

توسعه الگوریتم تولید رکوردهای تکیه‌گاهی غیریکنواخت با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان

محسن ایثاری^۱، رضا تارینژاد^{۲*} و عبدالله سهرابی بیدار^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی زمین شناسی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۶/۱۱/۲۸، پذیرش: ۹۷/۸/۲۶، نشر آنلاین: ۹۷/۸/۲۶)

چکیده

برای پیش‌بینی و تولید شتاب در نقاط مختلف تکیه‌گاه سد، براساس رکوردهای ثبت شده یک یا چند شتاب سنج در ساختگاه سد، تلاش‌های زیادی انجام گرفته است. در این پژوهش سعی شده است، با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان، مدل‌سازی سه‌بعدی که از ساختگاه سد پاکوبما انجام گرفته، تحت تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی بررسی شود. ساختگاه مدل شده، تحت امواج مهاجم قائم SV در فرکانس‌های غالب و سرعت‌های موج برشی مختلف، بررسی شد. برای نقاط در ارتفاعات مختلف در دو سمت دره، با استفاده از تابع خطی دیگر همبستگی، تأخیر زمانی نسبت به کف دره محاسبه شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزارهای آماری قدرتمند موجود، روابط آماری برای تأخیر زمانی در دو سوی دره بر مبنای ارتفاع نقاط، سرعت موج برشی و فرکانس غالب ارائه شده است. با جایگزینی توابع تأخیر زمانی به دست آمده در الگوریتم مورد بررسی، رکوردهای تکیه‌گاهی در نقاط مختلف تولید و با رکوردهای ثبت شده مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت بالای توابع تأخیر زمانی ارائه شده می‌باشد. بنابراین می‌توان از روش توسعه داده شده در این پژوهش برای تولید رکوردهای تکیه‌گاهی از روی یک رکورد در کف دره در صورت داشتن یک تابع بزرگ‌نمایی متناسب با ساختگاه، به جای روش میانه‌یابی که در آن حداقل به سه رکورد واقعی نیاز هست، استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: تأخیر زمانی، المان مرزی، تفرق امواج، رکورد غیر یکنواخت.

۱- مقدمه

انجام شده است. طی سالیان گذشته برای تولید رکوردهای تکیه‌گاهی غیر یکنواخت و بررسی اثرات آن روی پاسخ سازه محققین بسیاری از روش‌های مبتنی بر ارتعاش تصادفی استفاده کردند. برای بیان ارتباط جابه‌جایی‌های تکیه‌گاه‌های مختلف در این روش از تابع همبستگی استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف تابع همبستگی توسط محققین مختلف ارائه شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل لوه، لوکو و وانگ، آبراهامسون، هاریچاندرا و ونمارک و درکیقیان و همکاران اشاره کرد (Tarinejad و همکاران، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳).

TaghaviGhalesari و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی روی سازه‌هایی با دهانه بلند و با استفاده از روش آنالیز ارتعاش تصادفی پرداختند. مزیت روش به

در تحلیل‌های دینامیکی رایج سدها، برای همه نقاط مختلف تکیه‌گاه از یک شتاب ثابت استفاده می‌شود. این در حالی است که مطالعات محققین نشان می‌دهد طی یک زلزله، تغییر مکان‌های متفاوتی در نقاط مختلف ساختگاه یک سد ثبت می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن تحریک غیر یکنواخت در تحلیل‌های دینامیکی سدها و سایر سازه‌های عظیمی که دارای سطح تماس گسترده با زمین می‌باشند، ضروری به نظر می‌رسد. به علت عدم دسترسی به داده‌های تاریخیچه زمانی در نقاط مختلف تکیه‌گاه سد و پیچیدگی‌های تحلیل چند تکیه‌گاهی، انجام این تحلیل را مشکل ساخته است. برای پیش‌بینی و تولید رکوردهای تکیه‌گاهی در نقاط مختلف تکیه‌گاه ساختگاه سد، تلاش‌های زیادی توسط محققین مختلف

آمده برای دره همگن را با استفاده از پارامتر نسبت سطح دره به زاویه دیواره دره‌ها دسته‌بندی کردند.

