

چکیده

در این تحقیق، رفتار غیرخطی عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل در برابر هجوم امواج برشی SV با استفاده از برنامه اجزای محدود آباکوس^۱ و در قالب مطالعات پارامتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل رفتاری استفاده شده در مدل‌سازی عددی بر اساس مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک با ضابطه گسیختگی وون-مایسز^۲ می‌باشد. در این راستا، ابتدا تپه دوزنقه‌ای شکل^۳ با چهار ضریب شکل (SR) برابر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و با زاویه شیب ۴۵ درجه، مبنای مطالعات پارامتریک مد نظر قرار گرفته شده است. سپس جهت بررسی تأثیر شکل توپوگرافی تپه، علاوه بر تپه دوزنقه‌ای، تپه‌ها با شکل‌های نیم‌سینوسی^۴ و نیم‌بیضی^۵ و با چهار ضریب شکل یاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که رفتار غیرخطی خاک منجر به برآوردهای کمتر بزرگ‌نمایی امواج نسبت به رفتار خطی شده است. حداکثر مقادیر بزرگ‌نمایی تپه‌ها در ضرایب شکل مختلف در دو رفتار خطی و غیرخطی در تاج تپه‌ها ظاهر می‌شوند. همچنین مقادیر بزرگ‌نمایی غیرخطی در تپه‌های دوزنقه‌ای با ضریب شکل ۰/۷ در فرکانس‌های پایین با اختلافی در حدود ۱۵ درصد نسبت به مدل خطی، کاهش می‌یابند. با فاصله گرفتن از اطراف تپه به طرفین، پاسخ‌ها به سمت میدان آزاد بدون حضور عارضه تپه تمایل می‌یابند. همچنین در این تحقیق مقادیر PGA در عمق و نسبت امپدانس مصالح داخل تپه به بستر طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: رفتار غیرخطی، توپوگرافی تپه، بزرگ‌نمایی، روش عددی، امواج مهاجم.

بررسی رفتار غیرخطی عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل در اثر انتشار امواج SV

محمد مجدپزشکی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

حمید علی‌الهی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران، h.alielahi@iauz.ac.ir

۱- مقدمه

لرزه‌های عوارض تیز گوشه (نظیر شیب‌ها و مقاطع دوزنقه‌ای شکل) نسبت به عوارض هموار (نظیر مقاطع نیم‌دایره، نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی) در برابر امواج مهاجم و تولید امواج تفرق یافته^۱ می‌تواند متفاوت باشد [۳].

در این راستا، از جمله مطالعات انجام شده در مورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی رو سطحی، می‌توان به مطالعات سانچزسسما [۴] اشاره نمود که در این تحقیق رفتار لرزه‌ای تپه‌های تیز گوشه مثلی به روش تحلیلی تحت انتشار موج مهاجم SH مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این بررسی، افزایش ارتفاع تپه منجر به افزایش پتانسیل بزرگ‌نمایی امواج در تاج تپه خواهد شد. موکزو و همکاران [۵] پاسخ لرزه‌ای تپه‌های

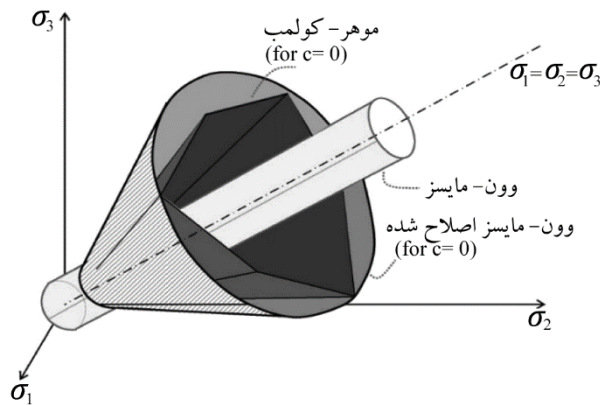
غالباً اثرات توپوگرافی با عوارضی همچون تپه^۲، دره^۳، پرتگاه^۴ و شیب^۵ معرفی می‌شوند. از طرفی، عوارض توپوگرافی رو سطحی می‌توانند بر شدت، مؤلفه‌های فرکانسی و مدت‌زمان تکان‌های لرزه‌ای در طول زلزله تأثیرگذار باشند. تجربیات به دست آمده از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهند که اغلب تخریب‌ها در مکانی با شیب تند یا در حضور توپوگرافی پیچیده اتفاق می‌افتد [۱]. به عنوان مثال، بزرگ‌نمایی توپوگرافی حرکت نیرومند زمین با شتاب ماکزیمم $1/82g$ در زلزله نورث‌ریج ۱۹۹۴، در ایستگاهی واقع بر تپه تارزاننا به ثبت رسیده است [۲]. در ناهمواری‌های سطحی، شکل هندسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای محسوب می‌شود که پاسخ

رسوبی تحت اثر امواج مهاجم SV را مورد مطالعه قرار دادند. در واقع آنها به مطالعه پاسخ لرزه‌ای خاک با تأکید بر حساسیت پاسخ دینامیکی دو بعدی به خصوصیات هندسی و رفتار خاک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پاسخ دو بعدی دره می‌تواند با پارامترهای بدون بعد نظیر ضرایب شکل دره (نسبت ارتفاع به عرض تپه)، ضریب امپدانس، طول موج مهاجم و مقاومت خاک بیان شود. همچنین آنها دریافتند که کاهش شیب دره در طول موج‌های کوتاه سبب انعکاس امواج به سمت لبه‌های دره می‌شود؛ بنابراین امکان تداخل امواج و سپس انتشار دو بعدی امواج سطحی بر روی سطح دره را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، زمانی که رفتار غیرخطی خاک افزایش می‌یابد، پدیده تشدید و بزرگ‌نمایی دو بعدی تمایل به قرار گرفتن در نزدیکی لبه‌های دره را دارد. آسیماکي و جیونگ [۱] به بررسی حرکت زمین در هتل مونتانا در زلزله ۷ ریشتری هائیتی با تکیه بر دو تأثیر توپوگرافی تپه و بزرگ‌نمایی خاک پرداختند. با این فرض که بزرگ‌نمایی توپوگرافی به‌عنوان عامل تخریب در نزدیکی هتل مونتانا بوده است. در ابتدا مدل‌سازی عددی پاسخ لرزه‌ای تپه با فرض شرایط همگن و رفتار الاستیک انجام شده و در انتها تحلیل ترکیبی پروفیل خاک لایه‌بندی شده با هندسه نامنظم توپوگرافی را انجام دادند و نشان دادند که پیش‌بینی عددی بزرگ‌نمایی توپوگرافی با داده‌های ساختگاه در مقدار دامنه و فرکانس متفاوت می‌باشد. همچنین آنها به‌طور کیفی نشان دادند که بزرگ‌نمایی‌ها منسوب به لایه‌های خاک و شکل عارضه توپوگرافی است. عامل‌سختی و همکاران [۱۳] پاسخ طیفی تأثیرات توپوگرافی بر رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوزنقه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. ارزیابی طیف پاسخ در ضرایب شکل مختلف تپه نشان داد که هرچه ابعاد تپه بزرگ‌تر می‌شود، اختلاف بین طیف پاسخ تحلیل یک‌بعدی و دو بعدی به محدوده بزرگ‌تری از پریود منتقل شده و طیف گسترده‌تر خواهد شد.

با مرور ادبیات فنی می‌توان مشاهده نمود که اکثر مطالعات انجام شده در مورد اثرات توپوگرافی و الگوهای بزرگ‌نمایی

دوزنقه‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده آنها نشان داد که اولاً حرکت نقاط واقع بر ضلع فوقانی تپه در مقایسه با نقاط واقع بر روی شیب آن دارای دامنه بیشتری هستند و ثانیاً امواج متفرق شده توسط تپه اگرچه حرکت آزاد نقاط خارج از تپه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اما فازهای مختلف آن قابل تفکیک نیست. بوکووالا و همکاران [۶] به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌ها تحت اثر امواج مهاجم SV پرداختند. ایشان در مطالعات خود تأثیر هندسه شیب و فرکانس موج مهاجم را مورد توجه قرار دادند. کمالیان و همکاران [۷] جزو اولین گروهی بودند که مطالعات پارامتریک گسترده‌ای را به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوزنقه‌ای شکل در برابر امواج قائم P و SV با استفاده از روش اجزای مرزی انجام دادند. همچنین کمالیان و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۸ به بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم SV, P با تکیه بر الگوهای بزرگ‌نمایی و کاربردهای مهندسی پرداختند. در ادامه رزم‌خواه و همکاران [۹] تأثیر شکل‌های مختلف عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل در فرکانس‌های بالا را مورد مطالعه قرار دادند. ساروپولوس و همکاران [۱۰] رفتار خطی و غیرخطی دره را بر حرکت لرزه‌ای زمین مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که رفتار غیرخطی خاک در طول تکان‌های قوی ممکن است تأثیرات بزرگ‌نمایی دره را کاهش دهد. گلاگوتی و همکاران [۱۱] به بررسی انتشار امواج لرزه‌ای در یک دره با مصالح نرم آبرفتی با مدل غیرخطی پرداختند. در این تحقیق، تأثیر امواج دو بعدی SV بر پارامتر مؤلفه فرکانسی تحریک زمین مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که تأثیر تمرکز امواج در نزدیکی لبه‌های دره و تولید امواج سطحی در گوشه‌های دره می‌تواند سبب تشدید ضریب بزرگ‌نمایی حرکت لرزه‌ای باشد. همچنین در نظرگیری رفتار غیرخطی رسوبات دره می‌تواند به‌طور مشخص پاسخ لرزه‌ای دره دو بعدی را اصلاح کند [۱۱]. همچنین گلاگوتی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲، رفتار غیرخطی دره‌های دوزنقه‌ای پر شده با مصالح

غیرخطی کینماتیک ترکیب شده و با قانون جریان پلاستیک^{۱۲} همراه می‌باشد (شکل ۱) [۱۶].



شکل (۱): نمایش سطح تسلیم مدل رفتاری سخت‌شونده کینماتیک با ضابطه گسیختگی وون- مایسز در فضای تنش‌های اصلی (شکل هاشور خورده) همراه با مدل وون- مایسز (شکل خاکستری روشن) و مقایسه آن با معیار گسیختگی موهر- کولمب (شکل خاکستری تیره) [۱۴].

در این مدل رابطه تنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha \quad (1)$$

که در این رابطه σ_0 معادل با تنش در کرنش پلاستیک صفر می‌باشد و ضریب پس تنش α تعیین کننده رفتار کینماتیک سطح تسلیم در فضای تنش بوده و به صورت تابعی از سطح تسلیم (F) تعریف می‌شود:

$$F = f(\sigma - \alpha) \sigma_0 \quad (2)$$

در این رابطه $f(\sigma - \alpha)$ تنش معادل مایسز با توجه به مقدار α (پس تنش) و همچنین جریان پلاستیک مرتبط با آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{pl} \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3)$$

که در آن ε^{pl} معادل نرخ کرنش پلاستیک معادل است.

به طور کلی سطح تسلیم در این مدل از دو مؤلفه زیر تشکیل شده است:

۱- مؤلفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک که تغییر در تنش معادل را با تعریف اندازه سطح تسلیم به عنوان یک تابع تغییر شکل پلاستیک توصیف می‌کند.

آنها، محدود به روش خطی می‌باشد. در صورتی که ممکن است استفاده از مدل‌های خطی به منظور برآورد الگوهای بزرگ‌نمایی امواج، منجر به برآوردهای غیر دقیق و دور از رفتار واقعی خاک شود. از این رو، رفتار لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل نیز در قیاس با دیگر انواع عوارض توپوگرافی دو بعدی ناشناخته مانده است. از طرفی، تاکنون مطالعات پارامتریک جامعی که تأثیر عوامل مختلفی نظیر فرکانس (طول موج) امواج مهاجم، شکل و هندسه تپه و مشخصات مکانیکی مصالح را بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تپه با رفتار غیرخطی در مقیاسه با رفتار خطی مورد بررسی قرار داده باشد، در ادبیات فنی گزارش نشده است. با توجه به موارد اشاره شده، آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، ارزیابی رفتاری لرزه‌ای غیرخطی عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل در برابر هجوم امواج برشی SV، با استفاده از برنامه اجزای محدود آباکوس و مقایسه آن با رفتار خطی در قالب مطالعات پارامتریک می‌باشد.

