

(مقاله پژوهشی)

بررسی اثر انحنای دیواره بر پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌های سنگی

صادق طهماسبی^۱، امین ازهری^{۱*}، سعید مهدوی^۱، هاجر شرع اصفهانی^۲^۱ - دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران^۲ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: دی ۱۳۹۹، پذیرش: مرداد ۱۴۰۰)

چکیده

بررسی پایداری استاتیکی و لرزه‌ای شیروانی‌های سنگی و خاکی در پروژه‌های عمرانی و معدنی از نقطه نظر فنی و اقتصادی و بر اساس ملاحظات ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون مطالعات زیادی در این بخش صورت گرفته که اغلب آن به صورت استاتیکی بوده و مطالعات لرزه‌ای محدود نیز تنها بر روی پارامترهای منبع زلزله متمرکز شده‌اند و تأثیرات محلی شامل توپوگرافی و اختلاف سختی مواد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی انحنای شیروانی‌های سنگی از جمله مواردی است که بسیار محدود و تنها برای تاج شیروانی در دو بعد بررسی شده است. هدف این پژوهش بررسی اثر انحنای دیواره شیروانی در شرایط بارگذاری دینامیکی است. به این منظور تأثیر انحنای دیواره شیروانی در سه بعد با نرم‌افزار عددی FLAC3D مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه دو مدل پیت و پیت معکوس بیضی شکل با انحنای بین ۲۵ تا ۲۵۰ متر به وسیله پارامترهای ژئومکانیکی معدن چغارت مدل‌سازی شده و تحت بار استاتیکی و بار لرزه‌ای متداول منطقه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل تطابق خوبی با مطالعات استاتیکی و دینامیکی دیگر محققان دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد جابه‌جایی دینامیکی مدل‌های مربوط به پیت معدنی مانند مدل استاتیکی آن‌ها کم است، در حالی که در مدل‌های مربوط به پیت معکوس جابه‌جایی برخلاف مدل استاتیکی قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در هر دو مدل با افزایش شعاع انحنا در ترازهای یکسان، میزان جابه‌جایی و شتاب سطحی نیز افزایش می‌یابد. در نهایت فاکتور تقویت شتاب (AF)، در مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که مقدار آن بسته به شعاع انحنا در مدل‌های پیت معکوس بیضی بین ۴/۵ و ۶ و پیت بیضی بین ۰/۳ و ۱/۲ است.

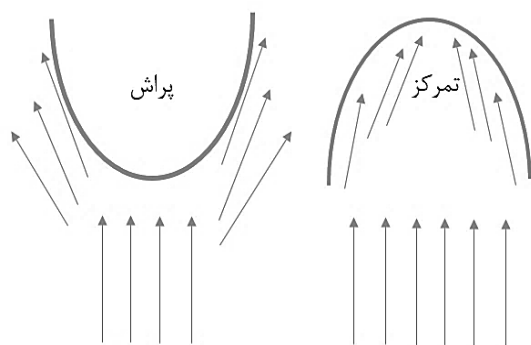
کلمات کلیدی

شیروانی، شعاع انحنا، فاکتور تقویت شتاب، تحلیل دینامیکی، روش عددی

* عهده‌دار مکاتبات: aazhari@iut.ac.ir

۱- مقدمه

پدیده تمرکز، مسئله تفکیک موج باعث کاهش چشمگیر لرزش در هنگام برخورد موج با زمین می‌شود. همچنین، زوایای مختلف شیروانی تنوعی از الگوهای منتشرشده برای امواج لرزه‌ای ایجاد می‌کند که یکی دیگر از عوامل افزایش یا کاهش اثرات توپوگرافی است. بر اساس قانون اسنل در صورتی که زاویه تابش موج از زاویه بحرانی کمتر باشد موج به سمت داخل شیروانی بازتابش می‌کند که در شیروانی‌های با شعاع انحنای بزرگ یا شیب تند باعث تشدید لرزش می‌شود. در مقابل، شیروانی‌های کم شیب، موج ورودی را پراکنده کرده و لرزش زمین را می‌کاهد. رابطه بین زاویه شیب و جهت موج لرزه‌ای، می‌تواند موجب تقویت لرزش در یک‌طرف و کاهش در طرف دیگر شیروانی شود [۱۱، ۲۰، ۱۹]. در مطالعات انجام‌شده تشدید و تضعیف موج زلزله توسط فاکتور تشدید (AF) که نسبت شتاب (سرعت) موج لرزه به شتاب (سرعت) موج سطح شیروانی است، بیان می‌شود. هاونیت و همکارانش نقش اثرات محلی را در لغزش شیروانی‌های منطقه آنانوو قرقیزستان که توسط زلزله‌ای در سال ۱۹۹۲ رخ داد مطالعه کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بیشتر تقویت لرزه‌ای زمین در ناحیه قله رخ داده است. در این حالت فاکتور تشدید تابعی از فرکانس زلزله است و می‌تواند تا ۱۰ افزایش یابد [۷]. در سال ۲۰۱۶ لوریگ به اثر تشدید زمین‌لرزه در معادن روباز در مقایسه با شیب‌های طبیعی با استفاده از تحلیل عددی روی اثر توپوگرافی و اختلاف سختی مواد به‌عنوان دو اثر محلی اشاره کرد [۲۱].



شکل ۱- پدیده تمرکز (سمت راست) و تفکیک (سمت چپ) امواج لرزه‌ای در توپوگرافی‌های مختلف

مطالعات جهانی توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) نشان می‌دهد که فاکتور تقویت شتاب زمین می‌تواند بر روی تپه‌ها و لبه‌های تیز، بزرگ‌تر از ۴ شود [۲۲]. همچنین بیشینه تقویت لزوماً در تاج شیروانی رخ

ایمنی و پایداری شیروانی‌های معدنی و شیروانی‌های جاده‌ای به دلیل مخاطرات مالی و جانی از اهمیت ویژه‌ای برای مهندسين ژئوتکنیک برخوردار است. با توجه به تنوع زیاد عوامل تأثیرگذار؛ مانند ویژگی‌های مقاومتی سنگ یا خاک تشکیل‌دهنده، توپوگرافی، پارامترهای ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها، شرایط آب‌های زیرزمینی و لرزه‌خیزی منطقه، انواع مختلف ریزش و شکست در شیروانی‌ها محتمل است؛ بنابراین باید در محل‌های مورد نظر عوامل فوق و تأثیراتی که به‌صورت مکمل عمل می‌کنند بررسی شود. از طرفی به دلیل اهمیت بحث لرزه‌خیزی منطقه و زلزله در بحث پایداری شیروانی‌ها لازم است طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها از طریق "تحلیل خطر لرزه‌ای" انجام گیرد. به‌طور کلی می‌توان گفت دودسته عوامل پارامترهای منبع و عوامل محلی بر پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها تأثیرگذارند. پارامترهای منبع شامل بزرگی زمین‌لرزه، فرکانس لرزه، مدت‌زمان، فاصله افقی و عمودی شیروانی از منبع و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه هست. عوامل محلی نیز شامل توپوگرافی و تنوع ویژگی‌های ژئومکانیکی شیروانی است [۱-۴]. تجربه نشان داده است که برای یک رویداد منحصربه‌فرد زلزله، در محل‌هایی واقع در نقاطی که فاصله آن‌ها تا کانون زلزله یکسان، ولی شرایط محلی مختلف است، شدت لرزش متفاوتی ثبت شده است [۵-۸]. در میان تأثیرات محلی، توپوگرافی از عواملی است که تا حد زیادی به طراحی شیروانی توسط مهندسين ژئوتکنیک وابسته است و تاکنون مطالعات گسترده‌ای به‌منظور بررسی اثر این عامل بر پایداری استاتیکی و دینامیکی شیروانی‌ها انجام شده است [۹-۱۶]. طبق مطالعات انجام‌شده دو پدیده‌ی بازتابش و پراش موج بر پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌ها تأثیر قابل‌توجهی دارند. این دو پدیده از دلایل تقویت یا تضعیف لرزش در شیروانی‌ها می‌باشند که توسط شیب و انحنای توپوگرافی کنترل می‌شوند [۱۰، ۱۷، ۱۸]. شکل ۱ تصویر شماتیک این دو پدیده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، امواج لرزه‌ای در توپوگرافی‌های تپه‌ای شکل به دام می‌افتند. این پدیده تمرکز نامیده شده و به‌طور قابل‌توجهی موجب افزایش لرزش زمین می‌شود. درحالی‌که برخورد امواج لرزه‌ای با توپوگرافی‌های به‌صورت گود باعث پراکنده شدن امواج شده و این مسئله تفکیک یا پراش موج نامیده می‌شود. برخلاف

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اکثر مطالعات به‌منظور بررسی تأثیر توپوگرافی شیروانی‌ها در پاسخ لرزه‌ای بر روی شیب و ارتفاع شیروانی‌ها انجام گرفته است و محدود مطالعاتی که بر روی انحنای توپوگرافی انجام گرفته، انحنای در تاج شیروانی و در مقطعی دوبعدی در نظر گرفته‌اند. به این منظور، در مطالعه حاضر سعی شده است تأثیر انحنای دیواره شیروانی‌ها در سه بعد در حالت استاتیکی و همچنین میزان تقویت شتاب لرزه در حالت دینامیکی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود (نرم‌افزار Flac3D) مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور در بخش دوم ابتدا به معرفی پارامترهای ژئومکانیکی منطقه و هندسه مدل‌های مورد مطالعه می‌پردازیم. در بخش سوم مدل‌سازی استاتیکی و پس‌از آن در بخش چهارم تأثیر انحنای بر پاسخ لرزه‌ای توسط مدل‌سازی دینامیکی و مقایسه توپوگرافی‌های مختلف به‌عنوان هدف اصلی مطالعه ارائه خواهد شد. در نهایت در بخش پنجم به ارائه و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده پرداخته خواهد شد.