Sohrabi-Bidar و همکاران (۲۰۰۹) با توسعه روش اجزا مرزی جهت حل مسائل لرزه‌ای عوارض سه‌بعدی در حوزه زمان، پاسخ لرزه‌ای دره‌های سه‌بعدی گوسی شکل را به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. Sohrabi-Bidar و Kamalian (۲۰۱۰) با استفاده از روش ذکر شده پاسخ لرزه‌ای تپه‌های گوسی شکل سه‌بعدی تحت اثر امواج مهاجم عمودی را بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که نوع موج، هندسه ساختگاه مشتمل بر نسبت شکل و نسبت ابعاد (کشیدگی عارضه) و طول موج از پارامترهای کلیدی مؤثر بر رفتار لرزه‌ای تپه‌های سه‌بعدی می‌باشند. در این پژوهش با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان، پاسخ لرزه‌ای در ساختگاه سد پاکویما به عنوان یکی از ساختگاه‌های شناخته شده مرتبط با اثرات توپوگرافی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور یک مدل عددی سه‌بعدی دقیق از ساختگاه سد پاکویما تهیه و تحت امواج مهاجم قائم ریکر قرار گرفت. سپس تأخیر زمانی بین رکوردهای نقاط مختلف تکیه گاهی محاسبه می‌شود. بررسی الگوی بزرگ‌نمایی ایجاد شده، ارائه روابطی برای تابع تأخیر زمانی و در نهایت مقایسه رکوردهای تکیه‌گاهی تولید شده با این توابع با رکوردهای ثبت شده از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشند.

۲- فرمول‌بندی روش المان مرزی در حوزه زمان

معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$(c_1^2 - c_2^2) \times u_{j,ij}(X, t) + c_2^2 \times u_{i,jj}(X, t) + b_i - \ddot{u}(X, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن u_i بیانگر تغییر مکان و b_i بیانگر نیروی پیکری محیط است. c_1 و c_2 سرعت‌های امواج طولی و عرضی محیط را نشان می‌دهند که به ترتیب از روابط $c_1^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho}$ ، $c_2^2 = \frac{\mu}{\rho}$ می‌آیند λ و μ ضرایب لامه و ρ دانسیته جرمی محیط هستند. لازم به ذکر هست در رابطه فوق و همچنین کلیه روابط اندیسی این پژوهش قرارداد جمع انیشتین حاکم هست. معادله انتگرال مرزی حاکم بر محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، با اعمال روش باقی‌مانده‌های وزنی بر معادله (۱) مطابق زیر به دست می‌آید.

$$c_{ij}(\xi) \times u_j(\xi, t) = \int U^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes t_j(X, t) \times d\Gamma - \int P^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes u_j(X, t) \times d\Gamma \quad (2)$$

که در آن U^*_{ij} و P^*_{ij} جواب‌های اساسی معادله دیفرانسیل و به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های زام جابجایی و ترکشن نقطه x در لحظه t هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور i

کار رفته، کاهش زمان لازم برای محاسبات توابع همبستگی بین دو نقطه می‌باشد.