۲- مدل رفتاری خاک

مدل رفتاری استفاده شده در مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر بر اساس مدل سخت‌شوندگی کینماتیک^{۱۱} با ضابطه گسیختگی وون- مایسز بوده که در نرم‌افزار آباکوس در دسترس می‌باشد. این مدل رفتاری که تحت شرایط زهکشی نشده قرار دارد مستقل از فشار همه‌جانبه است. البته در این مدل پدیده‌ی افزایش فشار آب حفره‌ای به علت وجود شرایط زهکشی نشده نمی‌تواند در نظر گرفته شود، هرچند در این مدل رفتاری اعمال بارگذاری لرزه‌ای سریع رخ می‌دهد تا فرصت زهکشی به مدل ندهد. با توجه به اینکه مدل مربوطه در برنامه آباکوس، یک مدل اصلاح شده است و می‌تواند به خوبی برای مصالح ماسه‌ای نیز مورد استفاده قرار بگیرد ولی بر اساس توصیه آرمسترانگ و فردریک [۱۴]، مدل اصلی و پایه لیمایتری و شپوش [۱۵] برای مصالح رسی مناسب‌تر می‌باشد. جهت بررسی مدل، در ادامه روابط ساختاری برای مصالح رسی مورد بحث قرار گرفته است. در این مدل فشار همه‌جانبه با ضابطه شکست وون- مایسز که با سخت‌شوندگی

پارامتر σ_0 که تنش اولیه نمودار غیرخطی را بیان می‌کند، عموماً در محدوده‌ای λ بین ۰/۱ تا ۰/۳ برابر σ_y در نظر گرفته می‌شود [۱۶].

$$\sigma_0 = \lambda \sigma_y \quad (۹)$$

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که کاهش λ منجر به بهبود دقت مدل عددی می‌شود [۱۶]. لذا در این پژوهش مقدار $\lambda=0.1$ (یا $\sigma_0 = 0.1 \sigma_y$) در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که در این مقاله از روابط مربوط به مصالح رسی به صورت رس نرم تا رس سخت به عنوان مصالح توپوگرافی تپه استفاده شده است.

۳- صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی برای انتخاب پارامترهای مناسب مدل رفتاری و شرایط مرزی صحیح، اقدام به تحلیل مسائل مختلف توسط نرم‌افزار آباکوس شده است. با توجه به محدود بودن مطالعات رفتار غیرخطی تپه‌های آبرفتی نسبت به دیگر انواع عوارض توپوگرافی دو بعدی مانند دره‌های آبرفتی، در این تحقیق صحت‌سنجی مدل عددی بر مبنای مطالعات گلاگوتی و همکاران [۱۱-۱۲] برای یک دره آبرفتی دوزنقه‌ای شکل با دو رفتار خطی و غیرخطی انجام شده است. همچنین با توجه به اینکه در تحقیق حاضر نتایج رفتار خطی نیز ارائه شده است، صحت‌سنجی دوم نیز بر اساس مطالعات کامالیان و همکاران [۸] برای تپه نیم‌سینوسی مبتنی بر مدل خطی انجام شده است.

الف) مدل خطی و غیرخطی دره آبرفتی دوزنقه‌ای شکل [۱۲]

جهت بررسی رفتار غیرخطی دره دوزنقه‌ای شکل تحت اثر امواج مهاجم SV، همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، دره‌ای آبرفتی با عرض ۵۲۰ متر و عمق ۲۴ متر با زاویه شیب ۱۶/۷ درجه نسبت به افق به صورت دو بعدی با فرض شرایط کرنش مسطح با کمک نرم‌افزار آباکوس مدل شده است [۱۲]. موج مهاجم قائم از نوع موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۴/۳

۲- مؤلفه سخت‌شوندگی کینماتیک که انتقال سطح تسلیم در فضای تنش را توصیف می‌کند و از یک بخش کینماتیک و یک جزء انتقال α (پس تنش) تشکیل شده است.

در تعریف مؤلفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، جهت بررسی اندازه سطح تسلیم به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل (ε^{pl}) داریم:

$$\sigma_0 = \sigma_0 + Q_{\infty}(1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (۴)$$

که در آن Q_{∞} و b پارامترهای مدل هستند که به ترتیب حداکثر تغییر اندازه سطح تسلیم و نرخ تغییر ε^{pl} می‌باشند. برای $Q_{\infty} = 0$ اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می‌ماند و مدل به یک مدل سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی تغییر می‌یابد که در این مقاله با ثابت نگه داشتن سطح تسلیم، مدل به رفتار سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی مبدل شده است. در بررسی مؤلفه کینماتیک، سطح تسلیم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \varepsilon^{pl} - \gamma \alpha \varepsilon^{pl} \quad (۵)$$

که C معادل مدول سخت‌شوندگی کینماتیک اولیه بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C = \sigma_y \varepsilon_y = E = 2(1 + \nu)G_0 \quad (۶)$$

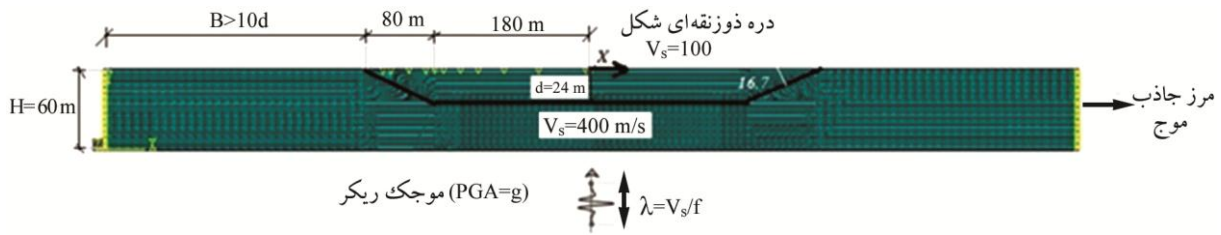
و γ پارامتر تعیین‌کننده نرخ کاهش سخت‌شوندگی کینماتیک با افزایش تغییر شکل پلاستیک است. معادله پیشین بر اساس قانون سخت‌شوندگی کینماتیک زیگلر [۱۷]، با در نظر گرفتن ترم اضافه شده $\gamma \alpha \varepsilon^{pl}$ به معرفی رفتار غیرخطی در مدل اصلی لیماپتری و شوش [۱۵] می‌پردازد.

در مصالح رسی، مقاومت زهکشی نشده (S_{II}) وابسته به فشار همه‌جانبه نیست که از این رو، حداکثر تنش تسلیم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sqrt{3} S_{II} \quad (۷)$$

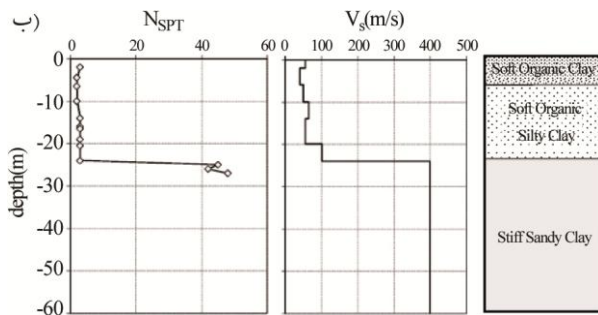
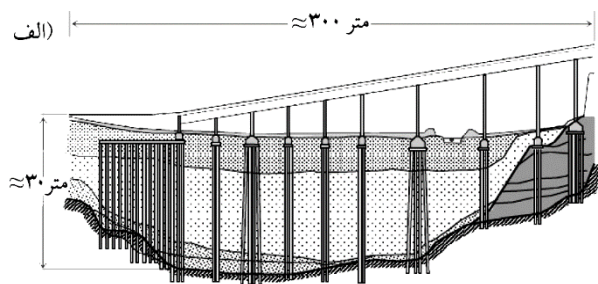
از آنجایی که $\sigma_y = C/\gamma + \sigma_0$ می‌باشد، پارامتر γ بنا به توصیه جرولیموس و همکاران [۱۸] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3}S_{II} - \sigma_0} \quad (۸)$$

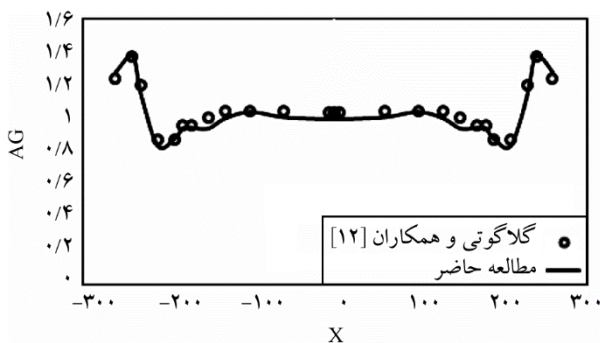


شکل (۲): هندسه مدل عددی دره ذوزنقه‌ای شکل با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس.

حاصل از مطالعه حاضر با دو رفتار خطی و غیرخطی با نتایج حاصل از مطالعات گلاگوتی و همکاران [۱۲] تطابق مناسبی دارد.



شکل (۳): (الف) مقطع عرضی دره اوها در اوها اوهاشی ژاپن (ب) پروفیل خاک با N_{SPT} و V_s سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در محل [۱۱].



شکل (۴): مقایسه رفتار خطی دره آبرفتی ذوزنقه‌ای شکل با مطالعات گلاگوتی و همکاران [۱۲].

هرتز در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی خاک از المان‌های پیوسته مثالی شکل با فرض شرایط کرنش مسطح استفاده شده است. همچنین از حداقل ۱۰ المان در هر طول موج استفاده شده است [۱۲]. لذا، مدل با ۲۴۰۰۰ المان به ابعاد حدودی ۰/۵ متر گسسته‌سازی شده است. در مدل مورد نظر فواصل مرزها از طرفین گوشه دره بزرگ‌تر از ده برابر عمق دره در نظر گرفته شده است ($B>10d$) تا امواج خطا وارد محدوده پاسخ‌های مسئله مورد نظر نشوند. البته علاوه بر این، از مرزهای جاذب امواج به کمک میراگرها در طرفین مدل در نظر گرفته شده است.

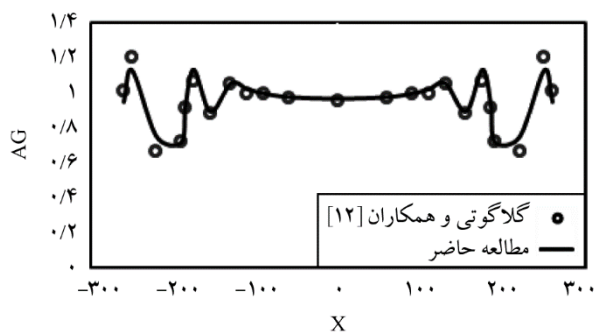
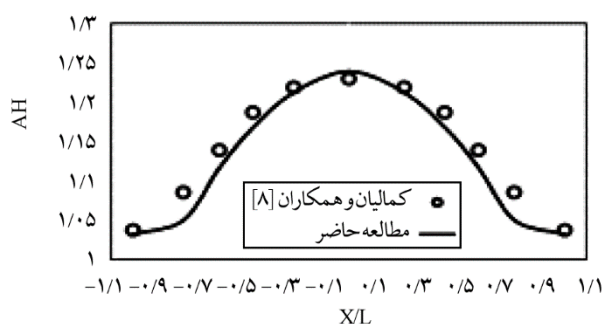
مدل رفتاری خاک در دره آبرفتی به صورت رفتار غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۳) هندسه دره مورد نظر برگرفته از دره اوها ژاپن بوده که این دره با مصالح نرم پر شده است [۱۱]. مصالح آبرفت شامل رس سیلتی نرم^{۱۴} با سرعت موج برشی 100 m/s و مقاومت برشی زهکشی نشده آن 50 kPa می‌باشد. همچنین مصالح لایه تحتانی از جنس رس ماسه‌ای سخت^{۱۵} با سرعت موج برشی 400 m/s و مقاومت برشی زهکشی نشده معادل 300 kPa تشکیل شده است [۱۱].

