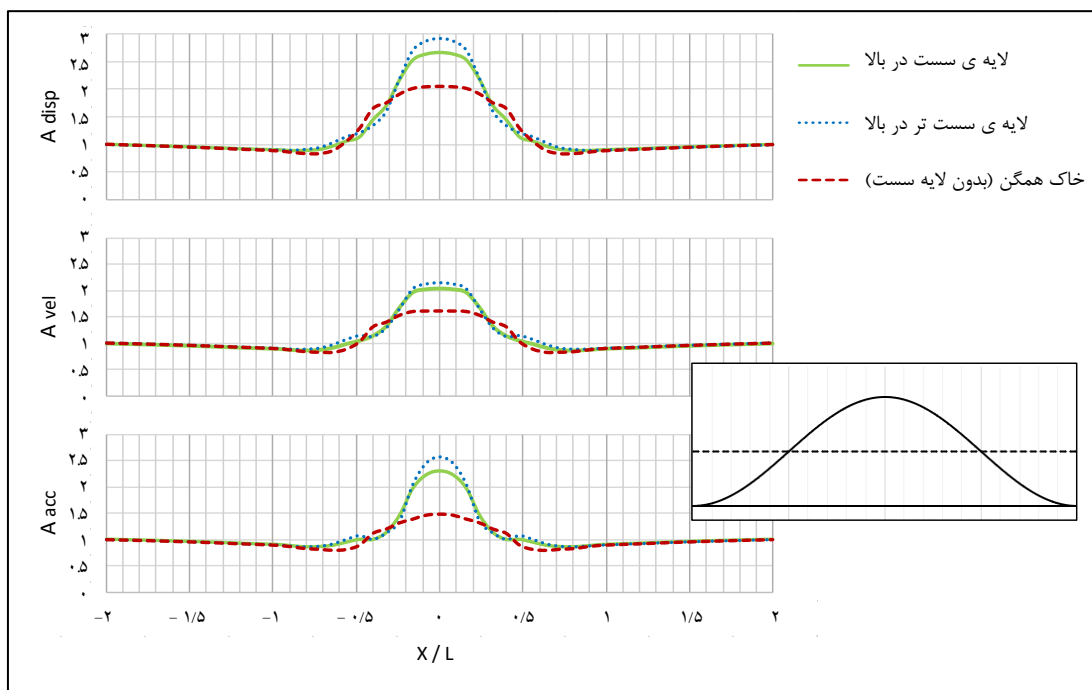
پاسخ مؤلفه‌های جابجایی، سرعت و شتاب در حوزه زمان در نقاط خاصی از تپه، یعنی پنجه، یال و راس تپه مشاهده شد. نتایج به این صورت است که کوچکنمایی برای جابجایی در فاصله ۰/۶، برای سرعت در فاصله ۰/۵ و برای شتاب در فاصله ۰/۴۵ از راس رخ می‌دهد. کوچکنمایی با دور شدن از این نقاط کاهش می‌یابد. در الگوی شتاب، مقدار کاهش بیشتر از الگوی جابجایی است. الگوی کوچکنمایی در پنجه‌ی تپه ملایم است، در حالی که در نیمه بالایی راس الگوی بزرگنمایی تندتر است. به طور کلی، مؤلفه‌های جابجایی و سرعت مقادیر حداکثر بزرگنمایی ثابتی در نزدیکی ۲ و ۱/۶ را در فاصله ۰/۲ از راس نشان می‌دهند، بنابراین مؤلفه‌های جابجایی نسبت به سایر مؤلفه‌ها حساسیت بیشتری در مقادیر بزرگنمایی دارند. با در نظر گرفتن لایه‌بندی در مدل و تعیین مشخصات خاک‌های سست (یا سست‌تر) و همچنین تنظیم پارامترهای نسبت پواسون، چگالی ویژه و سرعت موج برشی برای لایه بالایی مدل دولایه، اثر مشخصات خاک در این مدل بررسی شد. مدل تپه دولایه با ضخامت‌های مختلف لایه‌های سست و سست‌تر با مدل همگن مقایسه شد (شکل ۹). هدف این بود که اثرات مشخصات خاک در تپه‌های نیم‌سینوسی دولایه را درک کنیم. از طریق این مقایسه، مشخص شد که مقادیر کوچکنمایی در پنجه تپه دولایه (که فاصله بین نیمه پایین تپه و یال آن است) کمتر از مقادیر تپه همگن است. همچنین وجود یک لایه سست در قسمت بالایی تپه باعث می‌شود که امواج بیشتر در این نقطه خاص از توپوگرافی متمرکز شوند. با وجود لایه سست، کوچکنمایی در مؤلفه جابجایی در فاصله بی بعد ۰/۶ از راس تپه، در فاصله ۰/۵۵ برای مؤلفه سرعت و در فاصله ۰/۵ برای مؤلفه شتاب مشاهده شد. با سست‌تر شدن لایه، کوچکنمایی در فاصله‌های بی بعد کمی بزرگتر رخ می‌دهد؛ به این صورت که مقادیر نزدیک به ۰/۷ برای

می‌یابد (شکل ۱۰). بنابراین، مشخص شده است که کاهش بزرگنمایی ناشی از تأثیر مشخصات خاک و محدودیت لایه سست بین دو لایه سخت، بیشتر در مؤلفه شتاب نسبت به مؤلفه جابجایی است و مؤلفه جابجایی کاهش بیشتری نسبت به مؤلفه سرعت تجربه می‌کند.