BI و Hao (۲۰۱۲) در پژوهش خود روش تقریبی برای مدل و شبیه‌سازی تغییرات مکانی زمین‌لرزه بر روی یک سطح ناهموار با شرایط محلی متفاوت ارائه کردند. در حالت اول بستر سنگی دارای حرکت یکسان در نقاط مختلف فرض و با استفاده از فیلتر تابع چگالی طیف توان تاجیمی-کانایی مدل شد. محققین بسیاری از جمله Papadopoulos و همکاران (۲۰۱۳)؛ Ghaffar-Zadehe (۲۰۱۳)؛ Chen و همکاران (۲۰۱۴)؛ Zhou و Yang (۲۰۱۴)؛ با ارائه روش‌هایی مبتنی بر ارتعاش تصادفی، سری‌های زمانی غیر یکنواخت روی ساختگاه سازه‌های بزرگ که دارای سطح تماس گسترده با زمین می‌باشند را ارائه کردند. در بین روش‌های عددی، روش المان مرزی در حل مسأله انتشار امواج در محیط‌های خطی کاربرد فراوانی دارد و استفاده از این روش برای محیط‌های نامحدود به دلیل آن که گسسته‌سازی فقط در مرز حوزه انجام می‌گیرد و حجم مدل‌سازی و محاسبات لازم به شدت کاهش می‌یابد، بسیار مناسب است. در این مطالعه از روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان برای حل پاسخ لرزه‌ای و بررسی رکوردهای غیر یکنواخت در یک دره واقعی استفاده شده است. در ادامه مواردی از مطالعات پیشین محققین با موضوع بررسی پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی با استفاده از روش المان مرزی بیان می‌شود.

Mossessian و Dravinski (۱۹۹۰)؛ Chopra و Zhang (۱۹۹۱)؛ Zhang و همکاران (۲۰۰۸)؛ Luzon و همکاران (۲۰۰۹)؛ Pereira و Beer (۲۰۰۹)، از جمله محققینی می‌باشند که با استفاده از روش عددی المان مرزی به بررسی تفرق امواج لرزه‌ای در توپوگرافی‌های مختلف به شکل دره و تپه پرداختند.

Kamalian و همکاران (۲۰۰۶، ۲۰۰۷) فرمول‌بندی حوزه زمان اجزاء مرزی و ترکیب آن با المان محدود را به منظور استفاده در تحلیل لرزه‌ای ساختگاه‌های دوبعدی توسعه و پاسخ لرزه‌ای برخی عوارض توپوگرافی تحت اثر امواج لرزه‌ای درون صفحه را در محیط‌های همگن و نا همگن ارائه نمودند.

Tarinejad و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی و تحلیل اثرات بزرگ‌نمایی توپوگرافی بر ساختگاه دره‌ای با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی پرداخته‌اند. آنها در حوزه فرکانس اثرات برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر بزرگ‌نمایی حاصل از زلزله از جمله فرکانس و زاویه انتشار امواج، خصوصیات مصالح مشتمل بر میرایی و ضریب پواسون و همچنین شکل دره را بررسی نمودند.

Gatmiri و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نرم‌افزار هیبرید به ارزیابی و محاسبه طیف ویژه ساختگاه در دره‌های همگن و آبرفتی پرداخته و براساس تحلیل‌های انجام شده پاسخ‌های طیفی به دست

$$F_{ij1}^{N-n+1} = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} P^*_{ij}(x, \xi, N \times \Delta t - \tau) \times M_1(\tau) d\tau$$

$$F_{ij2}^{N-n+1} = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} P^*_{ij}(x, \xi, N \times \Delta t - \tau) \times M_2(\tau) d\tau \quad (۸)$$

در این رابطه F_{ij1}^{N-n+1} و F_{ij2}^{N-n+1} هسته‌های ترکشن الاستودینامیک در حالت ثابت تغییر مکان در طی یک گام زمانی می‌باشند. با جایگذاری این توابع در معادلات انتگرالی المان مرزی رابطه (۹) حاصل می‌شود.

$$c_{ij}(\xi) \times u_i^N(\xi) = - \sum_{n=1}^N \int F_{ijL}^{N+1-n} \times u_i^N(\xi) \times d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (۹)$$

در این رابطه F_{ijL}^{N+1-n} هسته ترکشن الاستودینامیک به صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود.

