

## بررسی اثرات توده‌سنگ درزه‌دار بر تفرق امواج لرزه‌ای از ساختگاه‌های دره‌ای در تکیه‌گاه سدها

مهدی زبردست<sup>۱</sup> و فرناز دانشور وثوقی<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۱۵)

### چکیده

مطالعه لرزه‌ای دره‌ها به دلیل احداث سازه‌های مهم مانند سد روی آنها همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. یکی از شرایط ساختگاهی مهمی که بر زمین‌لرزه عبوری از دره‌های سنگی اثر می‌گذارد وجود توده‌سنگ درزه‌دار در این نوع ساختگاه‌هاست. ما در این تحقیق به بررسی اثر این پدیده روی تفرق امواج لرزه‌ای خواهیم پرداخت. به منظور بررسی این مسئله از ترکیب دو روش المان محدود در حوضه نزدیک و المان مرزی در حوضه دور استفاده شده است و برای مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار، مدل الاستیک خطی همسان به کار رفته است. با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق، توده‌سنگ درزه‌دار در حالات خاص که بستگی به زاویه برخورد امواج، ضخامت لایه‌ها و مشخصات مصالح تشکیل دهنده آن دارد می‌تواند اثرات چشمگیری روی امواج زمین‌لرزه و در نتیجه روی سازه‌های ساخته شده روی دره‌ها داشته باشد و بایستی در طراحی این سازه‌ها اثرات آن مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: توده‌سنگ درزه‌دار، تفرق امواج لرزه‌ای، ساختگاه سنگی هموزن، روش‌های المان محدود و المان مرزی

۱. شرکت آب و فاضلاب روستایی استان اردبیل

۲. گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fdaneshvar.vousoughi@gmail.Com

## مقدمه

زمین لرزه و اثر ویران کننده آن روی سدها، از مسائل مهم احداث این تاسیسات آبی و بهره‌برداری از آنها به‌شمار می‌رود. سال‌هاست که اهمیت اثرات ساختگاهی روی حرکات لرزه‌ای زمین کاملاً شناخته شده است. تغییراتی که در امواج زمین لرزه پس از عبور از ساختگاه به‌وجود می‌آید از مسائلی است که اهمیت ویژه‌ای در بحث تحلیل و طراحی سازه‌های در دست مطالعه و نیز مقاوم‌سازی سدهای موجود در مقابل زمین لرزه دارد. این مسئله هم می‌تواند توسط تحلیل رکوردهای لرزه‌ای واقعی بررسی شود، همچنین می‌توان توسط لرزه نگاشت‌های مصنوعی به بررسی این مسئله پرداخت. دانش ما در مورد اثرات ساختگاه با گذشت زمان به دلیل پیشرفت‌های موازی در هر دو شاخه افزایش یافته است. در یک‌سو، رکوردهای لرزه‌ای تصویری از واقعیت را به ما می‌دهد که گمانه‌زنی‌های تئوریک و تجربی را ممکن می‌سازد. در سوی دیگر با ساده‌سازی واقعیت و ارائه کردن آن توسط مدل‌ها می‌توانیم مسائل مختلفی را که باعث یک اثر واحد می‌شوند از هم جدا کنیم.

ساختگاه‌های سنگی عموماً درزه‌دار هستند. فاصله درزه‌ها، جهت قرارگیری درزه‌ها و... از عواملی هستند که می‌توانند بر مشخصات حرکات لرزه‌ای تأثیر بگذارند. بنابراین لازم است تا برآورد صحیحی از اثر این عامل روی امواج عبوری زمین لرزه در این نوع ساختگاه‌ها صورت گیرد که به یک طرح بهینه و در عین حال ایمن برسیم. مطالعات زیادی در خصوص پدیده اثر توپوگرافی توسط پژوهشگران مختلف انجام گرفته است و مسئله به روش‌های مشاهده‌ای، تحلیلی و عددی بررسی شده است (۱-۱۲). این مشاهدات نشان می‌دهند که پدیده تشدید توپوگرافی در تحریک زمین نقش مهمی ایفا می‌کند به‌طوری که گسیختگی‌های سنگی در ترازهای بالاتر از دیواره دره و تمرکز خرابی‌های به‌وجود آمده در مناطق مرتفع در خیلی از زمین لرزه‌ها مؤید این مطلب است. علاوه بر مشاهده‌های انجام شده در سایت، پژوهشگران زیادی مسئله اثر توپوگرافی روی امواج زمین لرزه را به روش‌های مختلف عددی و تحلیلی حل کرده‌اند.

اولین مطالعات تئوریک راجع به موضوع تأثیر انتشار امواج در هنگام حرکات شدید زمین در حوالی سال ۱۹۶۰ آغاز شد و اصولاً به مسئله انعکاس و پراکندگی امواج در سطح زمین مربوط می‌شد (۱۳). تعدادی از مهم‌ترین کارهای انجام شده در این زمینه شامل: (۱۳-۲۲). علاوه بر مطالعات فوق مطالعات دیگر در ارتباط با اثر پدیده تشدید توپوگرافی و تفرق امواج روی پاسخ سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای انجام شده است شامل: (۲۳-۲۵).

بر اساس مطالعاتی که تاکنون به بیان آنها پرداختیم می‌توان به جمع‌بندی زیر رسید:

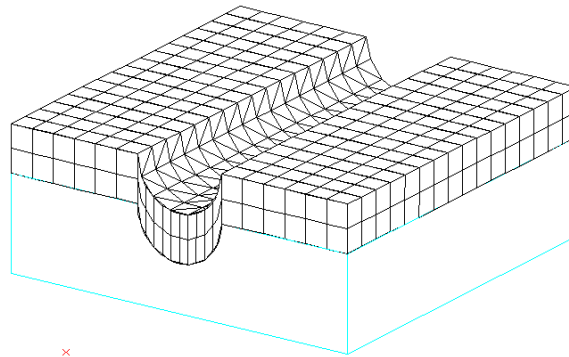
- نتایج حاصل از مدل‌های عددی و مشاهده‌های صورت گرفته در طبیعت در بعضی موارد تطابق خوبی داشته ولی در بیشتر موارد این تطابق خوب نبوده است.

