

## ارزیابی هندسه و مشخصات نامنظمی توپوگرافی در تعمیم نتایج تحلیل لرزه‌ای-زلزله منجیل در مناطق دارای خاک نوع دو

سعید غفاریور جهرمی<sup>\*</sup>، اصغر وطنی اسکویی، سما کارخانه

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ خرداد ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲ بهمن ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۹ اسفند ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

اثرات توپوگرافی  
پاسخ لرزه‌ای ساختمان  
خصوصیات هندسی توپوگرافی  
ضریب شکل  
طول شیب

**چکیده:** تجربیات به دست آمده از تخریب زلزله‌های اخیر نشان‌دهنده اهمیت شکل و هندسه توپوگرافی سطحی بر وسعت و شدت خرابی ساختمان‌ها و توزیع مکانی آن‌ها در حین زلزله دارد. فلسفه‌ی اهمیت این موضوع، الگوهای رفتاری پیچیده برای عوارض توپوگرافی بوده که منجر به ایجاد تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بین امواج گسیل شده از چشمه و امواج رسیده به سطح زمین می‌شود. با توجه به حساسیت نتایج تحلیل لرزه‌ای به خصوصیات هندسی بخصوص عوارض سطحی، تحلیل‌های پارامتریک در حوزه خصوصیات هندسی تمرکز بیشتری یافته و از طریق بی‌بعد ساختن نتایج خروجی، امکان تعمیم نتایج به ترکیبات متنوع از نظر هندسه و امواج برخوردی میسر می‌گردد. در مقاله حاضر برای چندین هندسه متفاوت، مطالعه‌ی عددی المان-محدود با به‌کارگیری برنامه‌ی ABAQUS انجام شده است. نتایج این تحقیق به وضوح نشان می‌دهند پاسخ لرزه‌ای ساختمان از نظر کیفی مشابه ولی از نظر کمی بسیار متفاوت است. اگر چه عموماً از یک فاکتور بدون بُعد بنام ضریب شکل به عنوان مهمترین خصوصیت هندسی در تعیین پاسخ لرزه‌ای ناهمواری‌ها و توپوگرافی‌ها استفاده می‌شود ولی در رابطه با توپوگرافی‌های با زاویه‌ی شیب متفاوت، فاکتور طول شیب توپوگرافی نیز باید به عنوان یکی دیگر از خصوصیات هندسی تاثیرگذار در تقویت امواج لرزه‌ای مورد توجه قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

آنچه بیشتر از علت وقوع زمین‌لرزه برای مهندسان اهمیت دارد، پیش‌بینی چگونگی رفتار زمین در اثر این ارتعاش و متعاقب آن پیشگیری از خسارات و خرابی‌های ناشی از این رفتار است. توجه به تجربه‌های حاصل از زلزله‌های گذشته و مطالعات میدانی نشان‌دهنده تاثیر ناهمگونی‌های توپوگرافی و اثرات قابل توجه آن‌ها بر حرکات زمین در زمان وقوع زلزله و خسارات وارده دارند. بنابراین بدون در نظر گرفتن تأثیر توپوگرافی محلی نمی‌توان تخمین واقع‌گرایانه‌ای از نیروهای ناشی از زلزله بر سطح زمین داشت [۱].

در سال ۱۸۲۴ در مطالعات مک مورد<sup>۱</sup> برای نخستین بار ساختمان به عنوان یکی از عوامل موثر بر پاسخ لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفت [۲]. با مطالعات بیشتر در این خصوص سرانجام در سال ۱۹۸۲، بارد<sup>۲</sup> نسبت طیفی را برای حرکت قله نسبت به پای شیب اندازه‌گیری کرد [۳]. اگرچه مطالعات

پیشین نیز وابستگی الگوی تشدید به زاویه‌ی تابش و طول موج را نشان داده بودند ولی در سال ۲۰۰۶ کمالیان و همکاران در مطالعات دقیق‌تر نشان دادند که نامنظمی‌های سطحی با ضریب شکل یعنی نسبت ارتفاع به نصف عرض قاعده عارضه توپوگرافی اگر بیشتر از یک باشد و همچنین موج لرزه‌ای حادث با نسبت طول موج به پهنای نامنظمی اگر کمتر از ۸ باشد می‌توانند اثر نامنظمی‌های توپوگرافی را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۴]. آشفورد<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ مطالعات گسترده‌ای در رابطه با عامل توپوگرافی بر روی شیب‌های ۳۰ تا ۹۰ درجه انجام دادند که نتایج به دست آمده در تاج شیب‌ها حاکی از آن بود که رابطه‌ی بین ارتفاع شیب و سرعت موج برشی در میزان تقویت حرکات لرزه‌ای اهمیت به‌سزایی دارد [۵]. در سال ۲۰۱۵ جعفرزاده و همکاران چندین مطالعه‌ی عددی المان محدود با بکارگیری برنامه‌ی آباکوس انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که برای پیش‌بینی جابه‌جایی و افزایش دقت روابط تجربی، اثر موج سطحی باید در نظر گرفته شود. در نهایت مفهوم "عمق موثر تقویت سطحی" معرفی و تاثیر آن را بر عملکرد لرزه‌ای شیب ارزیابی شد [۶]. در سال‌های اخیر نیز مطالعات تکمیلی

<sup>\*</sup>نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Saeed\_ghf@srttu.edu

1 Mac Murdo

2 Bard

3 Ashford

**جدول ۲. توپوگرافی دوزنقه ای شکل (شیب ثابت، ارتفاع متغیر)**

Table. 2. Trapezoidal topography (fixed slope, variable height)