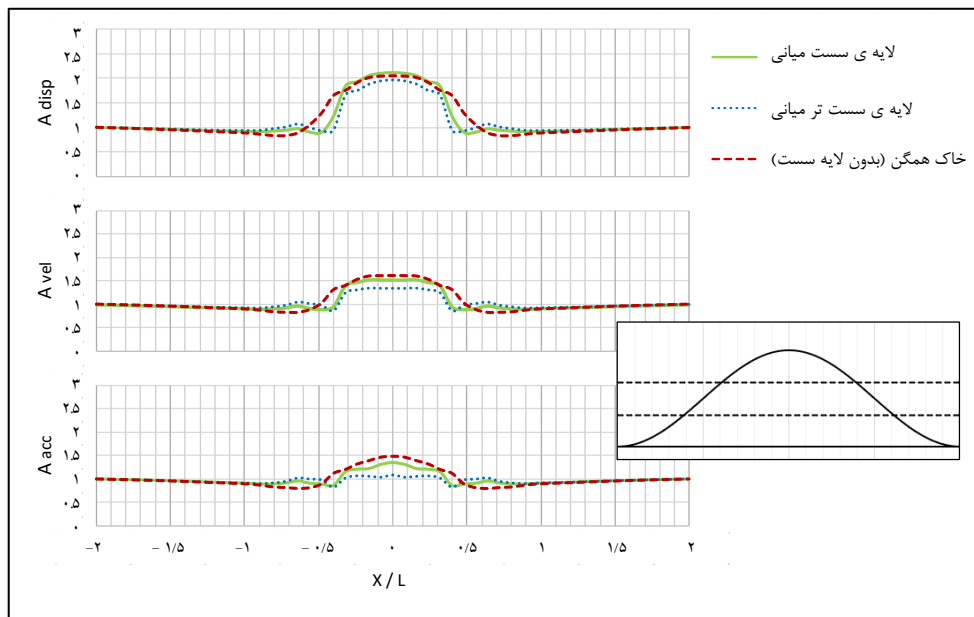
با نگاهی اجمالی به نتایج ارائه شده در جدول ۴، می‌توان گفت که بیشتر تغییرات مربوط به بزرگنمایی در بالای تپه، کاهش بزرگنمایی در سه مؤلفه به دلیل ضعیف شدن لایه میانی را نشان می‌دهد. به طور کلی، سست‌تر شدن لایه میانی تأثیر زیادی بر نتایج بزرگنمایی مؤلفه جابجایی نداشته است. این تغییرات در مقایسه با مدل همگن بین ۴٪ کاهش و ۴٪ افزایش بود، اما با سست‌تر شدن لایه میانی، این مقدار تا ۸٪ کاهش یافت. علاوه بر این، در سایر مؤلفه‌ها (سرعت و شتاب)، ضعیف شدن لایه میانی نیز بزرگنمایی در بالای تپه را کاهش داد.

تپه‌های سه‌لایه با ضخامت‌های یکسان نزدیک به یک مشاهده می‌شود. با بررسی شکل ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت که با ضعیف‌تر شدن لایه میانی، هر سه مؤلفه مقادیر بزرگنمایی کمتری را تجربه می‌کنند. مقدار بزرگنمایی در مؤلفه جابجایی کمتر از مقدار بزرگنمایی در مؤلفه سرعت است و این مقدار کمتر از مقدار بزرگنمایی در مؤلفه شتاب است. بنابراین، بزرگنمایی مؤلفه شتاب برای مدل سه‌لایه با لایه سست بسیار نزدیک به یک است.

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ و با مقایسه یک تپه دولایه با یک تپه سه‌لایه با ضخامت لایه‌های برابر، تأثیر قرارگیری لایه بسیار متراکم بر روی لایه سست در تپه سه‌لایه مشخص می‌شود. با وجود لایه سست در بخش بالایی تپه‌های دولایه، الگوهای بزرگنمایی سه مؤلفه در نیمه بالایی یال تپه مقادیر بالایی را نشان می‌دهند (شکل ۹). اما وقتی یک لایه بسیار متراکم بر روی لایه سست در یک تپه سه‌لایه با مشخصات مشابه اضافه می‌شود، مقادیر بزرگنمایی کاهش



شکل ۹. مقایسه تأثیر مشخصات دینامیکی خاک بر مقادیر بزرگنمایی مؤلفه افقی جابجایی، سرعت و شتاب برای یک تپه نیم‌سینوسی دولایه با ضخامت لایه‌بندی برابر.



شکل ۱۰. مقایسه تاثیر مشخصات دینامیکی خاک بر مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی جابجایی، سرعت و شتاب برای یک تپه نیم‌سینوسی سه‌لایه با ضخامت لایه‌بندی برابر.

جدول ۳. مقادیر بزرگنمایی در بالای تپه دولایه برای هر سه مولفه در رابطه با ویژگی‌های دینامیکی خاک و درصد تغییرات در سست شدن لایه‌ی فوقانی.

ضخامت یکسان			لایه‌ی سست به ضخامت نصف			لایه‌ی سست به ضخامت دو برابر		
بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر
همگن	۲/۰۴۰۳		همگن	۲/۰۴۰۳		همگن	۲/۰۴۰۳	
جابجایی	۲/۶۶۴۵	۳۱٪	جابجایی	۲/۵۷۸۰	۲۶٪	جابجایی	۲/۵۱۴۷	۲۳٪
سست	۲/۹۰۹۳	۴۳٪	سست	۲/۹۰۰۳	۴۲٪	سست	۲/۵۷۹۲	۲۶٪
همگن	۱/۶۲۱۰		همگن	۱/۶۲۱۰		همگن	۱/۶۲۱۰	
سرعت	۲/۰۳۳۶	۲۵٪	سرعت	۲/۰۴۸۱	۲۶٪	سرعت	۱/۸۵۸۵	۱۵٪
سست	۲/۱۴۷۴	۳۲٪	سست	۲/۲۶۵۰	۴۰٪	سست	۱/۸۵۲۱	۱۴٪
همگن	۱/۴۷۷۰		همگن	۱/۴۷۷۰		همگن	۱/۴۷۷۰	
شتاب	۲/۳۰۷۳	۵۶٪	شتاب	۲/۲۷۸۲	۵۴٪	شتاب	۱/۸۲۰۲	۲۳٪
سست	۲/۵۸۴۹	۷۵٪	سست	۲/۹۰۹۶	۹۷٪	سست	۱/۷۳۸۱	۱۸٪

جدول ۴. مقادیر بزرگنمایی در بالای تپه سه‌لایه برای هر سه مولفه در رابطه با ویژگی‌های دینامیکی خاک و درصد تغییرات در سست شدن لایه‌ی میانی.