۲- پارامترهای ژئومکانیکی و هندسه مدل‌های مورد مطالعه

پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در مدل‌سازی‌های عددی این پژوهش بر اساس معدن چغارت واقع در شهرستان بافق استان یزد انتخاب شده است [۲۷]. با توجه به این‌که توده سنگ دربرگیرنده این معدن روباز، درزه‌دار است و بررسی تأثیر انحنای به‌طور مستقل مورد نظر است، پارامترهای معادل‌سازی شده با توجه به پارامترهای سنگ بکر و درزه‌دار، در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۲، پارامترهای معیار موهر - کولمب توده سنگ این معدن را که با بهره‌گیری از روش پیشنهادشده توسط هوک ارزیابی شده و به‌عنوان ورودی مدل‌سازی استفاده شده است، نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای سنگ بکر و اندیس GSI در بلوک ۱ معدن چغارت [۲۷]

پارامتر	مقدار	واحد
σ_{ci}	۱۰۷	MPa
GSI	۵۱	-
E_i	۱۴۱۷۵	MPa
D	۰٫۸	-
m_i	۲۵	-
ν_i	۰٫۲۵	-

نمی‌دهد، بلکه می‌تواند در فاصله کوتاهی در پشت تاج شیروانی باشد [۲۴، ۲۳]. تارگوف و هیونیث در سال ۲۰۱۶، مطالعه‌ای دوبعدی به‌منظور تخمین میزان تقویت شدت آریاس (I_a)، به‌عنوان کمیتی که کل انرژی حاصل از زلزله را نشان می‌دهد، در چند توپوگرافی با میزان انحنای گوناگون و تحت موج‌هایی با فرکانس‌های مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که هر چه میزان انحنای یک توپوگرافی کمتر باشد به عبارتی شعاع انحنای بزرگ‌تری داشته باشد، سیگنال‌های با فرکانس پایین، پارامتر شدت آریاس را بیشتر کنترل کرده و بالعکس هر چه انحنای توپوگرافی بزرگ‌تر باشد یا به عبارتی شعاع انحنای کوچک‌تر باشد، سیگنال‌هایی با فرکانس بالا، بر شدت آریاس مؤثرتر خواهند بود [۲۵]. ازهری و آزیبی در سال ۲۰۱۷ اطلاعات جمع‌آوری شده از ۹۷ ریزش شیروانی‌های طبیعی در اثر زلزله را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که در ۱۲ مورد از شیب‌های طبیعی، توپوگرافی عامل اصلی ناپایداری است. همچنین در سایر موارد هم در کنار عوامل دیگری مانند تفاوت در مدول تغییر شکل لایه‌ها و سطح آب زیرزمینی، توپوگرافی تأثیرگذار بوده است. تطبیق نقشه‌های برداشت لرزه‌ای با نقشه‌های توپوگرافی در مناطق مورد بررسی نشان داده‌اند که همبستگی خوبی بین مناطق با شدت لرزه‌ای زیاد و توپوگرافی‌های مرتفع، تیز و تپه‌ای شکل وجود دارد. این مسئله تأییدکننده تأثیر توپوگرافی بر ناپایداری و تشدید اثر زلزله بر شیروانی است [۱]. این محققین در مطالعه دیگری تأثیر توپوگرافی بر فاکتور تقویت سرعت را با استفاده از روش المان مجزا بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عرض تاج شیروانی از قله نوک‌تیز تا شیروانی تپه‌ای شکل با عرض تاج بیشتر تا نهایتاً شیروانی‌های یک‌طرفه، فاکتور تقویت سرعت به ترتیب از ۹ تا ۲ تغییر خواهد کرد. نتایج نشان داد که برخلاف شیب‌های طبیعی و سدهای باطله که توپوگرافی آن‌ها باعث تمرکز موج و در نتیجه تشدید اثر زلزله می‌شود، معادن روباز به خاطر شکل دره مانند یا پله‌ای یک‌طرفه در معرض پدیده تفکیک و تضعیف موج قرار می‌گیرند و ضریب تشدید در شیروانی‌های طبیعی می‌تواند تا ۸ برابر معادن روباز افزایش یابد [۱۰]. ژانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ تأثیرات توپوگرافی از جمله زاویه شیروانی، ارتفاع شیروانی، انحنای لبه شیروانی، تأثیر فرکانس و تعداد سیکل موج ورودی بر فاکتور تقویت شتاب حرکت زمین را با نرم‌افزار FLAC2D بررسی کردند [۲۶].

جدول ۲- پارامترهای معیار موهر - کولمب توده سنگ معدن
چغارت و ورودی مدل‌سازی

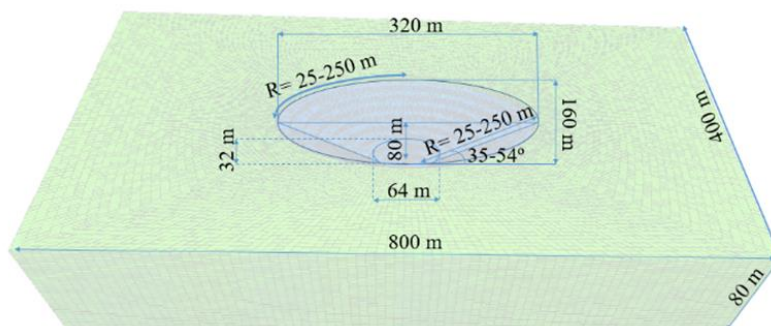
پارامتر	مقدار	واحد
چسبندگی (c')	۸۹۰	kPa
چگالی (d)	۲۷۵۰	Kg/m ³
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ')	۴۹	درجه
مدول یانگ (E_{rm})	۱۳۸۰	MPa
ضریب پواسون (ν_{rm})	۰٫۳۵	-

موجود، در هر مرحله از حفاری، یک قطر بزرگ و یک قطر کوچک وجود دارد. اولین پله (پله بالا یا دهانه) در مدل پیت بیضی‌شکل، دارای قطر بزرگ ۳۲۰ متر و قطر کوچک ۱۶۰ متر و آخرین پله (پله کف پیت) نیز به ترتیب دارای قطر بزرگ و کوچک ۶۴ و ۳۲ متر است. همچنین در مدل پیت بیضی معکوس، پایین‌ترین مقطع به ترتیب دارای قطر بزرگ و کوچک ۳۸۴ و ۱۹۲ متر و بالاترین مقطع دارای قطر بزرگ و کوچک ۱۲۸ و ۶۴ متر است. شکل ۲ ابعاد، زوایا و تغییرات شعاع انحنای را در مدل‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد. شعاع‌های انحنای برای نقاط موردنظر در هر مقطع از رابطه (۱) به‌دست‌آمده است.

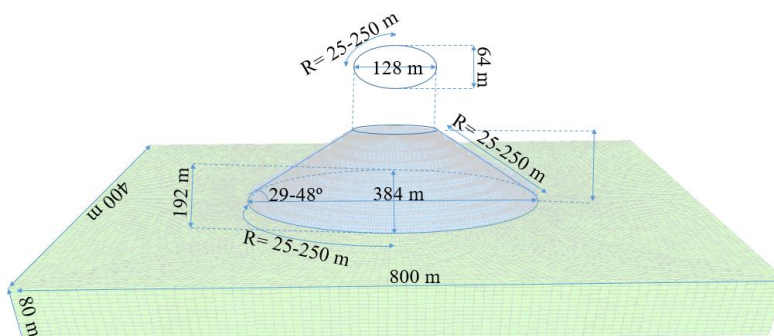
$$R = \frac{(b^4 x^2 + a^4 y^2)^{1.5}}{a^4 b^4} \quad (1)$$

که در این رابطه شعاع انحنای a قطر بزرگ بیضی و b قطر کوچک بیضی در هر مقطع است. x و y نیز مختصات نقطه مورد نظر به‌منظور محاسبه شعاع انحنای است. شیب کلی پیت معدنی مدل شده با توجه به عمق ۸۰ متری و عرض پله ۸ متری برای هرتراز، برای قسمت‌های با شعاع انحنای زیاد و کم به ترتیب ۵۴٫۵ و ۳۵ درجه است. شیب پیت معکوس بیضی‌شکل در جهت پرتیب (جهتی که دارای انحنای بازتر است) ۴۸٫۳ درجه و در جهت کم شیب ۲۹٫۳ درجه است.