طول شیب	ضریب شکل (h/b)	ارتفاع (h)	زاویه ( $\alpha$ )	شماره ی مدل
۴۰ m	۰/۱۴	۲۰ m	۳۰°	۶
۸۰ m	۰/۲۳	۴۰ m	۳۰°	۷
۱۲۰ m	۰/۲۹	۶۰ m	۳۰°	۸
۱۶۰ m	۰/۳۳	۸۰ m	۳۰°	۹
۲۰۰ m	۰/۳۶	۱۰۰ m	۳۰°	۱۰

**جدول ۳. توپوگرافی مستطیلی شکل**

Table. 3. Rectangular topography

طول شیب	ضریب شکل (h/b)	ارتفاع (h)	شماره ی مدل
۲۰ m	۰/۲۰	۲۰ m	۱۱
۴۰ m	۰/۴۰	۴۰ m	۱۲
۶۰ m	۰/۶۰	۶۰ m	۱۳
۸۰ m	۰/۸۰	۸۰ m	۱۴
۱۰۰ m	۱/۰۰	۱۰۰ m	۱۵

**جدول ۴. توپوگرافی مثلثی شکل (ارتفاع ثابت، شیب متغیر)**

Table. 4. Triangular topography (fixed height, variable slope)

طول شیب	ضریب شکل (h/b)	ارتفاع (h)	زاویه ( $\alpha$ )	شماره ی مدل
۳۸۶/۳ m	۰/۲۶	۱۰۰ m	۱۵°	۱۶
۲۰۰ m	۰/۵۷	۱۰۰ m	۳۰°	۱۷
۱۴۱/۴ m	۱/۰۰	۱۰۰ m	۴۵°	۱۸
۱۱۵/۴ m	۱/۷۳	۱۰۰ m	۶۰°	۱۹
۱۰۳/۵ m	۳/۷۴	۱۰۰ m	۷۵°	۲۰

توسط این محققان در خصوص توپوگرافی های مرکب و مفهوم عمق موثر تقویت سطحی مورد توجه قرار گرفته است [۷ و ۸].

حداکثر ضریب بزرگنمایی عامل توپوگرافی در نظر گرفته شده در آیین نامه های لرزه ای، در حدود ۱/۴ است در حالیکه در عمل بزرگنمایی های بیش از این نیز گزارش شده است. همچنین این آیین نامه ها اثر افزایش مولفه ی قائم را لحاظ نمی کنند و هندسه ی بسیار ساده ای از توپوگرافی را در نظر می گیرند [۹-۱۱]. بنابراین تاثیرات این عوامل مهم در طراحی لرزه ای آیین نامه های موجود لحاظ نشده است. در این تحقیق سعی بر آن است که چگونگی اثر عامل توپوگرافی از حیث نوع هندسه بر پاسخ لرزه ای ساختگاه و طراحی سازه ها مورد مطالعه قرار گیرد.

**۲- الگوسازی**

هندسه و نامنظمی های توپوگرافی از عوامل اثرگذار بر پاسخ لرزه ای است لذا به منظور مطالعه ی عوارض توپوگرافی از منظر هندسه، سه نوع هندسه ی متفاوت از توپوگرافی شامل مستطیلی، دوزنقه ای و مثلثی در این تحقیق مورد کاوش و بررسی قرار گرفت. در این بررسی ضخامت لایه خاک ۳۰ متر و سطح زمین تا فاصله ی ۵۰۰ متری از مرکز نامنظمی در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شدند. هر یک از توپوگرافی ها با ارتفاع متفاوت ۲۰ تا ۱۰۰ متر جهت بررسی اثر ارتفاع و زوایای مختلف از ۱۵ تا ۷۵ درجه جهت بررسی اثر شیب مورد مدل سازی قرار گرفتند که جدول ۱ اطلاعات هندسه را نشان می دهد. ضرایب شکل در هر یک از مدل ها با تعریف نسبت ارتفاع به نصف عرض تپه و همچنین طول شیب برای هر مدل محاسبه و در جدول ۲ تا ۵ ارائه شده است. شکل ۱ هندسه ی نامنظمی های توپوگرافی را نمایش می دهد.

**جدول ۱. توپوگرافی دوزنقه ای شکل (ارتفاع ثابت، شیب متغیر)**

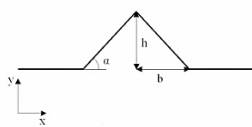
Table. 1. Trapezoidal topography (fixed height, variable slope)

طول شیب	ضریب شکل (h/b)	ارتفاع (h)	زاویه ( $\alpha$ )	شماره ی مدل
۳۸۶/۳ m	۰/۲۱	۱۰۰ m	۱۵°	۱
۲۰۰ m	۰/۳۶	۱۰۰ m	۳۰°	۲
۱۴۱/۴ m	۰/۵۰	۱۰۰ m	۴۵°	۳
۱۱۵/۴ m	۰/۶۳	۱۰۰ m	۶۰°	۴
۱۰۳/۵ m	۰/۷۸	۱۰۰ m	۷۵°	۵

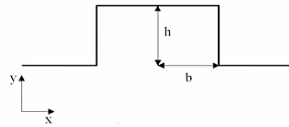
جدول ۵. توپوگرافی مثلثی شکل (شیب ثابت، ارتفاع متغیر)

Table 5. Triangular topography (fixed slope, variable height)