$$F_{ijL}^{N-n+1}(x, \xi) = F_{ij1}^{N+1-n}(x, \xi) + F_{ij2}^{N-n}(x, \xi) \quad (۱۰)$$

با انتخاب متغیرهای سهمی مناسب برای هندسه و میدان، این کمیت‌ها برحسب مقادیر روی گره‌ها به صورت معادله (۱۱) قابل ارائه می‌باشند.

$$x_i = \Phi_\alpha(\eta_1, \eta_2) \times X_{i\alpha}$$

$$u_i = \Phi_\alpha(\eta_1, \eta_2) \times U_{i\alpha} \quad (۱۲)$$

در این رابطه $\Phi_\alpha(\eta_1, \eta_2)$ ، $\alpha=1-8$ ، $i=1,2,3$ شکل، η_1 و η_2 مختصات محلی المان می‌باشند. بعد از گسسته‌سازی متغیرها معادله حاکم بر مسئله المان مرزی به صورت معادله (۱۲) خواهد بود:

$$c_{ij}(\xi) \times u_i^N(\xi) = - \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q U_{j\alpha}^n \times \int F_{ijL}^{N+1-n}(x(\eta_1, \eta_2), \xi) \times \Phi_\alpha(\eta_1, \eta_2) \times |J| \times d\eta_1 \times d\eta_2 + u_i^{inc,N}(\xi) \quad (۱۲)$$

در این رابطه Γ_q سطح المان، Q تعداد کل المان‌های مرزی و J برابر مقدار ژاکوبین که به صورت معادله (۱۳) بیان می‌شود، است.

$$J_i = \frac{\partial x_i}{\partial \eta} = \frac{\partial \Phi_\alpha(\eta_1, \eta_2)}{\partial \eta} \times X_{i\alpha} \quad (۱۳)$$

در این رابطه n بردار نرمال عمود بر سطح المان می‌باشد. اگر رابطه (۱۲) برای تمام گره‌ها نوشته شود، با منتقل کردن مقادیر معلوم و مجهول به دو طرف معادله، در نهایت بعد از اسمبل کردن معادلات شکل ماتریسی معادلات به صورت معادله (۱۴) خواهد شد.

در نقطه ξ و در لحظه τ پدید آمده‌اند. عبارات $P^*_{ij} \otimes u_j$ و $U^*_{ij} \otimes t_j$ انتگرال‌های کانولوشن ریمن هستند. در رابطه (۲) ضرب شناخته شده ناپیوستگی در نقطه ξ است که از تکینگی جواب اساسی P^*_{ij} ناشی می‌شود. این ضرب تنها تابع هندسه مرز بوده و در هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقدار یکسانی دارد. در صورتی که محیط مورد بررسی در معرض هجوم امواج لرزه‌ای قرار گیرد، معادله انتگرال مرزی حاکم به شرح زیر اصلاح می‌شود:

$$c_{ij}(\xi) \times u_j(\xi, t) = \int U^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes t_j(X, t) \times d\Gamma - \int P^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes u_j(X, t) \times d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (۳)$$

که در آن (u_i^{inc}) تغییر مکان حاصله از موج مهاجم را بیان می‌دارد. در مسائل توپوگرافی همگن، مرز شامل سطح آزاد زمین و تنش-های سطحی همواره برابر صفر است، بنابراین معادله (۳) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$c_{ij}(\xi) \times u_j(\xi, t) = - \int P^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes u_j(X, t) \times d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (۴)$$

برای حل مسئله به روش عددی می‌بایست معادله انتگرال مرزی به گونه‌ای بیان شود که مجموعه‌ای از معادلات خطی حاصل گردیده و با حل آنها جواب مسئله مقدار مرزی به دست می‌آید. به منظور تبدیل معادله انتگرالی حاکم به شکل مطلوب، آن را ابتدا در زمان، و سپس در مکان جداسازی می‌نماییم. نهایتاً معادلات به دست آمده به شکل ماتریسی بیان خواهند شد. برای جداسازی معادلات در زمان محور زمان را به N بازه زمانی مساوی Δt تقسیم می‌کنیم:

$$t = N \times \Delta t \quad (۵)$$

با استفاده از حالت تغییرات خطی زمان، جایابی به صورت معادله (۶) خواهد شد.