به‌منظور بررسی تأثیر انحنای از ساختارهای پیت شکل و تپه‌ای یا به عبارتی پیت معکوس با مقاطع بیضی استفاده شده است که با توجه به تغییر انحنای در هر مقطع و مقاطع با ارتفاع‌های مختلف محدوده شعاع انحنای بین ۲۵ تا ۲۰۰ متری را شامل می‌شوند. در مدل‌سازی‌های انجام‌شده، از ۹ پله‌ی ۱۰ متری در هر مدل (پیت و پیت معکوس) بهره گرفته شده است تا شبیه‌سازی از دونوع معدن روباز پیت شکل و پیت معکوس انجام گرفته باشد. حفاری‌های انجام‌شده در این مدل‌سازی به‌صورت حفاری مرحله‌ای انجام شده است تا روند تغییرات منحنی مورد نظر مانند شتاب، سرعت، جابه‌جایی و نیروهای نامتعادل را به‌صورت مرحله‌ای مشاهده کنیم. با توجه به هندسه‌ی بیضی‌شکل در دو مورد از مدل‌سازی‌های



شکل (الف) پیت بیضی‌شکل



شکل (ب) پیت معکوس بیضی‌شکل

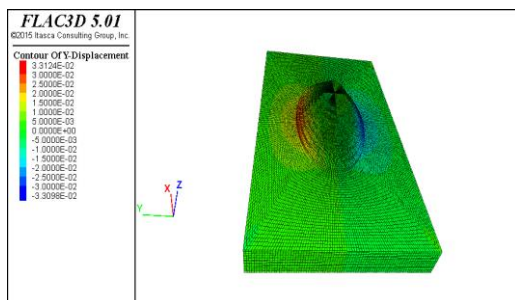
شکل ۲- نمای کلی از هندسه ساخته‌شده برای مدل‌های (الف) پیت بیضی‌شکل و (ب) پیت معکوس بیضی‌شکل

۳- مدل‌سازی استاتیکی

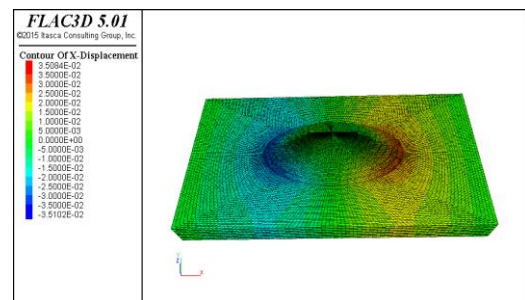
پس از هندسه‌سازی، اعمال خصوصیات ماده مطابق با مدل رفتاری تعیین‌شده و اعمال شرایط مرزی و اولیه به مدل، اقدام به حل مدل‌سازی‌های مورد نظر شده است. با توجه به آزمایش‌های برجای انجام‌شده در منطقه نسبت تنش افقی به عمودی (K_0) برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است. هرچند هدف اصلی این تحقیق، بررسی واکنش لرزه‌ای پیت و پیت معکوس است، ولی برای مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی با تحلیل دینامیکی، ابتدا جابه‌جایی‌های استاتیکی بررسی شده است. شکل ۳ کانتورهای جابه‌جایی پیت و پیت معکوس را در جهات X و Y نشان می‌دهد. در پیت بیضوی هرچند مقدار جابه‌جایی کم است، ولی به خاطر داشتن شعاع انحنای متفاوت در دو جهت X و Y ، میزان جابه‌جایی‌ها نیز متفاوت است و به‌طور کلی میزان جابه‌جایی در جهت Y بیشتر از جهت X است. یکی از دلایل اصلی این موضوع این است که هر چه در جهت مختصاتی X حرکت کنیم (چه در جهت مثبت X و چه در جهت منفی X) شعاع انحنای کم شده، در نتیجه فشار محصورکننده زیاد می‌شود و در نهایت اجازه جابه‌جایی محدودتری به سنگ داده می‌شود. همچنین به خاطر تأثیر تنش بیشتر در عمق پیت معدنی، میزان جابه‌جایی نیز در پله‌های پایینی زیادتر است؛ اما در مقابل،

در مورد پیت معکوس باوجود شعاع انحنای متفاوت در دو جهت X و Y ، میزان جابه‌جایی‌ها تفاوت معنی‌داری از خود نشان نمی‌دهند. دلیل این موضوع بی‌تأثیر بودن فشار محصورکنندگی در مدل پیت معکوس است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌ها نقاطی به‌منظور رصد جابه‌جایی مدل در شعاع انحنای مختلف در نظر گرفته شده‌اند. این نقاط در دو گروه بر روی مقاطع افقی از نقطه A تا B و در مقاطع مختلف ارتفاعی در مقاطع $A-A$ و $B-B$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

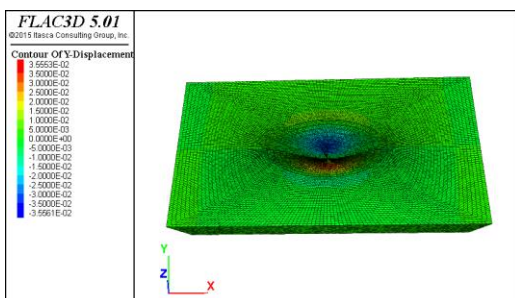
شکل ۵-الف جابه‌جایی‌های رصد شده برای مقطع $A-A$ و $B-B$ در پله‌های با ارتفاع‌های مختلف را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که به‌طور کلی در نقاط A با شعاع انحنای کمتر به دلیل وجود فشار محصورکننده بیشتر، جابه‌جایی‌ها مقادیر کمتری را نسبت به نقاط B با همان ارتفاع نشان می‌دهند. به‌منظور بررسی نقاط واقع در یک ارتفاع با شعاع انحنای متفاوت شکل ۵-ب جابه‌جایی‌های ثبت‌شده از نقطه A تا B را بر روی پله میانی (ارتفاع ۴۰ متر) در جهات X و Y و به‌صورت برآیند دو مؤلفه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابه‌جایی‌ها در جهت‌های X و Y روندی عکس یکدیگر دارند و برآیند جابه‌جایی‌ها از شعاع انحنای کم (نقطه A) تا زیاد (نقطه B) به‌صورت خطی در حال افزایش است.



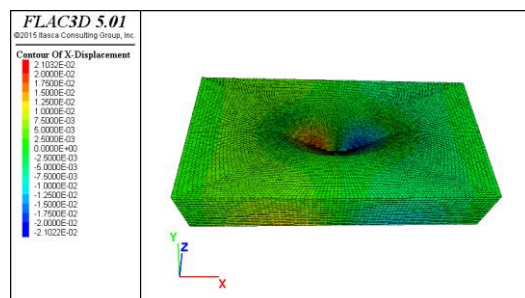
ب) کانتور جابه‌جایی در جهت Y مربوط به پیت معکوس بیضی



الف) کانتور جابه‌جایی در جهت X مربوط به پیت معکوس بیضی



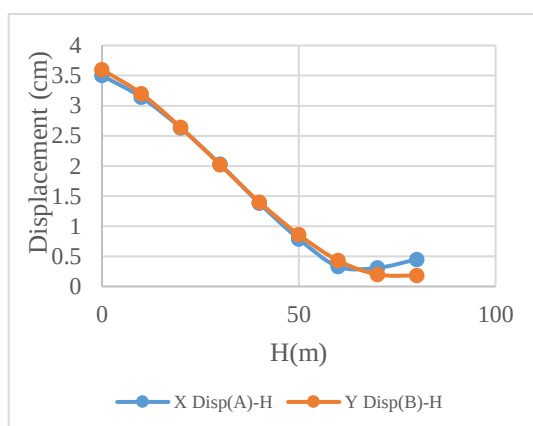
د) کانتور جابه‌جایی در جهت Y مربوط به پیت بیضی شکل



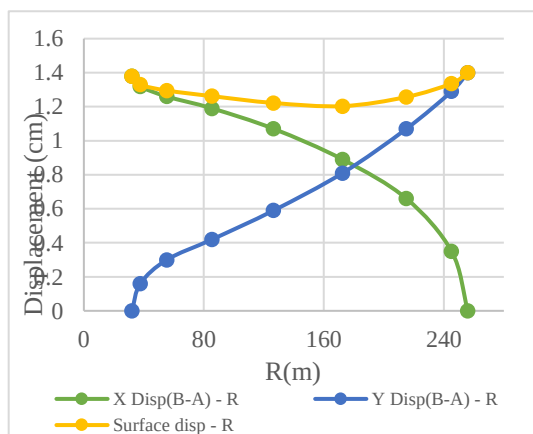
ج) کانتور جابه‌جایی در جهت X مربوط به پیت بیضی شکل

شکل ۳- کانتورهای جابه‌جایی در جهت X و Y تحت شرایط استاتیکی برای پیت و پیت معکوس

در شکل ۶، نمودارهای مشابهی برای پیت معکوس نیز رسم شده است که روندی کاملاً متفاوت با پیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف معنی‌داری بین جابه‌جایی‌ها در جهات X و Y وجود نداشته و با افزایش ارتفاع و در نتیجه کاهش شعاع انحنای جابه‌جایی‌ها کاسته می‌شود. همچنین برای نقاط مورد نظر در یک ارتفاع (شکل ۶-ب) تغییر شعاع انحنای تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر میزان جابه‌جایی برآیند ندارد. دلایل اختلاف در روند جابه‌جایی‌ها بین پیت و پیت معکوس را می‌توان کاهش تنش در ارتفاع‌های بالا و عدم وجود فشار محصورکننده در پیت معکوس برخلاف مدل پیت شکل دانست.