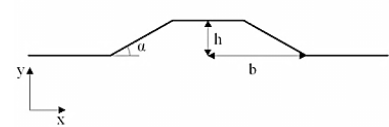
طول شیب	ضریب شکل (h/b)	ارتفاع (h)	زاویه ( $\alpha$ )	شماره ی مدل
۴۰ m	۰/۵۷	۲۰ m	۳۰ °	۲۱
۸۰ m	۰/۵۷	۴۰ m	۳۰ °	۲۲
۱۲۰ m	۰/۵۷	۶۰ m	۳۰ °	۲۳
۱۶۰ m	۰/۵۷	۸۰ m	۳۰ °	۲۴
۲۰۰ m	۰/۵۷	۱۰۰ m	۳۰ °	۲۵



(پ) توپوگرافی مثلثی شکل



(ب) توپوگرافی مستطیلی شکل



(الف) توپوگرافی دوزنقه‌ای شکل

شکل ۱. هندسه‌های نامنظمی‌های توپوگرافی

Fig. 1. Topographic irregular geometry

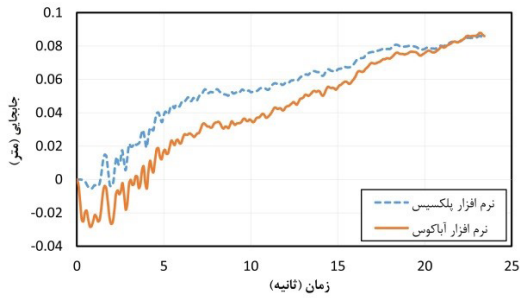
[۱۵]، پریسگ<sup>۳</sup> و جرمیک [۱۶]، عملکرد این المان‌ها را بررسی و مورد تایید قرار داده‌اند. منبع زلزله در این تحقیق بصورت گسل در عمق در نظر گرفته و در تراز سنگ بستر قرار دارد و بصورت دوبعدی مدل‌سازی انجام شده‌است. شکل ۲ شماتیک از پلان ساختمان و راستای گسل و مقطع آنرا نشان می‌دهد.

جدول ۶. مشخصات رکورد زلزله‌ی منجیل [۱۷]

Table 6. Manjil earthquake records

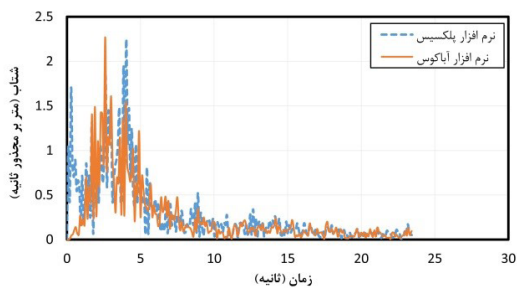
سرعت موج برشی رکورد زلزله	عمق-کیلومتر	بزرگی زلزله-ریشتر	شدت آریاس
۷۲۲/۹۵	۱۲/۵۵	۷/۳۷	۷/۵

مشخصات خاک مورد استفاده در این تحقیق برای تمامی مدل‌سازی‌ها یکسان و خاک نوع ۲ مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) در نظر گرفته شد و حرکت لرزه‌ای اعمال شده نیز رکورد زلزله‌ی منجیل در راستای افقی است که مشخصات آن در جدول ۶ ارائه شده‌است. با توجه به جدول ۶، سرعت موج برشی این رکورد زلزله برابر با سرعت موج برشی در سنگ است. بنابراین، می‌توان رکورد زلزله را مستقیماً بر سنگ بستر اعمال کرد. مدل‌ها به صورت دوبعدی<sup>۱</sup> و از نوع شکل‌پذیر تعریف شده‌اند. در جدول ۷ پاره‌ای از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ارائه شده‌است که از گزارش اکتشافات ژئوتکنیکی استخراج شده‌است [۱۳]. تحلیل و بررسی مطالعات محققان روی حالت‌های مختلف مرزهای جاذب انرژی نشان می‌دهد که بهترین حالت مدل‌سازی شرایط مرزی، استفاده از المان‌های نامحدود است لذا برای ایجاد مرزهای بی‌نهایت در این تحقیق برای مسائل دینامیکی از المان‌های نامحدود در ABAQUS استفاده می‌شود [۱۴]. 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



شکل ۳. مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی افقی-زمان در نرم‌افزار PLAXIS و ABAQUS

Fig. 3. Time- Horizontal displacement chart in the software ABAQUS and PLAXIS



شکل ۴. مقایسه‌ی نمودار شتاب-زمان در نرم‌افزار ABAQUS و PLAXIS

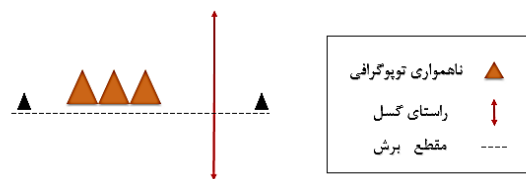
Fig. 4. Acceleration-time chart in the software ABAQUS and PLAXIS

همچنین به منظور صحت‌سنجی و دقت‌سنجی تحلیل عددی در این تحقیق از نتایج مطالعات عددی ارائه شده توسط کمالیان و همکاران [۷] استفاده شد چرا که نتایج تحقیق آنها با ضرایب بزرگ‌نمایی ثبت شده در اندازه‌گیری واقعی تطابق و نزدیکی مناسبی دارند. در تحقیق حاضر طول المان‌های نامحدود، نوع و اندازه شبکه‌بندی طوری استفاده شده‌است که نتایج را به اندازه‌گیری‌های واقعی نزدیک‌تر می‌کند (تحلیل ابعاد مش‌بندی). شکل‌های ۵ و ۶ نتایج ضریب بزرگ‌نمایی در توپوگرافی منفرد و توپوگرافی مرکب دوگانه با ضریب شکل ۰/۵ را نشان می‌دهند که تطابق مناسب نتایج در هر دو تحلیل عددی بارز است.

