

چکیده

اثرات توپوگرافی می‌تواند طبیعت لرزش زمین را در طول زلزله تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه خوشبختانه اثر توپوگرافی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای زمین در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و در دستور کار راهنما و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای گنجانده شده، ولی همچنان ابعادی از تأثیر این عامل پیچیده بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، نیاز به مطالعه و بررسی دقیق‌تر دارد تا کمتر شاهد خسارات پیش‌بینی‌نشده‌ی ناشی از عامل توپوگرافی در زلزله‌ها و یا هرگونه حرکات لرزه‌ای زمین باشیم. در یک حرکت لرزه‌ای، توپوگرافی محیط اطراف سبب گیر افتادن و انعکاس امواج لرزه‌ای در بین عوارض توپوگرافی می‌شود و این پدیده موجب تشدید بیشتر حرکت لرزه‌ای در بین نامنظمی‌های توپوگرافی می‌شود. در این مقاله به‌منظور بررسی چگونگی اثر عامل توپوگرافی محیط اطراف بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، چندین مطالعه‌ی عددی المان محدود با به‌کارگیری برنامه‌ی آباکوس (ABAQUS) انجام شده است. نتایج نشان داد که وجود عوارض توپوگرافی بیشتر بین منبع لرزه‌زا و ساختگاه، سبب تشدید بیشتر حرکت لرزه‌ای می‌شود و این امر برای تپه‌های دورتر از منبع و نقاط خط‌الرأس توپوگرافی‌ها، محسوس‌تر است. همچنین شتاب ساختگاه بیش از سرعت و جابه‌جایی تحت تأثیر عامل توپوگرافی محیط اطراف (اثر متقابل توپوگرافی‌ها) قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: اثرات توپوگرافی، توپوگرافی محیط اطراف، پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، نرم‌افزار آباکوس، نرم‌افزار پلکسیس.

بررسی اثر عوارض توپوگرافی‌های هم‌جوار بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه

سعید غفاریور جهرمی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

Saeed_ghf@srttu.edu

سما کارخانه

دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۱- مقدمه

اخیر ارمنستان در سال ۲۰۰۳ [۷]. اغلب پس از زلزله‌های مخرب گزارش شده است که در مناطق کوهستانی ساختمان‌هایی که بر روی صخره‌ها یا تپه‌ها قرار گرفته‌اند بسیار بیشتر از ساختمان‌های روی بستر صاف آسیب دیده‌اند. این چنین فروپاشی و آسیب‌های پیش‌بینی نشده، به دلیل عدم تجدید نظر به‌موقع در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ای است [۸-۱۰]. نقش توپوگرافی در زمین‌لرزه‌های بزرگ و در مناطقی که از نظر پستی و بلندی متنوع باشد پدیدار خواهد شد. بررسی زمین‌لرزه‌های گذشته نشان می‌دهد که زمین ناهموار باعث پیچیدگی امواج لرزه‌ای می‌شود. ارتفاعات معمولاً باعث افزایش دامنه، و دره‌ها باعث کاهش دامنه‌ی امواج می‌شوند. سازه‌های واقع بر روی قله‌های کوه، نسبت به آنهایی که پایه کوه قرار گرفته‌اند در اثر زمین‌لرزه‌های

اثرات توپوگرافی بر روی دامنه و محتوای فرکانسی حرکت زمین، امری ملموس و مشهود است. بررسی‌ها نشان داده است که توپوگرافی، هندسه و فاصله از منبع لرزه‌ای، نقش اساسی در تقویت حرکت لرزه‌ای زمین ایفا می‌کنند [۱]. اثرات توپوگرافی می‌تواند طبیعت لرزش زمین را در طول زلزله تحت تأثیر قرار دهد. در گذشته‌ی نزدیک چندین وضعیت ثبت شده و مشاهده شده از زلزله نشان داده است که توپوگرافی تأثیر زیادی در میزان خسارات ناشی از زلزله داشته است [۲-۳] و منجر به تأثیرات مستقیم در پاسخ لرزه‌ای می‌شود [۴]. از جمله زلزله‌هایی که وجود بی‌نظمی‌های توپوگرافی، سبب خسارات بیشتر در این نواحی شده است عبارتند از: زلزله‌ی سان‌فرناندو در سال ۱۹۷۱ [۵]، زلزله‌ی شیلی ۱۹۸۵ [۶]، زلزله‌ی ارمنستان ۱۹۹۸ و زلزله‌ی

سید و ایدریس [۱۸] یکی از اولین کسانی بودند که به طور خاص در مورد رفتار لرزه‌ای شیب‌های خاکی مطالعاتی انجام دادند. آنها در سال ۱۹۶۷ بر روی شیب‌های رسی با زاویه‌ی ۲۷ درجه و سپس بر روی شیب‌های ۴۵ درجه مطالعات پارامتریکی انجام دادند. مشاهدات آنان از این قرار بود که شتاب سطحی ماکزیمم در تاج شیب‌ها بیشتر از پای شیب‌ها است و در ناحیه‌ی تاج شب مؤلفه‌ی عمودی حرکت در اثر حرکت افقی زلزله تولید می‌شود. بور [۱۹-۲۰] در سال ۱۹۷۲، نتایج ثبت شده توسط لرزه‌نگارها در سد پاکویما را با مدل‌سازی تفرق امواج SH مقایسه کرد و در سال ۱۹۷۳، به مطالعه‌ی اثر توپوگرافی در نزدیکی این سد و به کمک اطلاعات ثبت شده توسط لرزه‌نگارها پرداخت. یکی از نتایج مهم وی تشدید تأثیر عوارض توپوگرافی در فرکانس‌های بالا بود. دیویس و وست [۲۱] در سال ۱۹۷۳، با ایجاد موج‌های لرزه‌ای با مشخصات چشمه و مسیر یکسان به بررسی چگونگی تأثیر توپوگرافی بر امواج لرزه‌ای پرداختند. این انفجارها مشابه زلزله‌هایی با بزرگ‌سایه‌ی بین ۲/۶ تا ۳/۲ بودند. مشاهدات آنها از این قرار بود که قله‌های کوچک و متوسط در محدوده‌ی پی‌رود کوچک و قله‌های بزرگ در باند پی‌رود بزرگ‌تر و به مقدار کمتری امواج را تشدید کردند. این اثر در حوضه‌ی زمان کم‌رنگ‌تر بود. در همین سال بوچون [۲۲] به بررسی تأثیر عوارض توپوگرافی سطحی با روش آکی-لارنر و در حوزه‌ی فرکانس پرداخت. بر اساس نتایج مطالعات وی بر روی امواج SH، بزرگ‌نمایی روی تپه و کوچک‌نمایی روی یال تپه مشاهده شد که این مهم در محدوده‌ی طول موج‌های قابل مقایسه با ابعاد عارضه و بزرگ‌تر از آن ملموس‌تر بود و همچنین، با افزایش نسبت شکل تپه، بر میزان و محدوده‌ی نواحی بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی افزوده می‌شد. سیتار و کلاف [۲۳] در سال ۱۹۸۳، از یک مدل دو بعدی المان محدود استفاده کردند تا تقویت حرکت ناشی از امواج لرزه‌ای را در تاج شیب نسبت به محیط آزاد پشت تاج شیب نشان دهند اما متوجه شدند که تأثیر عامل توپوگرافی در منطقه‌ی آزاد پشت تاج به دلیل

مخرب آسیب بیشتری می‌بینند. داده‌های دستگاهی نیز این نظریه‌ها را تأیید کرده است [۱۱]. با این حال اکثر مطالعات در این زمینه اثرات کلی این عامل تأثیرگذار را مورد بحث قرار داده‌اند؛ بنابراین، نگاهی جزئی‌تر و همه‌جانبه‌تر به تأثیر عامل توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه امری الزامی است.

اثرات دو بعدی ساختگاه بر بزرگ‌نمایی و محتوای فرکانسی، با ثبت داده‌های دستگاهی و مشاهدات تجربی آشکار شدند [۱۲]. به طور کلی، حرکت لرزه‌ای ساختگاه تابع سه عامل مشخصات گسل (منبع)، مسیر انتشار امواج لرزه‌ای (مسیر) و شرایط توپوگرافی و ژئولوژیکی محلی (ساختگاه) است [۱۳]. طبیعت اثرات محلی ساختگاه را می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف، مانند تحلیل ساده‌ی تئوری پاسخ زمین، اندازه‌گیری‌های حرکات واقعی سطحی و زیرسطحی در همان ساختگاه و اندازه‌گیری حرکات سطح زمین در ساختگاه‌هایی با شرایط متفاوت از ساختگاه مورد نظر تشریح نمود [۱۴]. اندرکنش امواج می‌تواند بسته به هندسه‌ی بی‌قاعدگی‌ها و انواع آن، فرکانس‌ها و زوایای برخورد امواج ورودی، الگوی پیچیده‌ای از تشدید و میرایی را ایجاد کند. مجموع بررسی‌های انجام شده در مورد پدیده‌ی بزرگ‌نمایی نشان داده است که چهار عامل اساسی در وقوع این پدیده مؤثر هستند که عبارتند از: اثر سطحی، اثر گهواره‌ای^۱، اثر کانونی شدن^۲ و اثر پراکندگی امواج^۳ این اثرات بیشتر توسط پدیده‌های کانونی شدن، انعکاس و پراکنش انرژی موج‌های لرزه‌ای ایجاد می‌شوند [۱۵]. با این حال اثرات دیگری نیز در تشدید ساختگاه مؤثر هستند. یکی از آنها بزرگ‌تر بودن تشدید در ساختگاه در یک راستای مشخص است که توسط ویدل و همکاران [۱۶] و بوناماسا و ویدال [۱۷] در سایت‌های کالیفرنیا گزارش شده است که به آن تشدید جهت‌دار گفته می‌شود. سایر اثرات مانند اندرکنش سایت و سازه و یا پاسخ سایت در نواحی خیلی نزدیک، در بعضی موارد ممکن است اثرات زیاد داشته باشد. اثرات محلی ساختگاه نقش مهمی در طراحی مقاوم در برابر زلزله ایفا می‌نمایند و باید برای هر حالت به صورت مجزا با آن برخورد لازم صورت پذیرد.