الف- منحنی جابه‌جایی برحسب ارتفاع (شعاع انحنای) مربوط به نقاط واقع در مقاطع A-A و B-B

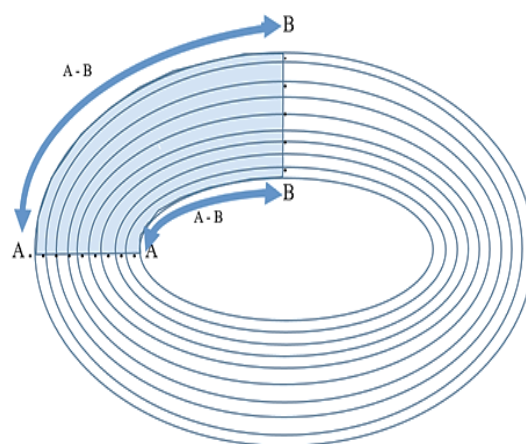


ب- منحنی‌های جابه‌جایی استاتیکی برحسب شعاع انحنای مربوط به پیت معکوس بیضی شکل

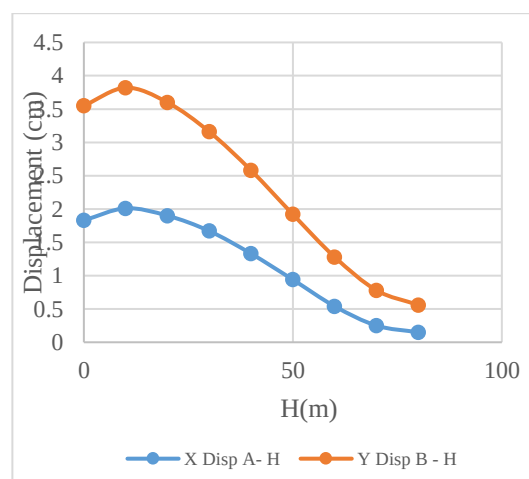
شکل ۶- جابه‌جایی‌های ثبت‌شده برای پیت معکوس در نقاط واقع بر مقاطع A-A، B-B و A-B

۴- مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی

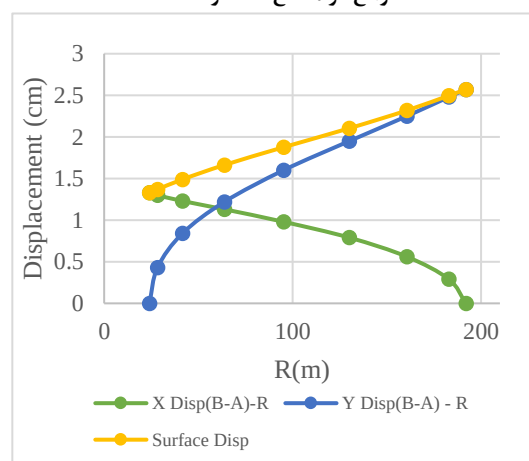
در این بخش به بررسی رفتار دینامیکی مدل‌های ساخته‌شده با توجه به پایداری استاتیکی مدل‌ها پرداخته



شکل ۴- نمایی از مکان‌های رصد در نظر گرفته شده پیت با پیت معکوس بر روی مقطعی با ارتفاع ثابت (A-B) و مقاطع A-A و B-B با ارتفاع متفاوت



الف) منحنی جابه‌جایی برحسب ارتفاع (شعاع انحنای) مربوط به نقاط واقع در مقاطع A-A و B-B



ب) منحنی‌های جابه‌جایی استاتیکی برحسب شعاع انحنای مربوط به پیت بیضی شکل

شکل ۵- جابه‌جایی‌های ثبت‌شده برای پیت برای نقاط واقع بر مقاطع A-A، B-B و A-B

می‌شود. به این منظور باید در ابتدا ملاحظات برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شود، این ملاحظات شامل، ابعاد شبکه‌بندی، میرایی مدل و شرایط مرزی است. در تحلیل دینامیکی، ابعاد المان‌ها دارای محدودیت است. ابعاد شبکه‌بندی در تحلیل‌های لرزه‌ای نقش مهمی دارند، زیرا با بزرگ‌تر شدن ابعاد المان‌ها علاوه بر اینکه دقت تحلیل پایین می‌آید، با توجه به فرکانس موج زلزله اعمالی احتمال بازتاب موج در برخورد با المان‌های بزرگ وجود دارد و موج به‌درستی در مدل عبور نمی‌کند. همچنین با کاهش بیش‌ازحد ابعاد المان‌ها، زمان محاسبات عددی توسط نرم‌افزار می‌تواند بسیار بالا رود. برای جلوگیری از اعوجاج موج زلزله در مدل و انتشار صحیح آن، لازم است تا حداکثر ابعاد المان کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج ایجادشده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد. حداکثر بعد هر المان را می‌توان با رابطه (۲) تعیین نمود [۲۸].

با توجه به این که موج در طبیعت، با پیشروی در محیط میرا شده و انرژی آن کاهش می‌یابد، لذا این پدیده نیز در تحلیل دینامیکی باید در نظر گرفته شود. در نرم‌افزارهای عددی برای مشخص شدن میرایی محیط از میرایی رایلی یا میرایی محلی استفاده می‌شود که مدل ریاضی آن به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که انرژی مستهلک شده در محاسبات عددی، مانند انرژی مستهلک شده در سیستم فیزیکی باشد. برای میرایی رایلی لازم است که ابتدا با تعیین مقدار فرکانس طبیعی مدل تهیه‌شده، مقدار میرایی رایلی را در محدوده فرکانس طبیعی تعریف کرد. تعیین میرایی محیط به‌راحتی امکان‌پذیر نیست، ولی بر اساس تجربه مقدار میرایی مصالح ژئوتکنیکی، ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود. قابل‌ذکر است که در صورت استفاده از مدل‌های پلاستیک (مانند موهر - کولمب)، به دلیل جریان پلاستیک ذرات، مقداری از انرژی بار لرزه‌ای تلف می‌شود. این اتلاف انرژی ایجاد می‌کند که میرایی، در مطالعات عددی به حدود ۰/۵ درصد برسد [۲۸].

$$l_{max} = \frac{C_s}{8f_{max}} \quad (۲)$$

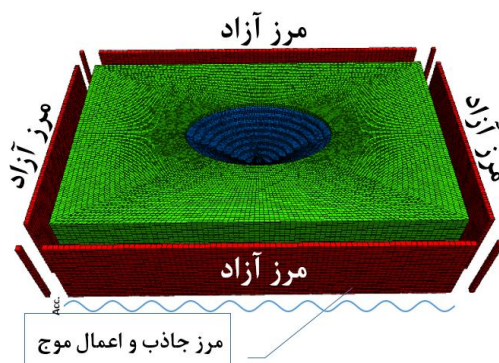
C_s : سرعت گذر موج برشی در محیط.
 f_{max} : بزرگ‌ترین فرکانس دارای انرژی در موج زلزله
 که C_s از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (۳)$$

G و ρ به ترتیب مدول برشی و چگالی سنگ موجود در منطقه با مقادیر ۵۱۲/۴ مگاپاسکال و ۲۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. درنهایت با محاسبه سرعت موج برشی از طریق رابطه (۳)، حداکثر اندازه ابعاد شبکه با استفاده از رابطه (۲)، ۱۰/۸ متر حاصل شده است. در مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC3D لازم است با تعیین شرایط مرزی آرام (ویسکوز) در مرزهای مدل یا مرز میدان آزاد از انعکاس امواج در هنگام برخورد با مرزها جلوگیری شود. اعمال بارهای لرزه‌ای مبتنی بر استفاده از میراگرهای عمودی و برشی در مرزهای مدل است که انرژی امواج برخوردی را جذب و از بازتاب آن به داخل مدل جلوگیری می‌کند. بنابراین در اطراف مدل‌های ساخته‌شده، از مرزهای آزاد و در کف مدل‌ها از مرزهای آرام استفاده شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. استفاده از مرز ویسکوز در پایه باعث می‌شود تا امکان اعمال بار در زلزله به‌صورت تدریجی سرعت یا شتاب وجود نداشته باشد. به این منظور با استفاده از رابطه‌ی (۴)، داده‌های شتاب زلزله به رکورد تنش برشی تبدیل شده است. سپس تنش برشی به‌صورت یک موج برشی به مدل اعمال شده است.