ضخامت یکسان			لایه‌ی سست به ضخامت نصف			لایه‌ی سست به ضخامت دو برابر		
بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		% تغییر
همگن	۲/۰۴۰۳		همگن	۲/۰۴۰۳		همگن	۲/۰۴۰۳	
جابجایی	۲/۱۰۴۱	۳٪	جابجایی	۲/۱۲۶۸	۴٪	جابجایی	۲/۰۶۹۷	۱٪
سست	۱/۹۶۱۱	-۴٪	سست	۲/۰۴۴۸	۰٪	سست	۱/۸۷۸۲	-۸٪
همگن	۱/۶۲۱۰		همگن	۱/۶۲۱۰		همگن	۱/۶۲۱۰	
سرعت	۱/۵۲۳۱	-۶٪	سرعت	۱/۵۶۸۴	-۳٪	سرعت	۱/۴۷۰۹	-۹٪
سست	۱/۲۴۹۹	-۱۷٪	سست	۱/۴۳۱۲	-۱۲٪	سست	۱/۲۷۷۴	-۲۱٪
همگن	۱/۴۷۷۰		همگن	۱/۴۷۷۰		همگن	۱/۴۷۷۰	
شتاب	۱/۳۴۲۹	-۹٪	شتاب	۱/۴۵۵۸	-۱٪	شتاب	۱/۲۱۷۰	-۱۸٪
سست	۱/۰۸۱۵	-۲۷٪	سست	۱/۲۶۱۶	-۱۵٪	سست	۰/۹۴۵۳	-۳۶٪

۲-۴ اثرات ضخامت لایه‌بندی خاک

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ اثر ضخامت لایه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی دولایه و سه‌لایه را نشان می‌دهند. با تحلیل الگوهای به دست آمده، می‌توان اثرات ترکیبی ضخامت لایه‌ها و مشخصات خاک را مشاهده نمود. در بررسی ضخامت‌های مختلف لایه‌ها در تپه‌های دولایه (شکل ۱۱)، نتیجه می‌گیریم که با افزایش ضخامت لایه، فاصله بدون بعد از راس تپه تا $0/4$ در بزرگنمایی کاهش می‌یابد، در حالی که بخش میانی افزایش می‌یابد. این موضوع در مورد هر سه مؤلفه صدق می‌کند که منجر به کاهش بزرگنمایی می‌شود. در مدل با لایه سست با ضخامت مساوی یا کمتر، دو مؤلفه جابجایی و سرعت تا فاصله بدون بعد $0/5$ از راس تپه کوچک‌نمایی بیشتری دارند، در حالی که مؤلفه شتاب نزدیک به راس تپه ادامه می‌یابد. در مدل با لایه سست ضخیم‌تر (دو برابر ضخامت لایه دیگر)، لایه سست از یال تپه تا مرز بین دو لایه‌ی کوچک‌تر مشاهده می‌شود. تا فاصله بدون بعد $0/4$ از راس تپه، بزرگنمایی با مقداری ثابت نزدیک به یک و در برخی نواحی با بزرگنمایی بیشتر قابل مشاهده است.

طبق شکل ۱۲، مشاهدات زیر در مورد تپه سه‌لایه با لایه سست ضخیم‌تر قابل ذکر است: در مؤلفه جابجایی، مقادیر کوچک‌نمایی از یال تپه تا فاصله بدون بعد $0/6$ از راس (نزدیک به مرز لایه‌های پایین و میانی) بدست می‌آید. در مؤلفه سرعت، مقادیر کوچک‌نمایی تا فاصله بدون بعد $0/5$ از راس (لایه میانی) حاصل می‌شود. در مؤلفه شتاب، مقادیر کوچک‌نمایی تا فاصله بدون بعد $0/4$ از راس (لایه میانی) بدست می‌آید. در راس تپه، نتایج بزرگنمایی شده و بزرگنمایی در مؤلفه جابجایی بیشتر است، در حالی که مؤلفه سرعت و سپس مؤلفه شتاب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به طور کلی، افزایش ضخامت لایه سست در میانه تپه‌های سه‌لایه منجر به افزایش بزرگنمایی در تمام مؤلفه‌ها می‌شود.

در مدل با لایه سست با ضخامت مساوی یا کمتر، که خاک لایه بالایی به‌طور مفرط سست نیست (شکل ۱۱)، نتایج کوچک‌نمایی تقریباً مشابهی در محدوده از یال تپه تا مرز بین دو لایه مشاهده می‌شود. مؤلفه جابجایی ناحیه کوچک‌تری از کوچک‌نمایی را نشان می‌دهد و به فاصله بدون بعد $0/6$ از راس تپه می‌رسد. مؤلفه سرعت تا فاصله بدون بعد $0/5$ از راس تپه کاهش می‌یابد، در حالی که مؤلفه شتاب کاهش بیشتری نسبت به سایر مؤلفه‌ها نشان می‌دهد و به فاصله بدون بعد $0/4$ از راس تپه می‌رسد.