مطابق شکل‌های (۴) و (۵)، ضریب بزرگ‌نمایی با توجه به مدل یک‌بعدی سطح زمین آزاد^{۱۶} تعریف شده است و با پارامتر AG بیان می‌شود که به صورت نسبت حداکثر مؤلفه افقی شتاب با در نظر گرفتن تأثیرات هندسه دو بعدی به حداکثر شتاب سطح زمین آزاد محاسبه شده و بر مبنای فاصله نقاط از مرکز دره (X) مورد نظر رسم شده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، نتایج

فرکانس مرکزی برابر ۱/۵ هرتز قرار دارد.

مطابق شکل (۶)، ضرایب بزرگ‌نمایی با توجه به سطح زمین آزاد تعریف شده است. به عبارت دیگر این ضریب برابر با نسبت حداکثر دامنه فوریه مؤلفه افقی یا قائم حرکت به حداکثر دامنه فوریه مدل سطح زمین آزاد محاسبه شده است که به ترتیب با پارامترهای A_H و A_V نشان داده شده و نسبت به فاصله بی‌بعد نقاط از مرکز تپه (X) به نصف عرض تپه (L) ارائه شده است.



شکل (۵): مقایسه رفتار غیرخطی دره آبرفتی دوزنقه‌ای شکل با مطالعات گلاگوتی و همکاران [۱۲].

ب) مدل تپه نیم‌سینوسی با رفتار خطی [۸]

به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی با رفتار خطی تحت اثر موج مهاجم SV، تپه همگن با هندسه نیم‌سینوسی با مدل خطی در نظر گرفته شده است [۸]. این مسئله نیز با استفاده از برنامه اجزای محدود آباکوس مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در این مسئله، موج مهاجم قائم از نوع ریکر با فرکانس مرکزی ۱/۵ هرتز در نظر گرفته شده است.

تمامی نتایج به صورت بی‌بعد شده و با توجه به پیوند بی‌بعد $(T = \pi C_2 / \omega b)$ ارائه شده‌اند که در آن ω فرکانس زاویه‌ای موج، C_2 سرعت موج برشی در محیط و b نیم‌پهنای تپه می‌باشد. در این اعتبارسنجی از ضریب شکل (نسبت ارتفاع تپه به نیم‌پهنای آن، SR) ۰/۷ و نسبت پواسون ۰/۳۳ در خاک همگن و سخت با $C_2 = 800 \text{ m/s}$ استفاده شده است. همچنین محدوده طول موج‌های بسیار بلند یعنی در محدوده پیوندهای بی‌بعد بین ۴/۱۷-۸/۳۳ در این صحت‌سنجی مد نظر قرار گرفته است [۸].

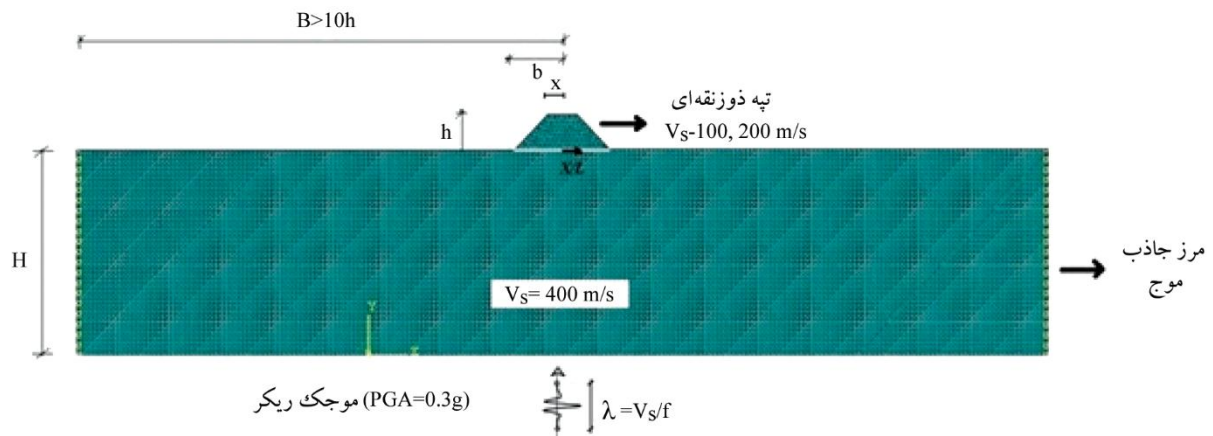
در نظر گرفتن فرکانس مرکزی موجک ورودی برابر ۱/۵ هرتز، پاسخ‌های طیفی دامنه فوریه^{۱۷} به دست آمده در محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۲/۴ هرتز دارای اعتبار بوده و پاسخ‌ها قابل قبول می‌باشند. از طرفی برای محدوده طول موج‌های بسیار بلند یعنی در محدوده پیوندهای بی‌بعد بین ۴/۱۷-۸/۳۳ با در نظر گرفتن سرعت موج برشی محیط برابر ۸۰۰ متر بر ثانیه و نیم‌پهنای تپه معادل ۵۰ متر، فرکانس بی‌بعد بین ۰/۹۶ تا ۱/۹۲ هرتز حاصل می‌شود که در محدوده پاسخ‌های دارای اعتبار موجک ریکر با

شکل (۶): مقایسه مؤلفه افقی A_H و مؤلفه قائم A_V بزرگ‌نمایی تپه نیم‌سینوسی با ضریب پواسون ۰/۳۳ تحت اثر موج مهاجم قائم SV با مطالعات کامالیان و همکاران [۸].

۴- روش انجام مطالعات پارامتریک

همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، تپه دوزنقه‌ای شکل با نیم‌پهنای b و ارتفاع h به صورت دو بعدی با فرض شرایط کرنش مسطح ارائه شده است. مسئله مورد بررسی در حوزه زمان و با استفاده از برنامه اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. در این مطالعه، موج مهاجم از نوع موجک ریکر با معادله زیر استفاده شده است:

$$F(t) = A[1 - 2(\pi f_p(t - t_0))^2]e^{-(\pi f_p(t - t_0))^2} \quad (10)$$



شکل (۷): هندسه مدل عددی تپه دوزنقه‌ای شکل با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس.

مدل مورد نظر برای مصالح تپه و بستر از همان مصالح دره مدل اعتبارسنجی شده (شکل‌های ۲ و ۳) استفاده شده است. همچنین برای انتخاب منطقی مقادیر پارامترهای مدل، توصیه‌های آیین‌نامه‌های اروپا [۱۹] و دستنامه کولای و ماین [۲۰] مد نظر قرار گرفته است.

رفتار خطی خاک با توجه به دو پارامتر C که معادل مدول سخت شوندگی کینماتیک اولیه در ناحیه خطی خاک بوده و نیز ρ که معادل چگالی خاک مورد نظر است، معرفی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر در بخش ۲ (مدل رفتاری خاک) اشاره شد، مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک برای مصالح رسی مناسب‌تر بوده و پارامترهای مدل رفتاری در جدول‌های (۱) تا (۳)، برای مصالح رسی داخل تپه و بستر آن ارائه شده است. لذا در این جدول‌ها روابط (۶) تا (۹) مدنظر قرار گرفته و جهت افزایش دقت محاسبات در ارائه نتایج غیرخطی خاک با مدل مورد نظر، ۱۰ سطح انتقال تنش (α) در نرم‌افزار آباکوس معرفی شده است که در جدول‌های (۱) تا (۳) ملاحظه می‌شود.

هندسه تپه مورد مطالعه به شکل دوزنقه‌ای با چهار ضریب شکل (SR) معادل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ با زاویه شیب $(\theta) 45^\circ$ درجه در نظر گرفته شده است. منظور از ضریب شکل نسبت ارتفاع تپه به نصف عرض آن (SR) است. همچنین در مدل، میرایی مصالح از نوع رایلی با ۵ درصد میرایی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این راستا از موج ریکر با دو فرکانس مرکزی (f_p) پایین ($1/4$ هرتز) و بالا ($4/3$ هرتز) برای پوشش دادن به تمام محدوده‌های پاسخ فرکانسی و با حداکثر شتاب برابر $0.3g$ (در حدود ۳ متر بر مجذور ثانیه) استفاده شده است (شکل ۸). همچنین در مدل‌سازی خاک از المان‌های پیوسته مثلثی شکل با فرض شرایط کرنش مسطح بهره‌گرفته شده است.

به جهت کاهش تأثیر بازتاب امواج مصنوعی از مرزهای جانبی مدل، ابعاد مدل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است [۷]. به همین دلیل فاصله مرزهای جانبی از مرکز تپه بزرگ‌تر از ۱۰ برابر ارتفاع حداکثر تپه لحاظ شده است ($B > 10h$). علاوه بر این، به جهت اطمینان از عدم بازتاب امواج خطا از مرزهای جانبی در مدل عددی، از میراگرهای جاذب انرژی امواج استفاده شده است. همچنین ابعاد بستر بر اساس مدل ارائه شده در اعتبارسنجی دره آبرفتی دوزنقه‌ای شکل در نظر گرفته شده است. همچنین مدل رفتاری خاک شامل مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک می‌باشد. تپه مورد بررسی از دو جنس رس ماسه‌ای سخت و رس سیلتی نرم با سرعت موج برشی به ترتیب 200 m/s و 100 m/s و مقاومت برشی زهکشی نشده به ترتیب 150 kPa و 50 kPa تشکیل شده است. همچنین لایه بستر دارای سرعت موج برشی معادل 400 m/s و مقاومت برشی زهکشی نشده آن 300 kPa می‌باشد. مطابق با جدول‌های (۱) تا (۳) پارامترهای مورد استفاده در معرفی

جدول (۱): پارامترهای مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک در تپه از جنس رس سیلتی نرم.

(Soft Silty clay) Hill material					
E_s	G_0	S_u	V_s	ν	ρ
39.7 MPa	15.3 MPa	50 kPa	100 m/s	0.3	1530 kg/cm ³
	$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3}S_u - \sigma_0}$	$C = a \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_0 = 0.1 \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_y = \sqrt{3} S_u$ (kPa)	Parameters
	510.4	39780	8.66	86.6	1
	340.26	39780	12.99	129.9	2
	255.2	39780	17.32	173.2	3
	204.16	39780	21.65	216.5	4
	170.13	39780	25.98	259.8	5
	145.83	39780	30.31	303.1	6
	127.6	39780	34.64	346.4	7
	113.42	39780	38.97	389.7	8
	102.08	39780	43.3	433	9
	92.8	39780	47.63	476.3	10

جدول (۲): پارامترهای مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک در تپه از جنس رس ماسه‌ای سخت.