$$u(X, \tau) = M_1(\tau) \times u^n(X) + M_2(\tau) \times u^{n-1}(X) \quad (۶)$$

در این رابطه $M_1(\tau)$ و $M_2(\tau)$ توابع خطی انترپولاسیون زمان را به صورت معادله (۷) بیان می‌شود.

$$(n-1) \times \Delta t < \tau < n \times \Delta t$$

$$M_1(\tau) = \frac{\tau - t_{n-1}}{\Delta t}, M_2(\tau) = \frac{t_n - \tau}{\Delta t} \quad (۷)$$

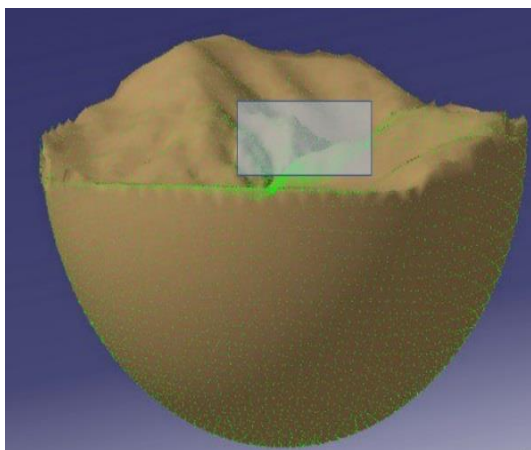
زیرنویس ۱ و ۲ توابع انترپولاسیون در طی یک گام زمانی می‌باشد. معادلات انتگرال مرزی حاکم در زمان، شامل جواب اساسی ترکشن و توابع خطی انترپولاسیون به صورت معادله (۸) بیان می‌شود:

به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه مدل شده، از امواج مهاجم قائم ریکر SV که موج برشی با ارتعاش ذرات عمود بر محور سد (y) می‌باشند، استفاده شد. سپس در کد کامپیوتری بمسا (Sohrabi-Bidar, ۲۰۱۰، ۲۰۱۳) که براساس المان مرزی سه بعدی در حوزه زمان می‌باشد، محاسبه و نتایج حاصله در دو حوزه زمان و بزرگ‌نمایی تجزیه و تحلیل شدند. رابطه (۱۶) معادله موج ریکر را بیان می‌کند.

$$f(t) = A_{max} \times [1 - 2 \times (\pi \times f_p \times (t - t_0))^2] \times e^{-\pi \times f_p \times (t - t_0)^2} \quad (16)$$

در این رابطه، f_p ، t_0 و A_{max} به ترتیب فرکانس غالب، پارامتر شیفت زمانی و بیشینه دامنه را بیان می‌دارند. $f(t)$ دامنه حرکت ناشی از امواج مهاجم است که در همه گره‌های مرزی وارد می‌گردد. برای تحقیق حاضر در فرکانس‌های غالب تا ۴ یک مدل سه‌بعدی از ساختگاه به شعاع ۵۰۰۰ متر با ۱۲۱۸ المان ۸ گرهی آماده شده است. پارامتر شیفت زمانی برای این تحلیل ۰/۲۵ ثانیه و بیشینه دامنه ۰/۰۰۱ متر در نظر گرفته شده است. میانگین ابعاد المان در بخش مرکزی مدل در حدود ۴۰ متر است که به سمت کناره‌های مدل به تدریج افزایش می‌یابد. برای فرکانس‌های غالب بالاتر از ۴ مدل با میانگین ابعاد المان ۲۰ متر در بخش مرکزی و شیفت زمانی ۰/۱۲۵ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) مدل سه بعدی توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما را نشان می‌دهد.