طبق جدول ۵، نصف کردن ضخامت لایه بالایی نسبت به لایه‌های برابر تأثیر چندانی بر مؤلفه جابجایی بزرگنمایی ناشی از راس تپه نداشت؛ این مقدار بیشتر از 3% نبود. دو برابر کردن ضخامت لایه بالایی باعث کاهش مؤلفه جابجایی بزرگنمایی شد. این کاهش 6% در لایه سست و 11% در لایه سست‌تر بود. همچنین، در مورد مؤلفه‌های سرعت و شتاب، دو برابر کردن ضخامت لایه سست باعث کاهش 9% در مؤلفه سرعت و حدود 20% در مؤلفه شتاب شد. دو برابر کردن ضخامت لایه سست‌تر تقریباً 14% کاهش برای مؤلفه سرعت و 33% کاهش برای مؤلفه شتاب ایجاد کرد.

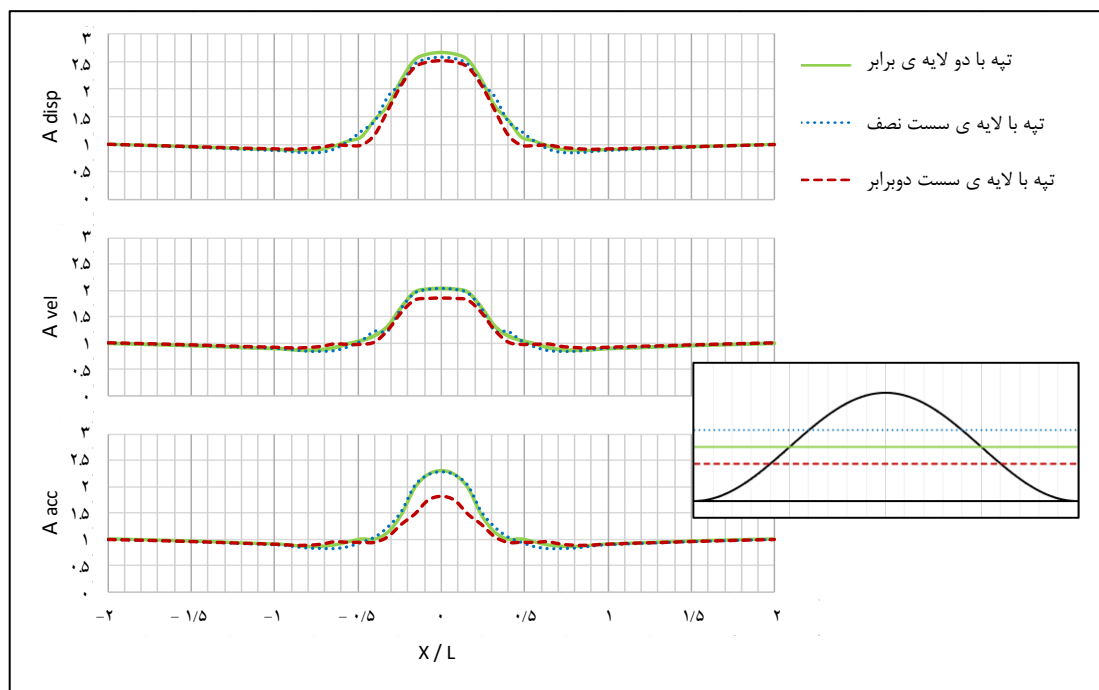
بر اساس جدول ۶، دو برابر کردن لایه سست‌تر در وسط تپه‌های سه‌لایه نسبت به لایه‌های برابر، مقدار بزرگنمایی جابجایی در بالای تپه را 3% کاهش داد. علاوه بر این، به دلیل افزایش ضخامت، مؤلفه شتاب بیشتر از مؤلفه سرعت تغییر کرده و مؤلفه سرعت بیشتر از جابجایی تغییر کرده است. از سوی دیگر، به دلیل نصف کردن ضخامت لایه سست، درصد تغییرات در بالای تپه به طور کلی افزایش یافته است.

۳-۴ تأثیر موقعیت لایه سست

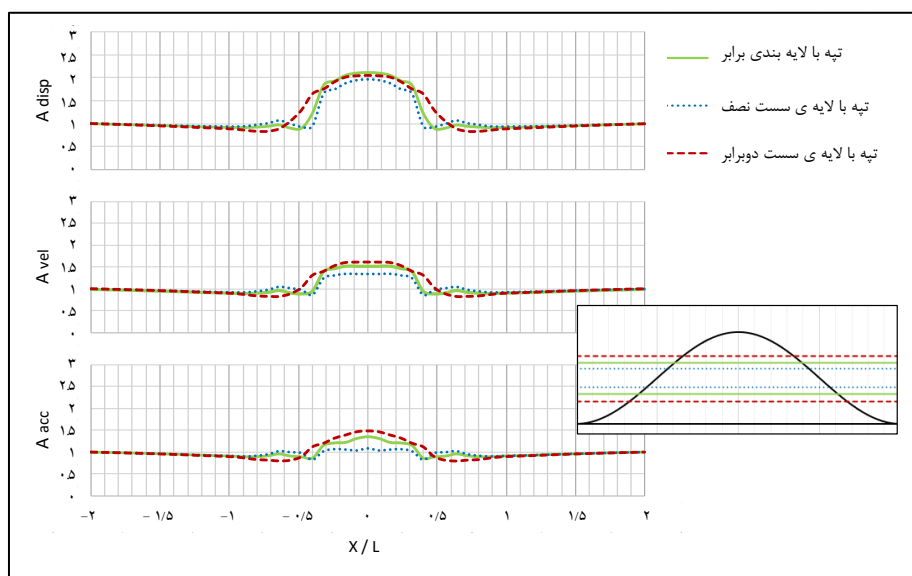
در بخش‌های قبلی، این مطالعه بر روی بررسی لایه سست در تپه‌های دولایه، به‌طور انحصاری در بالا، و در تپه‌های