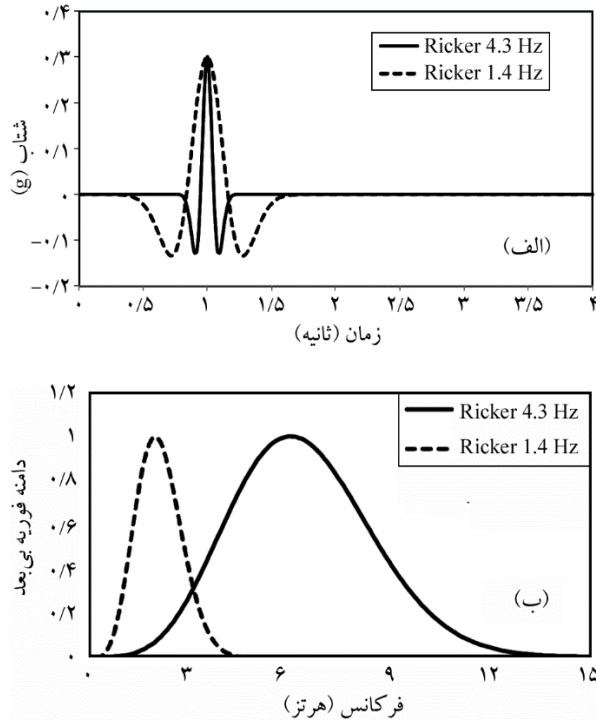
(Stiff Sandy clay) Hill material					
E_s	G_0	S_u	V_s	ν	ρ
187.2 MPa	72 MPa	150 kPa	200 m/s	0.3	1800 kg/cm ³
	$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3}S_u - \sigma_0}$	$C = a \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_0 = 0.1 \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_y = \sqrt{3} S_u$ (kPa)	Parameters
	800.6	187200	25.98	259.81	1
	533.7	187200	38.97	389.7	2
	400.3	187200	51.96	519.62	3
	320.2	187200	64.95	649.52	4
	228.7	187200	90.93	909.33	6
	266.8	187200	77.94	779.43	5
	200.1	187200	103.92	1039.24	7
	177.9	187200	116.92	1169.15	8
	160.1	187200	129.91	1299.05	9
	145.5	187200	142.9	1429	10

علاوه بر این، جهت بررسی تأثیر شکل هندسی توپوگرافی تپه، علاوه بر تپه دوزنقه‌ای از تپه‌ها با شکل‌های نیم‌سینوسی و نیم‌بیضی و با چهار ضریب شکل یاد شده نیز استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمامی نتایج مدل غیرخطی با مدل خطی مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول (۴) مشخصات هندسی مدل دو بعدی تپه‌های دوزنقه‌ای، نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی آورده شده است.

در این تحقیق، در فرکانس مرکزی موجک ورودی برابر ۱/۴ هرتز (نماینده فرکانس‌های پایین)، پاسخ‌های طیفی دامنه فوریه به‌دست آمده در محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۳/۴ هرتز دارای اعتبار بوده و قابل قبول می‌باشند که نسبت حداکثر پاسخ‌های طیفی دامنه فوریه در فرکانسی در حدود ۱/۶ هرتز مبنای محاسبات ضرایب بزرگ‌نمایی بوده است. همچنین در فرکانس مرکزی موجک ریکر برابر ۴/۳ هرتز (نماینده فرکانس‌های بالا)،

جدول (۳): پارامترهای مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک در بستر از جنس رس ماسه‌ای سخت.

(Stiff Sandy clay) Base material					
E_s	G_0	S_u	V_s	ν	ρ
851.2 MPa	320 MPa	300 kPa	400 m/s	0.33	2000 kg/cm ³
	$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3}S_u - \sigma_0}$	$C = a \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_0 = 0.1 \sigma_y$ (kPa)	$\sigma_y = \sqrt{3} S_u$ (kPa)	Parameters
	1820.2	851200	51.96	519.6	1
	1213.4	851200	77.94	779.4	2
	910.10	851200	103.92	1039.2	3
	728.1	851200	129.9	1299	4
	606.73	851200	155.88	1558.8	5
	520.06	851200	181.86	1818.6	6
	455.05	851200	207.84	2078.4	7
	404.49	851200	233.82	2338.2	8
	364.04	851200	259.8	2598	9
	330.95	851200	285.78	2857.8	10



شکل (۸): تاریخچه زمانی و دامنه فوری موجک ریکر با دو فرکانس مرکزی متفاوت.

پاسخ‌های طیفی دامنه فوری به دست آمده در محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۴/۸ هرتز دارای اعتبار می‌باشند و نسبت پاسخ‌های طیفی حداکثر دامنه فوری در فرکانسی در حدود ۲/۸ هرتز مد نظر قرار گرفته است. نتایج به صورت ضرایب بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی (مؤلفه موافق) یا قائم (مؤلفه مخالف) حرکتی ارائه شده‌اند. ضرایب بزرگ‌نمایی با توجه به پاسخ سطح زمین آزاد تعریف شده است که بر مبنای نسبت حداکثر دامنه فوری مؤلفه افقی یا قائم حرکت، به حداکثر دامنه فوری مدل سطح زمین آزاد محاسبه شده است. در این تحقیق ضرایب بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی و قائم به ترتیب با پارامترهای A_H و A_V نشان داده شده‌اند. همچنین محور افقی نمودارها نیز بیانگر نسبت بی‌بعد شده فاصله نقاط در نتایج به دست آمده از مرکز تپه (X) به نصف عرض تپه (L) می‌باشد.

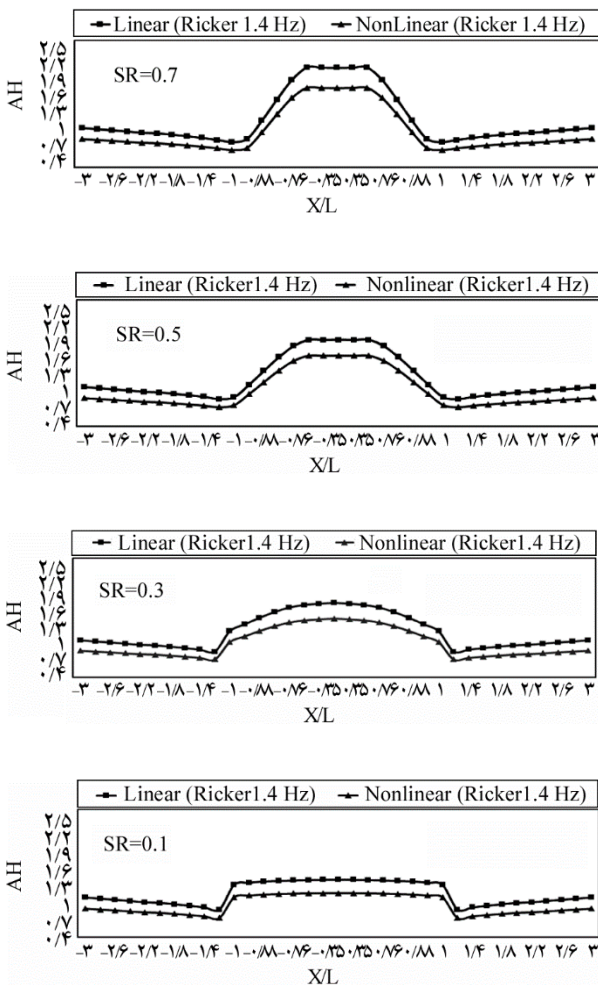
۵- بررسی نتایج مطالعات پارامتریک

در این مقاله با استفاده از مدل غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک

جدول (۴): مشخصات و محدوده مطالعات پارامتریک و نحوه بی‌بعد سازی پارامترها.

توپوگرافی تپه							عنوان		
SR=h/b	h	X(m)	θ	b(m)	H(m)	B(m)	معادله شکل تپه	مدل	شکل تپه
0.7	35	15	45	50	60	750	-	۱	ذوزنقه‌ای
0.5	25	25	45	50	60	750		۲	
0.3	15	35	45	50	60	750		۳	
0.1	5	45	45	50	60	750		۴	
SR=h/b	h	X(m)	θ	b(m)	H(m)	B(m)	معادله شکل تپه	مدل	نیم بیضی
0.7	35	...	...	50	60	750	$\xi(x) = -\sqrt{h^2(1 - \frac{x^2}{b^2})}$	۱
0.5	25	...	...	50	60	750		۲
0.3	15	...	...	50	60	750		۳
0.1	5	...	...	50	60	750		۴
SR=h/b	h	X(m)	θ	b(m)	H(m)	B(m)	معادله شکل تپه	مدل	نیم سینوسی
0.7	35	...	...	50	60	750	$\xi(x) = \frac{h}{2}(1 + \cos \frac{\pi x}{b})$	۱
0.5	25	...	...	50	60	750		۲
0.3	15	...	...	50	60	750		۳
0.1	5	...	...	50	60	750		۴

و غیرخطی کاهش می‌یابد و ملاحظه می‌شود که پاسخ‌ها به سمت میدان آزاد بدون حضور تپه تمایل دارد. همچنین نرخ افزایش بزرگ‌نمایی در ارتباط مستقیم با افزایش ضرایب شکل است، به طوری که با افزایش ضریب شکل، بزرگ‌نمایی در تاج تپه افزایش و به سمت شیب و دامنه آن کاهش می‌یابد.



شکل (۹): مقایسه الگوی مؤلفه افقی (A_H) بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی تپه دوزنقه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 1.4Hz .

از طرفی با افزایش فرکانس موج تحریک به $4/3$ هرتز (شکل ۱۰) الگوی بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی در ضرایب شکل مختلف از همان الگوی فرکانس $1/4$ هرتز (شکل ۹) تبعیت می‌کند، با این تفاوت که با افزایش فرکانس موج مهاجم، مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی (A_H) کاهش می‌یابد.

مبتنی بر روش اجزای محدود به مطالعه اثر رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی (تپه) پرداخته شده و نتایج به‌دست آمده با رفتار خطی مورد مقایسه قرار گرفته است.

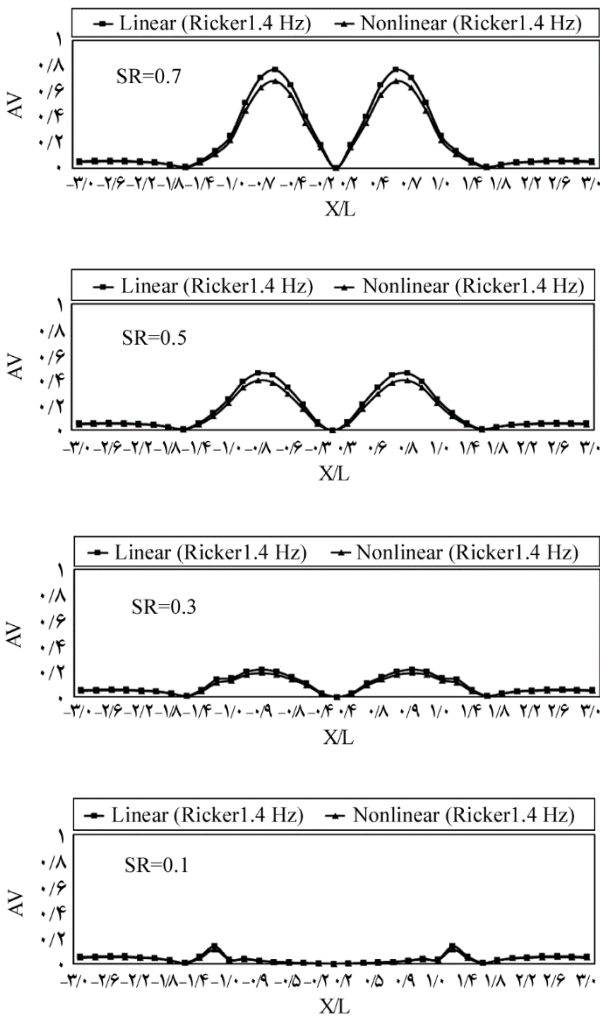
۵-۱- بررسی رفتار خطی و غیرخطی بزرگ‌نمایی مؤلفه

افقی (A_H)