فاکتور تقویت افزایش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۰، بوئچ و همکاران [۱] حرکت لرزه‌ای را در جنوب رشته کوه‌های آلپ در نیوزیلند بررسی کردند. هفت لرزه‌سنج در امتداد تاج، دامنه و پای توپوگرافی نصب شد. داده‌های دستگاه‌ها در مدت چندین زلزله ثبت و با هم مقایسه شد. به این ترتیب، تقویت و یا عدم تقویت امواج لرزه‌ای در نقاط مختلف یک ناهمواری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج از این قرار بود که بیشترین میزان تقویت حرکت لرزه‌ای در نقاط خط الرأس صورت می‌پذیرد. همچنین، بررسی‌ها نشان داده که توپوگرافی، هندسه و فاصله از منبع لرزه‌ای، نقش اساسی در تقویت حرکت لرزه‌ای زمین ایفا می‌کنند. در سال ۲۰۱۲، کمالیان و همکاران [۲۸] به بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی مرکب دوگانه تحت امواج مهاجم قائم برشی (SV) پرداختند. به این منظور رفتار تپه‌های مرکب همسان و ناهمسان دوگانه‌ی نیم‌سینوسی تحت موج مهاجم ریکر را با تپه‌ی منفرد نظیر آنها مقایسه کردند در این مطالعه از روش پیوندی به منظور حل مسئله استفاده شد. نتیجه‌ی بررسی از این قرار بود که اگرچه الگوی کلی رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه با حالت تپه‌ی منفرد مشابه است اما اثر متقابل توپوگرافی‌ها سبب افزایش پتانسیل بزرگنمایی قله‌ها به خصوص در تپه‌های کوچک‌تر می‌شود و به لحاظ کمی نمی‌توان آن را با یک توپوگرافی دارای نسبت شکل معادل شبیه‌سازی کرد. در سال ۲۰۱۲، دوسلیه و همکارانش [۲۹] اثر متقابل بین بی‌نظمی‌های توپوگرافی و حرکت لرزه‌ای زمین با استفاده از روش پیوندی را بررسی کردند. به این صورت که میزان تقویت امواج لرزه‌ای برای مجموعه‌ای از تپه‌ها و یک تپه‌ی تنها مقایسه شد. این مطالعه این حقیقت را روشن کرد که در هنگام ارزیابی اثر توپوگرافی محیط، توپوگرافی محیط اطراف باید علاوه بر توپوگرافی محلی در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۱۵، جعفرزاده و همکاران [۳۰] نقش عامل توپوگرافی در ناپایداری شیب لرزه‌ای را بررسی کردند. آنها چندین مطالعه‌ی عددی المان محدود با به کارگیری برنامه‌ی آباکوس انجام دادند. همچنین، دو مدل فیزیکی شیب ساخته و این مدل‌ها را با دستگاه میز لرزه آزمایش کردند. جابه‌جایی

زمان تناوب منطقه کاهش می‌یابد. جیسون [۲۴] در سال ۱۹۸۷ تشدید تقویت شده در نزدیکی تاج تپه طی پنج زلزله‌ی ماتسوزاکی ژاپن را اندازه‌گیری نمود. وی مشاهده کرد که «شتاب بیشینه» متوسط تاج حدود ۲/۵ برابر شتاب متوسط قاعده می‌باشد. در سال ۲۰۰۵، کمالیان و همکاران [۲۵] در تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختمان از فرمول‌بندی تازه‌ای در روش المان مرزی در حوزه‌ی زمان و حالت دو بعدی استفاده کردند که نسبت به روش‌های پیشنهادی محققان پیشین دقت عمل بیشتری را دارا بود. در سال ۲۰۰۶، کمالیان و همکاران [۲۶] با بررسی رفتار لرزه‌ای توپوگرافی‌های غیرهمگن با استفاده از روش هیبرید (تلفیق روش المان محدود و المان مرزی) در حالت دو بعدی نشان دادند که نامنظمی‌های سطحی با ضریب شکل بیشتر از یک و همچنین موج لرزه‌ای حادث با نسبت طول موج به پهنای نامنظمی کمتر از ۸ می‌تواند اثر نامنظمی‌های توپوگرافی را به میزان قابل توجهی افزایش دهند. همچنین روش بسیار کارآمدی را جهت تجزیه و تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختمان در حالت دو بعدی و در حوزه‌ی زمان ارائه دادند. کمالیان و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۰۷، با استفاده از الگوریتم اجزای مرزی نرم‌افزار هیبرید مطالعه‌ی جامعی در خصوص رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی انجام دادند. در این بررسی طیف وسیعی از تپه‌های نیم‌سینوسی از لحاظ ضریب شکل، نسبت پواسون محیط و نسبت عرض تپه به طول موج مهاجم در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه آنکه اثر توپوگرافی صرف‌نظر از نوع موج مهاجم، در درجه‌ی اول تابع نسبت شکل تپه و نیز نسبت عرض آن به طول موج مهاجم، و در درجه‌ی دوم تابع ضریب پواسون محیط است. همچنین، به ازای نسبت‌های شکل کوچک و نیز امواج با طول خیلی بلند، پاسخ لرزه‌ای تپه به سمت پاسخ لرزه‌ای آزاد زمین میل خواهد کرد. همچنین این محققان، پاسخ لرزه‌ای زمین در شیب‌ها را در حالت دو بعدی با تابش امواج عمودی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تاج شیب یک نقطه‌ی بحرانی است همچنین کمترین میزان تقویت در پایین شیب رخ می‌دهد و با زیاد شدن شیب میزان

شیب با استفاده از روش‌های متنوع تجربی محاسبه و نتایج حاصل از آن با حالت عددی آن مقایسه شد. نتایج ثابت کرد که برای افزایش دقت فرمول‌های تجربی در پیش‌بینی جابه‌جایی، اثر موج سطحی باید در نظر گرفته شود. در نهایت، مفهوم «عمق مؤثر تقویت سطحی» معرفی شد و تأثیر آن را بر عملکرد لرزه‌ای شیب، ارزیابی شد. به‌طور کلی، مطالعات و بررسی‌های بسیار گسترده و ارزشمندی در رابطه با تأثیر توپوگرافی منفرد بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه با مد نظر قرار دادن پارامترهای مهم و دخیل بر آن از جمله نوع هندسه و ضریب شکل توپوگرافی، نسبت طول موج امواج تابشی و همچنین نسبت محتوای فرکانسی زلزله‌ی ورودی به ابعاد و ویژگی‌های هندسی توپوگرافی، زاویه‌ی موج حادث، لایه‌بندی‌های زیرسطحی و ... انجام شده است و آنچه کمتر مورد توجه قرار گرفته اثر متقابل نامنظمی‌های توپوگرافی (توپوگرافی محیط اطراف) است.

در حقیقت حتی توصیه‌های فنی جهت در نظر گرفتن اثرات ساختگاه تا سال‌های ۱۹۷۰ در آیین‌نامه‌ها عنوان نشده بود [۱۵]. آیین‌نامه‌هایی که تا کنون اثرات دو بعدی توپوگرافی را در دستور کار خود لحاظ کرده‌اند، آیین‌نامه‌ی PS-92 فرانسه و آیین‌نامه‌ی اروپا (EC-8 (2000-Draft 2002) و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم می‌باشد. در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (S_T) برای شیب‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۰ متر و با زاویه‌ی میانگین بیش از 15° در نظر گرفته شده است. این ضریب تنها در ثلث فوقانی ارتفاع شیب‌ها اعمال می‌شود و حداکثر مقدار آن $1/4$ است. مقدار ضریب اعمالی با تغییر زاویه‌ی شیب توپوگرافی تغییر می‌کند [۳۱]. به این معنا که سایر پارامترهای توپوگرافی از جمله نوع شکل هندسی، ارتفاع شیب، طول شیب، نوع مصالح و تعداد عوارض توپوگرافی در نظر گرفته نشده است. در آیین‌نامه‌ی اروپا (EC.8)، ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی برای بی‌نظمی‌هایی نظیر تپه‌های با طول زیاد و صخره‌هایی با ارتفاع بیشتر از ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. چنانچه زاویه‌ی میانگین شیب کمتر از 15° باشد، از اثر توپوگرافی چشم‌پوشی شده است. در این آیین‌نامه برای شیب‌ها

و صخره‌های تنها، ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی بزرگ‌تر مساوی $1/2$ ($S_T \geq 1/2$) به ناحیه‌ی نزدیک بالای لبه‌ی توپوگرافی اعمال می‌شود. برای تپه‌هایی که عرض تاج آنها به مقدار قابل توجهی کمتر از عرض پی آنهاست، چنانچه زاویه‌ی میانگین شیب بیشتر از 30° باشد، مقدار $S_T \geq 1/4$ در نزدیکی رأس شیب باید در نظر گرفته شود و اگر زاویه‌ی میانگین شیب کمتر از مقدار فوق باشد، مقدار $S_T \geq 1/2$ باید در نظر گرفته شود. در صورت وجود یک لایه‌ی سطحی سست در هر یک از این حالت‌ها، مقدار بزرگ‌نمایی توپوگرافی باید حداقل به اندازه‌ی ۲۰ درصد افزایش یابد [۳۲]. AFPS 90 در واقع یک راهنمای لرزه‌ای است که پس از PS-96 (آیین‌نامه‌ی لرزه‌ای فرانسه در سال ۱۹۶۹) برای راهنمایی در مورد طراحی لرزه‌ای و به‌دنبال تجربیات کسب شده از زلزله‌ی اسنام ۴ در سال ۱۹۸۰ به تحریر درآمده و برای نگارش بعدی آیین‌نامه‌ی لرزه‌ای فرانسه از آن استفاده شده است. مقدار حداکثر ضریب تقویت توپوگرافی در این راهنمای لرزه‌ای هم $1/4$ است که مقدار با توجه به ارتفاع و طول شیب توپوگرافی متغیر است [۳۳]. آیین‌نامه‌ی NEHRP یک آیین‌نامه‌ی ساختمانی نیست بلکه منبعی برای کمک به آیین‌نامه‌های ساختمانی در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالاست و هدف آن دادن معیار طراحی برای طرح و ساخت لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی و غیر ساختمانی است [۳۴]. همان‌طور که اشاره شد، حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در آیین‌نامه‌های یاد شده در حدود $1/4$ است. لیکن در عمل بزرگ‌نمایی‌های بیش از این هم دیده شده است. همچنین آیین‌نامه‌ها و راهنماهای لرزه‌ای در بررسی عامل توپوگرافی، اثر افزایش مؤلفه‌ی قائم را در نظر نمی‌گیرند و هندسه‌ی بسیار ساده‌ای از توپوگرافی را در نظر می‌گیرند. بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار در تقویت حرکت لرزه‌ای ناشی از عامل توپوگرافی در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای لحاظ نشده است [۳۵]. در حقیقت، نگاه بسیار اجمالی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به اثر تقویت عامل توپوگرافی، پاسخ‌گوی نیازهای طراحی در این باب نیست.