سست در پایین و نزدیک به شیب قرار دارد، نتایج نشان‌دهنده کوچکنمایی هستند. در راس تپه، الگوی کوچکنمایی به حداکثر ارزش خود می‌رسد و در نزدیکی راس تپه، نتایج همچنان کوچکنمایی می‌شود. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که وقتی لایه نرم در پایین و بین لایه سخت بالایی و بستر سنگی قرار دارد، نتیجه اصلی کوچکنمایی است. بزرگنمایی تنها در مؤلفه‌های جابه‌جایی در فاصله بدون بعد $0/4$ از راس تپه، به‌ویژه در لایه سخت بالایی از طرفین رخ می‌دهد. در فاصله‌ای از شیب تپه به پنجه آن، نتایج به مقادیر نزدیکی به یک نزدیک می‌شود، در حالی که کمترین مقدار در مرز بین دو لایه به دست می‌آید. به‌طور مشابه، در نیمه بالایی تپه، مؤلفه‌های سرعت و شتاب مقادیر کمتری از یک (کوچکنمایی) را نشان می‌دهند؛ و بالعکس، اگر لایه سست در بالا قرار گیرد، نتایج بزرگنمایی بیشتری را نشان می‌دهند.

سه‌لایه، فقط در میانه مدل متمرکز بود. در این بخش، هدف مقایسه تأثیر قرارگیری لایه سست در بالا با وضعیتی است که این لایه بر روی بستر سنگی قرار دارد. برای این منظور، تپه دو لایه دو بار شبیه‌سازی شد: یک بار با لایه سست در بالا و بار دیگر با لایه سست در پایین. ضخامت‌های مختلف در هر دو حالت بررسی شد. شکل ۱۳ تأثیر موقعیت لایه سست در تپه دو لایه را با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف و محدودیت آن بین بستر سنگی و لایه سخت بالایی نشان می‌دهند. با مقایسه این شکل‌ها مشخص می‌شود که با وجود حضور لایه سست نزدیک به شیب و در نزدیکی راس تپه، نتایج مقادیر نزدیکی به یک را نشان می‌دهند. اگر مرز بین دو لایه به شیب نزدیک‌تر باشد، نتایج همچنان نزدیک به یک باقی می‌مانند. اما با دور شدن مرز بین دو لایه از بستر سنگی، مقادیر بزرگنمایی به تدریج افزایش می‌یابند و در نهایت، نزدیک به راس تپه، حداکثر مقادیر بزرگنمایی مشاهده می‌شود. در مقابل، وقتی لایه



شکل ۱۱. مقایسه تأثیر ضخامت لایه‌بندی بر مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی جابجایی، سرعت و شتاب برای یک تپه نیم‌سینوسی دو لایه با لایه سست.



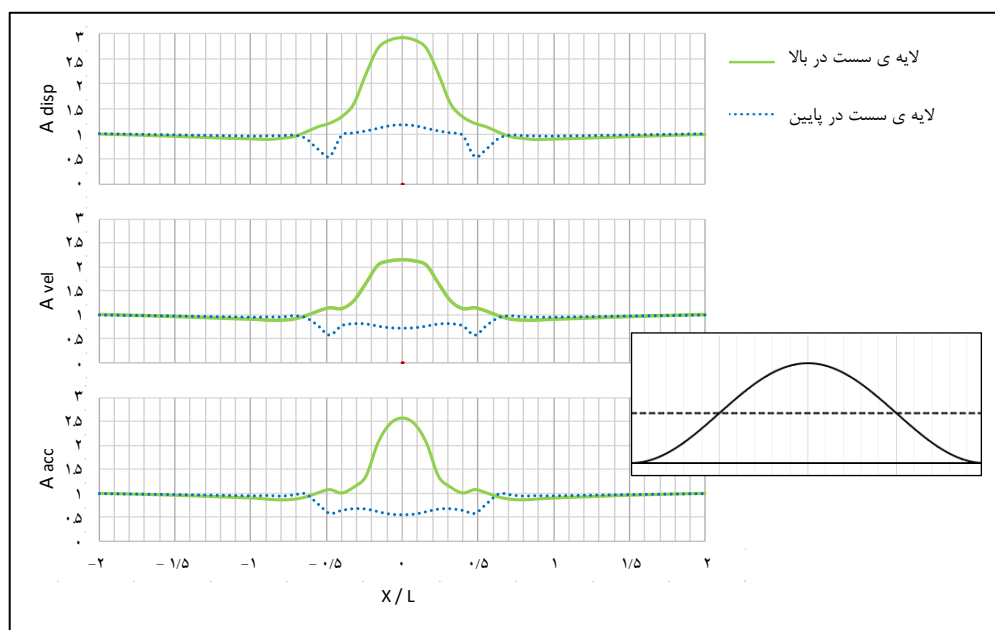
شکل ۱۲. مقایسه تاثیر ضخامت لایه‌بندی بر مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی جابجایی، سرعت و شتاب برای یک تپه نیم‌سینوسی سه‌لایه با لایه سست.

جدول ۵. مقادیر بزرگنمایی در بالای تپه دولایه برای هر سه مولفه در رابطه با ضخامت لایه فوقانی با مشخصات سست (تر) و درصد تغییرات ضخامت لایه.