- یکی از علت‌های عدم تطابق ضرایب تشدید توپوگرافی را می‌توان ساده‌سازی‌های مدل‌های عددی به لحاظ هندسه و شکل توپوگرافی موجود مخصوصاً در مدل‌های دوبعدی نام برد. بر همین اساس بیشتر تحقیقات انجام گرفته به ضرورت استفاده از مدل‌های سه‌بعدی به‌منظور در نظر گرفتن پیچیدگی‌های توپوگرافی تأکید کرده‌اند.

- از سوی دیگر مدل‌های عددی با توجه به اینکه مؤلفه‌های مختلف امواج زلزله به‌صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌دهند، در صورتی که در واقع چیزی که در طبیعت اتفاق می‌افتد اثر همزمان مؤلفه‌های مختلف امواج زلزله است. لذا این اثر نیز می‌تواند به‌عنوان عامل دیگر عدم انطباق بین نتایج مربوط به مدل‌های عددی و مشاهده‌های طبیعی معرفی شود.

- در نظر گرفتن اثرات تشدید ساختگاهی یکی از ضروریات در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای است. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که در نظر گرفتن این اثرات پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل‌ها را به‌طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در این تحقیق ابتدا مدل مناسب برای تحلیل رفتار لرزه‌ای ساختگاه‌های دره‌ای که مصالح تشکیل‌دهنده آنها توده‌سنگ



شکل ۱. نمایی از مدل ارائه شده: قسمت پایین هندسه شامل خطوط کم رنگ مدل شده توسط المان مرزی و قسمت بالای هندسه شامل خطوط پر رنگ مدل شده توسط المان محدود

### تحلیل‌های عددی

به منظور انجام تحلیل‌های مورد نیاز برای بررسی مسئله مورد نظر کد نرم‌افزاری به زبان فرترن نوشته شده است. قسمت المان مرزی این کد TDASC نام دارد که توسط دکتر تارین‌نژاد (۲۶) به زبان فرترن نوشته شده است. در این پژوهش بخش المان محدود به این کد اضافه شده است که توانایی حل مسائل الاستودینامیک در حالت سه‌بعدی را با بهره‌گیری از مزیت‌های هر دو روش دارا است. توده‌سنگ درزه‌دار در قسمت المان محدود مدل شده و برای شبیه‌سازی رفتار توده‌سنگ درزه‌دار از مدل الاستیک خطی همسان استفاده شده است. در این قسمت به بررسی صحت‌سنجی کد کامپیوتری و همچنین بررسی مسائل خاص به کمک این کد خواهیم پرداخت.

مدل به کار رفته برای تحلیل در بخش المان مرزی شامل ۱۸۰ المان سه‌بعدی از نوع ۹ گرهی و در بخش المان محدود شامل ۱۴۴۰ المان هشت گرهی آجری است. کل گره‌های مدل ۲۸۵۶ گره است. طول دره در مدل پنج برابر شعاع دره و طول میدان آزاد  $1/5$  برابر شعاع دره در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) نمایی از مدل به کار رفته نشان داده شده است. لازم به ذکر است در قسمت صحت‌سنجی، بخش المان محدود مسئله به صورت لایه‌دار در نظر گرفته نشده و در قسمت ۳-۵ لایه اعمال شده و مقایسه صورت گرفته است.

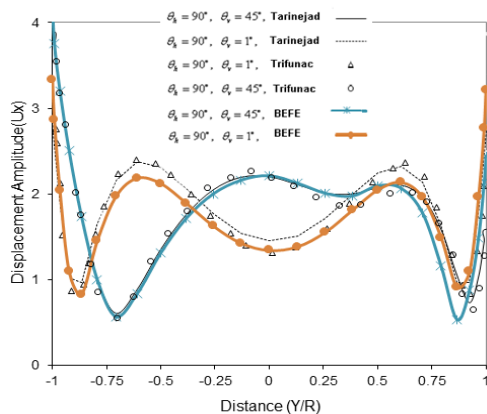
درزه‌دار است ارائه می‌شود، سپس کد مناسبی که بتواند به طور واقع‌بینانه رفتار لرزه‌ای چنین ساختگاه‌هایی را شبیه‌سازی کند از ترکیب دو روش المان محدود در حوضه نزدیک و المان مرزی توسعه خواهیم داد.

### مواد و روش‌ها

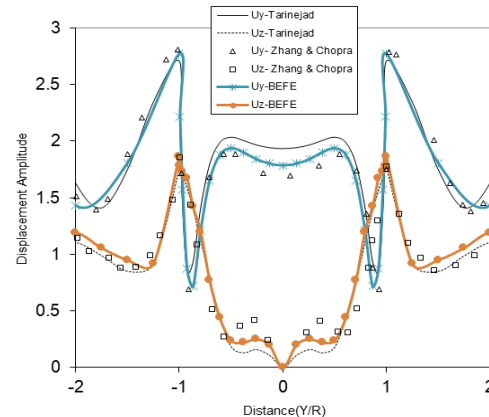
#### روش المان محدود

در طرف دیگر، در تکنیک‌های المان محدود ناحیه به المان‌های دوبعدی و سه‌بعدی تقسیم می‌شود که لازم نیست اندازه یکسان یا شکل یکسان داشته باشند. میدان جابه‌جایی در هر جایی داخل ناحیه به نقاط معینی که گره نامیده می‌شوند به وسیله توابع شکل وابسته است. مقادیر گرهی سپس توسط یک سیستم مجزا از معادلات به دست می‌آید که از انتگرال‌گیری مناسب از معادلات میدان نتیجه می‌شوند. تکنیک المان محدود انعطاف پذیری، مش‌بندی بالایی دارد و می‌تواند رفتار غیرخطی خاک‌ها را نیز وارد مسئله کند.