لازمه‌ی ارزیابی اثرات توپوگرافی و بی‌قاعدگی‌های

در حقیقت حتی توصیه‌های فنی جهت در نظر گرفتن اثرات ساختگاه تا سال‌های ۱۹۷۰ در آیین‌نامه‌ها عنوان نشده بود [۱۵]. آیین‌نامه‌هایی که تا کنون اثرات دو بعدی توپوگرافی را در دستور کار خود لحاظ کرده‌اند، آیین‌نامه‌ی PS-92 فرانسه و آیین‌نامه‌ی اروپا (EC-8 (2000-Draft 2002) و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم می‌باشد. در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (S_T) برای شیب‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۰ متر و با زاویه‌ی میانگین بیش از 15° در نظر گرفته شده است. این ضریب تنها در ثلث فوقانی ارتفاع شیب‌ها اعمال می‌شود و حداکثر مقدار آن $1/4$ است. مقدار ضریب اعمالی با تغییر زاویه‌ی شیب توپوگرافی تغییر می‌کند [۳۱]. به این معنا که سایر پارامترهای توپوگرافی از جمله نوع شکل هندسی، ارتفاع شیب، طول شیب، نوع مصالح و تعداد عوارض توپوگرافی در نظر گرفته نشده است. در آیین‌نامه‌ی اروپا (EC.8)، ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی برای بی‌نظمی‌هایی نظیر تپه‌های با طول زیاد و صخره‌هایی با ارتفاع بیشتر از ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. چنانچه زاویه‌ی میانگین شیب کمتر از 15° باشد، از اثر توپوگرافی چشم‌پوشی شده است. در این آیین‌نامه برای شیب‌ها

۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌های توپوگرافی به شکل‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی با ارتفاع‌های متفاوت (۲۰-۱۰۰ متر) و زوایای مختلف (۱۵-۷۵ درجه) جهت مطالعه‌ی اثر نوع هندسه، ارتفاع شیب، زاویه‌ی شیب و طول شیب در تشدید لرزه‌ای ناشی از عامل توپوگرافی مدل‌سازی و بررسی شدند. نتیجه آن‌که اگرچه میزان تقویت حرکت لرزه‌ای در هر یک از انواع هندسه‌ها (مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی) متفاوت است ولی روند تغییرات یکسان است، به این صورت که با افزایش ارتفاع، طول و زاویه‌ی شیب، پاسخ لرزه‌ای در تمامی انواع هندسه‌ی توپوگرافی بیشتر تقویت می‌شود. به منظور مطالعه‌ی اثر متقابل نامنظمی‌های توپوگرافی در پاسخ لرزه‌ای ساختمان، سه مدل توپوگرافی مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه‌ی این توپوگرافی‌ها به شکل مثلث بوده و شیب و ارتفاع آنها یکسان است. در این تحقیق، نامنظمی‌های توپوگرافی از نظر تعداد و فاصله‌ی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. هر عارضه‌ی توپوگرافی ضریب شکل (نسبت ارتفاع به نصف عرض) 0.57 ، زاویه‌ی شیب 30° و ارتفاع 100m دارد، طول کلی نامنظمی توپوگرافی در حدود $1079/2$ متر است. فاصله‌ی ناهمواری‌ها از یکدیگر 10 متر در نظر گرفته شده است و ارتفاع خاک نیز 30 متر فرض شده است.

در این تحقیق، خاک مورد استفاده در تمامی مدل‌سازی‌ها یکسان و از نوع II در نظر گرفته شد و حرکت لرزه‌ای اعمال شده نیز رکورد زلزله‌ی منجیل در راستای افقی است. بدون در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، تقویت حرکت لرزه‌ای ناشی از عامل توپوگرافی، دست کم تخمین زده می‌شود [۴۱]. در تمامی مدل‌ها از در نظر گرفتن تنش‌های مؤثر صرف نظر شده است تا به‌طور مشخص تنها تأثیر تعداد عوارض توپوگرافی در نتایج دخیل باشد. هم‌چنین مدل‌ها به صورت دوبعدی^۵ و از نوع شکل‌پذیر تعریف شده‌اند. در جدول ۱، مشخصات هندسه‌ی مدل‌ها و در جدول ۲، پاره‌ای از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ارائه شده است. در مطالعات بسیاری، حالت‌های مختلف مرزهای جاذب انرژی بررسی شده است و نتیجه‌ی تحلیل و بررسی‌های

زیرسطحی، تحلیل‌های دوبعدی و حتی در برخی موارد، سه‌بعدی می‌باشد. چنین تحلیل‌هایی اغلب پیچیده و وقت‌گیر هستند و معمولاً نیاز به خصوصیات جزئی‌تر خاک نسبت به آنچه معمول است دارند [۱۵]. روش المان محدود یکی از ابزارهای کلیدی در مدل‌سازی و حل مسائل مهندسی محسوب می‌شود. روش اجزاء محدود یا المان‌های محدود که به اختصار FEM نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. در پی یافتن روشی به‌منظور تجزیه و تحلیل‌های سازه‌ای و الاستیک در رشته‌ی مهندسی عمران و مهندسی هوافضا، استفاده از این روش آغاز و با مطالعات افرادی نظیر هرینکف [۳۶] و کوران [۳۷] در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ توسعه یافت. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شود. روش المان محدود یکی از بهترین روش‌ها در حل معادلات دیفرانسیل است و به‌عنوان یک روش بسیار کارآمد برای حل مسائل مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی یا غیرخطی به کار گرفته می‌شود [۳۸]. نمایش دقیق هندسه‌ی پیچیده‌ی مسئله، امکان استفاده از مواد و مصالحی با خصوصیات متفاوت و توانایی لحاظ کردن اثرات محلی، از جمله مزایای روش المان محدود نسبت به سایر روش‌هاست [۳۹].

یک نامنظمی توپوگرافی تنها (یک دره یا یک تپه) توسط محققان زیادی مطالعه شده است و هم‌چنین کاربردهای واقع‌بینانه‌ی بسیاری کشف شده است؛ با این وجود حتی در بین بهترین دانسته‌های ما مطالعات بسیار کمی در ارتباط با اثر متقابل نامنظمی‌های توپوگرافی وجود دارد [۴۰]. هدف از این مطالعه، این است که معین کنیم چگونه مجموعه‌ای از نامنظمی‌ها در مقایسه با یک نامنظمی تنها (یک تپه) اثر متقابل می‌گذارد. در این مقاله از نرم‌افزار قدرتمند المان محدود آباکوس، جهت شبیه‌سازی عوارض توپوگرافی و حرکات لرزه‌ای ساختمان استفاده شده است و نتایج در غالب تاریخچه‌ی زمانی و نمودارهای بی‌بعد شده ارائه شده و تحلیل می‌شوند.

جدول (۱): مشخصات هندسی مدل‌ها.

شکل	تعداد ناهمواری هندسی توپوگرافی (n)	شیب توپوگرافی (درجه)	ارتفاع توپوگرافی (h)	نوع مدل سازی
	۱	۳۰	۱۰۰	۱
	۲	۳۰	۱۰۰	۲
	۳	۳۰	۱۰۰	۳

$$Mu'' + Cu' + Ku = F \quad (1)$$

در این رابطه M ماتریس جرم، u بردار تغییر مکان، C ماتریس میرایی، K ماتریس سختی و F بردار بار می‌باشد. تغییر مکان (u)، سرعت (u') و شتاب (u'') با زمان تغییر می‌کنند. ذکر این نکته لازم است که در حقیقت میرایی مصالح از اصطکاک و تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر (پلاستیسیته و ویسکوزیته) ناشی می‌شود. در مصالح با پلاستیسیته و ویسکوزیته بیشتر، انرژی ارتعاشی بیشتری مستهلک خواهد شد. در روش المان محدود، ضریب C اغلب به صورت تابعی از جرم و ماتریس‌های سختی (میرایی رابلی) بیان شده که در رابطه (۲) آمده است:

$$C = \alpha_R M + \beta_R \quad (2)$$

در این رابطه α_R و β_R ضرایب رابلی را نشان می‌دهند که به ترتیب میرایی متناسب با جرم و میرایی متناسب با سختی هستند. برای یک سیستم چند درجه آزادی، نسبت میرایی بحرانی ζ_i ، برای هر فرکانس زاویه‌ای سیستم ω_i از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\omega_i^2 \beta + \alpha = 2\omega_i \zeta_i \quad (3)$$

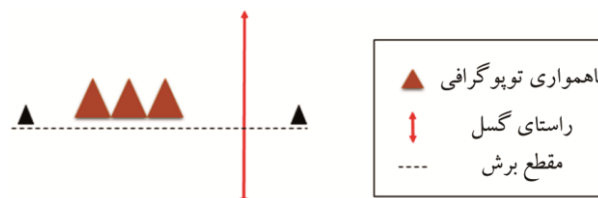
$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (4)$$

در این روابط ω_i فرکانس طبیعی مود ارتعاشی i ام (بر حسب rad/sec) است. مطابق روابط فوق در فرکانس‌های پایین، جمله میرایی متناسب با جرم است و در فرکانس‌های بالا، جمله

جدول (۲): خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک نوع II.

مقدار	واحد	خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک
۲۱	kN/m ³	وزن مخصوص طبیعی خاک
۱۷۱۲	MPa	مدول الاستیسیته
۰/۳	بدون بعد	ضریب پواسون

صورت گرفته از این قرار بوده است که بهترین حالت مدل‌سازی شرایط مرزی، استفاده از المان‌های نامحدود است. برای ایجاد مرزهای بی‌نهایت در مسائل دینامیکی، می‌توان از المان‌های نامحدود در آباکوس استفاده کرد [۴۲]. این المان‌ها همواره رفتار ارتجاعی داشته و در تحلیل‌های دینامیکی با جذب انرژی امواج رسیده به آنها، عملکرد مرزهای جاذب را ایفا می‌کنند. محققان مختلف همچون نیلسن [۴۳]، پریسگ و جرمیک [۴۴]، عملکرد این المان‌ها را بررسی کرده‌اند. منبع زلزله به صورت گسل در عمق در نظر گرفته شده برای سنگ بستر قرار دارد و به صورت دو بعدی مدل شده است. شکل (۱) نمای شماتیک پلان ساختمان و راستای گسل و مقطع برش را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمایش پلان ساختمان، راستای گسل و مقطع برش.

۲-۱- تعیین ضرایب میرایی رابلی

در این تحقیق از رابطه حرکت یک جسم تحت تأثیر بار دینامیکی و وابسته به زمان به صورت رابطه (۱) استفاده می‌شود:

مستهلك کردن بخشی از امواج لرزه‌ای منعكس شده از مرزهای مدل مد نظر قرار گرفته است، لذا میرایی بحرانی متوسط خاک برابر ۵ درصد لحاظ شده است.

۳- اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و دقت‌سنجی مدل

در این مطالعه به منظور حصول اطمینان از صحت، دقت و اعتبار نتایج مدل‌سازی، خروجی‌های به دست آمده از دو نرم‌افزار آباکوس و پلکسیس^۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین با داده‌ها و روابط تحلیلی نیز قیاس انجام می‌شود. علت انتخاب نرم‌افزار پلکسیس، کاربرد وسیع آن در مهندسی ژئوتکنیک به عنوان یک نرم‌افزار المان محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری سازه‌های ژئوتکنیک می‌باشد. با این نرم‌افزار امکان حل مسائل مختلف با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف با استفاده از المان‌های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی در مدل‌سازی فراهم است. تحقیقات نشان می‌دهد نتایج این نرم‌افزار انطباق مناسبی با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده دارد [۴۸]. در این راستا، هندسه‌ی توپوگرافی ترسیم شده و مشخصات مصالح و نوع بارگذاری در هر دو روش مدل‌سازی عددی کاملاً مشابه در نظر گرفته می‌شود. همچنین از داده‌های زلزله‌ی یکسان به منظور بارگذاری لرزه‌ای مشابه استفاده شده است. در نرم‌افزار پلکسیس، داده‌های زلزله با فرمت اس‌ام‌سی به مدل اعمال می‌شود که با کدهای آسکی^۷ نوشته شده است.

سپس با اصلاح این کدها، رکورد زلزله در نرم‌افزار سیزموسیگنال قابل پردازش می‌شود و می‌توان داده‌های شتاب-زمان را به دست آورد و به عنوان بار دینامیکی در نرم‌افزار آباکوس استفاده کرد. نتایج شتاب و جابه‌جایی در هر دو نرم‌افزار در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. نمودارها نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که هر دو نرم‌افزار نتایج کم و بیش یکسانی دارند.