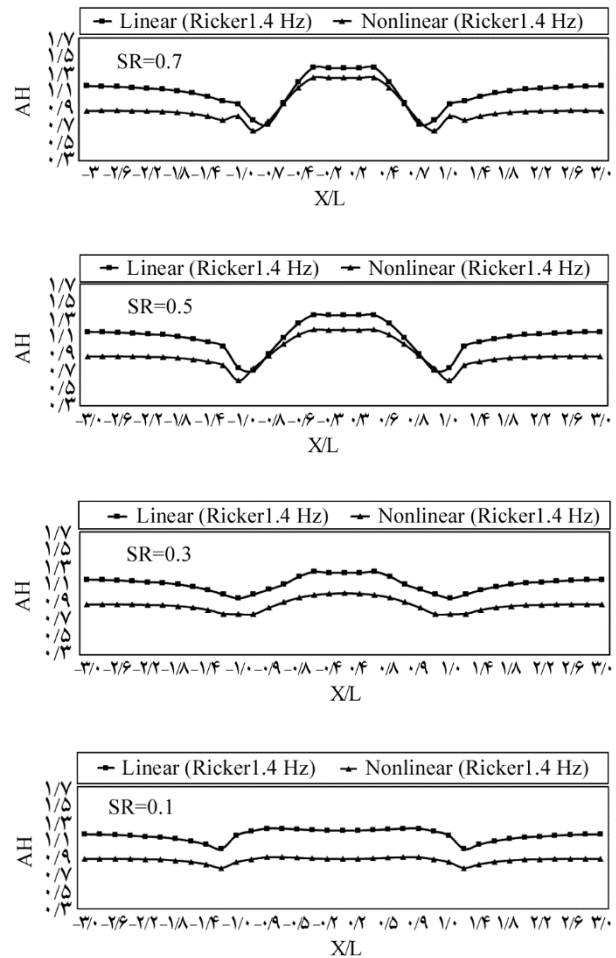
به منظور مقایسه رفتار خطی و غیرخطی مؤلفه افقی (مؤلفه موافق) بزرگ‌نمایی (A_H) تپه دوزنقه‌ای شکل با $V_s=200\text{m/s}$ (جدول ۲) تحت اثر موج مهاجم ریکر با دو فرکانس مرکزی $1/4$ و $4/3$ هرتز با مقیاس $PGA=0.3g$ به صورت مطالعات پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مشخصات مصالح بستر مطابق با جدول (۳) با $V_s=400\text{m/s}$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، مقایسه بزرگ‌نمایی رفتار خطی و غیرخطی مؤلفه افقی بزرگ‌نمایی (A_H) در عوارض تپه‌ای دوزنقه‌ای شکل تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس مرکزی $1/4$ هرتز ارائه شده است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهند که مقادیر بزرگ‌نمایی تپه با رفتار غیرخطی خاک منجر به برآوردهای کمتر پاسخ نسبت به رفتار خطی آن شده است. به عبارت دیگر میرایی موجود در رفتار غیرخطی خاک منجر به کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای می‌شود.

همچنین الگوی بزرگ‌نمایی حاصله نشان می‌دهد که در ضرایب شکل مختلف حداکثر مقادیر بزرگ‌نمایی در محل تاج تپه در هر دو رفتار خطی و غیرخطی ایجاد می‌شود. این مقادیر در تپه‌های دوزنقه‌ای در رفتار خطی به حداکثر مقدار خود در ضریب شکل بیشینه ($SR=0.7$) می‌رسد که مقدار آن در حدود $2/2$ بوده و در رفتار غیرخطی با کاهشی ۱۵ درصدی به حدود $1/9$ رسیده است. علت اصلی ایجاد بزرگ‌نمایی امواج را می‌توان به سبب تمرکز امواج در نقاط بالایی تپه‌ها و به‌طور کلی حبس موج در داخل آنها دانست [۱]. با حرکت به اطراف تپه و گذر از ناحیه تیزگوشه در تپه دوزنقه‌ای شکل و همچنین در فواصل بیش از $X/L=1$ یعنی در پای تپه، مقادیر بزرگ‌نمایی در هر دو مدل خطی

قائم (مخالف) (A_V) بزرگ‌نمایی در اثر تولید امواج رایلی ایجاد می‌شوند [۱ و ۱۲]. از این‌رو، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه قائم امواج تابشی SV با دو فرکانس $1/4$ و $4/3$ هرتز آورده شده است. با افزایش ضریب شکل، مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ضریب شکل بیشینه ($0/7$) مقادیر حداکثر بزرگ‌نمایی مؤلفه قائم دو مدل خطی و غیرخطی در نقاط تیز گوشه یا در شیب‌ها و در محدوده مقادیر $0/9$ تا $0/6$ با یک الگوی ثابت در فرکانس پایین ($1/4$ هرتز) به دست آمده است. همچنین بر خلاف مؤلفه افقی، محل حداکثر بزرگ‌نمایی مؤلفه قائم امواج در تاج تپه نبوده و در اطراف آن است.



شکل (۱۱): مقایسه رفتار خطی و غیرخطی مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی تپه دوزنقه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 1.4Hz

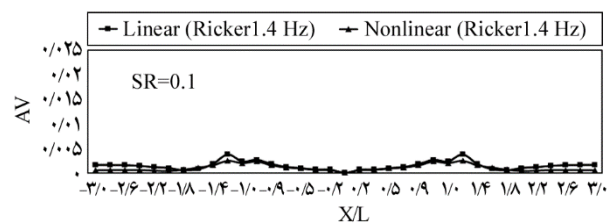
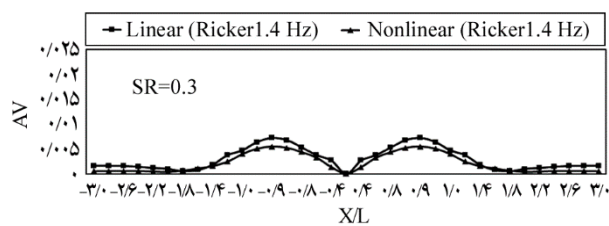
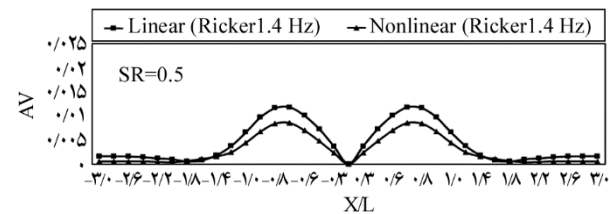
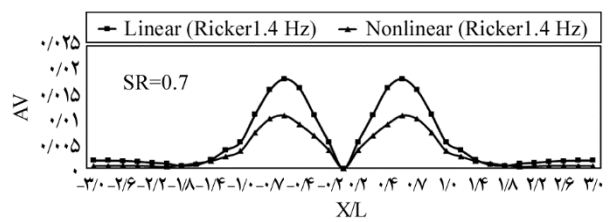
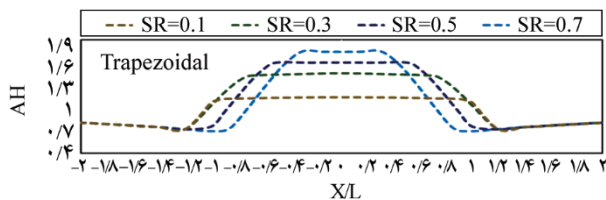


شکل (۱۰): مقایسه الگوی مؤلفه افقی بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی تپه دوزنقه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 4.3Hz

به‌عنوان مثال، این کاهش در حداکثر مقدار بزرگ‌نمایی تپه دوزنقه‌ای در ضریب شکل $0/7$ از $2/2$ به $1/5$ در رفتار خطی و از $1/9$ به $1/3$ در رفتار غیرخطی می‌رسد. در واقع پتانسیل بزرگ‌نمایی تپه با ضریب شکل افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش وابسته به طول موج و تغییرات آن در سراسر تپه است [۷-۹]. افزایش فرکانس موج ورودی به $4/3$ هرتز، منجر به کاهش طول موج نسبت به ابعاد تپه می‌شود (شکل ۷) که این کاهش، سبب کم شدن مقادیر A_H در سراسر تپه نسبت به فرکانس کم یعنی $1/4$ هرتز خواهد شد.

۵-۲- بررسی رفتار خطی و غیرخطی مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی (A_V)
موجک ریکر تنها دارای مؤلفه افقی است در صورتی که مؤلفه‌های

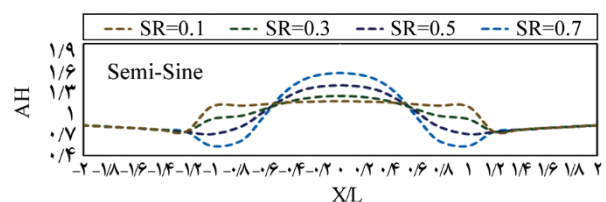
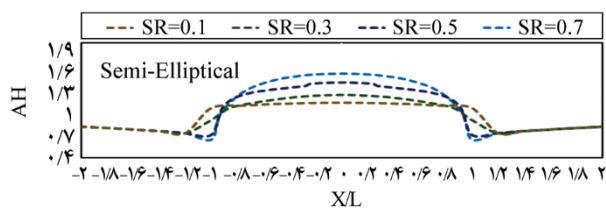
به عبارت دیگر در هر دو رفتار خطی و غیرخطی تغییرات شکل و ابعاد توپوگرافی بسیار تأثیرگذار بوده به طوری که با کاهش ضریب شکل (SR) در تمامی شکل‌ها عوارض توپوگرافی مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای کاهش یافته و اثر آنها کم می‌شود. همچنین با حرکت به اطراف تپه و گذر از ناحیه تیز گوشه در تپه ذوزنقه‌ای شکل و با نزدیک‌تر شدن به شیب‌های تپه با شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی و همچنین در فواصل بیش از $XL=1$ یعنی در پای تپه، پاسخ‌ها کاهش یافته و به سمت میدان آزاد بدون حضور تپه تمایل پیدا می‌کنند. همچنین در شکل (۱۴) نتایج مذکور برای موج مهاجم ریکر با فرکانس $4/3$ هر تر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس موج مهاجم (شکل ۱۴) الگوی بزرگ‌نمایی در رفتار غیرخطی، از فرکانس‌های پایین (شکل ۱۳) تبعیت می‌کند. در این حالت با افزایش فرکانس موج ورودی، مقادیر مؤلفه افقی بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابند. این کاهش در تپه‌های ذوزنقه‌ای، نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی به حداکثر مقدار بزرگ‌نمایی در تاج تپه به ترتیب در حدود $1/3$ تا حدود ۱ در مدل غیرخطی می‌رسند.



شکل (۱۲): مقایسه رفتار خطی و غیرخطی مؤلفه قائم (A_V) بزرگ‌نمایی تپه ذوزنقه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 4.3Hz

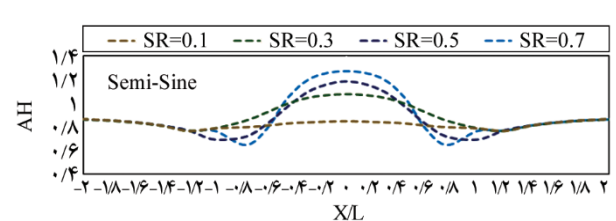
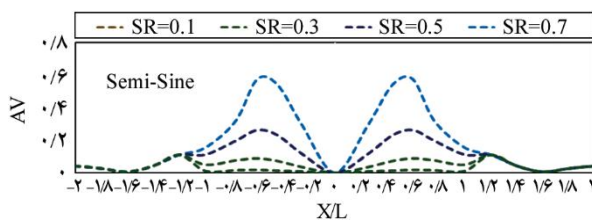
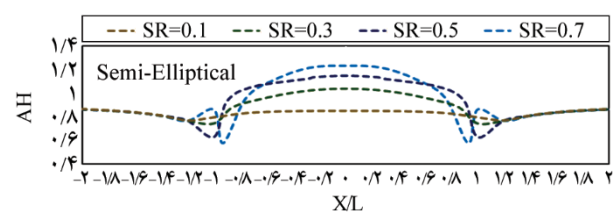
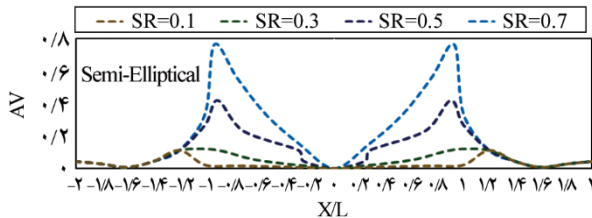
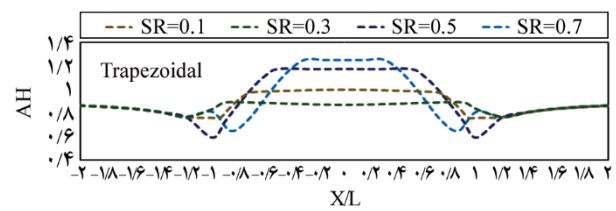
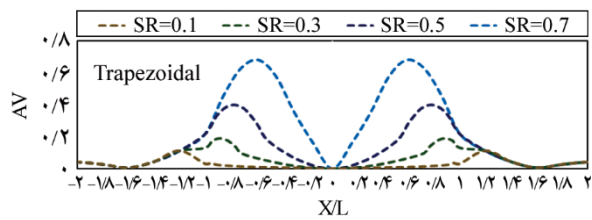
۵-۳- تأثیر ضریب شکل در عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل (SR)

شکل (۱۳) به مقایسه بزرگ‌نمایی غیرخطی مؤلفه افقی (A_H) در تپه‌های ذوزنقه‌ای شکل، نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی با ضرایب شکل مختلف از $0/1$ تا $0/7$ ، تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس $1/4$ هر تر بر مبنای مدل غیرخطی می‌پردازد.