خاک سست تر			خاک سست		
٪ تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		٪ تغییر	بزرگنمایی در راس تپه	
-۱۱٪	۲/۵۷۹۲	دوبرابر	-۶٪	۲/۵۱۴۷	دوبرابر
	۲/۹۰۹۳	یکسان		۲/۶۶۴۵	یکسان
۰٪	۲/۹۰۰۳	نصف		۲/۵۷۸۰	نصف
-۱۴٪	۱/۸۵۲۱	دوبرابر	-۹٪	۱/۸۵۸۵	دوبرابر
	۲/۱۴۷۴	یکسان		۲/۰۳۳۶	یکسان
	۲/۲۶۵۰	نصف		۲/۰۴۸۱	نصف
-۳۳٪	۱/۷۳۸۱	دوبرابر	-۲۱٪	۱/۸۲۰۲	دوبرابر
	۲/۵۸۴۹	یکسان		۲/۳۰۷۳	یکسان
	۲/۹۰۹۴	نصف		۲/۲۷۸۲	نصف

جدول ۶. مقادیر بزرگنمایی در بالای تپه سه‌لایه برای هر سه مولفه در رابطه با ضخامت لایه فوقانی با مشخصات سست (تر) و درصد تغییرات ضخامت لایه.

خاک سست تر			خاک سست		
٪ تغییر	بزرگنمایی در راس تپه		٪ تغییر	بزرگنمایی در راس تپه	
-۴٪	۱/۸۷۸۲	دوبرابر	-۳٪	۲/۰۴۰۳	دوبرابر
	۱/۹۶۱۱	یکسان		۲/۱۰۴۱	یکسان
۴٪	۲/۰۴۴۸	نصف		۱/۹۶۱۱	نصف
-۵٪	۱/۲۷۷۴	دوبرابر	۶٪	۱/۶۲۱۰	دوبرابر
	۱/۳۴۹۹	یکسان		۱/۵۲۳۷	یکسان
	۱/۴۳۱۲	نصف		۱/۳۴۹۹	نصف
-۱۳٪	۰/۹۴۵۳	دوبرابر	۱۰٪	۱/۴۷۷۰	دوبرابر
	۱/۰۸۱۵	یکسان		۱/۳۴۲۹	یکسان
	۱/۲۶۱۶	نصف		۱/۰۸۱۵	نصف



شکل ۱۴. تاثیر محل قرارگیری لایه سست بر بزرگنمایی مولفه افقی جابجایی، سرعت و شتاب برای یک تپه نیم سینوسی دولایه با ضخامت لایه بندی برابر.

۵ نتیجه گیری

به طور خلاصه، می توان نتیجه گیری کرد که بزرگنمایی نزدیک به راس تپه با سست شدن خاک در لایه بالایی در تپه دولایه افزایش می یابد. در صورتی که بزرگنمایی نزدیک به راس تپه در صورتی که خاک در تپه سه لایه در لایه میانی سست شود، کاهش می یابد. در هر دو حالت، کاهش بزرگنمایی بیشتر در نواحی نزدیک به پنجه تپه مشاهده می شود. به عنوان نتیجه کاهش ضخامت لایه سست در بالای تپه دولایه، بزرگنمایی عمدتاً در نیمه بالایی افزایش می یابد و در ناحیه پنجه تپه کاهش می یابد. در تپه های سه لایه، بزرگنمایی عمدتاً در نیمه بالایی کاهش می یابد و در ناحیه پنجه به دلیل کاهش ضخامت لایه میانی کاهش می یابد. یافته های حاصل از تحلیل تپه های سه لایه با لایه سست میانی، نسبت به نتایج تپه های دولایه با لایه سست در بالا، نشان داد که محدودیت لایه سست تأثیر کمتری بر بزرگنمایی ساختار دارد. این کاهش تأثیر همچنین در بررسی تپه های دولایه، زمانی که لایه سست در پایین قرار دارد، مشاهده شد.

مقادیر بزرگنمایی مؤلفه جابه جایی در هر دو تپه دولایه و سه لایه، بیشترین افزایش را در بررسی تغییرات هر یک از مشخصات لایه بندی نشان داده اند. در حالی که مقادیر بزرگنمایی در مؤلفه شتاب از مقادیر مؤلفه سرعت در تپه های دولایه بیشتر بود، این در مورد تپه های سه لایه صدق نمی کند. در مدل های سه لایه، مؤلفه شتاب کمترین تأثیر را بر بزرگنمایی داشت.

در تپه های دولایه، بزرگنمایی و کوچکنمایی حاصل از تغییر در ویژگی خاک تأثیر قوی تری نسبت به اثر ضخامت دارد. این بدان معنی است که لایه سست نازک در بالا کمترین تأثیر را دارد. به طور مشابه، در تپه های سه لایه، ابتدا تأثیر مشخصات خاک برجسته تر و سپس تأثیر ضخامت مورد توجه است. به طور کلی، بزرگ ترین افزایش در مؤلفه شتاب به عنوان نتیجه سست شدن لایه بالایی در تپه های دولایه و لایه میانی در تپه های سه لایه شناسایی شد. برعکس، کمترین تغییر قابل توجه در هر سه مؤلفه به دلیل نصف کردن لایه بالایی در تپه های دولایه مشاهده گردید.