### جدول ۷. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک نوع II [۱۳]

Table. 7. Physical and Mechanical Properties of Soil Type II [13]

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



شکل ۲. نمایش پلان ساختمان، راستای گسل و مقطع

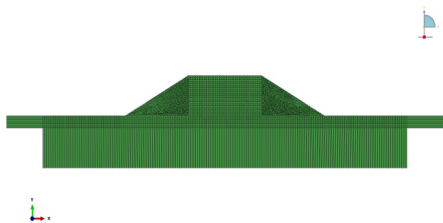
Fig. 2. site, direction of the fault and section

در این مطالعه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی خاک و ساختمان مورد نظر از تحلیل مودال در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده‌است. میرایی خاک با کرنش متناسب است لذا در ترازهای مختلف کرنش مقدار میرایی متفاوت است [۱۷]. در این تحقیق رفتار و عملکرد میرایی خاک برای مستهلک کردن بخشی از امواج لرزه‌ای منعکس شده در مرزهای مدل مد نظر قرار گرفته است و میرایی بحرانی متوسط خاک برابر ۵٪ لحاظ شده‌است.

### ۳- اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و دقت‌سنجی مدل

در این مطالعه به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی، خروجی‌های به‌دست‌آمده از دو نرم‌افزار آباکوس ABAQUS و پلاکسیس PLAXIS با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج شتاب و جابه‌جایی در هر دو نرم‌افزار در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌است. اختلاف نتایج در دو نرم‌افزار از نظر میزان 'PGA' و 'PGD'، در بخش‌های زیادی کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شده‌است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

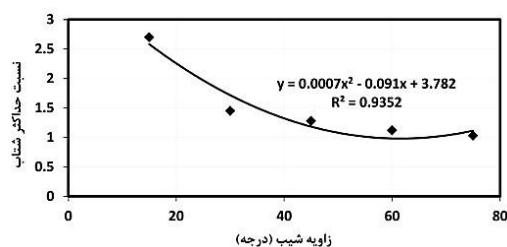
1 Peak Ground Acceleration  
2 Peak Ground Displacement



شکل ۸. مدل گرافیکی از شبکه‌بندی مدل و المان‌های نامحدود در مرزها

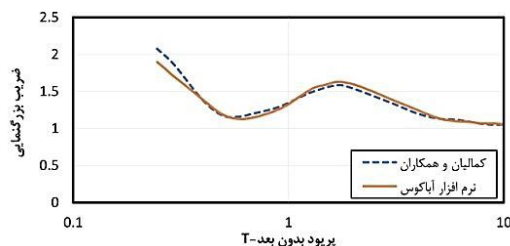
Fig. 8. Graphical model of networking of the model and unlimited elements at the boundaries

نتایج حاصل از مطالعات اغلب محققان نشان می‌دهد افزایش زاویه‌ی شیب باعث تشدید پاسخ لرزه‌ای ساختمان می‌شود در حالی که برخی محققان نظیر نهو و همکاران [۱۸] دیدگاه متفاوتی دارند و نشان دادند تشدید پاسخ لرزه‌ای با کاهش زاویه‌ی شیب ناهمواری توپوگرافی اتفاق می‌افتد. با تغییر زاویه‌ی شیب توپوگرافی، الزامات چندین مشخصه دیگر از هندسه ناهمواری و توپوگرافی نیز تغییر خواهد کرد لذا با توجه به این که کدام مشخصه از پارامترهای هندسه توپوگرافی در اثر افزایش زاویه‌ی شیب چگونه تغییر می‌کند، میتوان در خصوص تشدید یا تعدیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاه اظهار نظر کرد. شکل‌های ۹ تا ۱۲ نمودارهای بی‌بعد شده‌ی نسبت حداکثر شتاب در مقابل زاویه‌ی شیب و ضریب و شکل برای توپوگرافی‌هایی با هندسه‌های دوزنقه‌ای و مثلثی شکل با ارتفاع ثابت و زاویه‌ی شیب متغیر را نمایش می‌دهند. از این نمودارها چنین برمی‌آید که افزایش زاویه‌ی شیب و ضریب شکل باعث کاهش شتاب لرزه‌ای می‌شود. به دلیل ثابت بودن ارتفاع ناهمواری در سطح مدل‌های توپوگرافی، با کاهش زوایای شیب و ضریب شکل‌ها، طول شیب‌ها به عنوان یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار در هندسه‌ی توپوگرافی‌ها افزایش می‌یابد (جداول ۱ و ۳).