این روش‌ها (تفاضل محدود و المان محدود) ذاتاً خواستار محاسبات بیشتری نسبت به دیگر روش‌های ناحیه‌ای هستند اما کاملاً کلی و دقیق هستند و وجود حافظه‌های بزرگ کامپیوتری و سیستم محاسبات موازی کار با آنها را ممکن می‌سازد که دلیل محبوبیت فعلی آنهاست.



شکل ۳. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط تریفوناک و تارینژاد.



شکل ۲. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط ژانگ و چوپرا و تارینژاد.

است که در حالت اول زاویه افقی ۹۰° و زاویه قائم یک درجه است و در حالت دوم زاویه افقی ۹۰° و زاویه قائم ۴۵ درجه و بسامد بی بعد واحد است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است نتایج به دست آمده از تحلیل انطباق خوبی با نتایج دقیق مربوط به مدل دوبعدی تریفوناک و نتایج مدل سه بعدی تارینژاد دارد.

با توجه به مقایسه هایی که انجام شد می توان نتیجه گرفت که جواب های به دست آمده از کد ارائه شده از دقت قابل قبولی حتی به ازای طول محدود دره (پنج برابر شعاع دره) برخوردار است. بنابراین کد مربوطه را می توان با اطمینان برای حل مسائل واقعی به کار برد.

## نتایج و بحث

### تحلیل حساسیت روی زوایای مختلف برخورد موج در حالت هموزن

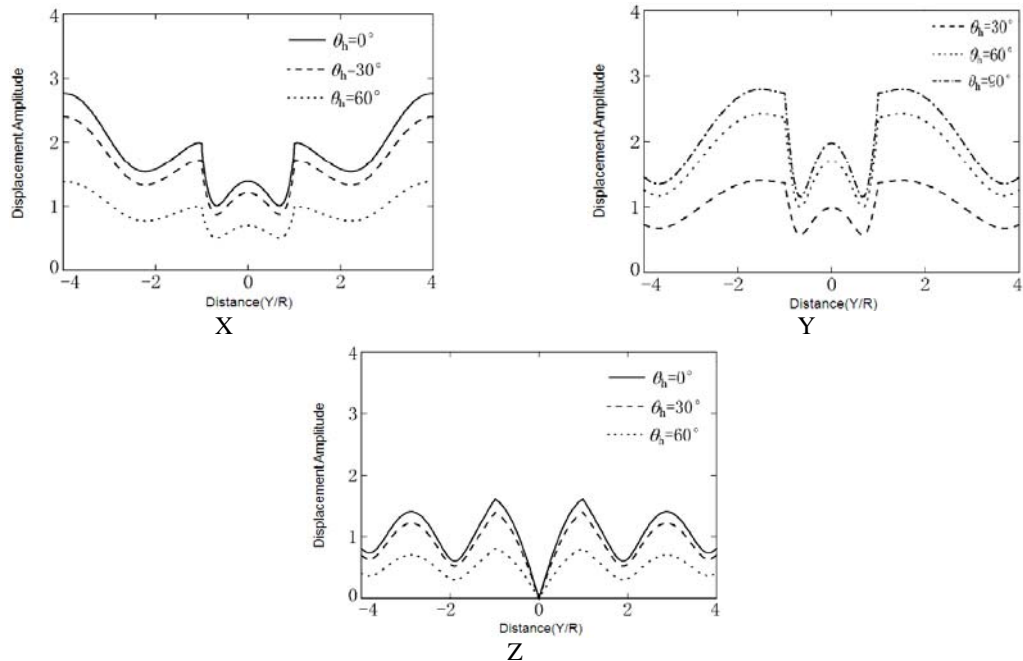
در این قسمت به بررسی جابه جایی های ایجاد شده در یک دره نیم دایره ای هموزن تحت اثر موج ورودی SH با زوایای برخورد افقی و قائم مختلف می پردازیم. در این مدل نیز میرایی ۰/۰۱ و نسبت پواسون ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است و تحلیل ها تحت دو بسامد بی بعد ۰/۵ و ۱ انجام شده است.