همچنین به منظور حصول اطمینان از طول در نظر گرفته شده برای المان‌های نامحدود، نوع و اندازه‌ی مش‌بندی و سایر خصوصیات صورت گرفته در مدل‌سازی؛ صحت‌سنجی با تپه‌های

میرایی متناسب با سختی بوده و تأثیر بیشتر و نقش مهم‌تری را ایفا می‌کنند. با فرض ثابت بودن میرایی در فرکانس‌های مختلف و تعیین دو فرکانس طبیعی سیستم، با استفاده از رابطه‌ی (۴) می‌توان ضرایب α_R و β_R را تعیین نمود.

هر سیستم دینامیکی تحت فرکانس‌های طبیعی خود، ارتعاش درونی دارد و کمترین فرکانس طبیعی هر سیستم به عنوان فرکانس اصلی شناخته می‌شود. همچنین مود ارتعاش در هر فرکانس طبیعی منحصر به فرد است [۴۵]. در یک مدل المان محدود، تعداد محدودی از فرکانس‌های طبیعی متناسب با درجات آزادی وجود دارد اما در تحلیل بسیاری از سیستم‌ها فقط چند مد اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فرکانس طبیعی و شکل مدهای متناظر با آن، به هندسه‌ی سیستم، مشخصات مواد و مصالح سیستم و همچنین شرایط تکیه‌گاهی در سیستم بستگی دارند.

در دو دهه‌ی گذشته، تحلیل مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مختلف مهندسی و به خصوص سازه‌های ژئوتکنیک تبدیل شده است. تحلیل مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مدها و به کارگیری آنها برای ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی به مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند که در این تحقیق نیز از این تکنیک استفاده می‌شود. شکل موده‌های ارتعاشی، وابسته به دینامیک سیستم است و به وسیله‌ی خواص فیزیکی (جرم، سختی، میرایی) و نحوه‌ی توزیع فضایی آنها تعیین می‌شوند و در پیش‌بینی پاسخ یک سازه به ارتعاشات محیطی و یا بارهای خارجی کاربردهای زیادی دارد [۴۶].

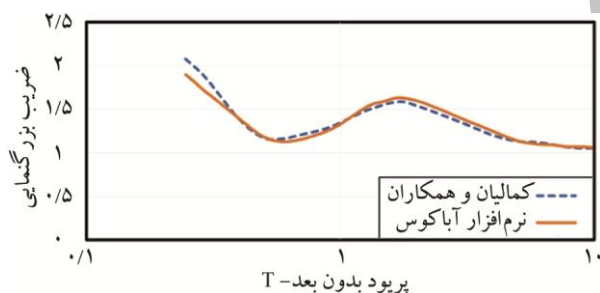
در این مطالعه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی خاک و ساختمان مورد نظر، از تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نظر به اینکه میرایی خاک با کرنش متناسب بوده و در ترازهای مختلف کرنش متفاوت است [۴۷]. در این پروژه رفتار پلاستیک مصالح لحاظ شده و عملکرد میرایی بیشتر برای

ارائه می‌شود. معادله ۷، تعریف از پریود بدون بعد را ارائه می‌دهد. پریود بدون بعد عکس فرکانس بدون بعد است که معنای فیزیکی آن، نسبت طول موج مهاجم به پهنای عارضه است. در این رابطه ω ، c_2 و b ، به ترتیب فرکانس، سرعت موج برشی محیط و نصف عرض تپه هستند [۲۸]. نتایج برای نقطه‌ی B واقع در رأس توپوگرافی که در شکل (۴) نشان داده شده، ارائه شده است. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) که به ترتیب مربوط به توپوگرافی تنها و مرکب دو گانه است تطابق مناسب نتایج هر دو حل عددی قابل مشاهده است.

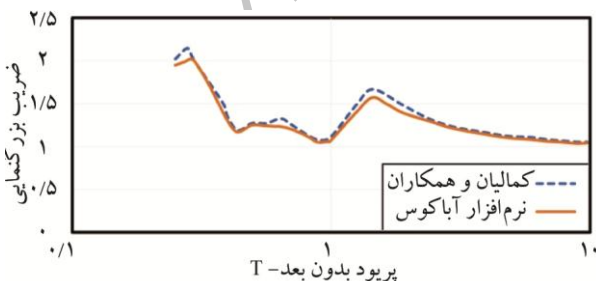
$$T = \frac{\pi c_2}{\omega b} \quad \text{پریود بدون بعد} \quad (۷)$$



شکل (۴): نمایش توپوگرافی مرکب دوگانه‌ی همسان و نیم‌سینوسی و نقطه‌ی مورد بررسی B.



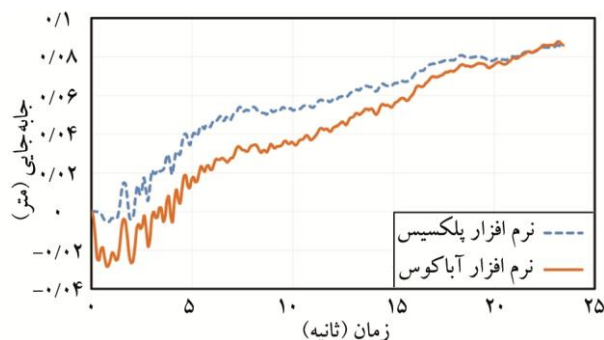
شکل (۵): منحنی بزرگ‌نمایی تاج تپه (نقطه B) در تپه‌ی منفرد.



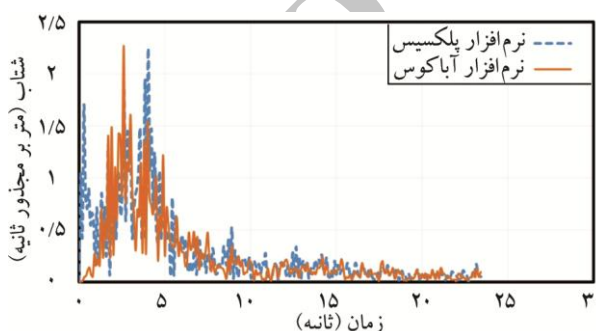
شکل (۶): منحنی بزرگ‌نمایی تاج تپه (نقطه B) در تپه‌ی مرکب دوگانه.

۴- تحلیل و ارزیابی نتایج

همان‌طور که در بالا اشاره شد بررسی‌های کمالیان و



شکل (۲): مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی افقی-زمان در نرم‌افزار آباکوس و پلکیس.



شکل (۳): مقایسه‌ی نمودار شتاب-زمان در نرم‌افزار آباکوس و پلکیس.

نیم‌سینوسی منفرد و مرکب دوگانه همسان با ضریب شکل ۰/۵ و رفتار ارتجاعی خطی با ضریب پواسون ۰/۳۳ انجام می‌گیرد که تحت موجک مهاجم ریکر قرار گرفته است. روابط (۵) و (۶) به ترتیب، معادله‌ی هندسه‌ی تپه‌ی نیم‌سینوسی و موجک ریکر را ارائه می‌دهد. در رابطه‌ی (۶)، پارامترهای f_p و t_0 به ترتیب فرکانس غالب^۸ و زمان نظیر دامنه‌ی حداکثر را بیان می‌دارند که ۳ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است.

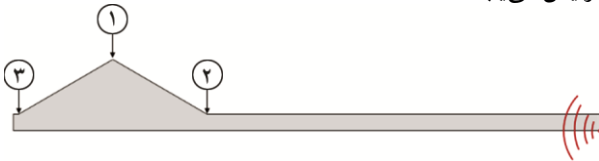
$$\xi(X) = 0.5h(1 + \cos(\pi x/b)) \quad |x| \leq b \quad (۵)$$

$$\xi(X) = 0 \quad |x| \geq b$$

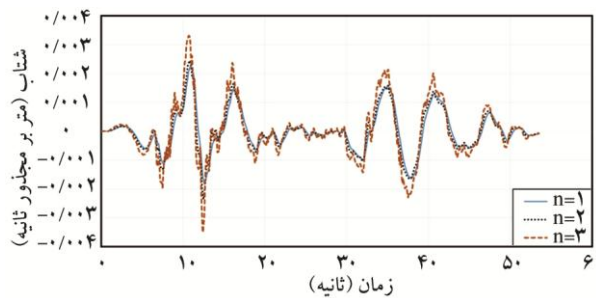
$$f(t) = [1 - 2(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2] e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \quad (۶)$$

با اعمال امواج مهاجم قائم SV به مجموعه‌ی تپه‌ها، نتایج در حوزه‌ی فرکانس با نتایج حاصل از تحلیل عددی کمالیان و همکاران [۲۸] مقایسه می‌شود. در حوزه‌ی فرکانس نتایج به‌دست آمده در قالب منحنی‌های بزرگ‌نمایی تغییرمکان افقی نقطه‌ی موردنظر به حرکت میدان آزاد در مقابل پریود بدون بعد^۹

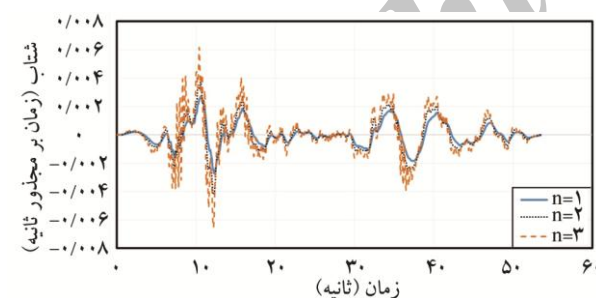
توپوگرافی دانست. در واقع، امواج لرزه‌ای در امتداد لبه‌های توپوگرافی انعکاس می‌یابد. به دلیل انعکاس‌های ایجاد شده، میدان موج حتی در خارج از توپوگرافی‌ها تغییر می‌کند و حرکت زمین به‌طور قابل توجهی تقویت می‌شود. حال هر چه تعداد این نامنظمی‌ها بیشتر باشد، میزان انعکاس‌ها و تغییرات میدان موج افزایش می‌یابد و به تبع آن، پاسخ لرزه‌ای زمین نیز افزایش می‌یابد.



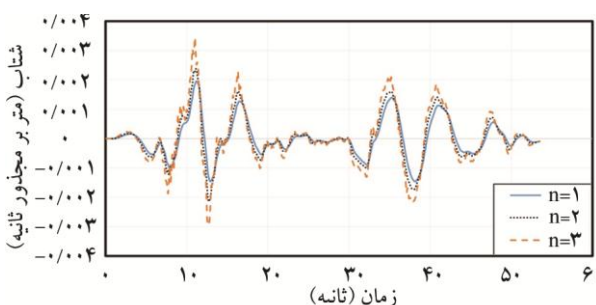
شکل (۷): نمای شماتیک هندسه‌ی توپوگرافی و نقاط مورد مطالعه.



شکل (۸): نمودار تغییرات شتاب زمان در نقاط شماره‌ی ۱ در هر سه مدل.



شکل (۹): نمودار تغییرات شتاب زمان در نقاط شماره‌ی ۲ در هر سه مدل.