$$\sigma_s = -2(\rho C_s) v_s \quad (۴)$$

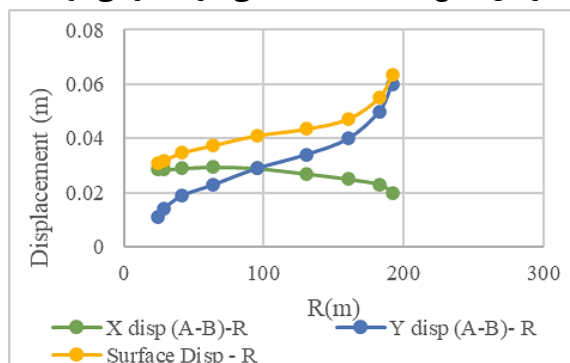
σ_s تنش برشی اعمالی، v_s سرعت موج برشی ورودی در مرز، ρ چگالی محیط و C_s سرعت عبور موج برشی در محیط.



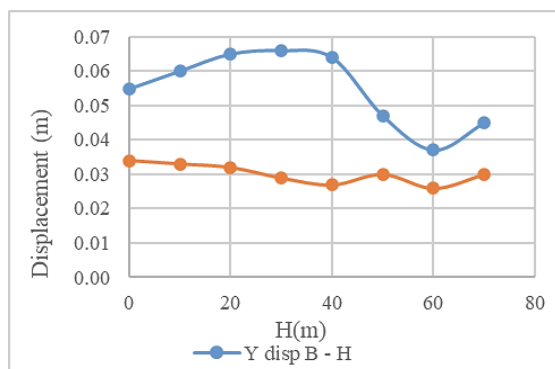
شکل ۷- شرایط مرزی آزاد در اطراف و آرام در کف مدل

در مدل‌های دینامیکی این مطالعه زلزله‌ای با فرکانس ۵ هرتز به مدت یک ثانیه و به بزرگی ۰/۵g به مدل‌ها اعمال شده است که در محدوده فرکانس و بزرگی زلزله‌های ثبت‌شده در شهرستان بافق می‌باشد. شکل ۸ موج ورودی در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. طبق رابطه (۴)، حداکثر مقدار تنش برشی اعمالی ۱/۲ مگاپاسکال است. از طرفی با توجه به میرایی مرز ویسکوز در کف مدل، بزرگی موج ورودی ۰/۶ مگاپاسکال است.

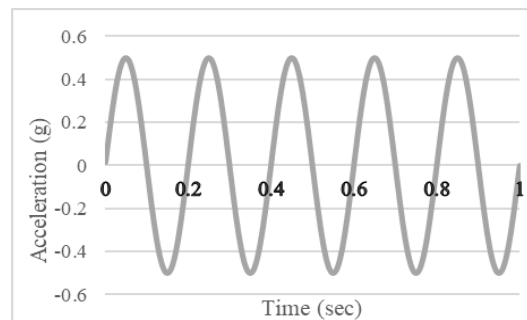
در نقاط A و B، کاهش می‌یابد. دلیل کاهش مقدار شتاب لرزه‌ای در ترازهای بالاتر، توپوگرافی پیت می‌باشد. به این صورت که پدیده پراکندگی موج در توپوگرافی‌های دره‌ای شکل در ارتفاع‌های بالاتر تشدید شده و در نتیجه موجب کاهش شتاب می‌گردد. با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۱ می‌توان به این نتیجه مهم پی برد که هرچند شتاب لرزه‌ای نقاط B در ترازهای مختلف کمتر از نقاط A هستند ولی مقدار جابه‌جایی نقاط B اندکی بیشتر است. دلیل این مسئله وجود فشار محصورکنندگی کم‌تر در نقاط B نسبت به نقاط A است. این در حالی است که در پیت اثر فشار محصورکنندگی بیشتر از شتاب لرزه‌ای، مقدار جابه‌جایی را کنترل می‌کند. با این توضیح که در توپوگرافی پیت به خاطر اثر پراکندگی موج، نقاطی که شیب تندتری دارند، پدیده پراش موج تشدید می‌شود و شتاب در این نقاط کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۱۲ روند تغییرات شتاب لرزه‌ای برحسب شعاع انحنا در جهت‌های X و Y و برآیند آن‌ها (شتاب سطحی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش شعاع انحنا، شتاب سطحی نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۹- مقایسه جابه‌جایی در نقطه ارتفاعی A و B مربوط به مدل پیت



شکل ۱۰- جابه‌جایی از نقطه A تا B (روی تاج یک پله با ارتفاع یکسان) مربوط به مدل پیت.



شکل ۸- موج زلزله اعمالی با بیشینه شتاب ۰٫۵g و فرکانس ۵ هرتز به مدت یک ثانیه

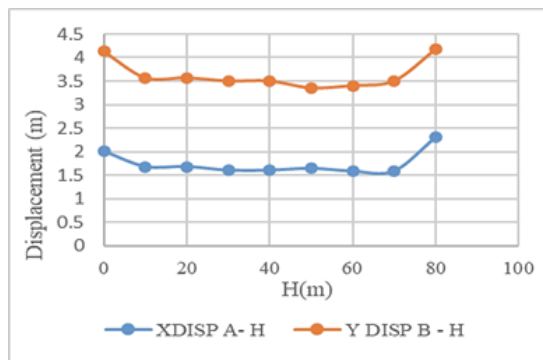
۴-۱- نتایج تحلیل دینامیکی پیت بیضوی

در مدل‌سازی‌های دینامیکی همانند حالت استاتیکی، جابه‌جایی‌ها در جهات X و Y برای مقاطع با ارتفاع‌های مختلف در نقاط A و B و در مقطع میانی با ارتفاع ۴۰ متر از نقطه A تا B ثبت شده‌اند. مقایسه جابه‌جایی در نقاط A و B در شکل ۹ نشان می‌دهد که هرچند مقدار جابه‌جایی‌ها کوچک هستند (کمتر از ۱۰ cm) ولی جابه‌جایی در جهت Y نقاط B از جابه‌جایی در جهت X نقاط A بیشتر است. علت جابه‌جایی بیشتر در نقاط B را می‌توان شیب بیشتر در راستای Y (۵۴/۵ درجه) نسبت به شیب نقاط A در راستای X (۳۵ درجه) دانست. همچنین در جابه‌جایی‌ها رفتاری سینوسی با فرکانس کم مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد رابطه‌ای بین فرکانس موج، ارتفاع و شعاع انحنا می‌باشد.

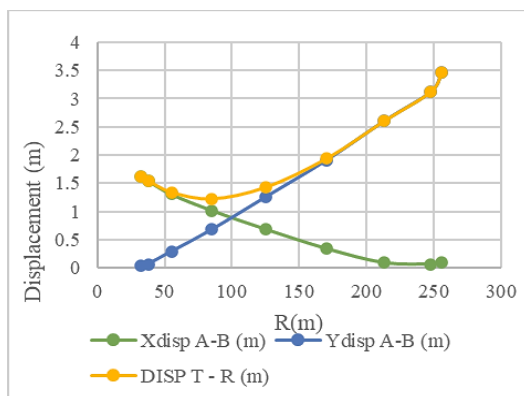
شکل ۱۰ جابه‌جایی از نقطه A تا B (روی تاج یک پله با ارتفاع یکسان ۴۰ متر) در جهت‌های X و Y و همچنین برآیند آن‌ها (جابه‌جایی سطحی) را نمایش می‌دهد. با توجه به منحنی‌های شکل مورد نظر با افزایش شعاع انحنا، برآیند جابه‌جایی‌ها در حال افزایش است. با توجه به این که نقطه A دارای شعاع انحنا کمتری است در این نقطه فشار محصورکنندگی بیشتری وجود دارد. لذا میزان جابه‌جایی سطحی در این نقطه کمتر از سایر نقاط است. هر چه قدر شعاع انحنا بیشتر شود، از مقدار فشار محصورکنندگی کاسته شده و بر میزان جابه‌جایی افزوده می‌شود. همچنین روند سینوسی جابه‌جایی به این معناست که در نقاط با شعاع انحنا بیشتر، روند جابه‌جایی صعودی می‌شود و بالعکس.