با توجه به نمودارهای شکل های (۴) و (۵)، با افزایش زاویه

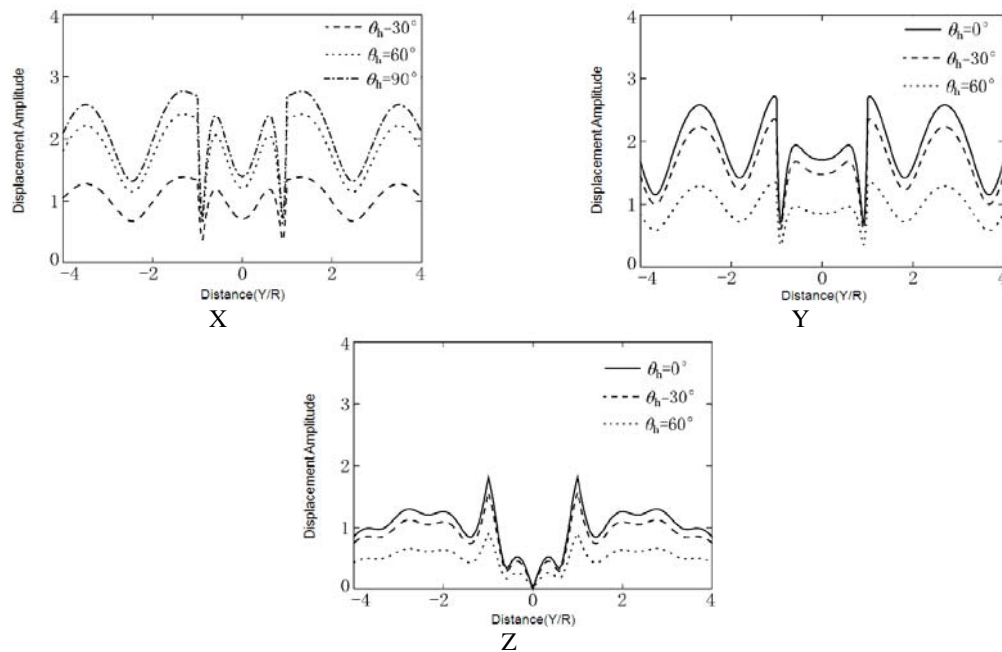
برای بررسی صحت کد کامپیوتری به کار رفته در تحقیق از نتایج به دست آمده توسط محققین مهم در این زمینه استفاده می کنیم که عبارتند از:

۱- تحقیق انجام شده توسط ژانگ و چوپرا در زمینه تحلیل سه بعدی تغییرات مکانی جابه جایی در سطح دره با مقطع نیم دایره ای منشوری تحت اثر موج ورودی SV با زاویه افقی ۹۰ درجه و زاویه قائم صفر درجه و بسامد بی بعد واحد در نظر گرفته شده است ( $\Omega = \frac{\omega L}{\pi c_s}$ ). در شکل (۲) مقایسه بین نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج تحلیل های پوچرا انجام شده است. روش استفاده شده توسط چوپرا، روش المان مرزی دوبعدی بود که با انتگرال گیری تحلیلی در بعد سوم برای دره به طول بی نهایت به حالت سه بعدی تعمیم یافته است این در حالی است که در روش به کار رفته توسط دکتر تارینژاد، المان مرزی سه بعدی استفاده شده است. اختلاف اندک بین نتایج را می توان به اختلاف در روش به کار رفته و استفاده از المان های دوبعدی توسط چوپرا و سه بعدی توسط تارینژاد و در تحقیق حاضر نسبت داد.

۲- تحقیق انجام شده توسط تریفوناک روی دره نیم دایره ای دوبعدی که مربوط به حل دقیق و تحلیلی مسئله است. موج ورودی از نوع SH و به ازای زوایای برخورد در دو حالت



شکل ۴. مقادیر تغییر مکان در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  برای زوایای افقی  $\theta_h = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  و زاویه قائم  $\theta_v = 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد ۰/۵



شکل ۵. مقادیر تغییر مکان در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  برای زوایای افقی  $\theta_h = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  و زاویه قائم  $\theta_v = 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد ۱

روند این تغییرات با بزرگ‌تر شدن زاویه در جهت  $y$  تندتر و در جهت  $x$  کندتر می‌شود. الگوی کلی تغییرات تغییر مکان‌ها نیز

افقی برخورد موج با دره از صفر تا  $90^\circ$  درجه، بزرگی تغییر مکان‌ها در جهت  $y$  کاهش و در جهت  $x$  افزایش پیدا می‌کند.

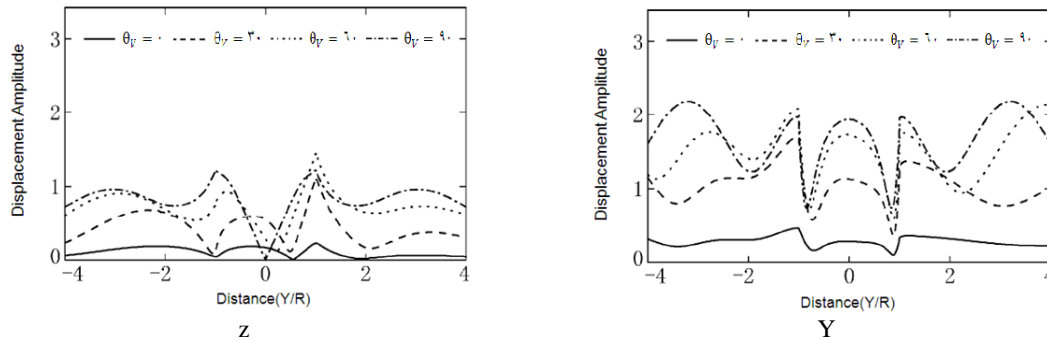
حالت پیچیده‌تری به خود می‌گیرند و این پیچیدگی در جهت‌های  $x$  و  $y$  بیشتر از جهت  $z$  است.

#### تحلیل حساسیت روی مشخصات مصالح لایه‌ها

حال به بررسی دره نیم‌دایره‌ای دارای دو لایه توده‌سنگ درزه‌دار در قسمت فوقانی آن می‌پردازیم. برای شبیه‌سازی لایه‌های توده‌سنگ درزه‌دار در این قسمت از دو ردیف المان سه‌بعدی هشت گرهی آجری در المان محدود استفاده شده است. نسبت ضخامت این دو لایه به شعاع دره  $0/5$  در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه برای شبیه‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار از مدل الاستیک خطی همسان استفاده شده است تنها به تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون لایه‌ها نیاز داریم که با استفاده از ضریبی از مقادیر پارامترهای سنگ بکر محاسبه می‌شود. نسبت چگالی سنگ بستر به توده‌سنگ برابر یک، نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار  $1/5$  و  $3$ ، نسبت پواسون برای هر دو  $0/33$  و نیز میرایی سنگ بستر و توده‌سنگ درزه‌دار به ترتیب  $0/02$  و  $0/04$  در نظر گرفته شده است. موج ورودی نوع  $SH$  با زاویه افقی  $45^\circ$  درجه و زوایای قائم  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه است. شکل‌های (۶ و ۷) این موج ورودی را برای بسامد بی‌بعد  $0/75$  و نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار  $1/5$  و  $3$  را نشان می‌دهد.