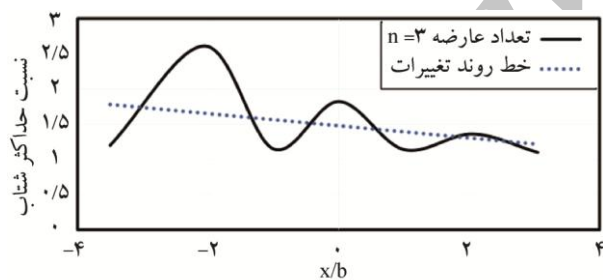


شکل (۱۰): نمودار تغییرات شتاب زمان در نقاط شماره‌ی ۳ در هر سه مدل.

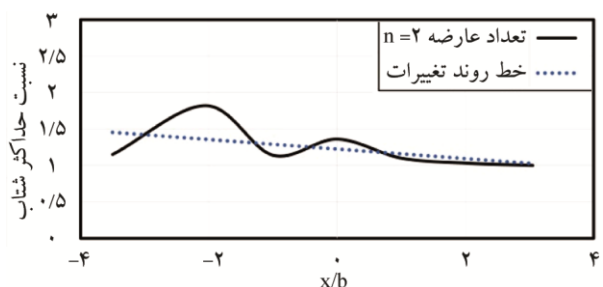
همکاران [۲۸] نشان داد که نامنظمی‌های سطحی با ضریب شکل بیشتر از یک و همچنین موج لرزه‌ای حادث با نسبت طول موج به پهنای نامنظمی کمتر از ۸ می‌توانند اثر نامنظمی‌های توپوگرافی به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۲۷]. هم‌چنین نتایج سایر محققان نیز از این قرار است که بیشترین اثرات مخرب عوارض توپوگرافی بر تشدید امواج لرزه‌ای در فرکانس‌های بدون بعد $0/2 - 0/45$ رخ می‌دهد. می‌توان از اثرات توپوگرافی در مقادیر بالا و پایین این باند صرف‌نظر نمود [۴۹-۵۲]. به عبارت دیگر، اثرات توپوگرافی هنگامی حائز اهمیت است که طول موج ورودی متناظر و قابل مقایسه با عرض تپه باشد [۵۲]. با محاسبه‌ی فرکانس و پرپود بی بعد موج لرزه‌ای حادث در این مقاله از رابطه‌ی ۷ می‌توان نشان داد که فرکانس‌های بی بعد در محدوده‌ی $0/15 - 1/02$ و پرپود بی بعد آن نیز در محدوده‌ی $0/98 - 6/66$ قرار دارد به این معنا که مقادیر فرکانس و پرپود بی بعد محاسبه شده در محدوده‌های اشاره شده در بالا می‌گنجد و در شمار تحریک لرزه‌ای با طول موج کوتاه قرار دارد. بنابراین، اثرات توپوگرافی تأثیر قابل توجهی در نتایج لرزه‌ای ساختمانها خواهند داشت.

نقاط مورد بررسی مدل‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰)، به ترتیب نمودار شتاب-زمان برای نقاط خط‌الرأس و خط‌القعر توپوگرافی که با شماره‌ی ۱، ۲ و ۳ در شکل (۷) نشان داده شده است را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، میزان شتاب، در مدلی که دارای سه عارضه‌ی توپوگرافی است، بیشتر از مدل دارای دو عارضه‌ی توپوگرافی است و به همین صورت، مقدار شتاب در مدل دارای دو عارضه‌ی توپوگرافی بیشتر از مدل دارای یک عارضه‌ی توپوگرافی است؛ بنابراین زمانی که هیچ نامنظمی توپوگرافی بین منبع و مکان مورد نظر وجود نداشته باشد؛ مانند مدل شماره ۱، حرکت تقویت‌شده‌ی زمین کم‌تر است. اما زمانی که نامنظمی‌های توپوگرافی بین منبع و گذرگاه قرار بگیرند (مدل شماره ۲ و ۳)، حرکت تقویت شده افزایش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان گیرافتادن و انعکاس امواج لرزه‌ای در بین عوارض

شتاب را داراست و بالاتر از سایر نمودارها قرار دارد. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر آن است که اگرچه میزان نسبت حداکثر شتاب در همه‌ی نقاط رأس توپوگرافی‌ها بیشتر از سایر نقاط مجاور آنهاست اما مقادیر آن برای رئوس دورتر از منبع لرزه‌زا (تپه‌های واقع در سمت چپ مدل) بیشتر از تپه‌های نزدیک‌تر به منبع است. این مهم در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) که نمودارهای بی‌بعد مربوط به مدل‌های دارای دو و سه عارضه‌ی توپوگرافی است قابل مشاهده است. می‌توان روند تغییرات نسبت حداکثر شتاب به نسبت فاصله از مرکز را با یک خط فرضی نشان داد، خطوط نقطه‌چین در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نمایانگر این خط فرضی است که آن را خط روند تغییرات می‌نامیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود خط روند تغییرات دارای شیب منفی است که با کاهش تعداد عوارض توپوگرافی‌های ساختگاه (از شکل ۱۲ تا شکل ۱۵) به سمت شیب صفر میل می‌کند. منفی بودن شیب خط نشان‌دهنده‌ی کاهش نسبت حداکثر شتاب برای نقاطی با نسبت فاصله‌ی مثبت‌تر است. به عبارت دیگر نقاطی که به منبع لرزه‌زا نزدیک‌تر هستند (نقاط سمت راست‌تر مدل) کمتر تحت تأثیر قرار گرفته و تشدید شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار نسبت حداکثر شتاب در مقابل نسبت بی‌بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای سه عارضه‌ی توپوگرافی (مدل شماره ۳).



شکل (۱۳): نمودار نسبت حداکثر شتاب در مقابل نسبت بی‌بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای دو عارضه‌ی توپوگرافی (مدل شماره ۲).

شتاب بیشینه زمین (PGA) ^{۱۰}، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی بزرگی شدت زلزله است که به عنوان پارامتر متغیر پاسخ لرزه‌ای در شیب‌ها در نظر گرفته می‌شود. میزان تشدید PGA یکی از مهم‌ترین عوامل در ارزیابی پایداری شیب‌ها است [۵۳]. در این مقاله، مدل مرجع برای هر نقطه از توپوگرافی به صورت یک مدل میدان آزاد با ارتفاعی معادل با ارتفاع پروفیل یک‌بعدی نقطه‌ی مذکور در نظر گرفته شده است و نسبت بزرگ‌نمایی حداکثر شتاب، سرعت و جابه‌جایی نقطه‌ی مورد نظر در مدل دارای توپوگرافی به بزرگ‌نمایی حداکثر شتاب، سرعت و جابه‌جایی نقطه‌ی مورد نظر در مدل مرجع آن نقطه، به عنوان نسبت حداکثر شتاب، سرعت و جابه‌جایی در نظر گرفته شده است و در این مقاله به عنوان پارامترهای متغیر و متأثر از توپوگرافی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شکل (۱۱) نمونه‌ای از یک سطح خالی از توپوگرافی است (یک سطح آزاد مسطح) که به عنوان حرکت مرجع زمین در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های (۱۲) تا (۱۵)، نمودارهای بی‌بعد شده‌ی نسبت حداکثر شتاب در مقابل فاصله‌ی نقاط از مرکز مدل (X) بر نصف عرض توپوگرافی (b) را نشان می‌دهند.



شکل (۱۱): مدل مسطح (بدون عوارض توپوگرافی).

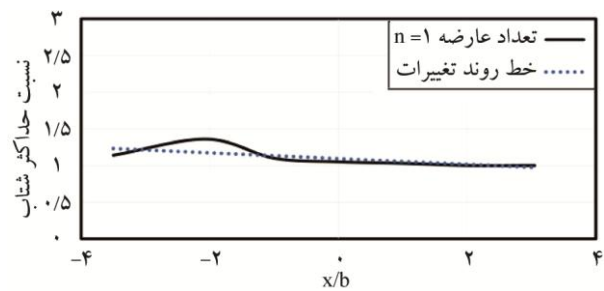
نقاط حداکثر در این نمودارها مبین رأس توپوگرافی‌ها هستند و همان‌طور که انتظار می‌رود بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته و تشدید شده‌اند به عبارتی دیگر میزان تأثیر عامل توپوگرافی محیط اطراف برای نقاط رأس ناهمواری‌ها (قله‌ها)، بیشتر از نقاط پای ناهمواری‌ها (دره‌ها) است. نتیجه آنکه عامل توپوگرافی محیط اطراف بر قله‌ها تأثیر بیشتری نسبت به دره‌ها دارد. از طرفی همان‌طور که در قسمت قبل نیز اشاره شد هرچه تعداد ناهمواری‌های توپوگرافی افزایش می‌یابد ارتفاع نمودار افزایش می‌یابد و پاسخ لرزه‌ای ساختگاه بیشتر تحت تأثیر اثر متقابل ناهمواری‌ها تشدید می‌شود. شکل ۱۲ که مربوط به مدل دارای سه عارضه‌ی توپوگرافی است نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین نسبت حداکثر

جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده و مطالب ذکر شده در بالا، ملاحظه می‌شود که هرچه تعداد عوارض توپوگرافی بیشتر باشد، نسبت حداکثر شتاب افزایش می‌یابد.

جدول (۳): نسبت حداکثر شتاب نقاط شماره ۱، ۲ و ۳ مدل‌های مختلف در مقایسه با مدل سازی مسطح.

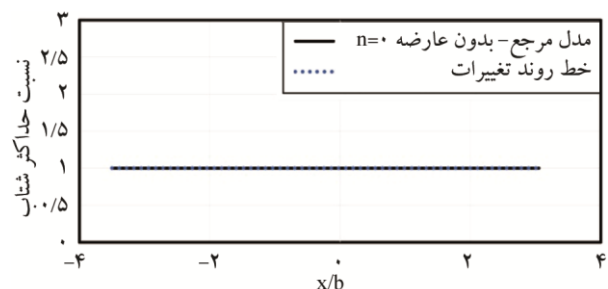
شماره نقاط	شماره مدل	نسبت حداکثر شتاب
۱	۱	۱/۳۶
	۲	۱/۸۲
	۳	۲/۶۱
۲	۱	۱/۱۴
	۲	۱/۱۵
	۳	۱/۲
۳	۱	۱/۱
	۲	۱/۱۴
	۳	۱/۱۵

به این صورت که به عنوان مثال برای نقاط ۱ نسبت حداکثر شتاب، زمانی که یک ناهمواری توپوگرافی بین منبع لرزه‌زا و نقطه‌ی مورد نظر است، به مقدار ۱/۳۶ است ولی همین مقدار زمانی که دو ناهمواری توپوگرافی بین منبع لرزه‌زا و نقطه‌ی مورد نظر است به مقدار ۲/۶۱ می‌رسد. این روند افزایشی برای نقاط ۲ و ۳ نیز صادق است. در حقیقت، وجود عوارض توپوگرافی بیشتر بین منبع لرزه‌زا و ساختمان مورد نظر، سبب تشدید بیشتر پاسخ لرزه‌ای ساختمان می‌شود. علت این امر، گیرافتادن و انعکاس بیشتر امواج لرزه‌ای در امتداد لبه‌های عوارض توپوگرافی است که سبب می‌شود اثرات کانونی شدن و گهواره‌ای بیشتری برای این امواج لرزه‌ای اتفاق افتد. بر اثر پدیده‌ی کانونی شدن، امواج لرزه‌ای در یک منطقه متمرکز می‌شوند. این اثر به دو دسته تقسیم می‌شود، دسته‌ی اول مربوط به محیط‌های ناهمگن می‌شود که در این محیط‌ها پرتوهای موج به طور پیوسته به شکل منحنی در می‌آیند. دسته‌ی دوم مربوط به هندسه‌ی سطح زمین و زیر سطح آن می‌شود که در این حالت کانونی شدن پرتوهای موج توسط انعکاس و انکسار در سطح ایجاد می‌شوند. زمانی که موج از محیط پر سرعت وارد محیط کم سرعت می‌شود، پرتوهای موج به شکل



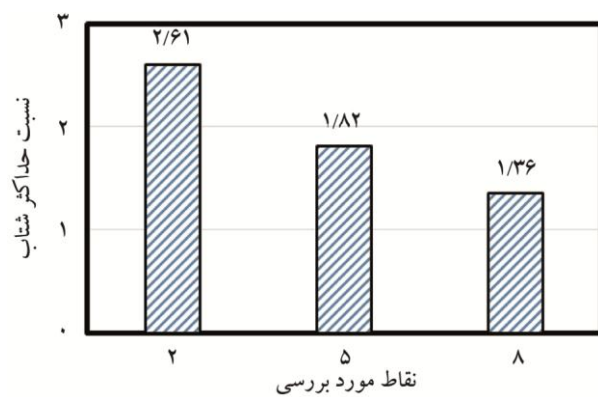
شکل (۱۴): نمودار نسبت حداکثر شتاب در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای یک عارضه‌ی توپوگرافی (مدل شماره ۱).