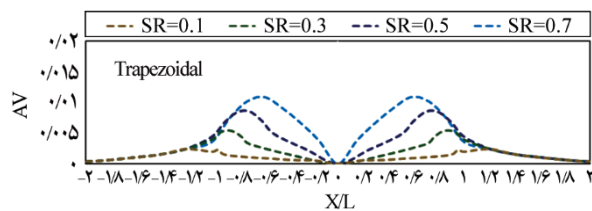
شکل (۱۳): الگوی مؤلفه افقی (A_H) بزرگ‌نمایی در رفتار غیرخطی و در ضرایب شکل مختلف عوارض تپه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 1.4Hz

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شکل هندسی تپه‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه محسوب می‌شود [۴ و ۹] به طوری که مقادیر حداکثر بزرگ‌نمایی در مدل‌های غیرخطی با فرکانس $1/4$ هر تر در تاج تپه با ضرایب شکل $0/1$ تا $0/7$ به ترتیب در شکل‌های ذوزنقه‌ای بیشترین مقدار ($1/2$ تا $1/9$) بوده و در شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی ($1/2$ تا $1/6$) که تقریباً مشابه است.

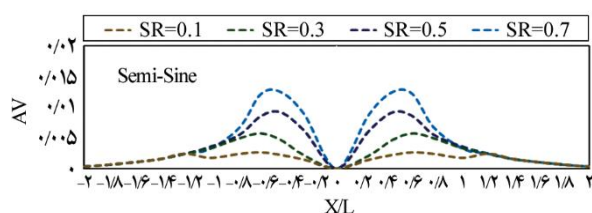
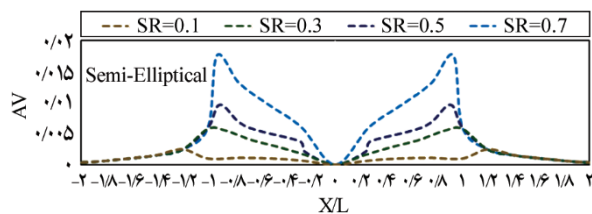


شکل (۱۵): الگوی مؤلفه قائم (A_V) بزرگ‌نمایی در رفتار غیرخطی و در ضرایب شکل مختلف عوارض تپه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 1.4Hz .

شکل (۱۴): الگوی مؤلفه افقی (A_H) بزرگ‌نمایی در رفتار غیرخطی و در ضرایب شکل مختلف عوارض تپه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 4.3Hz .



همچنین در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نتایج مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی (A_V) برای هندسه‌های مختلف تپه دوزنقه‌ای، نیم بیضی و نیم سینوسی در دو فرکانس کم و زیاد آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود مقادیر حداکثر مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی مدل غیرخطی در فرکانس‌های پایین ($1/4$ هرتز) در هر سه تپه دوزنقه‌ای، نیم بیضی و نیم سینوسی در محدوده 0.8 تا 0.2 قرار دارند. همچنین حداکثر A_V در محدوده نقاط تیز گوشه تپه دوزنقه‌ای شکل واقع شده است. در تپه‌های نیم سینوسی و نیم بیضی هرچه دامنه شیب (ضریب شکل) افزایش می‌یابد، مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی نیز افزایش یافته و با حرکت به سمت شیب و پای تپه کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۱۶)، مقادیر حداکثر بزرگ‌نمایی مؤلفه قائم در رفتار غیرخطی در محل نقاط تیز گوشه یا در شیب‌ها برای هر سه نوع تپه در محدوده 0.17 تا 0.04 قرار دارند که نشان از کاهش مؤلفه قائم در فرکانس‌های بالا ($4/3$ هرتز) دارد.



شکل (۱۶): الگوی مؤلفه قائم (A_V) بزرگ‌نمایی در رفتار غیرخطی و در ضرایب شکل مختلف عوارض تپه‌ای شکل از جنس رس ماسه‌ای سخت با $V_s=200\text{m/s}$ تحت اثر موج مهاجم ریکر با فرکانس 4.3Hz .

۵-۴- تأثیر ضریب امپدانس در تپه‌های دوزنقه‌ای (i)

به منظور نشان دادن تأثیر تغییرات سختی (سرعت موج)

در $i=0.19$ رخ می‌دهد که در محدوده $X/L=0.3$ یعنی در نقطه تیز گوشه تپه دوزنقه‌ای شکل با $SR=0.7$ قرار دارد. با افزایش ضرایب امیدانس، این الگو از نقطه تیز گوشه در بالای تپه به سمت شیب و پای تپه امتداد می‌یابد. لازم به ذکر است که تمامی پاسخ‌های مدل غیرخطی نسبت به مدل خطی در ضرایب امیدانس متناظر، کمتر می‌باشد. همچنین با افزایش فرکانس موج مهاجم به $4/3$ هرتز (شکل ۱۸) الگوی بزرگ‌نمایی در ضرایب امیدانس‌های مختلف از فرکانس‌های پایین (شکل ۱۷) تبعیت می‌کند، با این تفاوت که با افزایش فرکانس موج ورودی ریکر، مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی و همچنین مؤلفه قائم کاهش می‌یابند.

۵-۵- تغییرات حداکثر شتاب (PGA) با عمق

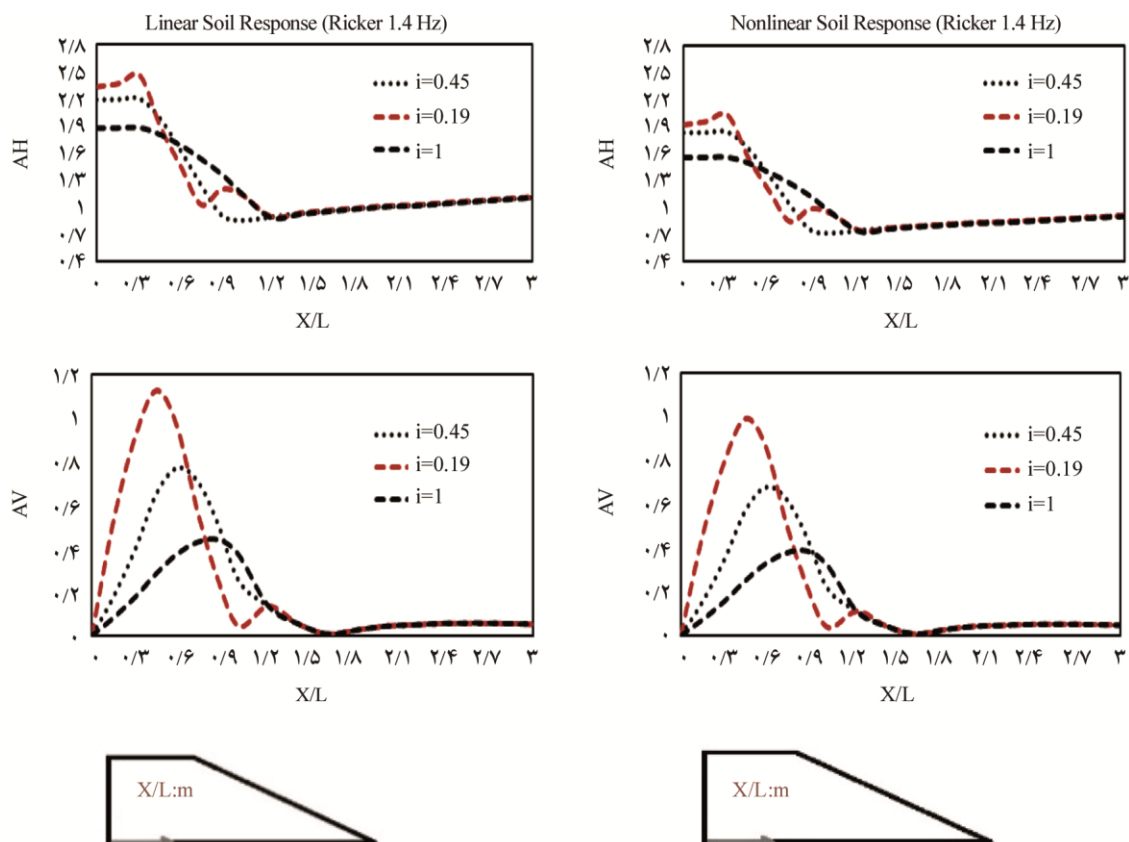
در شکل (۱۹) تغییرات حداکثر شتاب (PGA) با عمق در دو رفتار خطی و غیرخطی برای تپه دوزنقه‌ای شکل با ضریب شکل 0.7

مصالح در داخل تپه دوزنقه‌ای شکل نسبت به لایه بستر طبیعی، از نسبت امیدانس با رابطه زیر استفاده شده است:

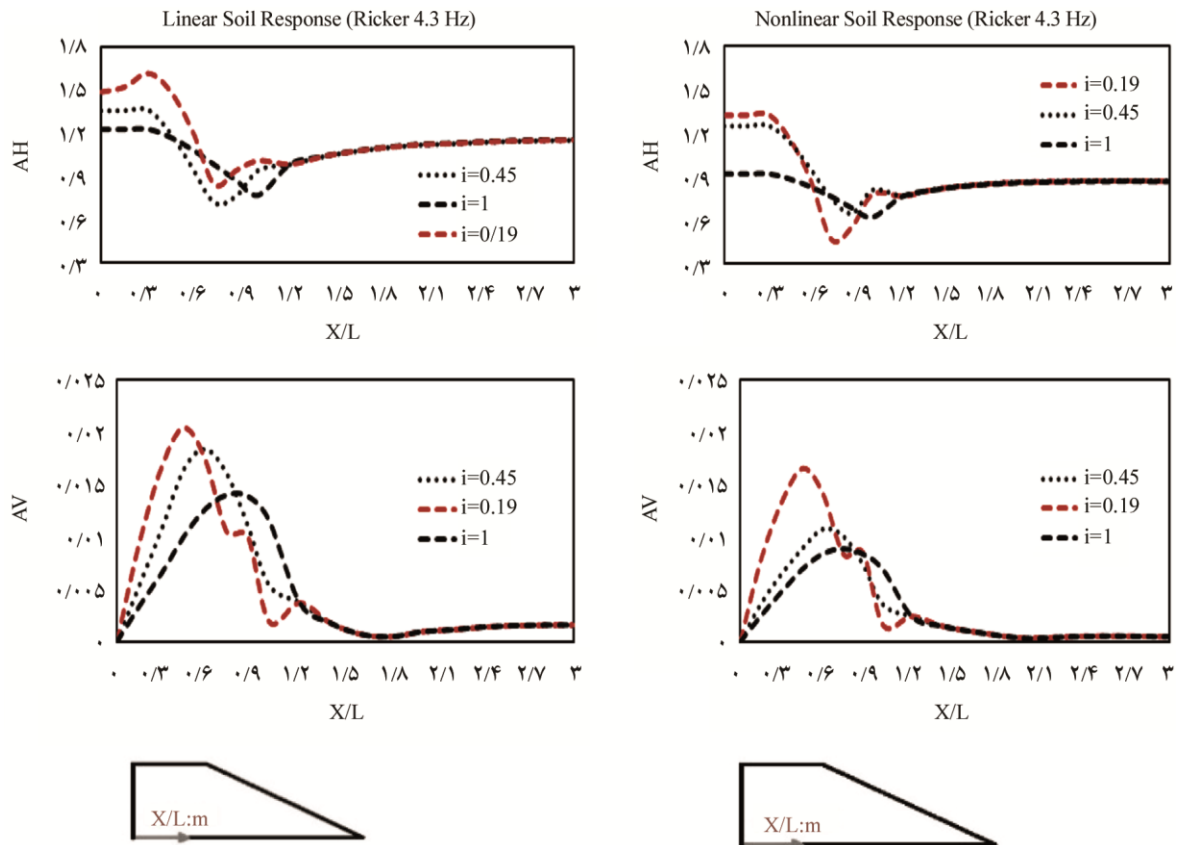
$$i = \frac{\rho_s V_s}{\rho_R V_R} \quad (11)$$