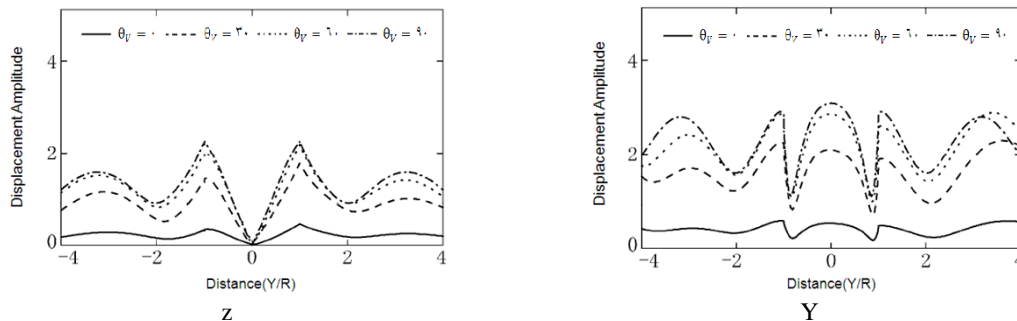
در نمودارهای شکل‌های (۶ و ۷)، می‌بینیم که با افزایش زاویه برخورد قائم موج، میزان تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد و همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها نیز عوض می‌شود. از مقایسه نمودارهای شکل‌های (۶ و ۷)، می‌توان گفت با افزایش نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار، بزرگی تغییر مکان‌ها در جهت  $y$  افزایش پیدا می‌کند و اندازه تغییر مکان ماکزیمم تقریباً  $1/5$  برابر می‌شود ولی روند تغییرات تغییر مکان‌ها و سرعت افزایش آن با افزایش زاویه برخورد قائم در دو حالت، مشابه است. البته در حالت اول پیچیدگی تغییر مکان‌ها در جهتی که موج به دره برخورد می‌کند بیشتر است. در جهت  $z$  نیز اندازه تغییر مکان ماکزیمم تقریباً  $1/5$  برابر می‌شود ولی در کل

در زوایای افقی مختلف مشابه است. برای جهت  $z$  مطابق نمودار شکل‌های (۴ و ۵)، با افزایش زاویه برخورد افقی موج، تغییر مکان‌ها کاهش می‌یابند ولی بزرگی تغییر مکان‌ها برای زوایای برخورد افقی مختلف نسبت به دو جهت  $x$  و  $y$  کمتر است. در نمودارهای شکل‌های (۴ و ۵)، حالت مشابه نمودارهای قبل با این تفاوت که بسامد بی‌بعد را واحد در نظر گرفته‌ایم بررسی شده است. با مقایسه نمودارهای شکل‌های (۴ و ۵)، می‌توان مشاهده کرد با افزایش بسامد موج، محل تغییر مکان ماکزیمم از انتهای بخش مدل شده در راستای  $y$  ( $y/R = -4$ ) تا ابتدای شروع دره ( $y/R = -1$ ) تغییر می‌کند. همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها حالت پیچیده‌تری به خود می‌گیرد ولی روند کاهش تغییر مکان‌ها با افزایش زاویه افقی مشابه حالت با بسامد  $0/5$  است. از مقایسه نمودارهای شکل‌های (۴ و ۵)، می‌توان گفت مقدار تغییر مکان ماکزیمم در دو حالت مشابه است ولی برای برای فواصل دورتر از دره در مدل، با افزایش بسامد، تغییر مکان‌ها افزایش بیشتری داشته‌اند و همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها پیچیده‌تر شده است. مقایسه نمودارهای شکل‌های (۴ و ۵)، برای جهت  $z$  نشانگر افزایش پیچیدگی الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها است. مقدار افزایش تغییر مکان‌ها در جهت  $z$  مانند دو جهت دیگر نیست و مشاهده می‌شود با افزایش بسامد، تغییر مکان‌ها در این جهت، به‌خصوص در فواصل دور از دره کاهش اندکی داشته‌اند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این بخش می‌توان گفت زاویه افقی برخورد موج تأثیر زیادی روی تغییرات تغییر مکان‌ها دارد. با افزایش زاویه افقی از صفر تا  $90^\circ$  درجه، اندازه تغییر مکان‌ها در جهات  $y$  و  $z$  کاهش و در جهت  $x$  افزایش می‌یابد. همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها برای زوایای مختلف متفاوت است. برای زاویه قائم  $\theta_v = 90^\circ$ ، این تغییر مکان‌ها نسبت به محور طولی دره حالت متقارن دارند ولی با توجه به بررسی‌هایی که با زاویه قائم  $\theta_v = 45^\circ$  نیز انجام شد، مشاهده شد که برای زاویه قائم  $\theta_v = 45^\circ$ ، این حالت تقارن وجود نخواهد داشت. با افزایش بسامد موج، تغییر مکان‌ها



شکل ۶. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی‌بعد  $0.75$  و نسبت

$$\frac{E_r}{E_l} = 1/5 \text{ مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار}$$