- Alielahi, H. & Adampira, M. (2018). Evaluation of 2D Seismic Site Response due to Hill-Cavity Interaction Using Boundary Element Technique. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1137-1167.
- 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*, pp. 6-13.
- 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., & Harati, A. (2024). The Effect of Heterogeneity of Materials, Different Shapes and Adjacent Hills on the Seismic Response of the Hill. *Indian Geotechnical Journal*, 1-12.
- Aminpour, P., Najafzadeh, J., Kamalian, M. & Jafari, M. K. (2015). Seismic Response of 2D Triangular-Shaped Alluvial Valleys to Vertically Propagating Incident SV Waves. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, pp. 89-101.
- Ashford, S. A., Sitar, N., Lysmer, J. & Deng, N. (1997). Topographic Effects on the Seismic Response of Steep Slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 701-709.
- Assimaki, D., Kausel, E. & Gazetas, G. (2005). Soil-Dependent Topographic Effects: A Case Study from the 1999 Athens Earthquake. *Earthquake Spectra*, pp. 929-966.
- 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. *Lisbon, Portugal, 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012 (15WCEE)*.
- Bard, P.-Y. (1982). Diffracted waves and displacement field over two-dimensional
- منابع**
- احمدی شیروانی، مهرداد، افضل‌ی راد، مبین و واعظ زاده، سید محسن. (۱۳۹۳). ارزیابی رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی دوگانه دارای میرایی مصالح با استفاده از روش اجزای مرزی در برابر امواج مهاجم P، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل.
- شعاری شعار، محمد (۱۳۹۹). شرح و درس دینامیک خاک، تهران: انتشارات نوآور.
- قنبری، علی و حسینی، شیما السادات. (۱۳۹۵). مبانی اندرکنش خاک و سازه، تهران: دانشگاه خوارزمی.
- کمالیان، محسن، جعفری، محمد کاظم و سهرابی بیدار، عبدالله. (۱۳۸۶). رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم، نشریه علمی پژوهشی استقلال، ۱۰۹-۱۳۰.
- کمالیان، محسن، جعفری، محمد کاظم، سهرابی بیدار، عبدالله و رزمخواه، آرش. (۲۰۰۶). بررسی اثر شکل بر پتانسیل بزرگنمایی لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی، *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, ۵۹-۷۰.
- کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (۱۳۹۴). آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی (۱۳۹۲). راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌ای، نشریه شماره ۶۲۴.
- AASHTO (2012). Design Specifications. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Afzalirad, M., Naghizadehrokni, M. & Khosravi, I. (2019). Dynamic behavior of double and triple adjacent 2D hills using boundary element method. *Heliyon*.

- elevated topographies. *Geophysical Journal International*, pp. 731-760.
- Bouchon, M. (1973). EFFECT OF TOPOGRAPHY ON SURFACE MOTION. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 615-632.
- Bouckovalas, G. D. & Kouretzis, G. P. (2001). Stiff soil amplification effects in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 671-687.
- Bouckovalas, G. D. & Papadimitriou, A. G. (2005). Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 547-558.
- Brando, G., Pagliaroli, A., Cocco, G. & Buccio, F. D. (2020). Site effects and damage scenarios: The case study of two historic centers following the 2016 Central Italy earthquake. *Engineering Geology*.
- Chiaradonna, A. et al. (2023). Insights on the role of local site effects on damage distribution in the Izmir metropolitan area induced by the October 30, 2020 Samos earthquake. *Soils and Foundations*.
- Criber, E., Brando, G. & Matteis, G. D. (2015). The effects of L'Aquila earthquake on the St. Gemma church in Goriano Sicoli: part I—damage survey and kinematic analysis. *Bull Earthquake Eng*, pp. 3713-3732.
- Das, Braja M. (1994). *Principles of Geotechnical Engineering*. Boston: PWS Publishing Company.
- Dravinski, M. & Mossessian, T. K. (1987). Scattering of Plane Harmonic Waves by Multiple Dipping Layers of Arbitrary Shape. *Developments in Geotechnical Engineering*, pp. 91-105.
- Geli, L. & Bard, P.-Y. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 42-63.
- Gercek, H. (2007). Poisson's Ratio Values for Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, pp. 1-13.
- Gonza'lez, J. et al. (2004). Site effects of the 1997 Cariaco, Venezuela earthquake. *Engineering Geology*, pp. 143-177.
- Hussain, K. et al. (2022). GEOTECHNICAL PARAMETER ASSESSMENT AND BEARING CAPACITY ANALYSIS FOR THE FOUNDATION DESIGN. *Earth Science Malaysia*, pp. 136-145.
- Isari, M. & Tarinejad, R. (2021). Introducing an effective coherence function to generate non-uniform ground motion on topographic site using time-domain boundary element method. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING VIBRATION*, Volume 20, pp. 89-100.
- Isari, M., Tarinejad, R., Sobhkhiz Foumani, R. & Alavi, S. A. (2020). Investigation of seismic response of topography under recorded excitation using boundary element method. *SN Applied Sciences*.
- Itasca (2005). *Fast Lagrangian Analysis of Continua - User's Manual*. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Kamalian, M., Gatmiri, B. & Sohrabi-Bidar, A. (2003). On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, pp. 35-45.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. & Khalaj, A. (2006a). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, pp. 871-887.
- Kamalian, M. et al. (2006c). Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, p. 753-765.
- Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A. & Razmkhah, A. (2008). Seismic Response of 2-D Semi-Sine Shaped Hills to Vertically Propagating Incident Waves: Amplification Patterns and Engineering Applications. *Earthquake Spectra*, pp. 405-430.