برای تولید رکوردهای تکیه‌گاهی در این پژوهش از روش ارائه شده توسط Alves استفاده شد. Alves در سال ۲۰۰۴ با استفاده از توابع انتقال که در برگزیده بزرگ‌نمایی و تأخیر فاز می‌باشد و با فرض انتشار عمودی امواج روشی برای تولید سری‌های زمانی تحریک غیر یکنواخت از روی یک رکورد سه مؤلفه‌ای واقع در پایین‌ترین نقطه دره ساختگاه سد پاکویما و دو رکورد در دو سمت دیواره ارائه کرده است.



شکل ۲- مدل سه‌بعدی توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما

$$\hat{F}^1 \times U^N = Z^N + U^{inc.N} \quad (14)$$

در این رابطه عبارت Z^N مربوط به تاریخچه دینامیکی لحظات قبل بوده و همه پارامترهای آن معلوم است.

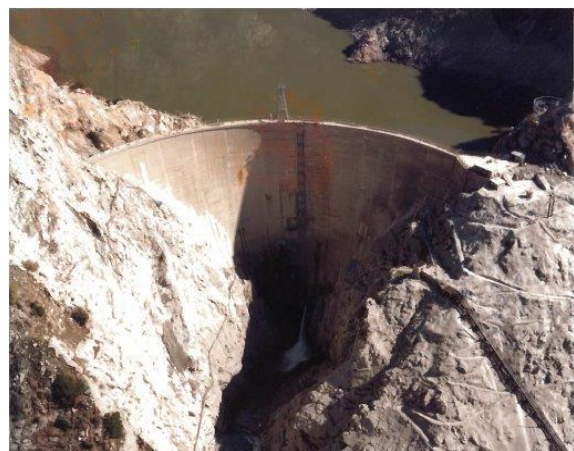
$$Z^N = \sum_{n=1}^{N-1} \hat{F}^{N+1-n} \times U^n \quad (15)$$

در نهایت ماتریس حاصل شده ماتریس مربعی دارای ابعاد $3Q \times 3Q$ می‌باشد که با استفاده از روش‌های استاندارد حل ماتریس، مقادیر مجهول جابجایی روی مرز را به دست آورد. لازم به ذکر است که محاسبه انتگرال‌های منفرد موجود روی قطر ماتریس با استفاده از تکنیک غیر مستقیم جسم صلب صورت می‌گیرد که مستلزم بسته بودن مرزهای مسأله و در نتیجه به کارگیری المان‌های مجازی در محیط‌های نیمه بی‌نهایت است (Sohrabi-Bidar, ۲۰۰۸).

۳- متدولوژی و مدل‌سازی

برای انجام تحقیق حاضر توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما (شکل (۱)) مدل شد. دلیل این انتخاب، ساختگاه نسبتاً هموزن این منطقه که بستری مناسب برای ارضا فرضیات استفاده شده در حل مسأله انتشار امواج و بررسی اثر پدیده تشدید توپوگرافی تحت تحریک غیر یکنواخت تکیه‌گاهی در طول یک زمین لرزه را فراهم کرده، می‌باشد. محل قرارگیری سد پاکویما در کوه‌های سن گابریل در ۵ مایلی شمال سن فرناندو و در نزدیکی لس‌آنجلس در جنوب کالیفرنیا است (Tarinejad و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۳).

خصوصیات مصالح ساختگاه سد براساس مطالعات در محل انجام شده در مرجع (Alves, ۲۰۰۴) در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی سه‌بعدی دره ساختگاه سد پاکویما با استفاده از نقشه-های توپوگرافی موجود (مدل رقومی ارتفاع) آماده شد.