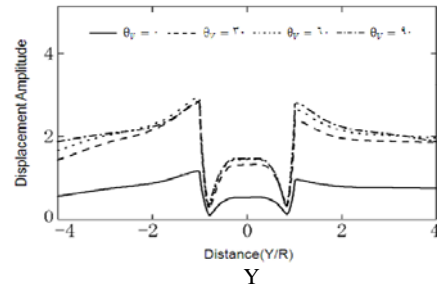
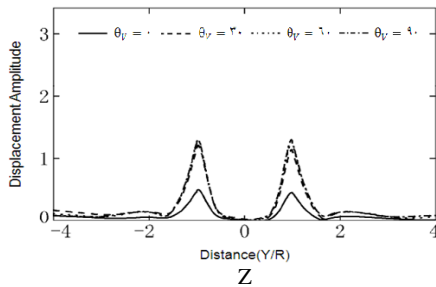


شکل ۷. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی‌بعد  $0.75$  و نسبت

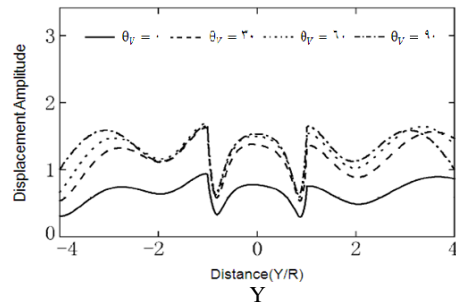
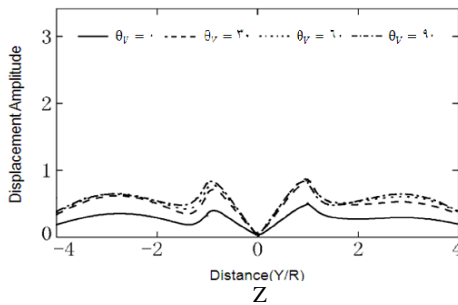
$$\frac{E_r}{E_l} = 3 \text{ مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار}$$

تحلیل حساسیت روی ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار در این قسمت دو حالت برای ضخامت توده‌سنگ درزه‌دار در نظر می‌گیریم. در حالت اول نسبت ضخامت توده‌سنگ درزه‌دار به شعاع دره برابر  $t/R = 0.5$  و در حالت دوم برابر  $t/R = 2$  است. نسبت چگالی سنگ بستر به توده‌سنگ برابر ۱، نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار ۳، نسبت پواسون برای هر دو  $0.33$  و نیز میرایی سنگ بستر و توده‌سنگ درزه‌دار به ترتیب  $0.02$  و  $0.04$  در نظر گرفته شده است. موج ورودی نوع SH با زاویه افقی  $45^\circ$  درجه و زوایای قائم  $5^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  و  $90^\circ$  در نظر گرفته شده است (شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱).  
با مقایسه نمودارهای شکل‌های (۹ و ۱۱) می‌توان مشاهده کرد با افزایش نسبت ضخامت توده‌سنگ درزه‌دار به شعاع دره،

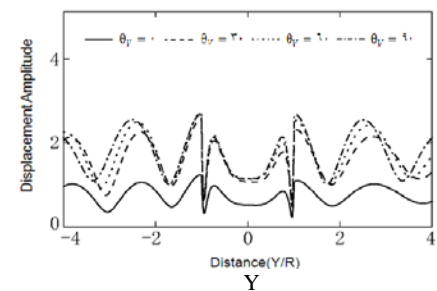
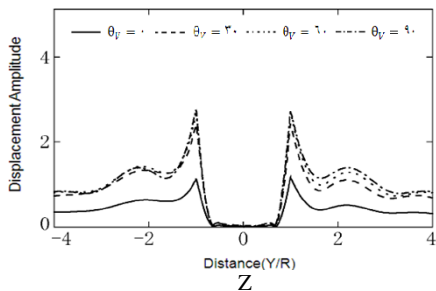
بزرگی تغییر مکان‌ها در جهت  $z$  نسبت به جهت  $y$  کمتر است. از نمودارهای بالا می‌توان استنتاج کرد وقتی که نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار کوچک است، آشفتگی و پیچیدگی تغییر مکان‌ها در جهتی که موج با دره برخورد می‌کند بیشتر از جهت دیگر دره است که دلیل آن را می‌توان به اثر مانع شونده وجود دره در مسیر عبور موج نسبت داد که مشابه حالت هموزن است، همان‌طور که در بخش قبل نیز مشاهده شد. همچنین در مقادیر پایین زاویه قائم موج، تغییر مکان‌ها کوچک هستند که این مورد نیز مشابه حالت هموزن است، ولی با افزایش نسبت مدول الاستیسیته‌ها اثر مانع شونده دره کاهش می‌یابد و تغییر مکان‌های دو طرف دره در زوایای غیر قائم حالت متقارن پیدا می‌کند. با افزایش نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار، اندازه تغییر مکان‌ها نیز افزایش می‌یابد.



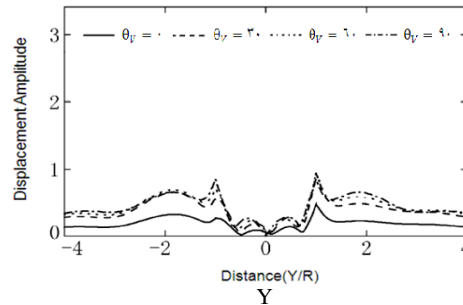
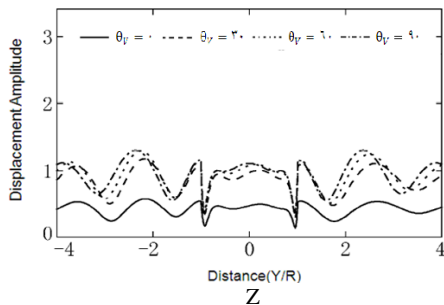
شکل ۸. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد  $0.75$  و نسبت ضخامت توده سنگ درزه دار به شعاع دره  $t/R = 0.5$



شکل ۹. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد  $0.75$  و نسبت ضخامت توده سنگ درزه دار به شعاع دره  $t/R = 2$



شکل ۱۰. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد  $1/25$  و نسبت ضخامت توده سنگ درزه دار به شعاع دره  $t/R = 0.5$



شکل ۱۱. تغییر مکان در جهت  $z$  و  $y$  برای زاویه افقی  $\theta_h = 45^\circ$  زوایای قائم  $\theta_v = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  تحت بسامد بی بعد  $1/25$  و نسبت ضخامت توده سنگ درزه دار به شعاع دره  $t/R = 2$



درزه‌دار با توجه به ضخامت لایه‌ها و مشخصات مصالح تشکیل دهنده آن است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده، زاویه افقی برخورد موج تأثیر زیادی روی تغییرات تغییر مکان‌ها دارد. با افزایش زاویه افقی از صفر تا  $90^\circ$  درجه اندازه تغییر مکان‌ها در جهات  $Y$  و  $Z$  کاهش و در جهت  $X$  افزایش می‌یابد. همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها برای زوایای مختلف متفاوت است. با افزایش بسامد موج، تغییر مکان‌ها حالت پیچیده‌تری به خود می‌گیرند و این پیچیدگی در جهت‌های  $X$  و  $Y$  بیشتر از جهت  $Z$  است. در مورد توده‌سنگ درزه‌دار می‌توان گفت وقتی که نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار کوچک است آشفتگی و پیچیدگی تغییر مکان‌ها در جهتی که موج با دره برخورد می‌کند بیشتر از جهت دیگر دره است که دلیل آن را می‌توان به اثر مانع‌شونده وجود دره در مسیر عبور موج نسبت داد. همچنین در مقادیر پایین زاویه قائم موج، تغییر مکان‌ها کوچک هستند ولی با افزایش نسبت مدول الاستیسیته‌ها، اثر مانع‌شونده دره کاهش می‌یابد و تغییر مکان‌های دو طرف دره در زوایای غیر قائم حالت متقارن پیدا می‌کنند. با افزایش نسبت مدول الاستیسیته سنگ بستر به توده‌سنگ درزه‌دار، اندازه تغییر مکان‌ها نیز افزایش می‌یابد. تغییر در ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار در ایجاد تغییر مکان‌های متفاوت بسیار تأثیرگذار است. در یک بسامد مشابه با افزایش ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار توزیع تغییر مکان‌های سطحی پیچیدگی بیشتری به خود می‌گیرد و بزرگی تغییر مکان‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار بسامد، روند کاهش اندازه تغییر مکان‌ها سریع‌تر می‌شود. به‌طورکلی با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق، توده‌سنگ درزه‌دار در حالات خاص که بستگی به زاویه برخورد امواج، ضخامت لایه‌ها و مشخصات مصالح تشکیل دهنده آن دارد می‌تواند اثرات چشمگیری روی امواج زمین‌لرزه و در نتیجه روی سازه‌های ساخته شده روی دره‌ها داشته باشد و بایستی در طراحی این سازه‌ها اثرات آن مورد توجه قرار گیرد.

در این تحقیق از روش مدل الاستیک همسان برای

الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها پیچیده‌تر می‌شود و بزرگی تغییر مکان‌ها در فاصله دور از دره و در لبه دره کاهش می‌یابد. مقایسه نمودارهای (۸ و ۱۰) نشان می‌دهد وقتی که نسبت ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار به شعاع دره  $0.5\%$  است در جهت  $Z$  تنها در لبه‌های دره تغییر مکان خواهد داشت و در نقاط دیگر تغییر مکان‌ها ناچیز است و با افزایش زاویه قائم، بزرگی این تغییر مکان‌ها در لبه‌های دره افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار به شعاع دره به مقدار دو، بزرگی تغییر مکان‌ها در تمامی نقاط مدل بغیر از لبه‌های دره افزایش پیدا می‌کند و همچنین الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها نیز پیچیده‌تر می‌شود. در نمودارهای شکل‌های (۸ تا ۱۱) تنها تغییر ایجاد شده افزایش بسامد بی‌بعد از  $0.75\%$  به  $1.25\%$  است که باعث پیچیده‌تر شدن الگوی تغییرات تغییر مکان‌ها در هر دو جهت می‌شود. مقایسه نمودارهای شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان می‌دهد با افزایش نسبت ضخامت توده‌سنگ درزه‌دار به شعاع دره در حالت بسامد بی‌بعد  $1.25\%$ ، بزرگی تغییر مکان‌ها در جهت  $Z$  کاهش پیدا می‌کند.

از نمودارهای این بخش می‌توان نتیجه گرفت اثر تغییر در ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار در ایجاد تغییر مکان‌های متفاوت کاملاً محسوس است. در یک بسامد مشابه با افزایش ضخامت لایه توده‌سنگ درزه‌دار توزیع تغییر مکان‌ها، پیچیدگی بیشتری به خود می‌گیرد و بزرگی تغییر مکان‌ها کاهش می‌یابد همچنین با افزایش مقدار بسامد، روند کاهش اندازه تغییر مکان‌ها سریع‌تر می‌شود.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی اثرات توده‌سنگ درزه‌دار روی زمین‌لرزه عبوری از ساختمان‌های دره‌ای از روش ترکیب المان محدود و المان مرزی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد این روش از توانایی قابل قبول برای حل این مسئله برخوردار است و توانایی شبیه‌سازی انواع دره‌ها به شکل دلخواه و به‌صورت سه‌بعدی را داراست. همچنین قادر به پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ

شبهه‌سازی رفتار توده‌سنگ درزه‌دار استفاده شد. پیشنهاد می‌شود از روش‌های دیگر نیز برای شبهه‌سازی این مسئله استفاده شود و مقایسه بین جواب‌ها صورت گیرد. استفاده از ترکیب روش‌های المان محدود و المان مرزی برای بررسی اثرات تحریک غیر یکنواخت روی سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای یکی از کارهایی است که می‌توان به آن پرداخت.

#### منابع مورد استفاده

- Alves, W. S. 2005. Nonlinear analysis of Pacoima Dam with spatially Non-uniform Ground Motion, PhD. Thesis, California Institute of Technology, California.
- Kojic, S. B. 1988. Earthquake response of arch dams to non-uniform canyon motion, PhD. Thesis, Southern California University, California.
- Sepulveda, S. A., W. Murphy and D. N. Petley. 2004. The role of topographic amplification effects on the generation of earthquake-induced rock slope failures, Landslides: evaluation and stabilization, Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayao (eds), Taylor and Francis group, London.
- Zaslavsky, Y., A. Shapira and A. A. Arzi. 2000. Amplification effects from earthquakes and ambient noise in the Dead Sea Rift (Israel). *Soil Dynamics and Earth Engineering* 20 (1-4): 187-207.
- Celebi, M. 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong motion and aftershocks records of the 3 march 1985 Chile earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77(4): 1147-1167.
- Hartzell, S. H., D. L. Carver, K. W. King. 1994. Initial investigation of site and topographic effects at Roobinwood Ridge, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (5): 1336-49
- Athanasopoulos, G. A., P. C. Pelekis and E. A. Leonidou. 1999. Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake. *Soil Dynamics and Earth Engineering* 18(2): 135-149.
- Vahdani, S. and S. Wikstorm. 2002. Response of Tarzana strong ground motion site during the 1994 Northridge earthquake. *Soil Dynamics and Earth Engineering* 22(9): 837-848.
- Spudich P., M. Hellweg, W. H. K. Lee. 1996. Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California earthquake: Implication for main shock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(1 B): S193-S208.
- Bouchon, M., J. S. Barker. 1996. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California, *Bulletin of the of the Seismological Society of America* 86: 66-72.
- Poursartip, B., A. Fathi and L. F. Kallivokas. 2017. Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 92: 503-527.
- Pelekis, P., A. Batilas, E. Pefani, V. Vlachakis and G. Athanasopoulos. 2017. Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008  $M_w$  6.4 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 100: 538-554.
- Trifunac, M. D. 1973. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1: 267-281.
- Wong, H. L. and M. D. Trifunac. 1974. Scattering of plane SH-waves by a semi-elliptical canyon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 3: 157-169.
- Sabina, F. J. and J. R. Willis. 1975. Scattering of SH-waves by a rough half-space of arbitrary slope, *Geophysics. Geophysical Journal International* 42(2): 685-703.
- Asano, S. 1966. Reflection and refraction of elastic waves as a corrugated surface. *Bulletin of the Seismological Society of America* 56 (1): 201-222.
- Bazyar, M. H. and H. Song. 2017. Analysis of transient wave scattering and its applications to site response analysis using the scaled boundary finite-element method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 98: 191-205.
- Wang, F. and K. Sett. 2016. Time-domain stochastic finite element simulation of uncertain seismic wave propagation through uncertain heterogeneous solids, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 88: 369-385.
- Li, C., H. Hao and K. Bi. 2017. Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading, *Engineering Structures* 148: 373-386.
- Hashash, Y. M. A., S. Dashti, M. Romero, M. Ghayoomi and M. Musgrove. 2015. Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 78: 19-31.

21. Bazyar, M. H. and H. Song. 2017. Analysis of transient wave scattering and its applications to site response analysis using the scaled boundary finite-element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 98: 191-205.
22. Kontoe, S., V. Avgerinos and D. M. Potts. 2014. Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 66: 206-219.
23. Tan, H. and A. K. Chopra. 1995. Earthquake analysis of arch dam including dam-water foundation rock interaction. *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 24 (11): 1453-1474.
24. Tan, H. and A. K. Chopra. 1995. Dam-foundation rock interaction effects in frequency response functions of arch dams. *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 24 (11): 1475-1489.
25. Reimer, R. B., R. W. Clough and J. M. Raphael. 1974. Seismic response of Pacoima dam in the San Fernando earthquake, *In: Proceeding of the 5<sup>th</sup> World Conference Earthquake Engineering, Rome*. PP. 2328-2337.
26. Tarinejad, R., R. Fatehi and S. Harichandran. 2013. Response of an arch dam to no uniform excitation generated by a seismic wave scattering model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 52: 40-54.

## Jointed Rock Mass Effects on the Seismic Waves Scattering from the Canyon Sites in the Dam's Support

M. Zabardast<sup>1</sup> and F. Daneshvar Vousoughi<sup>2\*</sup>

(Received: October 5-2017 ; Accepted: August 6-2018)

### Abstract

Seismic study of canyon sites has always been one of the important fields of seismic studies because of massive structures such as dams that are built in such sites. Jointed rock mass in rock canyon sites is one of the main site effects that can change the seismic waves. In this research, we studied the influence of this factor on the scattering of seismic waves. To fulfil this goal, we employed a coupled method combining the finite element method in the near field with boundary elements in the far field. To simulate the behaviour of jointed rock mass, we used the linear elastic model. Based on the results of the numerical analyses, jointed rock mass could have significant effects on the seismic waves in some special conditions. These conditions are the angle of incident wave, the thickness of layers and the material properties of the jointed rock mass. So it is necessary to consider this factor in the seismic structure design in the canyon sites.

**Keywords:** Seismic Wave Scattering, Jointed Rock Mass, Site Effect, Hybrid Numerical Method, Boundary Element, Finite Element

---

1. Water and Wastewater Company of Ardabil Province, Ardabil, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: fdaneshvar.vousoughi@gmail.Com