در شکل ۱۱ نیز منحنی‌های مربوط به روند تغییرات شتاب لرزه‌ای در جهت‌های X و Y که به ترتیب مربوط به نقاط A و B (با ترازهای مختلف) است، نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، شتاب لرزه‌ای

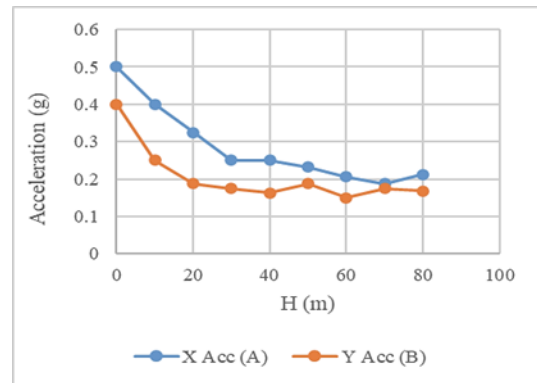
سطحی) را نمایش می‌دهد. با توجه به این نمودار با افزایش شعاع انحناء، برآیند جابه‌جایی‌ها نیز در حال افزایش است. شکل ۱۵ کانتور شتاب لرزه‌ای در مدل پیت معکوس را نشان می‌دهد و شکل ۱۶ نیز منحنی‌های مربوط به روند تغییرات شتاب لرزه‌ای در جهت‌های X و Y را به ترتیب برای نقاط A و B، ارائه می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، شتاب کلی به تدریج از A تا B به‌مرور افزایش یافته و شتاب در جهت Y تقریباً ثابت و ۲ برابر شتاب در جهت X است. شکل ۱۷ روند تغییرات شتاب لرزه‌ای برحسب شعاع انحناء در جهت‌های X و Y با تراز یکسان و برآیند آن‌ها (شتاب سطحی) را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شعاع انحناء شتاب در جهت Y افزایش یافته است. علت این مسئله شیب بیشتر پیت معکوس در جهت Y (۴۸/۳ درجه) در مقایسه با جهت X (۲۹/۳ درجه) و طول تکیه‌گاهی کمتر ۱۹۲ متری در جهت Y در مقابل ۳۸۴ متر در جهت X می‌باشد که باعث تشدید لرزش در این جهت شده است.



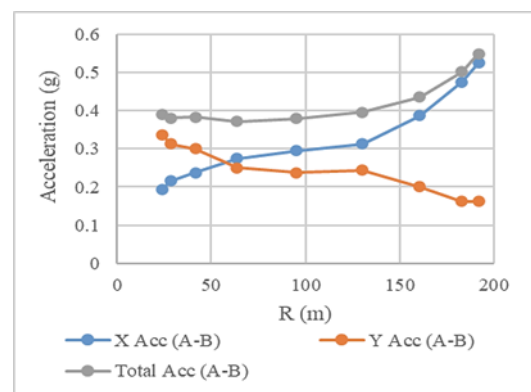
شکل ۱۳- مقایسه جابه‌جایی در نقطه A و B مربوط به مدل پیت معکوس بیضی‌شکل



شکل ۱۴- جابه‌جایی از نقطه A تا B (روی تاج یک پله با ارتفاع یکسان) مربوط به مدل پیت معکوس



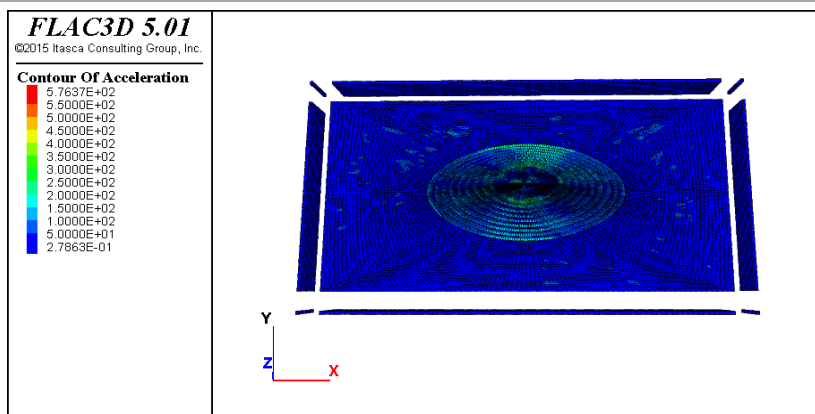
شکل ۱۱- روند تغییرات شتاب لرزه‌ای در نقاط A و B (با ترازهای مختلف) مربوط به پیت



شکل ۱۲- روند تغییرات شتاب لرزه‌ای برحسب شعاع انحناء در جهت‌های X و Y و برآیند آن‌ها (شتاب سطحی) مربوط به پیت

۲-۴- نتایج تحلیل دینامیکی پیت معکوس بیضوی

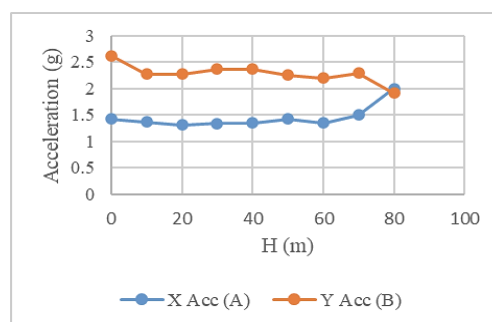
پس از مدل‌سازی پیت بیضوی به‌منظور بررسی اثر تمرکز موج، پیت معکوس نیز تحت بار دینامیکی مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل ۱۳ جابه‌جایی نقاط A و B را برحسب ارتفاع در پیت معکوس نشان می‌دهد. باوجود این‌که در مدل پیت معکوس با افزایش ارتفاع، شعاع کاهش می‌یابد، ولی روند جابه‌جایی‌های سطحی برای نقاط A و B برحسب ارتفاع به‌طور کلی ثابت است. باوجودی که در مدل پیت معکوس منحنی جابه‌جایی در نقاط مربوط به A و B روند مشابهی دارند ولی مقادیر آن‌ها متفاوت و قابل‌توجه است. این اختلاف نشان می‌دهد که در این نوع توپوگرافی جابه‌جایی برای شعاع انحناءهای بزرگ‌تر بیشتر خواهد بود. شکل ۱۴ روند جابه‌جایی بر روی پله میانی با شعاع انحناءهای مختلف از نقطه A تا B (روی تاج یک پله با ارتفاع یکسان ۴۰ متر) در جهت‌های X و Y و همچنین برآیند آن‌ها (جابه‌جایی



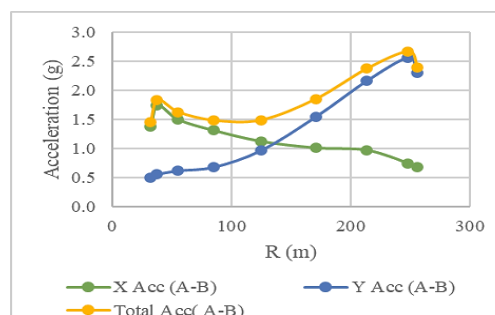
شکل ۱۵- کانتور شتاب لرزه‌ای مدل پیت معکوس بیضی شکل

انحنا)، B (دارای بیشترین شعاع انحنا) و برآیند دو جهت را برای ارتفاع‌های مختلف مدل‌های پیت و پیت معکوس نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر فاکتور (AF) در پیت‌ها کمتر از یک بوده و برای پیت معکوس بین ۲/۸ تا ۵/۳ می‌باشد که تغییرات محدودتری در پیت نسبت به پیت معکوس مشاهده شده است. این مسئله نشان از تضعیف و محدود کردن شدت تأثیر موج در پیت‌ها می‌باشد. برای نقاط A (شعاع انحنا کمتر) و نقاط B (شعاع انحنا بزرگ‌تر) فاکتور AF تقریباً ثابت به دست آمده و در ارتفاعات مختلف تغییرات قابل توجهی ندارد. درحالی‌که پیت معکوس برای انحناهای مختلف در نقاط A (شعاع انحنا کمتر) و نقاط B (شعاع انحنا بزرگ‌تر) دارای برآیند فاکتور تقویت شتاب در محدوده ۵ تا ۶ می‌باشند. دلیل اصلی اختلاف قابل ملاحظه AF در این دو مدل، تفاوت توپوگرافی این دو ساختار می‌باشد. توپوگرافی پیت معکوس باعث پدیده تمرکز امواج لرزه‌ای به سمت داخل ساختار و حرکت تا بالای ساختار توپوگرافی پیت باعث تفکیک و پخش موج به سمت بیرون و کاهش انرژی موج شده است. همچنین علت اصلی اختلاف بین ضرایب تشدید در نقاط A و B را می‌توان طول تکیه‌گاهی بیشتر در جهت X نسبت به جهت Y دانست (شکل ۱۹-الف)

شکل ۲۰ تغییرات فاکتور تقویت شتاب (AF) از نقطه A تا B در یک ارتفاع مربوط به دو مدل را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات فاکتور تقویت شتاب در مدل پیت معکوس در جهات X و Y در یک ارتفاع ثابت، یکسان و برآیند آن‌ها در محدوده ۴/۵ تا ۶ می‌باشد. نتایج مربوط به پیت، تغییرات محدود فاکتور تقویت را در جهت X نسبت به جهت Y نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند به دلیل وجود