و با دور شدن از منبع میزان تأثیر و تقویت شتاب لرزه‌ای ناشی از اثر متقابل توپوگرافی‌ها افزایش یافته است و این مسئله‌ای است که در نگاه اول غیرمعمول به نظر می‌رسد؛ از این رو در ادامه بیشتر به آن پرداخته می‌شود. نکته‌ی دیگر کاهش شیب خط روند تغییرات با کاهش تعداد ناهمواری‌ها است به طوری که در مدل خالی از توپوگرافی (شکل ۱۵) شیب این خط به صفر می‌رسد و به این معناست که هرچه تعداد ناهمواری‌های توپوگرافی در یک ساختمان کمتر باشد شدت اثر متقابل توپوگرافی‌ها در آن محیط کاهش یافته و کمتر دچار تقویت پاسخ لرزه‌ای ساختمان می‌شود و برعکس. در این مطالعه با افزایش تعداد توپوگرافی‌ها از تعداد دو به سه، نسبت حداکثر شتاب لرزه‌ای ۱/۹ برابر شده است. قابل ذکر است در صورتی که مقادیر نسبت حداکثر شتاب به ازای محدوده‌ی گسترده‌ای از نسبت فاصله (X/b) رسم شود نمودار قطعاً به سمت مقدار یک همگرا خواهد شد و تأثیر عامل توپوگرافی محیط اطراف محو خواهد شد.

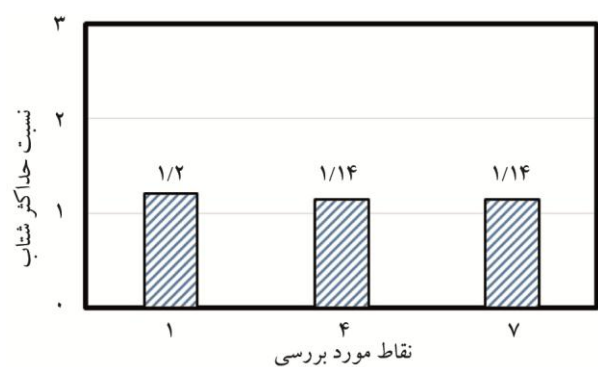


شکل (۱۵): نمودار نسبت حداکثر شتاب در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل خالی از توپوگرافی (مدل مرجع).

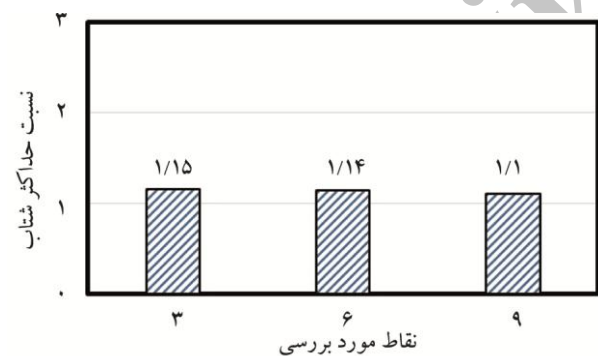
نسبت حداکثر شتاب نقاط ۱، ۲ و ۳ برای هر یک از مدل‌ها در



شکل (۱۷): مقایسه‌ی نسبت حداکثر شتاب نقاط خط الرأس (قله‌ها).



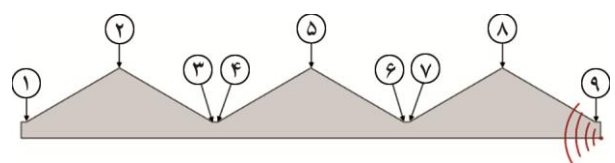
شکل (۱۸): مقایسه‌ی نسبت حداکثر شتاب نقاط خط القعر (دره‌های سمت چپ توپوگرافی).



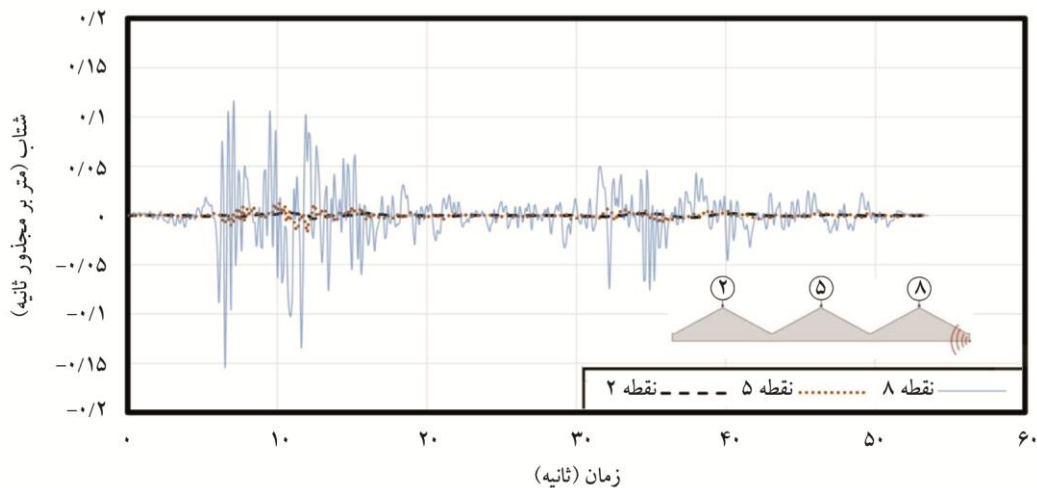
شکل (۱۹): مقایسه‌ی نسبت حداکثر شتاب نقاط خط القعر (دره‌های سمت راست توپوگرافی).

مقدار تشدید شتاب برای تپه‌هایی که به منبع نزدیک‌تر هستند، نسبت به تپه‌هایی که از منبع دورتر هستند، کمتر است و این برخلاف آن چیزی است که به‌طور طبیعی انتظار می‌رود [۳۰]. حال آنکه محصورشدگی امواج لرزه‌ای در بین ناهمواری‌های توپوگرافی تأثیر بسیاری در تقویت حرکات لرزه‌ای ساختگاه دارد. از آنجا که هرچه از منبع لرزه‌زا دور می‌شویم تعداد

منحنی به هم نزدیک می‌شوند و بدین شکل تمرکز انرژی در یک منطقه‌ی خاص رخ می‌دهد. این پرتوها پس از برخورد به سطح زمین بازتابش یافته و در یک منطقه‌ی دیگر تمرکز می‌یابند. عوارض در سطح زمین می‌توانند باعث تمرکز امواج در یک منطقه شود. همچنین، عارضه‌های روسطحی، در برخی موارد به‌صورت آونگ و ارونه عمل می‌کنند. به این صورت که پرتوهای تابش و بازتابش در درون برآمدگی تداخل سازنده می‌کنند و رفتار گهواره‌ای بروز خواهد کرد. اثر گهواره‌ای برای موج‌های SV بیشتر از موج‌های SH می‌باشد. رفتار این اثر در عوارض روسطحی وابسته به مودهای ارتعاش است و در مودهای مختلف، رفتارهای متفاوتی دیده می‌شود. بیشترین تقویت در رأس عارضه روسطحی معمولاً در مود نخست مشاهده می‌شود. نتایج مطالعات گذشته نشان می‌دهد که در ارتفاع یکسان از دو طرف شیب توپوگرافی، پاسخ لرزه‌ای متفاوت است [۳۹]. با هدف بررسی این موضوع که چه نقاطی بیشتر تحت تأثیر عامل توپوگرافی محیط اطراف قرار می‌گیرند، نقاطی از مدل‌سازی شماره‌ی ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل (۱۶) نقاط مورد بررسی در مدل شماره ۳ و محل منبع لرزه‌زا در عمق زمین را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد. شکل‌های (۱۷ تا ۱۹) مقادیر نسبت حداکثر شتاب را برای قله‌ها و دره‌های مدل شماره‌ی ۳ به‌صورت جداگانه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۷)، ملاحظه می‌شود که نسبت حداکثر شتاب برای نقطه‌ی شماره‌ی ۲ (دورترین قله از منبع لرزه‌زا) ۲/۶۱ است ولی همین نسبت برای نقاط شماره‌ی ۵ و ۸ (قله‌های نزدیک‌تر به منبع لرزه‌زا) به ترتیب، ۱/۸۲ و ۱/۳۶ است، به این معنا که تقویت ناشی از اثر متقابل توپوگرافی برای تپه‌هایی که در نزدیکی منبع واقع شده‌اند، نسبت به تپه‌هایی که دور از منبع واقع شده‌اند، کمتر است.



شکل (۱۶): شماره نقاط مورد مطالعه‌ی مدل ۳.

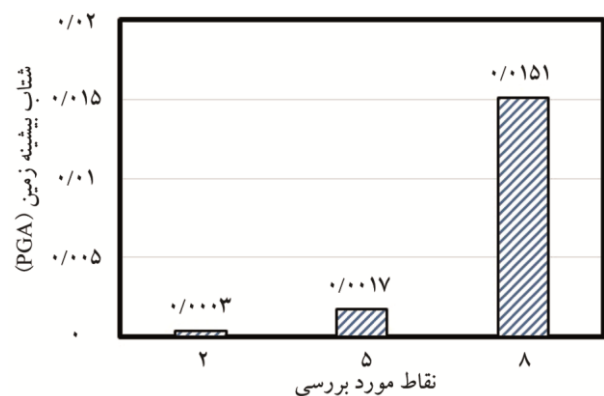


شکل (۲۰): نمودار تغییرات شتاب زمان نقاط خط‌الرأس مدل شماره ۳.