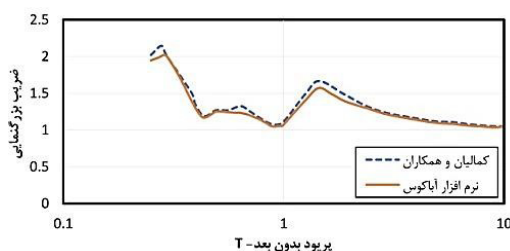
شکل ۹. نسبت حداکثر شتاب در مقابل زاویه شیب برای نقطه مرجع ۱ در توپوگرافی دوزنقه‌ای با ارتفاع ثابت و زاویه متغیر

Fig. 9. Maximum acceleration ratio versus slope angle for reference point 1 in trapezoidal topography with fixed and variable angles



شکل ۵. منحنی بزرگ‌نمایی تاج تپه در تپه‌ی منفرد

Fig. 5. Enlarge the crown of the hill in a single hill

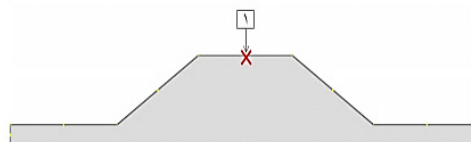


شکل ۶. منحنی بزرگ‌نمایی تاج تپه در تپه‌ی مرکب دوگانه

Fig. 6. Enlarge the crown of the hill on a dual compound hill

#### ۴- نتایج و بحث

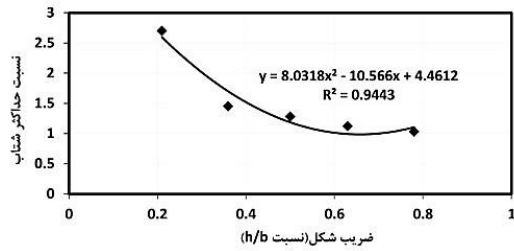
راس توپوگرافی که با نقطه ۱ در شکل ۷ نشان داده شده‌است به عنوان نقطه‌ی مرجع و مورد بررسی در تمامی مدل‌ها جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای تاثیر هندسه توپوگرافی در نظر گرفته می‌شوند. مدل گرافیکی المان محدود و جزئیات مش‌بندی و شرایط مرزی در شکل ۸ نشان داده شده‌است. در این مقاله مدل مرجع برای هر نقطه از توپوگرافی به صورت یک مدل میدان آزاد و با ارتفاعی معادل با ارتفاع پروفیل یک‌بعدی در نقطه‌ی مذکور در نظر گرفته شده‌است. نسبت حداکثر شتاب نقطه‌ی مورد نظر در مدل دارای توپوگرافی به حداکثر شتاب نقطه‌ی مورد نظر در مدل مرجع، به عنوان ضریب بزرگ‌نمایی حداکثر شتاب تعریف می‌شود. مدل‌های شماره‌ی ۱۹ و ۲۰ مربوط به توپوگرافی‌هایی با هندسه‌ی مثلثی شکل به علت عدم پایداری از این مطالعه حذف شده‌اند.



شکل ۷. راس توپوگرافی به عنوان نقطه‌ی مرجع شماره ۱

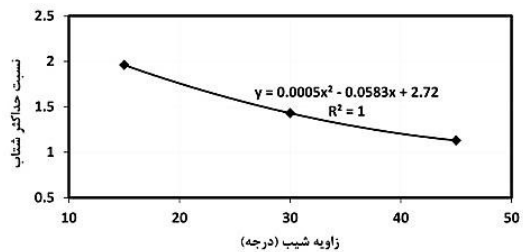
Fig. 7. Top topography position as reference point number 1

شکل های ۱۳ و ۱۴ نمودارهای بی‌بُعد شده‌ی نسبت حداکثر شتاب را در مقابل طول شیب توپوگرافی‌های مذکور نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش طول شیب سبب تقویت شتاب لرزه‌ای ساختگاه می‌شود. زلزله نوعی اغتشاش درونی زمین است که باعث ایجاد موج‌های مختلف تنش و انتشار آن در لایه‌های خاک می‌شود. عوارض توپوگرافی با الگوی رفتار پیچیده سبب ایجاد تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در امواج رسیده به سطح زمین می‌شوند. ناهمواری‌ها هم به صورت زیرسطحی و هم سطحی دامنه حرکات زمین را افزایش می‌دهند. توزیع مجدد شدت امواج در محیط که ناشی از حضور یک مانع است موجب پدیده‌ی تفرق (پراش) می‌شود. همچنین، 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. همان‌طور که اشاره شد انعکاس امواج لرزه‌ای در امتداد طول شیب ناهمواری‌های توپوگرافی صورت می‌پذیرد. بنابراین، بدیهی است که افزایش طول شیب توپوگرافی سبب تشدید وقوع انواع پدیده‌های مرتبط با امواج لرزه‌ای می‌شود. گیر افتادن و انعکاس بیشتر امواج لرزه‌ای در امتداد لبه‌ی عوارض توپوگرافی 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 به‌طور 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 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 وارونه عمل می‌کنند. به این صورت که پرتوهای تابش و بازتابش در درون برآمدگی تداخل سازنده می‌کنند و رفتار گهواره‌ای بروز خواهد کرد. با توضیحات یاد شده، ارجحیت پارامتر طول شیب نسبت به سایر پارامترهای مربوط به هندسه‌ی توپوگرافی‌ها، باتوجه به رخ داد انواع پدیده‌های مربوط به تشدید امواج لرزه‌ای در طول شیب ناهمواری‌ها تبیین می‌شود. بنابراین بدیهی است که افزایش طول شیب توپوگرافی سبب تشدید وقوع انواع پدیده‌های مرتبط با امواج لرزه‌ای می‌شود. گیر افتادن و انعکاس بیشتر امواج لرزه‌ای در امتداد لبه‌ی عوارض توپوگرافی سبب می‌شود اثرات کانونی شدن و گهواره‌ای بیشتری برای این امواج لرزه‌ای اتفاق افتد. همان‌طور که مشاهده شد در توپوگرافی‌های با زاویه‌ی شیب متغیر و ارتفاع ثابت، کاهش زاویه‌ی شیب و افزایش طول شیب سبب تقویت شتاب لرزه‌ای ساختگاه شد [۱۸].