شکل ۱- سد پاکویما

علاوه بر بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمانگاه تحت فرکانس‌های غالب مختلف، مدل تحت سرعت‌های برشی مختلف که در مرجع (Alves, 2004) به محدوده آن اشاره شده، نیز قرار گرفت و رفتار لرزه‌ای آن بررسی شد. برای محاسبه تأخیر زمانی بین تکیه‌گاه‌های مختلف با پایین‌ترین نقطه دره، ۱۰ نقطه هم تراز در دو سوی دره در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از تابع دیگر همبستگی، تأخیر زمانی بین رکوردهای تکیه‌گاهی در فرکانس‌ها و سرعت‌های مختلف تعیین شد. به عنوان نمونه، جدول (۱) مقادیر تأخیر زمانی محاسبه شده در ۱۰ نقطه تعیین شده در سمت چپ دره در فرکانس‌های غالب مختلف و سرعت موج برشی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. چنانکه که از این جدول قابل مشاهده است، با افزایش فرکانس غالب، تأخیر زمانی بین رکوردهای مختلف تکیه‌گاهی کاهش پیدا کرده است. به دلیل تفرق و انعکاس امواج لرزه‌ای از سطوح توپوگرافی مقادیر تأخیر زمانی حاصل از تابع دیگر همبستگی بین رکوردهای تکیه‌گاهی با نسبت اختلاف ارتفاع به سرعت موج برشی برای این تکیه‌گاه‌ها متفاوت می‌باشند. شکل (۴) نمودار همبستگی متقاطع رکوردهای تکیه‌گاهی مربوط به نقاط A, B, C و D در فرکانس غالب ۱/۵ هرتز را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر تأخیر زمانی محاسبه شده بین نقاط در

ترازهای ارتفاعی مختلف با کف دره در سمت چپ

ΔH	Fp=1.5	Fp=2	Fp=3	Fp=4
۰	۰	۰	۰	۰
۶۱	۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲۵
۹۱	۰/۱۲	۰/۰۷۵	۰/۰۶۵	۰/۰۵
۱۲۰	۰/۱۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷	۰/۰۵
۱۵۷	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵
۱۷۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۲۲۳	۰/۱۷	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
۲۶۶	۰/۱۷۵	۰/۱۷۵	۰/۱۵	۰/۱۵
۲۸۶	۰/۲	۰/۱۷۵	۰/۱۷۵	۰/۱۷۵
۳۳۲	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲	۰/۲
Fp=5	Fp=5.5	Fp=6.5	Fp=7.5	Fp=9
۰	۰	۰	۰	۰
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
۰/۰۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۰۶	۰/۰۶
۰/۰۷۵	۰/۰۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵
۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
۰/۱۲	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵	۰/۱۲	۰/۱۲
۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳۵
۰/۱۶۵	۰/۱۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵	۰/۱۶۵
۰/۱۸	۰/۱۶۵	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸
۰/۲۱	۰/۱۹۵	۰/۱۹۵	۰/۱۹۵	۰/۲۱

ایشان برای برای بازسازی از دو کمیت مهم بزرگ‌نمایی و تأخیر زمانی استفاده نموده است. بزرگ‌نمایی عبارت است از دامنه تابع انتقال بین یک رکورد پایه و یک رکورد تکیه‌گاهی. فاز تابع انتقال به صورت حاصل ضرب منفی تأخیر زمانی ($-\tau$) در بردار فرکانس ω بیان می‌شود. بنابراین با در اختیار داشتن بزرگ‌نمایی و فاز تابع انتقال به راحتی می‌توان رکوردهای تکیه‌گاهی مورد نظر را با استفاده رابطه زیر تولید کرد.

$$A_n(\omega) = Amp_{n,m}(\omega)e^{-i\omega\tau_{n,m}(\omega)}A_m(\omega) \quad (17)$$