شکل ۱۶- منحنی شتاب در جهت X و Y به ترتیب در نقاط A و B در ترازهای مختلف پیت معکوس



شکل ۱۷- روند تغییرات شتاب لرزه‌ای برحسب شعاع انحنا در جهت‌های X و Y و برآیند آن‌ها (شتاب سطحی) مربوط به پیت معکوس

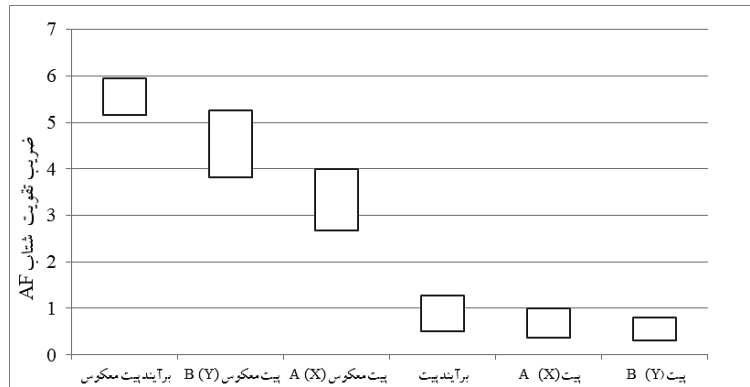
۳-۴- مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی پیت و پیت معکوس

همان‌طور که گفته شد فاکتور تقویت شتاب (AF)، نسبت شتاب بیشینه زمین (PGA) روی شیروانی به شتاب بیشینه ورودی، یکی از فاکتورهای اصلی مورد استفاده در بررسی پاسخ لرزه‌ای است، که تأثیر عوامل محیطی از جمله توپوگرافی را به خوبی نشان می‌دهد. شکل ۱۸ تغییرات فاکتور تقویت شتاب (AF) نقاط A (دارای کمترین شعاع

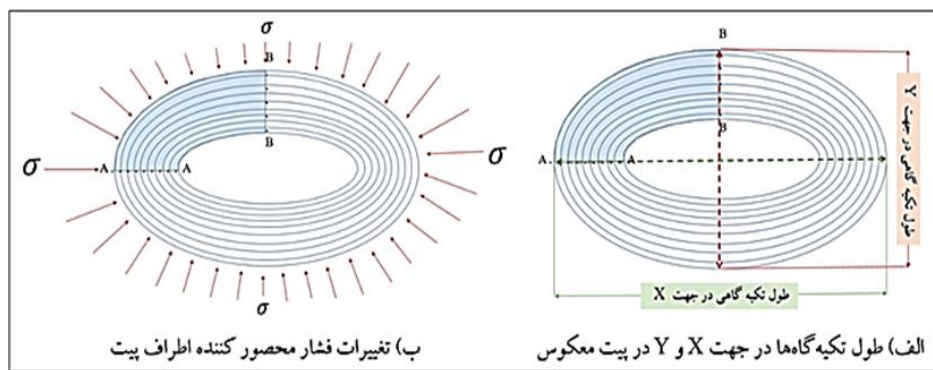
که در آن R شعاع انحنا برحسب متر و C_1, C_2, C_3 و C_4 ثابت‌های رابطه هستند که برحسب نوع شیروانی در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که این رابطه تنها برای فرکانس ۵ هرتز زلزله به‌عنوان فرکانس قالب منطقه صادق است.

فشار محصورکننده بیشتر در جهت X باشد (شکل ۱۹-ب). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده رابطه (۵) فاکتور تقویت شتاب افقی (AF) را برحسب شعاع‌های انحنای مختلف ارائه می‌دهد.

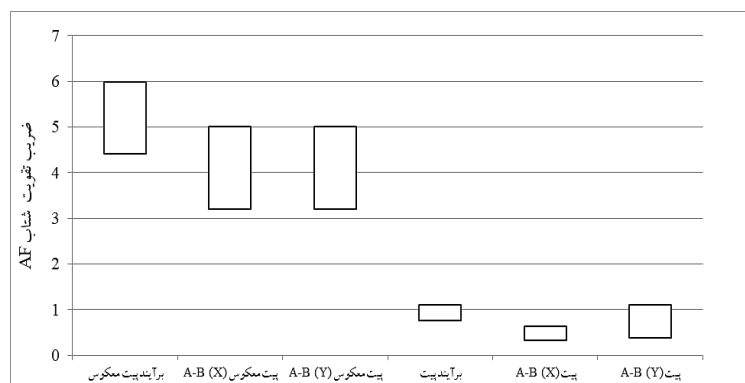
$$AF = C_1 R^3 + C_2 R^2 + C_3 R + C_4 \quad (5)$$



شکل ۱۸- فاکتور تقویت شتاب از نقطه A و B در ترازهای مختلف



شکل ۱۹- تصاویر شماتیک عوامل تأثیرگذار بر فاکتورهای تشدید شتاب در الف) پیت معکوس و ب) پیت

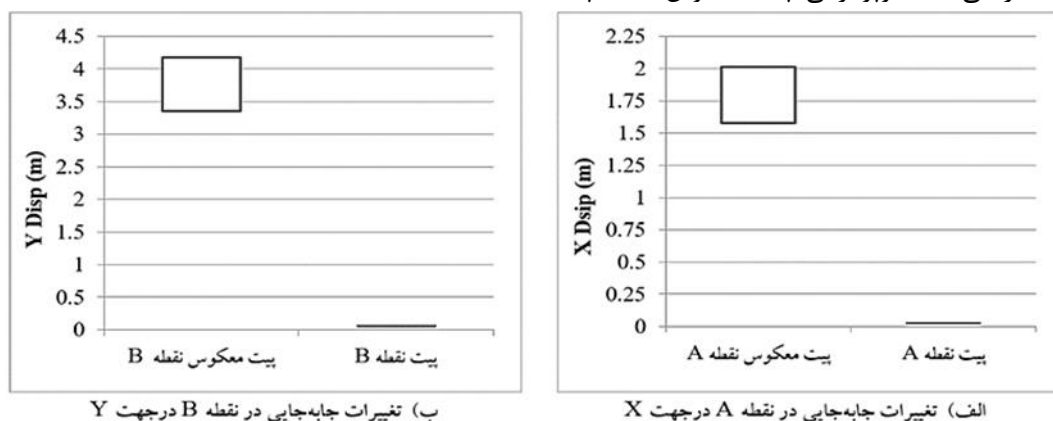


شکل ۲۰- تغییرات فاکتور تقویت شتاب از نقطه A تا B در تراز ثابت

جدول ۳- ثابت‌های رابطه (۵) بنابر نوع شیروانی

C_4	C_3	C_2	C_1	
۱/۰۷	۴/۵E-۳	۲/۵E-۵	۰	پیت
۵/۴۳	۴/۸E-۲	۲/۵E-۴	۷/۵E-۷	پیت معکوس

تمرکز امواج لرزه‌ای به سمت داخل ساختار و حرکت در طول آن تا بالای پیت معکوس شده است. درحالی‌که توپوگرافی پیت باعث تفکیک و پخش موج به سمت بیرون و کاهش انرژی موج شده است. همچنین علت اصلی اختلاف بین ضرایب تشدید در نقاط A و B را می‌توان طول تکیه‌گاهی بیشتر در جهت X نسبت به جهت Y دانست.



شکل ۲۱- مقایسه تغییرات جابه‌جایی‌ها در مدل پیت و پیت معکوس تحت بار لرزه‌ای در جهات الف) X و ب) Y

به‌طور کلی اعمال بار لرزه‌ای موجب افزایش مقدار جابه‌جایی در مدل‌های دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی شده است. اگرچه در مدل‌های مربوط به پیت، جابه‌جایی نسبت به حالت استاتیکی فقط در حد چند سانتی‌متر افزایش یافته است، مقدار جابه‌جایی در مدل‌های مربوط به پیت معکوس به‌طور قابل‌توجهی نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است. دلیل این موضوع به توپوگرافی مدل‌ها برمی‌گردد به این ترتیب که توپوگرافی پیت معکوس باعث تمرکز موج و پیت باعث پراش موج می‌شود.