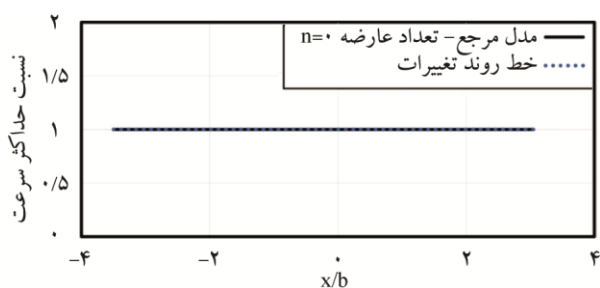
همان‌طور که می‌دانیم نقاط نزدیک‌تر به منبع بسیار بیشتر از سایر نقاط تحت تأثیر حرکت لرزه‌ای ورودی قرار می‌گیرند. از آنجایی که هر دو عامل فاصله از منبع لرزه‌زا و توپوگرافی در میزان پاسخ لرزه‌ای شتاب و PGA دخیل هستند بنابراین با محاسبه‌ی نسبت حداکثر شتاب می‌توان تأثیر عامل فاصله از منبع لرزه‌زا را از بین برد و به نتایج قابل اطمینان‌تری رسید. نمونه‌ای دیگر از این مسئله در مقایسه‌ی شکل‌های (۸ و ۹) قابل مشاهده است که نمودار شتاب-زمان نقاط خط‌الرأس و خط‌القعر را نشان می‌دهند و برخلاف آنچه انتظار می‌رود شتاب در گوشه‌ی تپه بسیار بزرگ‌تر از قله تپه ثبت شده است زیرا گوشه‌ی راست تپه‌ها نسبت به قله‌ی آنها در فاصله‌ی بسیار نزدیک‌تری به منبع لرزه‌زا قرار گرفته است در حالی که با از بین بردن بعد فاصله از منبع، مقادیر نسبت حداکثر شتاب نقاط خط‌الرأس همواره بزرگ‌تر از نقاط خط‌القعر هستند که در شکل‌های (۱۲ تا ۱۵) قابل مشاهده است.

شکل‌های (۲۲ تا ۲۵) نمودارهای بی‌بعد نسبت حداکثر سرعت در مقابل نسبت فاصله و شکل‌های (۲۶ تا ۲۹) نمودارهای بی‌بعد نسبت حداکثر جابه‌جایی در مقابل نسبت فاصله‌ی مدل‌ها را نشان می‌دهند. مشابه آنچه در مورد نمودارهای نسبت حداکثر شتاب بیان گردید نقاط بیشینه در این نمودارها مبین قله‌های ناهمواری‌ها

ناهمواری‌های توپوگرافی بیشتری بین منبع و نقطه‌ی مورد نظر قرار می‌گیرد و امواج لرزه‌ای بیشتر به سبب انعکاس‌های صورت گرفته تشدید می‌شود پس افزایش مقدار تشدید شتاب برای تپه‌هایی دورتر از منبع توجیه‌پذیر خواهد بود. شکل‌های (۲۰ و ۲۱) به ترتیب نمودار شتاب-زمان و مقادیر PGA نقاط خط‌الرأس (نقاط ۲، ۵، ۸) را نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی شکل (۱۷) با (۲۰ و ۲۱) درمی‌یابیم که اگرچه نسبت حداکثر شتاب با فاصله از منبع لرزه‌زا کاهش می‌یابد اما میزان پاسخ لرزه‌ای شتاب و به تبع آن مقادیر PGA این نقاط با فاصله از منبع به شدت کاهش می‌یابد علت این امر عامل بسیار تأثیرگذار فاصله از منبع لرزه‌زا است.

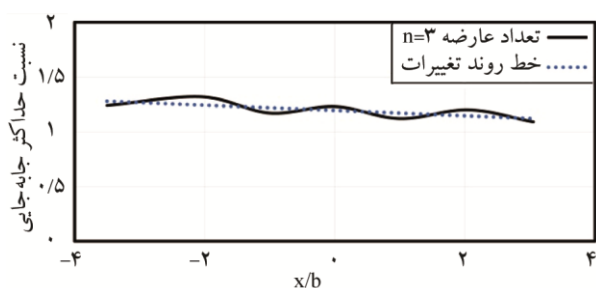


شکل (۲۱): مقایسه‌ی مقادیر شتاب بیشینه زمین (PGA) نقاط خط‌الرأس مدل شماره ۳.

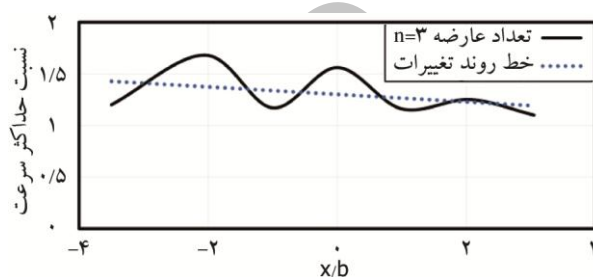


شکل (۲۵): نمودار نسبت حداکثر سرعت در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل خالی از توپوگرافی (مدل مرجع).

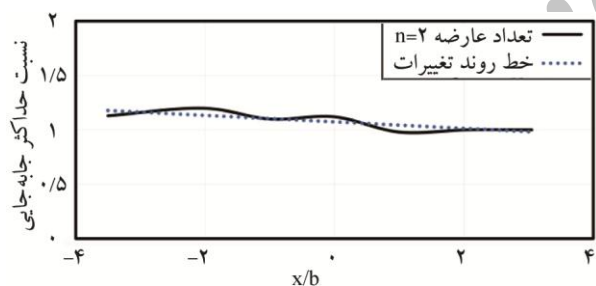
هستند که نسبت به نقاط اطراف خود بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. همچنین با افزایش تعداد ناهمواری‌ها نمودارها به سمت بالاتر جابه‌جایی می‌شود که نشان از بزرگ‌نمایی بیشتر سرعت و جابه‌جایی محیط در حضور ناهمواری‌های بیشتر است. گرچه میزان تغییرات در نمودارهای نسبت حداکثر شتاب بیشتر از نسبت حداکثر سرعت و هر دو بیشتر از نسبت حداکثر جابه‌جایی است ولی تغییرات از لحاظ کیفی مشابه هستند.



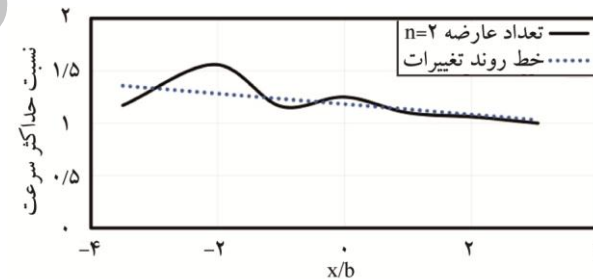
شکل (۲۶): نمودار نسبت حداکثر جابه‌جایی در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای سه عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۳).



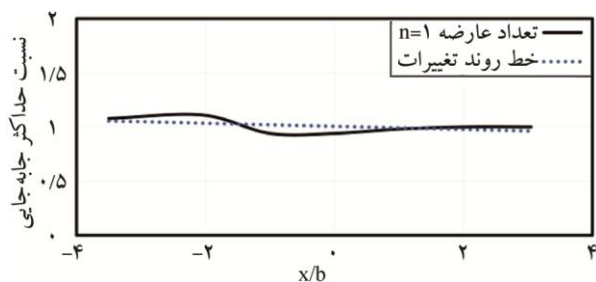
شکل (۲۲): نمودار نسبت حداکثر سرعت در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای سه عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۳).



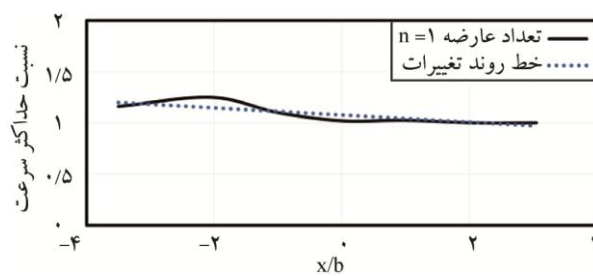
شکل (۲۷): نمودار نسبت حداکثر جابه‌جایی در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای دو عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۲).



شکل (۲۳): نمودار نسبت حداکثر سرعت در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای دو عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۲).



شکل (۲۸): نمودار نسبت حداکثر جابه‌جایی در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای یک عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۱).

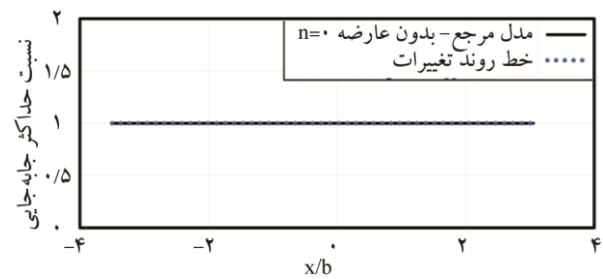


شکل (۲۴): نمودار نسبت حداکثر سرعت در مقابل نسبت بی بعد فاصله از مرکز برای مدل دارای یک عارضه توپوگرافی (مدل شماره ۱).

ناهمواری‌ها بیشتر باشد روند تشدید شتاب افزایش می‌یابد. از آنجایی که در واقعیت، ناهمواری‌های توپوگرافی به‌صورت مجموعه‌ای در کنار هم قرار دارند، بی‌توجهی به این عامل می‌تواند سبب خسارات جدی شود. نکته‌ی دیگر این است که برخلاف آنچه معمولاً تصور می‌شود، تشدید شتاب لرزه‌ای برای نقاطی که دورتر از منبع لرزه‌زا قرار گرفته‌اند بیشتر از نقاطی است که نزدیک‌تر به منبع لرزه‌زا هستند. در واقع در این حالت، تعداد ناهمواری‌های بیشتری بین نقطه‌ی دورتر و منبع لرزه‌زا وجود دارد که زمان گیرافتادن امواج لرزه‌ای بین عوارض توپوگرافی را بیشتر می‌کند و این خود سبب تأثیر بیشتر پدیده‌های کانونی شدن و گهواره‌ای امواج لرزه‌ای می‌شود و در نهایت تشدید بیشتر پاسخ لرزه‌ای در این نقاط را سبب می‌شود. همچنین همان‌طور که مشاهده شد اگرچه تمامی نقاط تحت اثر متقابل توپوگرافی‌ها دچار تشدید پاسخ لرزه‌ای می‌شوند اما اثر این عامل برای نقاط رأس توپوگرافی بیشتر از سایر نقاط است. همچنین، شتاب محیط بیش از سرعت محیط و هر دو بیش از جابه‌جایی نسبت به عامل توپوگرافی محیط اطراف (اثر متقابل توپوگرافی‌ها) حساس هستند و بیشتر تحت تأثیر این عامل تقویت یا میرا می‌شوند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف بررسی اثر متقابل توپوگرافی‌ها، مدل‌هایی با تعداد عوارض توپوگرافی متفاوت شبیه‌سازی و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در غالب تاریخچه‌ی زمانی و نمودارهای بی‌بعد ارائه گردیده است. اگرچه عامل توپوگرافی محیط اطراف کمتر مورد توجه قرار گرفته، اما تأثیر آن در تشدید پاسخ لرزه‌ای زمین قابل توجه است. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که میزان تشدید پاسخ لرزه‌ای برای یک عارضه‌ی توپوگرافی، زمانی که هیچ ناهمواری بین منبع و این عارضه‌ی توپوگرافی وجود نداشته باشد، بسیار متفاوت است در مقایسه با حالتی که بین منبع لرزه‌زا و عارضه‌ی توپوگرافی، ناهمواری‌های دیگری هم وجود داشته باشد. گیر افتادن امواج لرزه‌ای بین سطوح عوارض توپوگرافی، موجب انعکاس‌های بیشتر این امواج در امتداد شیب‌های این عوارض می‌شود و این پدیده سبب تشدید بیشتر حرکت لرزه‌ای در چنین ساختگاه‌هایی می‌شود. اهمیت این موضوع به این دلیل است که هرچه تعداد این



شکل (۲۹): نمودار نسبت حداکثر جابه‌جایی در مقابل نسبت بی‌بعد فاصله از مرکز برای مدل خالی از توپوگرافی (مدل مرجع).