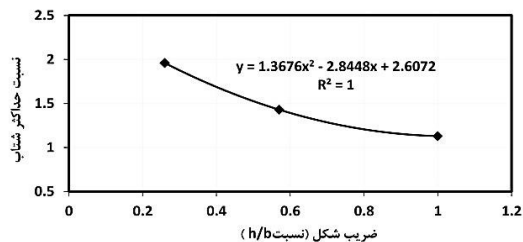
شکل ۱۰. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ضریب شکل برای نقطه مرجع ۱ در توپوگرافی دوزنقه‌ای با ارتفاع ثابت و زاویه متغیر

Fig. 10. Maximum acceleration ratio versus coefficient for reference point 1 in trapezoidal topography with fixed height and variable angle



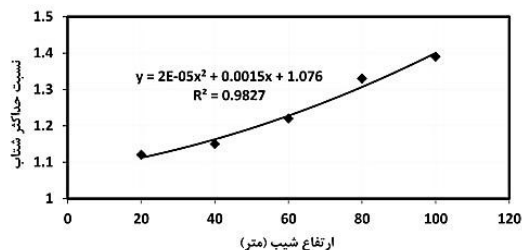
شکل ۱۱. نسبت حداکثر شتاب در مقابل زاویه شیب برای نقطه‌ای در راس توپوگرافی مثلثی شکل با ارتفاع ثابت و زاویه‌ی متغیر

Fig. 11. Maximum acceleration ratio versus tilt angle for point at the top of a triangular topography with fixed and variable angles



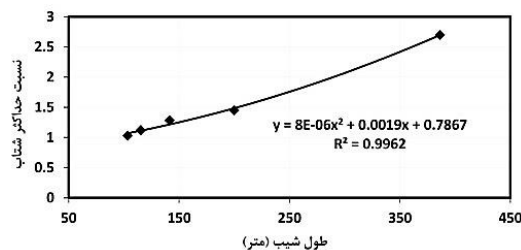
شکل ۱۲. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ضریب شکل برای نقطه راس توپوگرافی مثلثی شکل با ارتفاع ثابت و زاویه‌ی متغیر

Fig. 12. Maximum acceleration ratio versus shape coefficient for a triangular top point with fixed height and variable angles



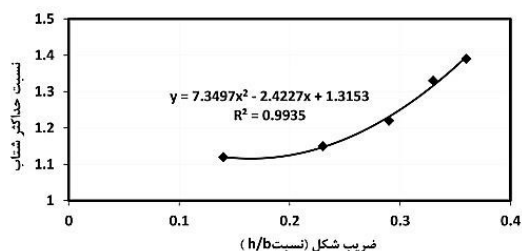
شکل ۱۵. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ارتفاع شیب برای نقطه مرجع در راس توپوگرافی دوزنقه‌ای با زاویه شیب ثابت و ارتفاع متغیر

Fig. 15. Maximum acceleration ratio versus tilt height for the reference point at the top of the trapezoidal topography with constant inclination angle and variable height



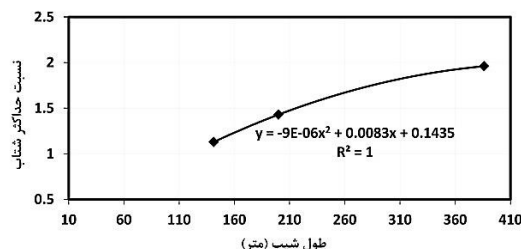
شکل ۱۳. نسبت حداکثر شتاب در مقابل طول شیب برای نقطه مرجع ۱ در توپوگرافی دوزنقه‌ای شکل با ارتفاع ثابت و زاویه متغیر

Fig. 13. Maximum acceleration ratio versus slope length for reference point 1 in trapezoidal topography with fixed height and variable angles



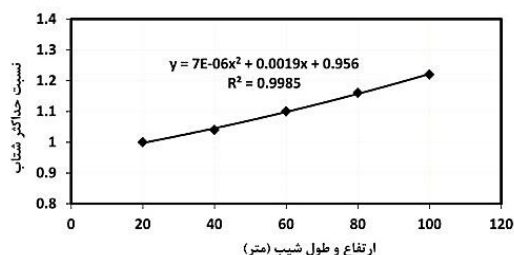
شکل ۱۶. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ضریب شکل برای نقطه مرجع در راس توپوگرافی دوزنقه‌ای با زاویه شیب ثابت و ارتفاع متغیر

Fig. 16. Maximum acceleration ratio versus coefficient of shape for the reference point at the top of the trapezoidal topography with constant inclination angle and variable height



شکل ۱۴. نسبت حداکثر شتاب در مقابل طول شیب برای نقطه راس توپوگرافی مثلثی شکل با ارتفاع ثابت و زاویه متغیر

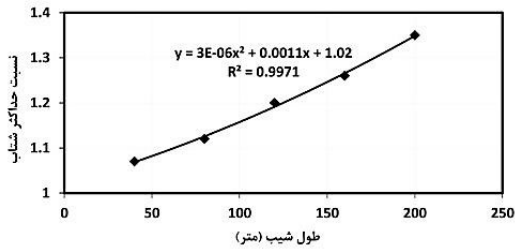
Fig. 14. Maximum acceleration ratio versus slope length for the tip top of a triangular topography with a constant elevation and variable angles



شکل ۱۷. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ارتفاع و طول شیب برای نقطه‌ای در راس توپوگرافی مستطیلی با ارتفاع متغیر