طبق نتایج تحلیل دینامیکی در مدل‌های پیت و پیت معکوس بیضوی در ترازهای یکسان با افزایش شعاع انحنا، جابه‌جایی و شتاب برآیند (سطحی) افزایش یافته که دلیل آن در پیت معکوس تکیه‌گاه کمتر و شیب بیشتر و در پیت، فشار محصورکنندگی کمتر در مناطق با شعاع انحنا بزرگ‌تر می‌باشد. به‌علاوه، در مدل پیت معکوس، با توجه به پدیده تمرکز موج در ناحیه‌ای که شیب تندتری دارد، شتاب‌های بزرگ‌تری تا حدود $2/6g$ ثبت می‌شود؛ اما در پیت به خاطر پدیده پراکندگی موج در ناحیه‌ای که شیب بیشتری دارند، شتاب‌های کمتری در محدوده $0/4g$ تا $0/55g$ ثبت می‌شود. بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی، در مدل پیت فشار محصورکننده تأثیر بیشتری در کنترل جابه‌جایی نسبت به

شکل ۲۱ جابه‌جایی‌ها در مدل پیت و پیت معکوس را تحت بار لرزه‌ای در جهات X و Y نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جابه‌جایی‌ها در مدل‌های پیت معکوس در حد چند متر و در مدل‌های مربوط به پیت، در حد چند سانتی‌متر است. دلیل اصلی این اختلاف‌های قابل‌ملاحظه در جابه‌جایی‌ها و شتاب‌ها، تفاوت توپوگرافی این دو ساختار می‌باشد. توپوگرافی پیت معکوس باعث پدیده

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات محدود انجام‌گرفته بر روی تأثیر انحنای توپوگرافی شیروانی‌ها بر پاسخ لرزه‌ای آن‌ها که اغلب به بررسی انحنای تاج شیروانی‌ها به‌صورت دوبعدی پرداخته‌اند و درباره اثرات ناشی از تغییرات شعاع انحنای دیواره شیروانی‌ها مطالعاتی صورت نگرفته است، در این تحقیق به بررسی سه‌بعدی لرزه‌ای رفتار دو سازه پیت و پیت معکوس بیضوی با نرم‌افزار عددی FLAC3D پرداخته شد. نتایج حاصل را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

طبق نتایج تحلیل استاتیکی، در مدل پیت بیضی‌شکل، با افزایش شعاع انحنا در ترازهای یکسان از ۲۵ تا ۲۵۰ متر، مقدار جابه‌جایی به دلیل کاهش فشار محصورکنندگی ۴۰ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که به دلیل عدم وجود فشار محصورکننده در پیت معکوس با تغییر شعاع انحنا مقدار جابه‌جایی تغییر چندانی نکرده است. از طرفی، اگرچه جابه‌جایی در شعاع انحنای کوچک‌تر در یک تراز کمتر است، به‌طور کلی برای جابه‌جایی‌های سطحی (برآیند جابه‌جایی‌ها) اختلاف چندانی در نقاط هم‌تراز وجود ندارد. ضمناً با افزایش عمق شعاع انحنا کاهش یافته ولی به دلیل تنش بیشتر مقدار جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

- earthquakes." *Geotechnical and Geological Engineering* 36, no. 2 (2018): 1249-1266.
- [11] Sepúlveda, Sergio A., William Murphy, Randall W. Jibson, and David N. Petley. "Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California." *Engineering geology* 80, no. 3-4 (2005): 336-348.
- [12] Gorum, Tolga, Cees J. van Westen, Oliver Korup, Mark van der Meijde, Xuanmei Fan, and Freek D. van der Meer. "Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake." *Geomorphology* 184 (2013): 127-138.
- [13] Tsai, Chi-Chin, and Chung-Han Lin. "Prediction of earthquake-induced slope displacements considering 2D topographic amplification and flexible sliding mass." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 113 (2018): 25-34.
- [14] Luo, Yonghong, and Yunsheng Wang. "Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan earthquake." *Journal of mountain science* 31, no. 2 (2013): 200-210.
- [15] Havenith, H-B., M. Vanini, D. Jongmans, and E. Faccioli. "Initiation of earthquake-induced slope failure: influence of topographical and other site specific amplification effects." *Journal of seismology* 7, no. 3 (2003): 397-412.
- [16] Meunier, Patrick, Niels Hovius, and John Allan Haines. "Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides." *Earth and Planetary Science Letters* 275, no. 3-4 (2008): 221-232.
- [17] Harp, Edwin L., and Randall W. Jibson. "Anomalous concentrations of seismically triggered rock falls in Pacoima Canyon: Are they caused by highly susceptible slopes or local amplification of seismic shaking?" *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, no. 8 (2002): 3180-3189.
- [18] Anggraeni, Dita. *Modelling the impact of topography on seismic amplification at regional scale*. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 2010.
- [19] Ashford, Scott A., and Nicholas Sitar. "Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff." *Bulletin of the seismological society of America* 87, no. 3 (1997): 692-700.
- [20] Chen, Hongjun, Wenhuan Zhan, Liqing Li, and Ming-ming Wen. "Occurrence of submarine canyons, sediment waves and mass movements along the northern continental slope of the South China Sea." *Journal of Earth System Science* 126, no. 5 (2017): 73.
- [21] Lorig, L. "Designing for extreme events in open pit slope stability." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 116, no. 5 (2016): 387-398.
- [22] Allen, Trevor I., and David J. Wald. "On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS 30)." *Bulletin of the Seismological Society of America* 99, no. 2A (2009): 935-943.
- [23] Tripe, R., S. Kontoe, and T. K. C. Wong. "Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 50 (2013): 72-84.
- شتاب دارد. به‌طوری‌که باوجود شتاب کمتر در نقاط B با شعاع انحنای کمتر، مقدار جابه‌جایی بیشتری در این نقاط ثبت شده است که دلیل اصلی آن فشار محصورکنندگی کمتر در آن ناحیه است. در ارتباط با فاکتور تقویت شتاب (AF)، مقایسه منحنی‌ها و کانتورهای شتاب در مدل‌های پیت و پیت معکوس، مقدار این فاکتور تابعی از شعاع انحنای و مدل‌های پیت معکوس بین ۴/۵ و ۶ و برای پیت بین ۰/۳ و ۱/۲ را نشان می‌دهد.
- ### مراجع
- [1] Azhari, A., and U. Ozbay. "Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 100 (2017): 218-228.
- [2] Kastens, Kim A. "Earthquakes as a triggering mechanism for debris flows and turbidites on the Calabrian Ridge." *Marine Geology* 55, no. 1-2 (1984): 13-33.
- [3] Dai, F. C., C. Xu, Xin Yao, L. Xu, X. B. Tu, and Q. M. Gong. "Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China." *Journal of Asian Earth Sciences* 40, no. 4 (2011): 883-895.
- [4] Zebarjadi Dana, H., R. Khaloo Kakaie, R. Rafiee, and A. R. Yarahmadi Bafghi. "Effects of geometrical and geomechanical properties on slope stability of open-pit mines using 2D and 3D finite difference methods." *Journal of mining and Environment* 9, no. 4 (2018): 941-957.
- [5] Moore, Jeffrey R., Valentin Gischig, Jan Burjanek, Simon Loew, and Donat Fäh. "Site effects in unstable rock slopes: dynamic behavior of the Randa instability (Switzerland)." *Bulletin of the Seismological Society of America* 101, no. 6 (2011): 3110-3116.
- [6] Bourdeau, Céline, and H-B. Havenith. "Site effects modelling applied to the slope affected by the Suusamyр earthquake (Kyrgyzstan, 1992)." *Engineering Geology* 97, no. 3-4 (2008): 126-145.
- [7] Moore, Jeffrey R., Valentin Gischig, F. Amann, M. Hunziker, and J. Burjanek. "Earthquake-triggered rock slope failures: Damage and site effects." In *Proceedings 11th International & 2nd North American Symposium on Landslides*, vol. 1, pp. 869-875. Banff, Canada: CRC Press, 2012.
- [8] Havenith, Hans-Balder, Denis Jongmans, Ezio Faccioli, Kanatbek Abdrakhmatov, and Pierre-Yves Bard. "Site effect analysis around the seismically induced Ananevo rockslide, Kyrgyzstan." *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, no. 8 (2002): 3190-3209.
- [9] Pelekis, Panagiotis, Anastasios Batilas, Eleni Pefani, Vasileios Vlachakis, and George Athanasopoulos. "Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6. 4 earthquake." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 100 (2017): 538-554.
- [10] Azhari, A., and U. Ozbay. "Role of geometry and stiffness contrast on stability of open pit mines struck by

topography and seismic input motion." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 113 (2018): 420-431.

[27] Azhari, A., Yarahmadi B., A. و Faramarzi, L., Dynamic Analysis of Tectonic Blocks 1 and 2 of Choghart Open-Pit Mines under earthquake: A Case Study, 9th International Congress on Civil Engineering, May 8-10, (2012), Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

[28] Itasca Consulting Group Inc. *FLAC3D Fast LAGRANGIAN Analysis of Continua in 3 Dimensions*", (2012); Version 5, User's Manual.

[24] Bouckovalas, George D., and Achilleas G. Papadimitriou. "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, no. 7-10 (2005): 547-558.

[25] Torgoev, Almaz, and Hans-Balder Havenith. "2D dynamic studies combined with the surface curvature analysis to predict Arias Intensity amplification." *Journal of Seismology* 20, no. 3 (2016): 711-731.

[26] Zhang, Zezhong, Jean-Alain Fleurisson, and Frederic Pellet. "The effects of slope topography on acceleration amplification and interaction between slope