خط فرضی روند تغییرات نیز دارای شیب منفی است که با کاهش تعداد ناهمواری‌ها به سمت صفر میل می‌کند. مشاهده می‌شود که شیب این خط در نمودارهای نسبت حداکثر جابه‌جایی بسیار کوچک و نزدیک به خط افقی است. از مقایسه‌ی خطوط فرضی روند تغییرات در نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که شتاب محیط بیش از سرعت محیط و هر دو بیش از جابه‌جایی نسبت به عامل توپوگرافی محیط اطراف (اثر متقابل توپوگرافی‌ها) حساس هستند و بیشتر تحت تأثیر این عامل تقویت یا میرا می‌شوند.

مراجع

1. Buech, F., Davies, T.R., and Pettinga, J.R. (2010) The Little Red Hill seismic experimental study: topographic effects on ground motion at a bedrock-dominated mountain edifice. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(5A), 2219-2229.
2. Pagliaroli, A., Lanzo, G., and D'Elia, B. (2011) Numerical evaluation of topographic effects at the Nicastro ridge in Southern Italy. *Journal of Earthquake Engineering*, **15**(3), 404-32.

- Seismological Society of America*, **78**(1), 42-63.
13. Sanchez-Sesma, F.J. (1987) Site effect on strong ground motion. *Soil Dynamics and Earth Engineering*, **6**(2), 124-132.
 14. Ghayamghamian, M.R. (2005) Segmental cross-spectrum as a new technique in site response estimation using spectral ratio analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, **9**(2), 247-261.
 15. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey
 16. Vidale, J., Bonamassa, O., and Houston, H. (1991) Directional site resonance observed from the 1 October 1987 Whittier Narrows, California, earthquake and the 4 October aftershock. *Earthquake Spectra*, **7**(1), 107-125.
 17. Bonamassa, O. and Vidale, J. (1991) Directional site resonances observed from aftershocks of the 18 October 1989 Loma Prieta earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**(5), 1945-1957.
 18. Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1970) *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*. Report No. ERRC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
 19. Boore, D. (1972) A note on the effect of simple topography on seismic SH wave. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**(1), 275-284.
 20. Boore, D. (1973) The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**(5), 1903-1973.
 21. Davis, L. and West, L. (1973) Observed effects of topography on ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**(1), 283-208.
 22. Bouchon, M. (1973) Effect of topography on surface motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **63**, 615-632.
 23. Sitar, N. and Clough, G.W. (1983) Seismic response of steep slopes in cemented soils. *J. Geotechnical Engineering*, **9**(2), 247-261.
 3. Kaiser, A., Holden, C., and Massey, C. (2011) Determination of site amplification, polarization and topographic effects in the seismic response of the Port Hills following the 2011 Christchurch earthquake. *NZSEE Conference GNS Science*, Avalon, and Lower Hutt.
 4. Del Gaudio, V. and Wasowski, J. (2011) Advances and problems in understanding the seismic response of potentially unstable slopes. *Engineering Geology*, **122**(1-2), 73-83.
 5. The U.S. Geological Survey and the National Oceanic and Atmospheric Administration. (1971) *The San Fernando, California, Earthquake of February 9, United States*. U.S. Govt. Print. Off. 254p.
 6. Douglas, H., Christense, L., and Ruf, J. (1986) Rupture process of the March 3, 1985 Chilean earthquake. *Geophysical Research Letter*, **13**(8), 721-724.
 7. Messaoudi, A., Laouami, N., and Mezouer, N. (2012) Topographic effects on the seismic responses of slopes. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon.
 8. Assimaki, D., Kausel, E., and Gazetas, G. (2005) Soil-dependent topographic effects: a case study from the 1999 Athens earthquake. *Earthquake Spectra*, **21**(4), 929-966.
 9. Gazetas, G., Kallou, P.V., and Psaropoulos, P.N. (2002) Topography and soil effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) earthquake: the case of Adámes. *Natural Hazards*, **27**, 133-169.
 10. Uttekar, S.D. and Nayak, C.R. (2016) A review on seismic response of RC building on sloping ground. *International Journal of Engineering Research*, **5**, 701-704.
 11. Hartzell, S.H., Carver, D.L., and King, K.W. (1994) Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Ridge, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1336-1349.
 12. Geli, L., Bard, P., and Jullien, B. (1988) The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new result. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68**(1), 17-34.

- Engineering, Madrid.
34. Field, E.H. and SCEC Phase III Working Group (2000) Accounting for site effects in probabilistic seismic hazard analyses of southern California: Overview of the SCEC Phase III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 6B, S1- S31.
35. Foccioli, E. (1996) Site effect in the Eurocode 8. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, ACAPULCO.
36. Hrennikoff, A. (1941) Solution of problems of elasticity by the framework method. *Journal of Applied Mechanics*, **8**(4), 169–175.
37. Courant, R. (1943) Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*, **49**, 1–23.
38. Parakash, S. (1981) *Soil Dynamics*. McGraw-Hill Book Company, USA.
39. Reddy, J. (1993) An introduction to the finite element method. McGraw- Hill, New York.
40. Ducellier, A. and Hideo, A. (2012) Interactions between topographic irregularities and seismic ground motion investigated using a hybrid FD-FE method. *Bull. Earthquake Engineering*, **18**, 773-792.
41. Rizzitano, S., Ernesto, C., and Giovanni, B. (2014) Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **67**, 66–84.
42. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, RL. (1969) Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE* **95**, 859–77.
43. Nielsen, A.H. (2013) Towards a complete framework for seismic analysis in Abaqus. *Engineering and Computational Mechanics*, **167**(1), 3-12.
44. Preisig, M. and Jeremic, B. (2005) *Nonlinear Finite Element Analysis of Dynamic Soil-Foundation-Structure Interaction*. SFSI Report, University of California, Davis.
45. Thomas, O., Touzé, C., and Luminais, É. (2007) *Geotech. Eng.*, ASCE, **109**, 210-227.
24. Jibson, R.W. (1987) *Summary of Research on the Effects of Topographic Amplification of Earthquake Shaking on Slope Stability*. US Geological Survey Open-File Report, Menlo Park, CA, 87–268.
25. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-bidar, A., and Gatmiri, B. (2003) On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **5**, 2-35.
26. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006) Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 753-765.
27. Kamalian, M., Jafari, M.K., and Sohrabi-Bidar, A. (2007) Seismic behavior of 2D semi-sine shaped hills against vertically propagating incident waves. *Journal of Computational Methods in Engineering (JCME)*, **26**(1), 109-130 (In Persian).
28. Kamalian, M., Mohazzab, K., Sohrabi Bidar, A., and Haghshenas, E. (2012) Seismic behavior of 2D semi-sine shaped hills against vertical SV waves. *Journal of Computational Methods in Engineering (JCME)*, **31**(1), 25-45 (in Persian).
29. Ducellier, A. and Hideo, A. (2012) Interactions between topographic irregularities and seismic ground motion investigated using a hybrid FD-FE method. *Bull. Earthquake Engineering*, **18**, 773-792.
30. Jafarzadeh, F., Shahrabi, Mohammad Mahdi, and Farahi Jahromi, H. (2015) On the role of topographic amplification in seismic slope instabilities. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**(2), 163-170.
31. Building and Housing Research Center (2015) *Iran National Standard No. 2800* (in Persian).
32. Eurocode 8 (2004) *Design of Structures for Earthquake Resistance*. The European Union per Regulation.
33. Jalil, W. (1992) New French seismic code orientation. 10th Word Conference, Earthquake

F	بردار بار
f_p	فرکانس غالب موج ریکر (ثانیه/۱)
h	ارتفاع توپوگرافی (متر)
K	ماتریس سختی
M	ماتریس جرم
n	تعداد عوارض توپوگرافی
PGA	شتاب حداکثر زمین
S_H	موج برشی خارج از صفحه
S_T	ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی
S_V	موج برشی درون از صفحه
T	پریود بدون بعد
t_0	زمان نظیر دامنه حداکثر (ثانیه)
u	بردار تغییر مکان
x	موقعیت (متر)
\dot{u}	بردار سرعت
\ddot{u}	بردار شتاب
$\xi(x)$	تابع تپه نیم‌سینوسی (متر)
π	عدد پی
ω_i	فرکانس طبیعی مود ارتعاشی i ام (رادیان بر مجذور ثانیه)
α_R	ضریب رایلی متناسب با جرم
β_R	ضریب رایلی متناسب با سختی

واژه‌نامه

Rocking Effect	۱- اثر گهواره‌ای
Focusing Effect	۲- اثر کانونی شدن
Scattering and Passage Effect	۳- اثر پراکندگی امواج
ASNAM	۴- اسنام
Two-Dimension	۵- دو بعدی
Plaxis	۶- پلکسیس
ASCI	۷- آسکی
Predominant Frequency	۸- فرکانس غالب
Dimensionless Period	۹- پریود بدون بعد
Peak Ground Acceleration	۱۰- شتاب بیشینه زمین

- Nonlinear vibrations of free-edge thin spherical shells: Experiments on a 1:1:2 internal resonance. *Nonlinear Dynamics*, **49**(1-2), 259-284.
46. Chiu, J.K., Cermak, J.E., and Chou, L.S. (2007) Random decrement based method for modal parameter identification of a dynamic system using acceleration responses. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **95**(6), 389-410.
47. Bolton, M.D. and Wilson, J.M.R. (1990) 'Soil stiffness and damping'. In: *Structural Dynamics*, Rotterdam Balkema, 209-216.
48. Safuan A.R., Ahmad, F.K., Kalatehjari, R., and Nazir, R. (2013) Assessment of soil nailing performance by using finite element and finite difference methods. *EJGE*, **18**, 5881-5894.
49. Ashford, S.A. and Sitar, N. (1997) Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff. *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**(3), 692-700.
50. Stewart, J.P. and Sholtis, S.H.E. (2005) Case study of strong ground motion variations across cut slope. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**, 539-545.
51. Ozkahrman, F., Nasim, A., and Wartman, J. (2007) Topographic effects in a centrifuge model experiment. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No. 1262.
52. Geli, L., Bard, P.-Y., and Jullien, B. (1988) The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results. *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**(1), 42-63.
53. Luo, Y.H., Huang, R., and Wang, Y. (2014) The slope seismic response monitoring of Wenchuan aftershocks in Qingchuan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, **2**, 4135-4161.

فهرست علائم

b	نیم پهنای توپوگرافی (متر)
C	ماتریس میرایی
c_2	سرعت موج برشی محیط (متر بر ثانیه)