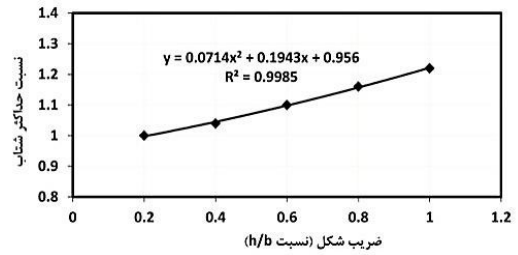
Fig. 17. Maximum acceleration ratio versus height and tilt length for a point at the top of a rectangular topography with variable height

شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ به ترتیب نمودارهای بی‌بعد شده‌ی نسبت حداکثر شتاب در مقابل ارتفاع شیب و ضریب شکل توپوگرافی‌هایی با هندسه‌های دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی شکل با زاویه‌ی شیب ثابت و ارتفاع‌های متغیر را نمایش می‌دهند. در این مدل‌ها نیز به علت ثابت در نظر گرفتن زاویه‌ی شیب و سطح مدل‌های توپوگرافی، با افزایش ارتفاع طول شیب‌ها افزایش می‌یابد (جدول ۲، ۳ و ۵). شکل‌های ۱۷، ۲۰ و ۲۱ نمودارهای بی‌بعد شده‌ی نسبت حداکثر شتاب را در مقابل طول شیب برای توپوگرافی‌های مذکور را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش طول، ارتفاع و ضریب شکل این توپوگرافی‌ها، تقویت شتاب لرزه‌ای ساختگاه اتفاق می‌افتد. در حقیقت در توپوگرافی‌هایی با ارتفاع متغیر و زاویه‌ی شیب ثابت، عوامل افزایش ارتفاع، ضریب شکل و طول شیب، همگی به صورت هم‌راستا با هم سبب افزایش شتاب لرزه‌ای شده‌است لذا نتایج حاصل از این تحقیق با انتظارات و گزارش ثبت شده در تحقیقات قبلی تطبیق دارد.



شکل ۲۱. نسبت حداکثر شتاب در مقابل طول شیب برای نقطه راس توپوگرافی مثلثی با زاویه شیب ثابت و ارتفاع متغیر

Fig. 21. Maximum acceleration ratio versus slope length for the vertex top of the triangular topography with constant gradient and variable height



شکل ۱۸. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ضریب شکل برای نقطه‌ای در راس توپوگرافی مستطیلی شکل با ارتفاع متغیر

Fig. 18. Maximum acceleration ratio versus shape factor for point at the top of a rectangular topographic shape with variable height

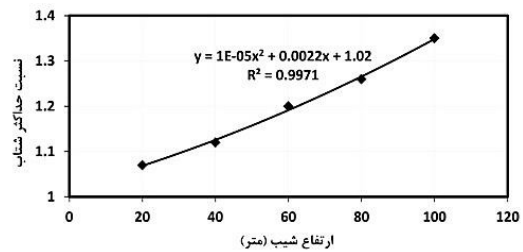
نکته‌ی جالب توجه این است که مقادیر ضریب شکل برای تمامی مدل‌های مثلثی شکل با ارتفاع متغیر و زاویه‌ی شیب ثابت، تقریباً یکسان و برابر ۰/۵۷ است (جدول ۵). هرچند پاسخ لرزه‌ای ساختمان برای توپوگرافی‌هایی با ضریب شکل یکسان متفاوت است اما این پارامتر طول شیب مدل‌های توپوگرافی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در روند تغییر پاسخ لرزه‌ای ساختمان ایفا می‌کند. بنابراین اهمیت فاکتور طول شیب به عنوان یکی از خصوصیات هندسی تعیین‌کننده در پاسخ لرزه‌ای نامنظمی‌ها و توپوگرافی بار دیگر اثبات می‌شود که ضروری است علاوه بر ضریب شکل در تعمیم نتایج لرزه‌ای نیز مد نظر قرار داده شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به روش عددی، تاثیر توپوگرافی محلی بر پاسخ ساختمان و تحلیل لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که خلاصه نتایج آن را می‌توان بصورت زیر جمع‌بندی و خلاصه کرد.

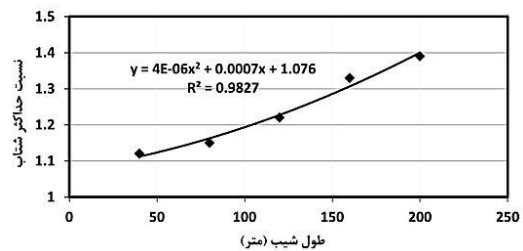
معمولاً افزایش ضریب شکل و زاویه‌ی شیب توپوگرافی باعث تقویت بیشتر پاسخ لرزه‌ای ساختمان می‌شود ولی گاهی عکس این مطلب در نتایج به چشم می‌خورد؛ در توپوگرافی دوزنقه‌ای شکل با افزایش ضریب شکل از ۰/۲۱ تا ۰/۷۸ نسبت حداکثر شتاب در حدود ۲۱ درصد کاهش یافته است که علت این تناقض در نظر نگرفتن سایر پارامترهای موثر مربوط به هندسه‌ی توپوگرافی‌ها است، در توپوگرافی‌های یاد شده میزان طول شیب ناهمواری‌ها در حدود ۷۳/۲ درصد کاهش یافته است و با توجه به رخ داد انواع پدیده‌های مربوط به تشدید امواج لرزه‌ای در طول شیب ناهمواری‌ها، کاهش نسبت حداکثر شتاب توجیه‌پذیر است.

در توپوگرافی‌هایی با زاویه‌ی شیب ثابت، افزایش ضریب شکل سبب تقویت پاسخ لرزه‌ای می‌شود ولی با متغیر در نظر گرفتن فاکتور زاویه‌ی شیب، رفتار لرزه‌ای متفاوتی به چشم می‌خورد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگر زاویه‌ی شیب توپوگرافی به نحوی افزایش یابد که طول شیب توپوگرافی کاهش یابد، شتاب لرزه‌ای ساختمان کاهش می‌یابد حتی اگر ضریب شکل



شکل ۱۹. نسبت حداکثر شتاب در مقابل ارتفاع شیب برای نقطه‌ای در راس توپوگرافی مثلثی شکل با زاویه شیب ثابت و ارتفاع متغیر

Fig. 19. Maximum acceleration ratio versus tilt height for point at the top of a triangular topography with constant gradient angle and variable height



شکل ۲۰. نسبت حداکثر شتاب در مقابل طول شیب برای نقطه‌ای در راس توپوگرافی دوزنقه‌ای با زاویه شیب ثابت و ارتفاع متغیر

Fig. 20. Maximum acceleration ratio versus slope length for point at the top of trapezoidal topography with constant inclination angle and variable height



- [6] S.M.M. Jafarzadeh F., Farahi Jahromi H., On the role of topographic amplification in seismic slope instabilities, *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2) (2015) 163-170.
- [7] M.K. Kamalian M., Sohrabi Bidar A., Haghshenas E., Seismic Behavior of 2D Semi-sine Shaped Hills against Vertical SV Waves, *Journal of Computational Methods in Engineering (JCME)*, 31(1) (2012) 25-45.
- [8] F.J. Nguyen H.T., Evaluation of topography site effect in slope stability under dynamic loading, (2013).
- [9] Iran national Standard No. 2800, 4 Edition, (2015).
- [10] Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance, (2004).
- [11] J. W., New French seismic code orientation, (1992).
- [12] E.C. Rizzitano S., Giovanni B., Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67 (2014) 66-84.
- [13] D.I.K. Co., Geotechnical report and the supporting structure design commercial building project, (2015).
- [14] K.R. Lysmer J., Finite dynamic model for infinite media, *Journal of Engineering Mechanic Division ASCE*, 95 (1969) 859-877.
- [15] N.A.H. T., towards a complete framework for seismic analysis in Abaqus, *Engineering and Computational Mechanics*, 167(1) (2013) 3-12.
- [16] J.B. Preisig M., Nonlinear finite element analysis of dynamic soil-foundation-structure interaction, (2005).
- [17] J.M.R. Bolton M.D., Soil stiffness and damping in *Structural Dynamics*, (1990) 209-216.
- [18] W.Q.a.W. F., FEM Seismic Analysis on the Effect of Topography and Slope Structure for Landsliding Potential Evaluation, *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 46(2) (2012) 61-66.

روند افزایشی داشته باشد. اگر ارتفاع توپوگرافی به نحوی افزایش یابد که طول شیب نیز افزایش یابد حتی اگر ضریب شکل توپوگرافی‌ها ثابت بماند پاسخ لرزه‌ای ساختگاه تشدید می‌شود زیرا با وجود اثرگذاری پارامترهای هندسی زاویه‌ی شیب و ضریب شکل، ارجحیت تاثیر پارامتر طول شیب مورد بحث قرار گرفت. مقادیر ضریب شکل برای تمامی مدل‌های مثلثی شکل با ارتفاع متغیر (۲۰-۱۰۰ m) و زاویه‌ی شیب ثابت ( $30^\circ$ )، تقریباً یکسان و برابر  $0.57$  است. با این وجود، مشاهده شد که پاسخ لرزه‌ای ساختگاه برای توپوگرافی‌هایی با ضریب شکل یکسان، متفاوت است و با افزایش ارتفاع و طول شیب با ضریب شکل ثابت، نسبت حداکثر شتاب  $1/2$  برابر شده‌است. اگرچه فاکتور بدون بعد ضریب شکل عموماً به عنوان یکی از خصوصیات هندسی تعیین کننده در پاسخ لرزه‌ای ناهمواری‌های توپوگرافی مطرح می‌شود ولی در رابطه با توپوگرافی‌هایی با زاویه‌ی شیب متفاوت، فاکتور طول شیب توپوگرافی نیز به عنوان یکی از خصوصیات هندسی تاثیرگذار در تقویت امواج لرزه‌ای باید مورد توجه قرار گیرد و بررسی ضریب شکل به تنهایی در تعمیم دادن نتایج کافی نخواهد بود.

#### مراجع

- [1] W.J. Del Gaudio V., Advances and problems in understanding the seismic response of potentially unstable slopes, *Engineering Geology*, 122(1) (2011) 73-78.
- [2] M. J., Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819, *Philosophical Magazine*, 63 (1824) 105-177.
- [3] B. P., Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies, *Geophysical Journal International*, 171(3) (1982) 731-760.
- [4] J.M.K. Kamalian M., Sohrabi Bidar A., Gatmiri B., On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 5 (2003) 5-35.
- [5] S.N. Ashford S.A., Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff, *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3) (1997) 692-700.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Ghaffarpour Jahromi, A. Vatani Oskouei, S. Karkhaneh, Evaluation of geometry and essential parameters of topographic irregularities for generalization seismic results of Manjil Earthquake for regions with soil type II , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 19-28.  
DOI: 10.22060/ceej.2018.13007.5311