که در این رابطه V_s و ρ_s به ترتیب سرعت موج برشی و دانسیته خاک در مصالح داخل تپه و V_R و ρ_R به ترتیب سرعت موج برشی و دانسیته در لایه بستر می‌باشند. در این مطالعه از سه نسبت امیدانس $i=0.19$ مطابق با خاک نرم در داخل تپه نسبت به بستر، نسبت امیدانس متوسط ($i=0.45$) و سخت ($i=1$) استفاده شده است. همان‌طور که در مقایسه رفتار خطی و غیرخطی تپه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۱۷ و ۱۸) با تغییر جنس خاک تپه از نرم ($i=0.19$) به سخت ($i=0.45, 1$)، مؤلفه موافق و مخالف بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابند و انتظار می‌رود با تغییر امیدانس لایه‌های خاک از سخت (بستر سخت) به نرم (تپه)، پاسخ‌ها افزایش یابند.

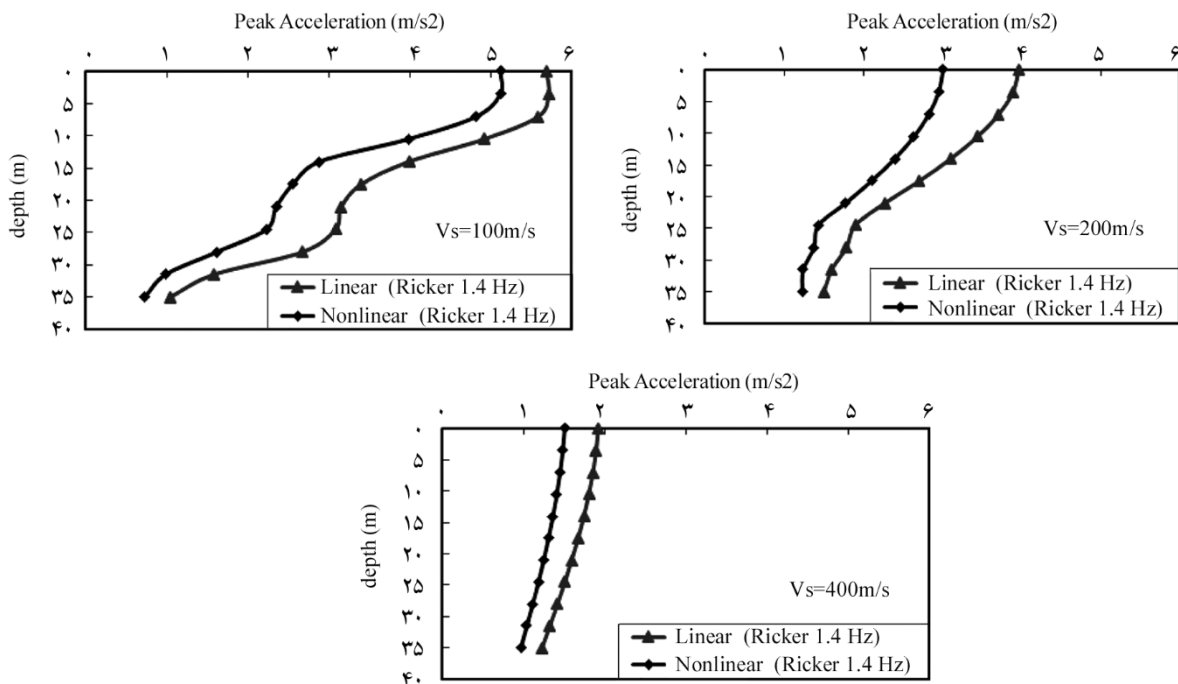
حداکثر مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی



شکل (۱۷): اثر نسبت امیدانس بر روی مؤلفه افقی (A_H) (نمودار بالایی) و مؤلفه قائم (A_V) بزرگ‌نمایی (نمودار پایینی) در دو رفتار خطی و غیرخطی در تپه دوزنقه‌ای شکل ($SR=0.7$) تحت اثر موج مهاجم با فرکانس 1.4Hz .



شکل (۱۸): اثر نسبت امپدانس بر روی مؤلفه افقی (A_H) (نمودار بالایی) و مؤلفه قائم (A_V) بزرگ‌نمایی (نمودار پایینی) در دو مدل خطی و غیرخطی در تپه دوزنقه‌ای شکل (SR=0.7) تحت اثر موج مهاجم با فرکانس 4.3Hz.



شکل (۱۹): تغییرات PGA با عمق در دو مدل خطی و غیرخطی در تپه دوزنقه‌ای شکل (SR=0.7) تحت اثر موج مهاجم با فرکانس 1.4Hz.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل سخت‌شونده کینماتیک و با کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به مطالعه پارامتریک عوامل مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل با دو رفتار خطی و غیرخطی پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا تپه دوزنقه‌ای شکل با چهار ضریب شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و با شیب ۴۵ درجه، مبنای مطالعات پارامتریک قرار گرفته شده است. سپس جهت بررسی تأثیر شکل هندسی توپوگرافی تپه، علاوه بر تپه دوزنقه‌ای، تپه‌ها با شکل‌های نیم‌سینوسی و نیم‌بیضی با چهار ضریب شکل یاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، برای تپه دوزنقه‌ای شکل تأثیر عوامل مؤثر نظیر نسبت امپدانس مصالح تپه به بستر و تغییرات PGA با عمق بررسی شده است. از جمله مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- به‌طور کلی در نظرگیری رفتار غیرخطی خاک می‌تواند منجر به برآوردهای کمتری برای پاسخ لرزه‌ای توپوگرافی تپه نسبت به رفتار خطی آن شود.

۲- طول موج امواج مهاجم، هندسه ساختگاه تپه، اختلاف سختی بین مصالح داخل تپه و بستر (نسبت امپدانس) از جمله پارامترهای کلیدی و حاکم بر الگوی تقویت لرزه‌ای تپه‌ها می‌باشند.

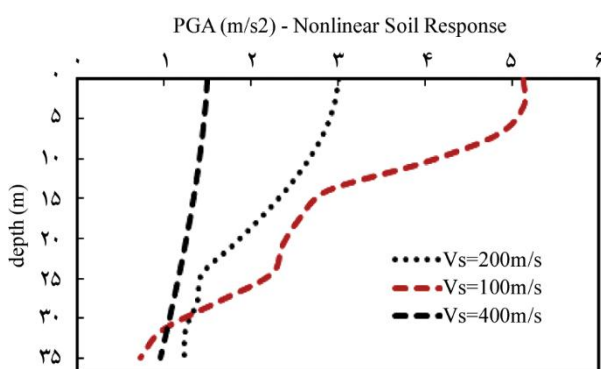
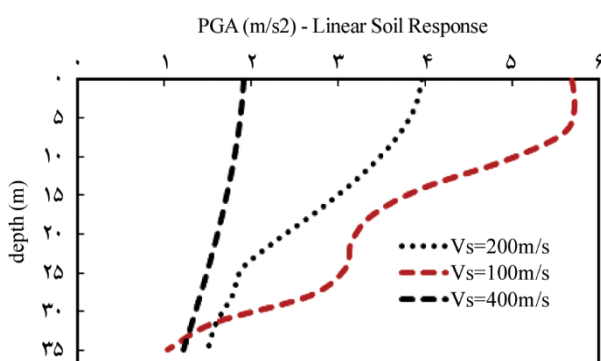
۳- در ضرایب شکل (SR) مختلف، حداکثر مقادیر بزرگ‌نمایی در محل تاج تپه در هر دو رفتار خطی و غیرخطی ایجاد می‌شود. این مقادیر در تپه‌های دوزنقه‌ای در رفتار خطی به حداکثر مقدار خود در ضریب شکل بیشینه (SR=0.7) می‌رسد که مقدار آن در حدود ۲/۲ بوده و در رفتار غیرخطی با کاهشی ۱۵ درصدی به حدود ۱/۹ رسیده است. علت اصلی ایجاد بزرگ‌نمایی امواج را می‌توان به سبب تمرکز امواج در نقاط بالایی تپه‌ها و به‌طور کلی حبس موج در داخل آنها دانست.

۴- با افزایش فرکانس موج تحریک به ۴/۳ هرتز، الگوی بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی در ضرایب

نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر PGA با افزایش عمق کاهش می‌یابند [۲۱]؛ که این کاهش در مصالح مختلف تپه و بستر می‌تواند متفاوت باشد.

در تپه‌های دوزنقه‌ای شکل با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه برای تپه و ۴۰۰ متر بر ثانیه برای بستر، کاهش PGA با عمق در هر دو رفتار خطی و غیرخطی از یک الگوی تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند که در محدوده‌ی بین ۱ متر بر مجذور ثانیه (در عمق تپه) تا حداکثر ۴ متر بر مجذور ثانیه (در تاج تپه) قرار دارد.

مطابق شکل (۲۰) با نرم‌تر شدن سختی مصالح تپه (سرعت موج برشی ۱۰۰ متر بر ثانیه) نسبت به بستر ملاحظه می‌شود که مقادیر PGA در سطح تپه بیشتر در هر دو رفتار خطی و غیرخطی می‌شود که تغییرات آن از تاج تپه تا عمق در بازه ۱ تا ۶ متر بر مجذور ثانیه قرار دارد. در واقع با تغییر نسبت امپدانس لایه‌ها از خاک سخت (بستر سخت) به خاک نرم (تپه)، پاسخ‌ها افزایش می‌یابند.



شکل (۲۰): مقایسه تغییرات PGA با عمق در دو مدل خطی و غیرخطی در خاک‌ها با سرعت‌های موج برشی مختلف در تپه دوزنقه‌ای شکل (SR=0.7) تحت اثر موج مهاجم با فرکانس 1.4Hz.

۸- مقادیر PGA با افزایش عمق کاهش می‌یابد که این کاهش در مصالح مختلف تپه و بستر می‌تواند متفاوت باشد. در تپه‌های دوزنقه‌ای شکل با سرعت موج برشی ۲۰۰ متر بر ثانیه برای تپه و ۴۰۰ متر بر ثانیه برای بستر، کاهش PGA با عمق در هر دو رفتار خطی و غیرخطی از یک الگوی تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند که در محدوده‌ی بین ۱ متر بر مجذور ثانیه (در عمق تپه) تا حداکثر ۴ متر بر مجذور ثانیه (در تاج تپه) متغیر است. همچنین با نرم‌تر شدن سختی مصالح تپه (سرعت موج برشی ۱۰۰ متر بر ثانیه) نسبت به بستر ملاحظه می‌شود که مقادیر PGA در سطح تپه در هر دو رفتار خطی و غیرخطی بیشتر می‌شود که تغییرات آن از عمق تا تاج تپه در بازه ۱ تا ۶ متر بر مجذور ثانیه قرار دارد. در واقع تغییر نسبت امپدانس لایه‌ها از خاک سخت (بستر سخت) به خاک نرم (تپه)، منجر به افزایش پاسخ‌ها خواهد شد.