- Kawase, H. (1988). Time-domain response of a semi-circular canyon for incident SV, P, and Rayleigh waves calculated by the discrete wavenumber boundary element method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1415-1437.
- Kawase, H. (1996). The Cause of the Damage Belt in Kobe: "The Basin-Edge Effect, " Constructive Interference of the Direct S-Wave with the Basin-Induced Diffracted/Rayleigh Waves. *Seismological Research Letters*, pp. 25-34.
- Kuhlemeyer, R. L. & Lysmer, J. (1973). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, pp. 421-427.
- Liu, G., Chen, H., Liu, D. & Khoo, B. (2010). Surface Motion of a Half-Space with Triangular and Semicircular Hills under Incident SH Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1306-1319.
- Maleki, M. & Khodakarami, M. I. (2017). Feasibility analysis of using MetaSoil scatterers on the attenuation of seismic amplification in a site with triangular hill due to SV-waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 169-182.
- Massa, M., Barani, S. & Lovati, S. (2014). Overview of topographic effects based on experimental observations: meaning, causes and possible interpretations. *Geophysical Journal International Advance Access*.
- Navarrete, M., Godínez, F. & Villagrán-Muniz, M. (2013). Elastic Properties of Compacted Clay Soils by Laser Ultrasonics. *International Journal of Thermophysics*, pp. 1810-1816.
- Nguyen, K.-V. & Gatmiri, B. (2007). Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 183-188.
- Pagliaroli, A. et al. (2018). Assessment of site effects in the Kathmandu valley, Nepal, during the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake sequence using 1D and 2D numerical modelling. *Engineering Geology*.
- Panji, M. & Habibivand, M. (2020). Seismic analysis of semi-sine shaped alluvial hills above subsurface circular cavity. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING VIBRATION*, pp. 903-917.
- Panzeria, F. et al. (2018). Correlation between earthquake damage and seismic site effects: The study case of Lentini and Carlentini, Italy. *Engineering Geology*, pp. 149-162.
- Paolucci, R. (2002). *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*, pp. 1831-1853.
- Pelekis, P. et al. (2017). Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6.4 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 538-554.
- Sanchez-sesma, F. J. (1987). Site effects on strong ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 124-132.
- Sanchez-sesma, F. J. & Campillo, M. (1991). DIFFRACTION OF P, SV, AND RAYLEIGH WAVES BY TOPOGRAPHIC FEATURES: A BOUNDARY INTEGRAL FORMULATION. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 2234-2253.
- Sanchez-sesma, F. J. & Campillo, M. (1993). Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves. *Tectonophysics*, pp. 113-125.
- Sextos, A. et al. (2018). Local site effects and incremental damage of buildings during the 2016 Central Italy earthquake sequence. *The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*.
- 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*, pp. 68-81.

- 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*, p. 1–12.
- 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*, pp. 1429-1442.
- Tertulliani, A. (1999). Site effects as inferred from damage severity observation. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, pp. 1989-1992.
- Tertulliani, A. & Maramai, A. (1998). Macroseismic evidence and site effects for the Lunigiana (Italy) 1995 Earthquake. *Journal of Seismology*, pp. 209-222.
- Wair, B. R., DeJong, J. T. & Shantz, T. (2012). Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity. Headquarters at the University of California: PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER.
- Wong, H. (1982). EFFECT OF SURFACE TOPOGRAPHY ON THE DIFFRACTION OF P, SV, AND RAYLEIGH WAVES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 72, pp. 1167-1183.
- Zhang, B., Papageorgiou, A. S. & Tassoulas, J. L. (1998). A Hybrid Numerical Technique, Combining the Finite-Element and Boundary-Element Methods, for Modeling the 3D Response of 2D Scatterers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 1036-1050.

A study of the effects of different layering characteristics on the response of two and three-layered semi-sine hills

Mohammad Hossein Nateqi¹, Masoud Amelsakhi^{2*} and Morteza Nateqi³

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

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

³ M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(Received: 26 January 2024, Accepted: 13 May 2025)

Summary

Seismic waves generate resonance when they move from bedrock into soil layers, which typically leads to increased damage to surface structures. The similarity of the soil layers affects this resonance; when their characteristics are similar, resonance is reduced, but greater differences between layers result in more resonance. Consequently, soft soil over bedrock can amplify acceleration, raising the risk of structural damage. Additionally, topographic amplification occurs when seismic waves are intensified or altered by the site's landscape features, such as hills and valleys, which can significantly impact how structures respond to seismic activity, potentially leading to greater ground motion and damage during earthquakes. The examination of the phenomenon of topographic amplification and the seismic response of sites is an important subject that has previously attracted the attention of many researchers. Studies and research conducted on the effects of topography and the phenomenon of earthquake wave amplification as they pass through surface layers have demonstrated that topography significantly influences the level of damage caused by earthquakes. Local topographic features amplify ground motion during an earthquake, ultimately resulting in substantial damage. This paper investigates the effects of a semi-sine hill, which is one of the most common forms of topography in nature, on the seismic response of the ground surface affected by vertically propagating shear waves (SV), utilizing the FLAC 2D software, a two-dimensional finite difference program. In the numerical modeling, linear elastic behavior has been employed. To analyze the effects of layering on the response of the sinusoidal hills, two-layer and three-layer hills with varying characteristics and thicknesses of layers have been considered as the basis for this study. This research examines the impact of soil properties, layer thickness, and the position of the soft layer. The results indicate that the characteristics and thickness of the layering, as well as the position of the soft layer, have significant effects on the overall amplification trends over the hills and the reduction of amplification near the toe of the hills in response to horizontal motion for the acceleration, velocity, and displacement components. The study revealed that in two-layer hills, amplification increases at the top as the upper soil layer loosens, while in three-layer hills, it decreases at the top when the middle layer loosens. The reduction in amplification is more significant near the base in both cases. For two-layer hills, the thinning of the upper loose layer primarily results in increased amplification in the upper section and decreased amplification near the base. In contrast, for three-layer hills, the middle layer's thinning mainly causes decreased amplification in the upper half and also affects the toe area.

Keywords: Site Effect, amplification, semi-sinusoidal hill, layering, ricker wavelet

*Corresponding author: