

## شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از روش چشمه نقطه‌ای با اعمال اثرات بزرگ‌نمایی

محسن ایثاری<sup>۱\*</sup>

سید امیر علوی<sup>۲</sup>

حامد محجوب<sup>۳</sup>

عبداله سهرابی بیدار<sup>۴</sup>

سید رضا علوی<sup>۵</sup>

### چکیده

استفاده از تحلیل‌های دینامیکی در حوزه زمان در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بزرگ نظیر سدها، با توجه به مزیت‌های آن امری جذاب به نظر می‌رسد. برای انجام چنین تحلیل‌هایی نیاز است تا شتاب‌نگاشت‌هایی مناسب و سازگار با شرایط ساختگاهی منطقه در اختیار طراح قرار گرفته باشد. چنین اطلاعاتی در طول یک زمین‌لرزه در ساختگاه یک سد به‌ندرت به ثبت رسیده و معمولاً تعداد داده‌های ثبت‌شده نیز به تعدادی نیست که امکان انجام تحلیل غیریکنواخت را فراهم آورد. در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از روش ارتعاش تصادفی چشمه-نقطه شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شود. در ادامه اثرات بزرگ‌نمایی ساختگاه سد، بر روی نگاشت‌های تولیدشده، اعمال شد. بررسی پارامترهای تأثیرگذاری مانند فاصله از چشمه و فرکانس گوشه، نشان داد که افزایش فرکانس گوشه، موجب پیچیده‌تر شدن الگوی شتاب شده و مقدار ماکسیمم شتاب را افزایش داده است. همچنین مشاهده شد که افزایش فاصله موجب کاهش اثرات بزرگ‌نمایی روی شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت در ساختگاه شده است. در فواصل نزدیک‌تر ترکیب اثر بزرگ‌نمایی ساختگاه با پارامترهای فاصله و مسیر تأثیر محسوسی بر شتاب‌نگاشت‌ها خواهد داشت.

### واژه‌های کلیدی:

<sup>۱\*</sup> دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه تبریز. isari.mohsen@tabrizu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر.

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد عمران، دانشگاه تبریز.

<sup>۴</sup> دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران.

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز.

## مقدمه

در حال حاضر استفاده از تحلیل‌های دینامیکی در حوزه زمان به دلیل مزیت‌های آن و همچنین در بعضی موارد بررسی رفتار غیرخطی سازه در حین زمین‌لرزه برای سازه‌های هیدرولیکی حساسی همچون سدها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لازمه چنین تحلیل‌هایی در اختیار داشتن شتاب‌نگاشت‌های مناسب و سازگار با شرایط ساختگاهی منطقه است. علاوه بر این برای بررسی اثرات جابجایی‌های غیریکنواخت روی پاسخ لرزه‌ای یک سد اطلاعات جابجایی زمین‌لرزه در امتداد دیواره دره مورد نیاز خواهد بود. چنین اطلاعاتی در طول یک زمین‌لرزه در ساختگاه یک سد به ندرت به ثبت رسیده و معمولاً داده‌های ثبت شده نیز به تعدادی نیست که امکان انجام تحلیل غیریکنواخت را فراهم آورد. ضمن آنکه روش درونیابی چندجمله‌ای بین نقاط ثبت شده، برای دستیابی به اطلاعات نقاط مابین، به علت پیچیدگی‌های نحوه عملکرد امواج در برخورد با توپوگرافی دره و الگوی تغییرات جابجایی‌های زمین مناسب نیست (تاری نژاد و همکاران ۲۰۱۳، سهرابی بیدار ۲۰۰۸). در مناطقی که چنین شتاب‌نگاشت‌هایی در دسترس نباشد، استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی سازگار با طیف طراحی ساختگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانکه تاکنون توسط محققین مختلف به اثبات رسیده یکی از عوامل اصلی تفاوت نگاشت‌های ثبت شده وجود توپوگرافی ناهموار در سطح زمین است (تاری نژاد و همکاران ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷، سهرابی بیدار ۲۰۱۷). این امر لزوم محتاط بودن در بکار گرفتن تنها یک نگاشت زلزله در تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها و توجه به تحریک غیریکنواخت، بخصوص برای سازه‌هایی که سطح تماس گسترده‌ای با زمین دارند (سدها، پل، تونل و لوله‌های انتقال آب) ایجاب می‌کند؛ اما عدم دسترسی به داده‌های تاریخچه زمانی واقعی در نقاط مختلف تکیه‌گاه انجام تحلیل‌های با تحریک غیریکنواخت را با مشکلات زیادی همراه می‌سازد. بررسی عددی اثرات عوارض توپوگرافی بر پاسخ زمین و محاسبه جنبش در نقاط مختلف تکیه‌گاهی یکی از روش‌های دستیابی به تحریک غیریکنواخت و طراحی سازه‌های گسترده در زمین، مانند سازه‌های واقع در ساختگاه دره‌ای است (ایثاری و همکاران ۲۰۱۹، واحد مهندسی ارتش

آمریکا ۲۰۰۳). طراحی ایمن و بهینه سازه‌های مهندسی بخصوص سازه‌هایی بااهمیت مانند سدها سایر سازه‌های هیدرولیکی بزرگ، هدف اساسی در برنامه مطالعاتی پروژه-های عمرانی کشور است. چنانکه اشاره شد یکی از عوامل اصلی تفاوت نگاشت‌های ثبت شده وجود توپوگرافی ناهموار در سطح زمین است. زمین‌لرزه و مسئله طراحی مقاوم سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدها در مقابل این پدیده از جمله مواردی است که همواره مورد توجه خاص مهندسیین بوده است؛ بنابراین برای طراحی مقاوم در برابر زمین‌لرزه، لازم است برآورد و شناختی دقیق از ویژگی‌های حرکت شدید زمین طی زمین‌لرزه‌های آتی در منطقه ساختگاه وجود داشته باشد (هی ۲۰۱۴). به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی در حوزه زمان لازم است شتاب‌نگاشت‌های مناسب جهت تحلیل دینامیکی در اختیار طراح قرار گیرد. طبیعی است شتاب‌نگاشت‌های طراحی می‌بایست با توجه به شرایط ساختگاه انتخاب گردیده و دربردارنده خصوصیات زمین‌لرزه‌های محتمل در ساختگاه باشد. جهت تهیه شتاب‌نگاشت‌های طراحی دو روش اساسی وجود دارد (بور<sup>۲</sup> ۲۰۰۳). روش اول استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده طی زمین‌لرزه‌های پیشین و اصلاح آن‌ها به منظور سازگاری با شرایط ساختگاه و روش دوم شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه با استفاده از روش‌های مختلف شبیه‌سازی است. استفاده از روش دوم به‌ویژه در مواقعی که دسترسی به شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده سازگار با شرایط منطقه وجود ندارد اهمیت می‌یابد. اهمیت طراحی ایمن لرزه‌ای ساختگاه دره به همراه سد به‌خوبی شناخته شده است. سه عامل اصلی مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سدهای بزرگ به ترتیب عبارت‌اند از: ۱- مکانیسم ورودی زمین‌لرزه، ۲- آنالیز دینامیکی مدل متشکل از سیستم سد-مخزن و فونداسیون، ۳- رفتار دینامیکی مصالح. در بین این عوامل، مکانیسم ورودی تحریک زمین به دلیل پیچیدگی مکانیسم منبع انتشار امواج زمین‌لرزه و شرایط محلی ساختگاه دره-سد از پیچیدگی زیادی برخوردار است؛ بنابراین استفاده از روشی که عوامل مؤثر ذکر شده را به‌خوبی شامل شود ضروری به نظر می‌رسد (بور ۲۰۰۳). در

<sup>۱</sup>.He

<sup>۲</sup>.Boore

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f)$$

در این رابطه E نشان دهنده اثرات منبع، P بیانگر اثرات مسیر و G بیانگر اثرات ساختگاه است. همچنین  $M_0$  گشتاور لرزه‌ای و  $I(f)$  آیتم کنترل ابزار است. برای به دست آوردن اثرات منبع از رابطه (۲) استفاده می‌شود (بور ۲۰۰۳).

$$E(M_0, f) = C \cdot M_0 \cdot S(M_0, f) \quad (۲)$$

$$S(M_0, f) = \frac{1}{1 + (f/f_0)^2} \quad (۳)$$

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \cdot \beta \cdot (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (۴)$$

$$C = \left( \frac{R_{\theta f} \cdot F \cdot V}{4 \pi \rho \beta^3 R_0} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه C مقدار ثابت، f فرکانس،  $f_0$  فرکانس گوشه (برحسب هرتز)،  $\Delta\sigma$  نشان دهنده افت تنش (برحسب بار)،  $\beta$  سرعت موج برشی و  $\rho$  نشان دهنده دانسیته جرمی پوسته و  $R_{\theta\phi}$  الگوی تشعشع که برای امواج برشی به طور متوسط ۰/۵۵ است. واحد گشتاور لرزه‌ای  $M_0$  برحسب دین<sup>۱</sup> بر سانتیمتر، واحد سرعت موج برشی پوسته برحسب کیلومتر بر ثانیه (برون<sup>۲</sup> ۱۹۷۰) می‌باشد. در این رابطه، V ضریب مشارکت ناشی از دو موج برشی SH و SV (ضریب مشارکت موج برشی در مؤلفه افقی) که مقدار آن ۰/۷۰۷ در نظر گرفته شده است. ضریب F (ضریب میدان آزاد) ضریب تشدید لایه سطحی و برای موج SH معمولاً مقدار ۲ در نظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن اثرات مسیر که با پارامتر P نشان داده شد، از پارامترهای وابسته به فاصله و ضریب کیفیت به صورت رابطه (۶) استفاده می‌شود (بور ۲۰۰۳، سمائی ۲۰۱۷).

$$P(R, f) = Z(R) \cdot \exp[-\pi f R / Q(f) C_Q] \quad (۶)$$

در این رابطه  $C_Q$  سرعت موج برشی زمانی که ضریب کیفیت سیر امواج  $Q(f)$  (میرایی هندسی) برحسب فرکانس محاسبه

این پژوهش به منظور شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه از روش ارتعاش تصادفی چشمه نقطه‌ای استفاده شده است. در این روش چشمه زمین‌لرزه به صورت نقطه‌ای مدل گردیده و پارامترهای اصلی ورودی، بزرگای زمین‌لرزه و فاصله ساختگاه تا چشمه زمین‌لرزه است. علاوه بر تولید سری‌های زمانی مصنوعی با این روش، در ادامه سعی شده است که با ترکیب اثرات بزرگنمایی ساختگاه که از نوآوری‌های پژوهش انجام شده است، از روی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده عامل اثرات ساختگاهی تجربی را نیز در این شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده، وارد کرد. اثرات پارامترهای دیگری همچون فاصله از چشمه و فرکانس گوشه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### روش ارتعاش تصادفی (چشمه - نقطه‌ای)

دیدگاه کلی در مورد روش شبیه‌سازی تحریک زمین‌لرزه با استفاده از روش ارتعاش تصادفی این است که منبع ارتعاش به صورت یک فرایند ارتعاشی شعاعی به سمت اهداف مقابل حرکت می‌کند؛ بنابراین طیف منبع باید منطبق بر توان دوم فرکانس ( $w^2$ ) بوده و همچنین به دلیل پیچیدگی پیش‌بینی حالت واقعی زلزله از تکنیک ارتعاش تصادفی استفاده می‌شود. روش چشمه نقطه‌ای که اشاره شد، یک روش ساده اما مؤثر برای تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی است که براساس توان دوم فرکانس  $\omega^2$  منبع، بنانهاده شده است (بور ۲۰۰۳ و ۲۰۰۲). در ابتدا، رکوردهای تاریخچه زمانی ارتعاش تصادفی یک نویز سفید با میانگین صفر تولید شد. در ادامه تاریخچه زمانی تولید شده با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس تبدیل شد. آنگاه دامنه آن را در طیف هدفی که بر اساس اصول لرزه‌شناسی ساخته شده است، ضرب کرده و با داشتن این دامنه اصلاح شده و فاز تصادفی نویز سفید به کمک تبدیل معکوس فوریه به فضای زمان بازمی‌گردد. چنانکه ذکر شد، طیف تولید شده باید شامل اثرات منبع، مسیر و ساختگاه باشد. براساس رابطه بور در سال ۲۰۰۳ برای رکورد زمین‌لرزه مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود.

(۱)

<sup>۱</sup>. Dyn/cm

<sup>۲</sup>. Brune

زمانی استفاده می‌شود، تابع پنجره زمانی ساراگونی-هارت<sup>۱</sup> یا تابع نمایی و تابع پنجره جعبه. تابع پنجره ساراگونی و هارت از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه مؤلفه‌های  $t = \varepsilon \times t_{\eta}$  و  $b \cdot a$  به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند که در زمان  $t_{\eta}$  مقدار  $w(t)$  حداکثر مقدار و برابر واحد شود. مدت تداوم زلزله برابر با مدت‌زمان انتشار ترک در گسل به‌علاوه مدت‌زمان لازم برای رسیدن امواج به ساختگاه است (زعفرانی ۲۰۱۳).

$$w(t; \varepsilon, \eta, t_{\eta}) = a(t/t_{\eta})^b \cdot \exp(-c(t/t_{\eta})) \quad (11)$$

$$b = -(\varepsilon \ln \eta) / [1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)]$$

$$c = b / \varepsilon$$

$$a = (\exp(1) / \varepsilon)^b$$

$$t_{\eta} = d \times (T_d + T_p)$$

در این رابطه  $d$  مقدار ثابت و برابر ۲ است. همچنین براساس تحقیقات ساراگونی و هارت مقادیر  $\eta = 0.05$  و  $\varepsilon = 0.2$  انتخاب شده‌اند (زعفرانی ۲۰۱۳).

### معرفی مسئله و پارامترها

در این مطالعه برای تولید شتاب‌های مصنوعی با استفاده از روش چشمه نقطه ساختگاه سد پاکویما به‌عنوان یک ساختگاه شناخته‌شده برای مسائل اثرات ساختگاهی، در نظر گرفته شد. سد بتنی قوسی پاکویما واقع در کوه‌های سن گابریل در حومه لس‌آنجلس است که تاکنون تجربه چندین زلزله بزرگ را داشته است (شکل ۱). در سال ۲۰۰۱ زلزله‌ای با بزرگی  $4/3$  و عمق کانونی ۹ کیلومتر که مرکز آن ۶ کیلومتر از شمال سد پاکویما فاصله داشت اتفاق افتاد. شکل (۲) شتاب‌های ثبت‌شده در طی این زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده روی ساختگاه سد پاکویما به ترتیب الف) کانال ۱۱ در جهت عرض دره روی بستر، ب) کانال ۱۲ در جهت طول دره در سمت چپ، ج) کانال ۱۴ در جهت عرض دره در سمت چپ و د) کانال ۱۵ در جهت طول دره در سمت راست دره ارائه شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در روی دیواره دره در کانال‌های مختلف به‌وضوح نشان‌دهنده تغییرات شدید در دامنه

می‌شود. برای بیان پارامتر  $Z(R)$  که نشان‌دهنده اثرات فاصله (توزیع هندسی) است، از رابطه (۷) استفاده می‌شود (بور ۲۰۰۳، سمائی ۲۰۱۷).

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{R_0}{R}, R \leq R_1 \\ Z(R_1) \left(\frac{R_1}{R}\right)^{p_1}, R_1 \leq R \leq R_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Z(R_n) \left(\frac{R_n}{R}\right)^{p_n}, R_n \leq R \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه  $R$  نشان‌دهنده فاصله چشمه تا ساختگاه است. در ادامه برای نشان دادن اثرات ساختگاهی که شامل پارامتر بزرگنمایی ساختگاه  $A(f)$  و پارامتر  $D(f)$  می‌باشد، از رابطه ترکیبی زیر استفاده می‌شود.

$$G(f) = A(f) \cdot D(f) \quad (8)$$

ضریب بزرگنمایی ارائه‌شده در اینجا وابسته به منبع زمین‌لرزه که به‌صورت امیدانس عمق منبع به سطح آن است که وابسته به شرایط محلی اثرات ساختگاه نیست. در سال ۱۹۸۴ اندرسون و حاق نشان دادن که ارائه تابع نمایی از میرایی بسامد بالا به‌صورت زیر می‌تواند مناسب باشد (زعفرانی ۲۰۱۳).

$$D(f) = e^{-\pi k_0 f} \quad (9)$$

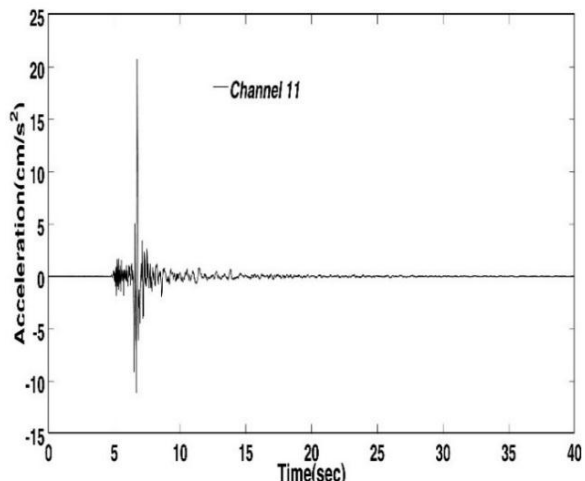
مقادیر کمتر این پارامتر نشان‌دهنده شرایط ساختگاهی سخت‌تر و اینکه این مقدار می‌تواند برای ساختگاه‌های مختلف مقادیر بسیار متفاوتی را داشته باشد.  $K_0$  متغیر تضعیف در بسامدهای بالا است. برای بیان پارامتر کنترل ابزار  $I(f)$  از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$I(f) = (2\pi f i)^n \quad (10)$$

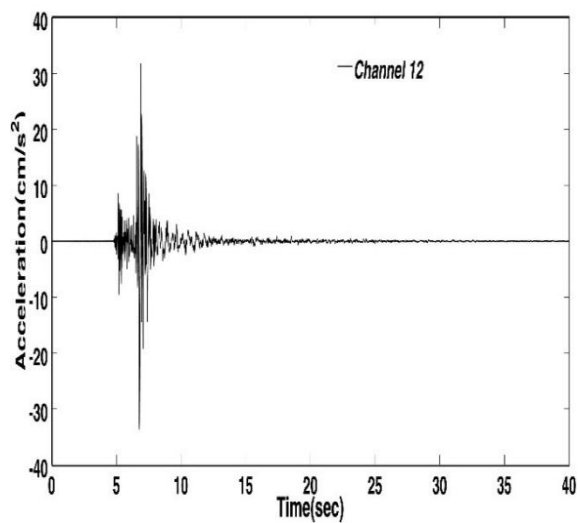
در این رابطه  $i = \sqrt{-1}$  و مقدار  $n = 0, 1, 2$  به ترتیب برای جایجایی، سرعت و شتاب است. در روش شبیه‌سازی تصادفی با استفاده از فرکانس گوشه معمولاً از دو نوع تابع پنجره

<sup>۱</sup>.Saragoni-Hart

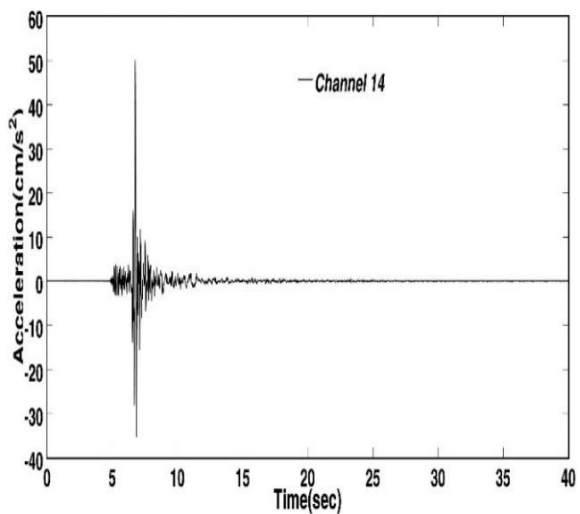
رکوردهای ثبت شده است. به طوری که رکوردهای ثبت شده در قسمت های بالای دیواره دره بزرگتر از کف دره می باشند. برای تعیین پارامترهای مدل تصادفی به منظور شبیه سازی شتابنگاشت با استفاده از روش چشمه نقطه از روی زلزله ۲۰۱۲ نیوهال که در جدول (۱) ارائه شد، استفاده شده است (تاری نژاد و همکاران ۲۰۱۳).



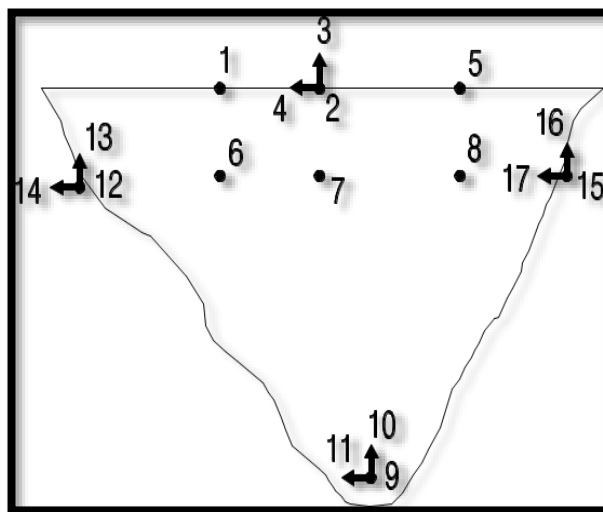
(الف)



(ب)

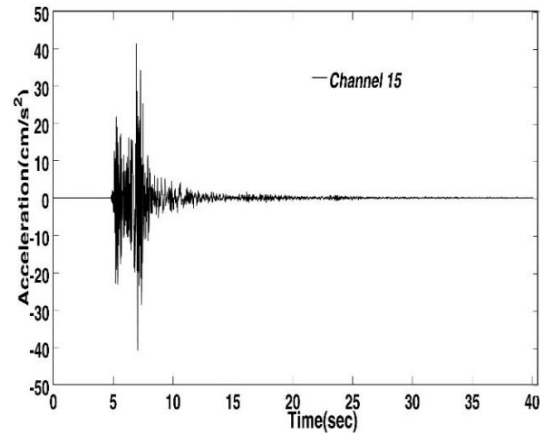


(ج)



شکل (۱): موقعیت مکانی سد پاکویما و شتابنگاشت های مختلف روی بدنه سد (تاری نژاد و همکاران ۲۰۱۳)

کانال ۱۱ بر روی کف دره در راستای عرض دره در شکل (۳) نشان شده است. برای محاسبه منحنی بزرگنمایی در این پژوهش از نسبت طیف فوریه نگاشت‌های به‌دست‌آمده در هر نقطه نسبت به طیف فوریه نگاشت‌های نقطه کف دره استفاده شده است. همان‌گونه که قابل است، دامنه بزرگنمایی در نقاط هم‌تراز دیواره سمت چپ دره نسبت به دیواره سمت راست دره بزرگ‌تر است. این مسئله، نشان‌دهنده تفاوت در شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در نقاط مختلف ساختگاه طی یک زلزله به دلیل اثرگذاری توپوگرافی روی امواج رسیده به سطح زمین است.

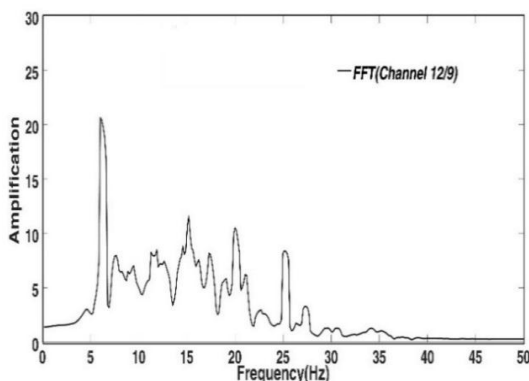


(د)

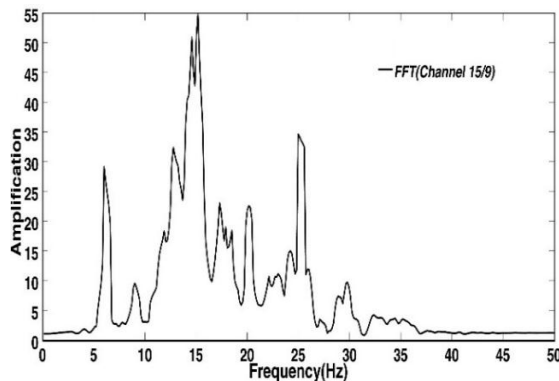
شکل (۲): شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده روی ساختگاه سد پاکویما به ترتیب الف) کانال ۱۱ در جهت عرض دره روی بستر، ب) کانال ۱۲ در جهت طول دره در سمت چپ، ج) کانال ۱۴ در جهت عرض دره در سمت چپ و د) کانال ۱۵ در جهت طول دره در سمت راست دره

جدول (۱): پارامترهای مدل تصادفی برای زلزله ۲۰۱۲

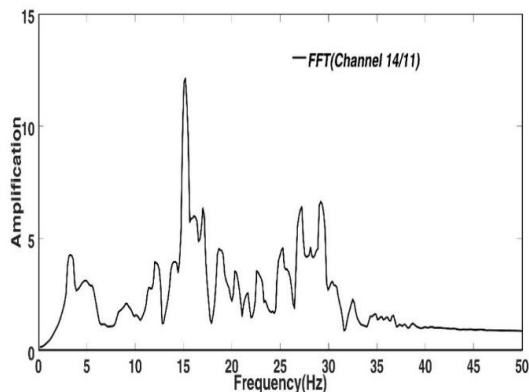
مقدار	پارامتر
۱۳۹/۶۸/۱۳۷	مکانیسم منبع
۴ کیلومتر	عمق
$10^{21} * 4/0.3$ دین در سانتی‌متر	گشتاور لرزه‌ای
۰/۰۴	کاپا
۳۵۰۰ متر بر ثانیه	سرعت موج برشی
۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	دانسیته



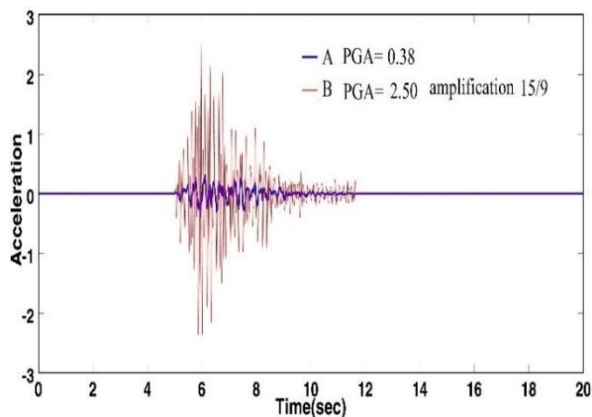
(الف)



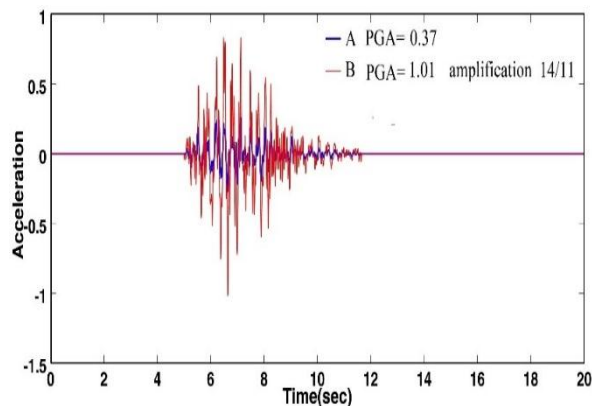
(ب)



یکی از عوامل تأثیرگذار در رفتار دینامیکی سازه‌هایی همانند سد که سطح تماس گسترده‌ای با زمین دارند، تغییرات مکانی زمین‌لرزه است. این اثر در بررسی رفتار لرزه‌ای این قبیل سازه‌ها تحت عنوان اثرات بزرگنمایی ساختگاه وارد روابط تولید شتاب می‌شود. شکل (۳) نمودارهای بزرگنمایی حاصل از نگاشت‌های ثبت‌شده در دیواره‌های راست و چپ دره محل سد پاکویما نسبت به کف دره را نشان می‌دهد. منحنی‌های بزرگنمایی برای هر دو حالت موج برشی در جهت X (امواج در راستای طول دره) و موج برشی در جهت Y (امواج در جهت عرض دره) نشان داده شده است. بزرگنمایی نگاشت‌های ثبت‌شده طی زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما در کانال‌های ۱۲ (سمت چپ) نسبت به کانال ۹ در کف دره و در راستای طول دره، کانال ۱۵ نسبت به کانال ۹ بر روی کف دره در راستای طول و در سمت راست دره، همچنین کانال ۱۴ نسبت به



(ب)



(ج)

شکل (۵): شتاب‌های شبیه‌سازی شده بدون بزرگنمایی و با اعمال بزرگنمایی روی کانال‌های مختلف

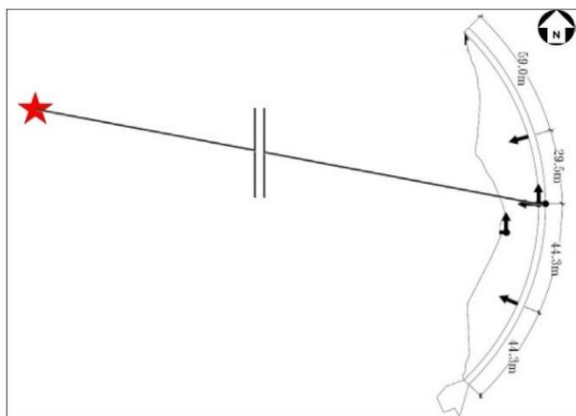
در شکل (۵) قسمت الف منحنی شتاب‌نگاشت برای کانال ۱۲ واقع در قسمت چپ دره در دو وضعیت با اعمال بزرگنمایی و بدون اعمال این پارامتر ارائه شده است. حداکثر شتاب در حالت اعمال بزرگنمایی برابر  $1/23$  و در حالت بدون بزرگنمایی برابر  $0/37$  مشاهده شد. در شکل (۵) قسمت (ب) حداکثر شتاب در حالت بدون بزرگنمایی برابر  $0/38$  و با اعمال این پارامتر  $2/5$  مشاهده شد. کانال ۱۵ در قسمت راست دره قرار گرفته و طیف پاسخ شتاب محاسبه شده در آن نقطه در راستای طول دره نسبت به نقطه ۹ واقع در کف دره محاسبه و در شتاب تولید شده در روش ارتعاش تصادفی ضرب شده است. در ادامه تحلیل‌های انجام شده در شکل قسمت (ج) شتاب‌های تولید شده در دو حالت مورد بررسی بر روی کانال ۱۴ در سمت چپ دره در راستای عرض دره مورد مطالعه قرار گرفت. در روی این کانال در حالت بدون اعمال بزرگنمایی همانند کانال‌های دیگر شتاب  $0/37$  و در

(ج)

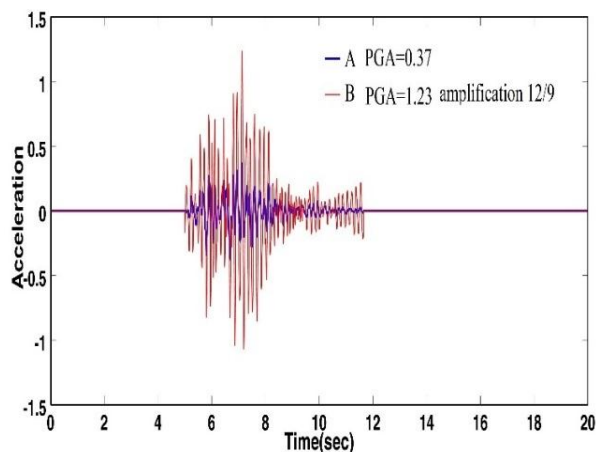
شکل (۳): بزرگنمایی نگاشت‌های ثبت شده طی زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما در کانال‌های به ترتیب الف) کانال ۱۲ ب) کانال ۱۵ و ج) کانال ۱۴ نسبت به کف دره

شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از روش چشمه نقطه

شکل (۴) فاصله محل وقوع زلزله ۲۰۱۲ را نسبت به ساختگاه سد پاکویما نشان می‌دهد. شتاب‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از روش چشمه نقطه در شکل (۵) در دو حالت ارائه شده است. وضعیت اول بدون اعمال اثرات بزرگنمایی ساختگاه را نشان می‌دهد که در این حالت مقدار ماکسیمم شتاب  $0/38$  است. در وضعیت دوم اثرات بزرگنمایی روی این شتاب‌نگاشت در کانال‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۴ نسبت به کف دره، اعمال شد.



شکل (۴): فاصله محل وقوع زلزله از ساختگاه سد پاکویما

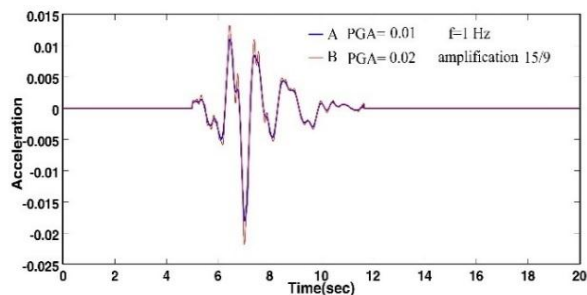
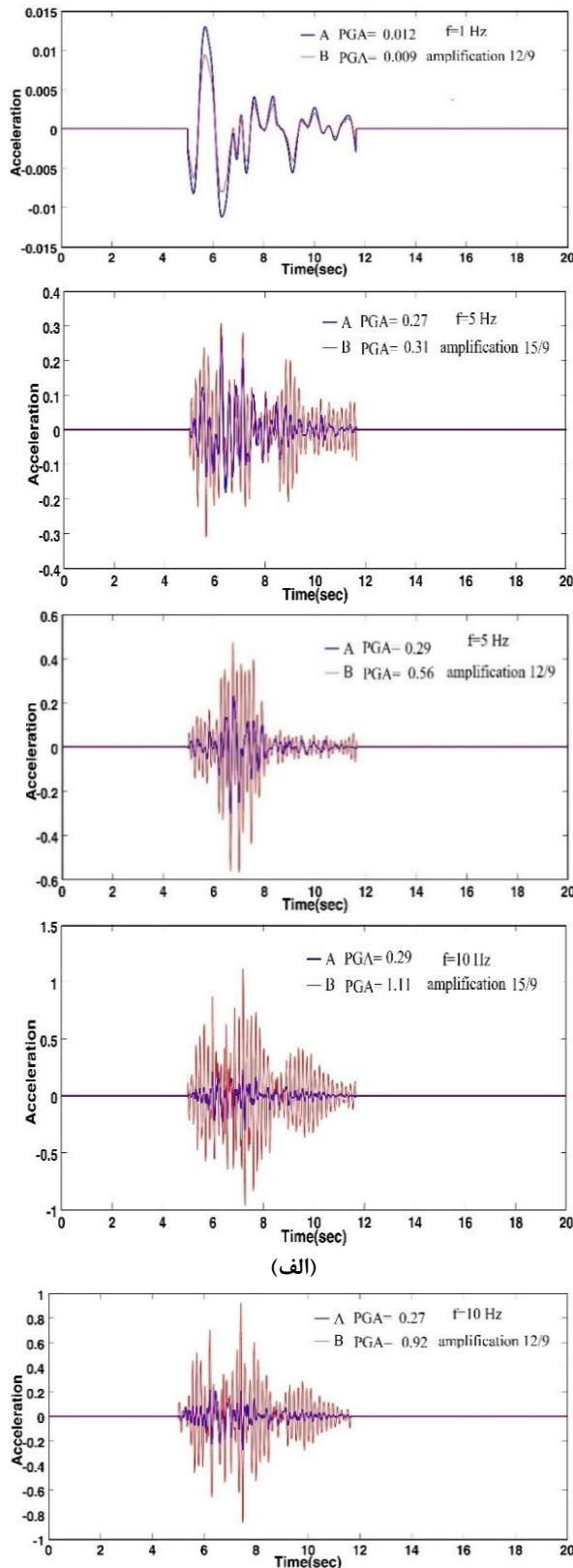


(الف)

حالت اعمال اثرات ساختگاهی حداکثر شتاب ۱/۰۱ مشاهده شد.

### اثرات فرکانس گوشه

در شکل (۶) در قسمت‌های الف و ب شتاب‌های غیریکنواخت با روش ارتعاش تصادفی در فرکانس‌های گوشه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در فرکانس‌های گوشه ۱، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هرتز و همچنین در دو حالت اعمال پارامتر بزرگنمایی و بدون اعمال بزرگنمایی روی کانال‌های ۱۵ و ۱۲ در دو سمت دره در راستای طول آن، شتاب‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی تولید شد. در این منحنی‌ها، اثرات فرکانس گوشه بر الگو و همچنین مقدار ماکسیمم شتاب‌نگاشت‌های شبهه‌سازی‌شده در دو وضعیت بزرگنمایی روی دو طرف ساختگاه بررسی شده است. چنانکه قابل مشاهده است، در فرکانس‌های کمتر در دو سمت دره اثرات بزرگنمایی چندان محسوس نیست. ولی افزایش فرکانس، موجب پیچیده‌تر شدن الگوی شتاب شبهه‌سازی‌شده و همچنین موجب افزایش مقدار ماکسیمم شتاب بخصوص در سمت چپ دره به دلیل اثرات بزرگنمایی شده است. شیب این افزایش در سمت چپ دره ساختگاه با افزایش فرکانس نسبت به سمت راست بزرگنمایی محسوس‌تری را نشان می‌دهد. در این بررسی نشان داده شد، ماکسیمم شتاب روی کانال ۱۵، در فرکانس گوشه ۳۰ هرتز برابر مقدار ۲/۵ با اعمال بزرگنمایی و ۰/۳۸ بدون اعمال بزرگنمایی تجربه شده است. این مقادیر برای کانال ۱۲ در فرکانس گوشه ۳۰ هرتز برابر ۱/۲۳ در حالت اعمال بزرگنمایی و ۰/۳۷ بدون اعمال این پارامتر است.





### اثرات فاصله

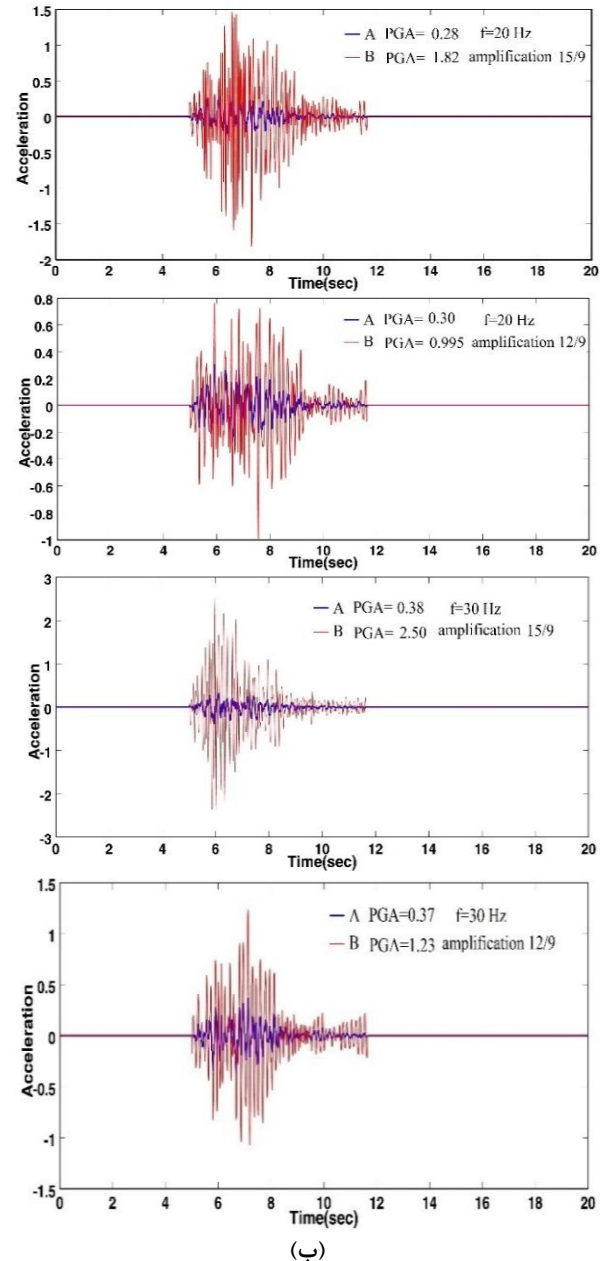
در ادامه تحلیل‌های انجام شده در این بخش، اثرات افزایش فاصله بر روی پاسخ ماکسیمم شتاب ایجاد شده در دو حالت بدون اعمال بزرگنمایی ساختگاه و همچنین با اعمال اثرات بزرگنمایی بررسی شد. نتایج حاصل شده در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، افزایش فاصله موجب کاهش اثرات بزرگنمایی روی شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت در ساختگاه شده است. همچنین تقریباً از فاصله ۹۰ کیلومتری به بعد، مقدار ماکسیمم شتاب در حالت بدون اعمال بزرگنمایی به هم نزدیک شده است. در فواصل کمتر تفاوت میان شتاب‌های تولید شده در حالت بدون اعمال بزرگنمایی و با اعمال بزرگنمایی در مقدار ماکسیمم شتاب، بسیار محسوس است. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت اثرات ساختگاهی در شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های ایجاد شده روی یک ساختگاه دارد.

جدول (۲): مقایسه اثرات فاصله روی ماکسیمم شتاب در دو حالت بدون بزرگنمایی و با اعمال بزرگنمایی.

فاصله (کیلومتر)	ماکسیمم شتاب بدون بزرگنمایی ساختگاه	ماکسیمم شتاب اثرات ساختگاهی
۲۰	۰/۶۶	۰/۸۳
۳۰	۰/۳	۰/۹۳
۴۰	۰/۱۸	۰/۶
۵۰	۰/۱۳۸	۰/۳۱
۶۰	۰/۰۷۸	۰/۲۱
۷۰	۰/۰۶۷	۰/۱۵۸
۸۰	۰/۰۵۲	۰/۱۳۵
۹۰	۰/۰۴۱	۰/۱۰
۱۰۰	۰/۰۴	۰/۱۱۴
۱۱۰	۰/۰۳۳	۰/۰۹۳
۱۲۰	۰/۰۲۹	۰/۰۶۵
۱۳۰	۰/۰۳۲	۰/۰۴۵

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نحوه تولید شتاب‌های مصنوعی با استفاده از روش ارتعاش تصادفی چشمه نقطه بیان شده است. با توجه به اهمیت سازه‌های آبی بزرگ نظیر سدها و لزوم تحلیل‌های دینامیکی حوزه زمان برای اغلب سازه‌های آبی در اختیار



شکل (۶): شتاب‌های شبیه‌سازی شده در دو طرف دره در فرکانس‌های مختلف

در خصوص علت مشاهده این رفتار با افزایش فرکانس گوشه می‌توان به این نکته توجه کرد که فرکانس گوشه خود تابعی از گشتاور لرزه‌ای، افت تنش و همچنین سرعت موج‌برشی، طبق رابطه (۴) در قسمت فرمول‌بندی است. افزایش فرکانس گوشه منجر به افزایش اثرات تابع منبع روی تولید شتاب مصنوعی شده که می‌تواند باعث پیچیده‌تر شدن و افزایش مقدار ماکسیمم در شتاب‌های مصنوعی تولید شده، شود.

- 6- Isari, M. Tarinejad, R. Sohrabi-Bidar ,A. (2019) "A New Solution to Estimate the Time Delay on the Topographic Site Using Time Domain 3D Boundary Element Method". *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, In press.
- 7- US Army Corps of Engineers. (2003) "Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures". Publication Number: EM 1110-2-6053.
- 8- He C-H, Wang J-Y, Zhang C-H and Jin F. (2014)"Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- 9- Boore, D.M. (2003) "Simulation of ground motion using the stochastic method". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, pp. 635-675.
- 10- Boore D.M. (2002) "SMSIM Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes: Version 2.0 A Revision of OFR 96-80-A. united states department of the interior, u.s". geological survey.
- 11- Brune, J. (1970) "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophysics*". Res. Vol. 75, pp. 4997-5009.
- 12- Samaei, M. Barzegari, A. Ghavimipannah ,M.R. Jaafari ,F. Shami ,A. (2017) "Simulation of probable scenarios of earthquake occurrences in Tehran". *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, vol.26, No.103, Spring.
- 13- Zaferani, H. Farjoudi, J. Zaman ,M. (2013) "Investigating the effect of the type of time window function and time steps in the randomized method of finite fault on the nonlinear dynamical response of structures of a degree of freedom". *Seismology and Earthquake Engineering*, Seventh Year, Number 3 and 4.

داشتن شتاب‌نگاشت‌های مناسب جهت تحلیل‌های دینامیکی ضرورت دارد. با استفاده از روش چشمه نقطه‌ای روی ساختگاه سد پاکویما به‌عنوان یک سد شناخته‌شده برای بررسی مسائل اثرات ساختگاهی، چند شتاب‌نگاشت مصنوعی تولید شد. در مناطقی که شتاب‌نگاشت‌های مناسب جهت تحلیل‌های دینامیکی وجود نداشته باشد، استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی سازگار با طیف طراحی جایگزین مناسبی برای شتاب‌نگاشت‌های طبیعی محسوب می‌گردد. در این تحقیق برای تولید شتاب‌نگاشت از تابع پنجره زمانی ساراگونی-هارت استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که عامل بزرگنمایی بخصوص در فواصل نزدیک تأثیر چشمگیری بر شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولیدشده روی ساختگاه توپوگرافیک دارد. همچنین نشان داده شد که فرکانس گوشه موجب پیچیده‌تر شدن الگو و همچنین افزایش پیک شتاب می‌شود.

#### مراجع

- 1- Tarinejad, R, Fatehi R and Harichandarn, R.S. (2013) "Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 52, Pages 40-54.
- 2- Sohrabi-Bidar A. (2008) "Seismic Behavior Assessment of Surface Topographies Using Time Domain 3D Boundary Elements Method". Ph.D. Dissertation - Geophysics - Seismology, *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*.
- 3- Tarinejad R, Ahmadi MT, Khaji N. (2007) "Analysis of Topographic Amplification Effects on Canyon Sites using 3D Boundary Element Method". *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 9, (1): 25-37.
- 4- Tarinejad, R. Isari, M. TaghaviGhalesari, A. (2019) "A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum". *Earthq Eng & Eng Vib* (2019) 18: 267-284.
- 5- Sohrabi-Bidar ,A. Isari, M. Tarinejad, R. (2017) "Evaluation Topography Effect on the Pacoima Dam Site Using Boundary Element Method". *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*. In press.

## Simulation of artificial earthquake records using Point Source method with applying amplification effects

Mohsen Isari<sup>1\*</sup>

Seyed Amir Alavi<sup>2</sup>

Hamed Mahjoob<sup>3</sup>

Abdollah Sohrabi-Bidar<sup>4</sup>

Seyed Reza Alavi<sup>5</sup>

### Abstract

Today to design large hydraulic structures like dams, application of dynamic analysis in time domain seems very interesting due to its benefits. For applying such analysis, appropriate earthquake records that are compatible to site conditions are necessary for designer. Such information is rarely recorded for a dam site during an earthquake and usually the amount of recorded data is not sufficient for a non-uniform analysis. In this study using stochastic method, artificial earthquake records compatible to site conditions are generated and effects of distance from source and corner frequency is investigated. It is shown that increasing in corner frequency, caused to complicating simulated acceleration pattern and also the magnitude of maximum acceleration is increased. It is shown that increasing in distance caused in decreasing amplification effects at site. But in closer distances the combination of site amplification effect and distance parameters and the path have significant effect on earthquake records.

### Key Words

stochastic vibration; site effects; amplification; artificial earthquake records; acceleration simulation

---

<sup>1</sup> \* Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Bushehr, Iran.

<sup>3</sup> Master of Science, Civil Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>4</sup> Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran.

<sup>5</sup> Master of Science, Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Shiraz, Iran.