در انتها باید خاطر نشان نمود که نتایج این تحقیق می‌تواند در مطالعات ریزپهنه بندی نواحی مختلف شهری کاربرد داشته باشد و باید به این نکته اشاره نمود که در تپه‌ها با مصالح نرم‌تر نسبت به بستر که رفتار خاک می‌تواند غیرخطی باشد، استفاده از مدل خطی می‌تواند منجر به ارائه نتایج دور از واقعیت شود. البته در این تحقیق مصالح داخل تپه به صورت همگن در نظر گرفته شده است که در آینده می‌توان تأثیر لایه بندی خاک بر رفتار غیرخطی عوارض توپوگرافی تپه‌ای شکل را نیز مد نظر قرار داد. همچنین می‌توان پاسخ‌های به دست آمده در فرکانس‌های دیگر لرزه‌ای و بارگذاری زلزله واقعی را نیز مورد بررسی قرار داد.

مراجع

1. Assimaki, D. and Jeong, S. (2013) Ground-motion observations at hotel Montana during the M 7.0 2010 Haiti earthquake: Topography or Soil Amplification? *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**(5).
2. Bouchon, M. and Barker, J. (1996) Seismic

شکل مختلف از همان الگوی فرکانس ۱/۴ هرتز تبعیت می‌کند، با این تفاوت که با افزایش فرکانس موج مهاجم، مقادیر مؤلفه افقی (A_H) و قائم (A_V) بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد. افزایش فرکانس موج ورودی به ۴/۳ هرتز، منجر به کاهش طول موج نسبت به ابعاد تپه می‌شود که این کاهش، سبب کم شدن مقادیر مؤلفه افقی و قائم بزرگ‌نمایی در سراسر تپه نسبت به فرکانس کم یعنی ۱/۴ هرتز خواهد شد.

۵- شکل هندسی تپه‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان محسوب می‌شود. به طوری که مقادیر حداکثر بزرگ‌نمایی در مدل‌های غیرخطی با فرکانس ۱/۴ هرتز در تاج تپه با ضرایب شکل ۰/۱ تا ۰/۷ به ترتیب در شکل‌های دوزنقه‌ای بیشترین مقدار (۱/۲ تا ۱/۹) بوده و در شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی (۱/۲ تا ۱/۶) که تقریباً مشابه است.

۶- مقادیر حداکثر مؤلفه قائم (مخالف) بزرگ‌نمایی (A_V) که به علت تولید امواج سطحی ایجاد می‌شود، در محدوده فرکانس‌های پایین (۱/۴ هرتز) برای رفتار غیرخطی تپه در هر سه تپه دوزنقه‌ای، نیم‌بیضی و نیم‌سینوسی در بازه ۰/۸ تا ۰/۲ قرار دارند. علاوه بر این، با افزایش ضریب شکل، مؤلفه قائم بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد و برخلاف مؤلفه افقی، محل حداکثر بزرگ‌نمایی مؤلفه قائم امواج در تاج تپه نمی‌باشد.

۷- به منظور بررسی تأثیر تغییرات نسبت امپدانس مصالح داخل تپه نسبت به بستر، با تغییر جنس خاک تپه از نرم ($i=0.19$) به متوسط ($i=0.45$) و سخت ($i=1$)، مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه افقی و قائم کاهش می‌یابد و انتظار می‌رود با تغییر نسبت امپدانس از خاک سخت (بستر سخت) به خاک نرم (تپه)، پاسخ‌ها افزایش یابند. در واقع حداکثر بزرگ‌نمایی‌ها در رفتار خطی و غیرخطی در $i=0.19$ رخ می‌دهد که در محدوده $X/L=0.3$ یعنی در نقطه تیز گوشه تپه دوزنقه‌ای شکل با $SR=0.7$ قرار دارد.

- component. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), 3035-3054.
12. Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, and Gazetas, G. (2012) Nonlinear dimensional analysis of trapezoidal valleys subjected to vertically propagating SV wave. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(3), 999-1017.
 13. Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., Sharegi, A. (2014) Spectral assessing of topographic effects on seismic behavior of trapezoidal hill. *International Journal of Environment, Earth Science and Engineering*, **8**(4).
 14. Armstrong, P.J., and Frederick, C.O. (1966) A mathematical representation of the multiaxial bauschinger effect. *CEGB Rep. No. RD/B/N 731*.
 15. Lemaitre, J. and Chaboche, J.L. (1990) *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
 16. Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., and Gazetas, G., ASCE, M. (2011) Simplified constitutive model for simulation of cyclic response of shallow foundations: Validation against laboratory test. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(12), 1154-1168.
 17. Ziegler, H. (1959) A modification of Prager's hardening rule. *Quart. Appl. Math.*, **17**, 55-65.
 18. Gerolymos, N., Gazetas, G., and Tazoh, T. (2005) Seismic response of yielding pile in non-linear soil. *Proc. 1st Greece-Japan Workshop, Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, National Technical Univ. of Athens, Athens, Greece, 25-36.
 19. CEN Eurocode 8 (EC8) (2006) *Design of Structures for Earthquake Resistance*. EN 1998-5. European Committee for Standardization, Brussels.
 20. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990) *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Cornell University, Geotechnical Engineering Group, Hollister Hall Ithaca (EL-6800), New York 14853-3501.
 21. Jin, D.D., Chen, J.X., and Dong, F.F. (2014) Seismic Response of a Real Basin Site Considering Topography Effect and Nonlinear Characteristic of Soil. *International Effort in Lifeline Earthquake Engineering*.
 - response of a hill: The example of Tarzana, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(1A), 66-72.
 3. Bouchon, M. (1973) Effect of topography on surface motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**.
 4. Sanchez-Sesma, F.J. (1987) Site effects on strong ground motion. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **6**, 124-132.
 5. Moczo, P., Bystricky, E., Kristek, J., Carcione, J.M., and Bouchon, M. (1997) Hybrid modeling of P-SV seismic motion at inhomogenous viscoelastic topographic structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 1305-1323.
 6. Bouckovalas, G., Papadimitriou, D., Achilleas, G. (2005) Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 547-558.
 7. Kamalian, M., Jafari, M., Sohrabi-bidar, A., Razmkhah, A. (2007) Seismic response of 2-D trapezoidal shaped hills to vertically propagating incident waves. *Fani Mohandesi Modarres*, No. 29 (in Persian).
 8. Kamalian, M., Jafari, M., 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*, **24**(2), 405-430.
 9. Razmkhah, A., Kamalian, M., and Alielahi, H. (2008) Seismic behavior of 2D topographic features subjected to vertically propagating incident SV at high frequency. *Proc. of the 4th Decennial Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference (GEESD 5)*, EESD Committee of ASCE's Geo-Institute.
 10. Psarropoulos, P.N., Tazoh, T., Gazetas, G., Apostolou, M. (2007) Linear and nonlinear valley amplification effects on seismic ground motion. *Soil and Foundation*, **47**(5), 857-871.
 11. Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., Tazoh, T and Gazetas, G. (2010) Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: Sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical

واژه‌نامه

ABAQUS	۱- آباکوس
Von-Mises	۲- وون- مایسنز
Trapezoidal Hill	۳- تپه دوزنقه‌ای شکل
Semi-Sine	۴- نیم سینوسی
Semi-Elliptical	۵- نیم بیضی
Hill	۶- تپه
Canyon	۷- دره
Cliff	۸- پرتگاه
Slope	۹- شیب
Scattered	۱۰- تفرق یافته
Kinematic Hardening Constitutive Model	۱۱- مدل سخت‌شوندگی کینماتیک
Associate Flow Rule	۱۲- قانون جریان پلاستیک
Back Stress	۱۳- پس تنش
Soft Silty Clay	۱۴- رس سیلتی نرم
Stiff Sand Clay	۱۵- رس ماسه‌ای سخت
Free-Field	۱۶- سطح زمین آزاد
Fourier Amplitude	۱۷- دامنه فوریه

Assessment of Seismic Non-linear Behavior of Hill-Type Topographies Subjected to propagating SV Waves

Mohammad Majd Pezeshki¹ and Hamid Alielahi^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran,

* Corresponding Author, email: h.alielahi@iazu.ac.ir

Introduction

Generally, topographic effects are mostly introduced by hills, canyons, basins, and slopes. Besides, the topographic features produce significant seismic site-effects and can apply a crucial influence on the severity of building damages and its spatial distribution during earthquakes. Some experience observation such as Tarzana hill in the 1994 Northridge earthquake and the Kushiro Meteorological Observatory in the 1993 Kushiro-Oki earthquake, revealed the effective role of surface topographies such as hill and ridges on the seismic damage on the crest and hillsides.

Reviewing the technical literature can deduce that the most studies about the effects of topography and the amplification patterns are limited to the linear behavior of the medium. However, the use of linear models to estimate amplification patterns of waves can lead to misleading results than the actual behavior of the soil, especially in the soft soils. The non-linear seismic behavior of the hill topographic features unknown in comparison with other types of topographic irregularities, e.g. basins or alluvial valleys. Hence, in this study, the effects of non-linear behavior of the hill type of topographies due to propagating SV waves using ABAQUS program in the form of parametric studies are discussed. In this regard, the trapezoidal-shaped hill has been taken into account for parametric study with four shape ratio (SR=0.1, 0.3, 0.5 and 0.7). Besides, in order to evaluate the effect of topography geometry, the semi-sine and semi- elliptical shapes of the hills have been studied. The constitutive model used herein is based on non-linear Kinematic Hardening model with Von-Mises failure criterion.

Parametric Studies

In this research, the finite element method (ABAQUS software) is used to evaluate the hill-type Topographies behavior due to the vertically in-plane propagating incident SV waves. The hill-type Topographies has been excited vertically by Ricker-type pulse excitations. In this regard, two center frequencies (f_p) of low (i.e. 1.4 Hz) and high (i.e. 4.3 Hz) have been considered to cover all frequency responses with a maximum acceleration equal to 0.3 g. The constitutive model used herein is based on non-linear Kinematic Hardening model, which is suitable for clay materials. The results are presented as horizontal component amplifications (direct component) or vertical (indirect component). Spectral amplifications have been defined with respect to the free-field motion, based on the maximum Fourier amplitude of the horizontal or vertical component, to the maximum Fourier amplitude of the Free-field motion. In this research, the horizontal and vertical component amplifications are shown, with A_H and A_V abbreviations, respectively. Moreover, the obtained results provided for the dimensionless distance (X/L) in which X is points from the center of the hill and L is half the width of the hill. All results have been compared in two linear and non-linear soil behaviors.

Concluding Remarks

The obtained results indicated that considering the non-linear soil behavior can reduce seismic response of topographic effects in comparison with linear behavior. Furthermore, the maximum amplification appears on the crest of the hill in both linear and non-linear behaviors. The non-linear amplification values reduced about 15 percent at the

lower frequencies for the trapezoidal-shaped hill with shape ratio (SR) of 0.7 compared with linear behavior. The seismic response of topographic irregularities tends towards free-field ground motion with far from surrounding hills. Besides, in this research the PGA values versus depth and the impedance ratio between inside of hill and its base materials have been studied.

The results of this research can be used in seismic hazard and microzonation studies of various urban areas and to point out this the hills with softer materials than the bed, where soil behavior can be non-linear and using linear models, can lead to misleading results than the actual behavior of the soil.

Keywords: Non-linear Behavior, Hill-Type Topographies, Amplification, Numerical Method, SV Waves.