در این رابطه، $A_m(\omega)$ و $A_n(\omega)$ به ترتیب تبدیل فوریه شتاب‌های ثبت شده در تکیه‌گاه و پایه می‌باشند. $Amp_{n,m}(\omega)$ تابع بزرگ‌نمایی و $\tau_{n,m}(\omega)$ تابع تأخیر زمانی بین دو رکورد n و m می‌باشد. با تعیین توابع تأخیر زمانی و بزرگ‌نمایی در این ساختگاه و در فرکانس‌های غالب مختلف، تابع انتقال فرکانسی بین هر دو جفت رکورد مورد نظر، با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید (Alves, 2004).

$$TF(\omega) = Amp_{n,m}(\omega)e^{-i\omega\tau_{n,m}(\omega)} \quad (18)$$

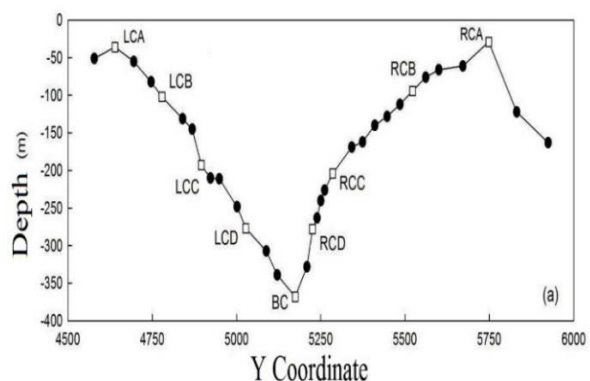
برای محاسبه تأخیر زمانی بین رکوردهای ثبت شده از تابع دیگر همبستگی این دو رکورد استفاده می‌شود.

$$-d \leq \tau \leq d$$

$$c_{n,m}(\tau) = \int_0^d a_n(t + \tau)a_m(t)dt$$

$$\tau_{n,m} = \{\tau: c_{n,m}(\tau) \rightarrow \max\} \quad (19)$$

در این رابطه، $c_{n,m}(\tau)$ همبستگی متقاطع دو رکورد m و n و d طول مدت رکورد شتاب می‌باشد. بنابراین تأخیر زمانی بین دو رکورد m و n معادل است با $time\ lag$ که در آن تابع دیگر همبستگی ماکزیمم می‌شود. برای انجام پژوهش حاضر، مدل سه-بعدی تهیه شده از ساختگاه سد، تحت موج برشی قائم ریکر SV در فرکانس‌های غالب ۱/۵ تا ۹ قرار گرفت.



شکل ۳- پروفیل عرضی دره

۴- بررسی بزرگ‌نمایی

شکل‌های (۵) و (۶) نمودارهای بزرگ‌نمایی حاصل از تحلیل عددی به روش المان مرزی در دیواره‌های راست و چپ دره محل سد پاکویما نسبت به کف دره را نشان می‌دهد. منحنی‌های بزرگ‌نمایی برای حالت موج برشی در جهت y در فرکانس‌های غالب $1/5$ ، 4 ، $6/5$ و 9 نشان داده شده است. برای محاسبه منحنی بزرگ‌نمایی در این پژوهش از نسبت طیف فوریه نگاشت‌های به دست آمده در هر نقطه نسبت به طیف فوریه نگاشت‌های نقطه کف دره استفاده شده است. همان‌گونه دیده می‌شود، نقاط مختلف دره نسبت به کف آن دارای الگوی بزرگ‌نمایی نسبتاً مشابهی هستند. در اکثر نقاط قله‌های بزرگ‌نمایی قابل توجهی به خصوص در فرکانس‌های 7 تا 10 هرتز قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد در هر دو سوی دره با افزایش ارتفاع، دامنه بزرگ‌نمایی به خصوص در فرکانس‌های 7 تا 10 هرتز افزایش می‌یابد. با این حال بیشتر بودن دامنه بزرگ‌نمایی در نقاط هم‌تراز دیواره سمت چپ دره نسبت به دیواره سمت راست دره کاملاً مشخص می‌باشد.

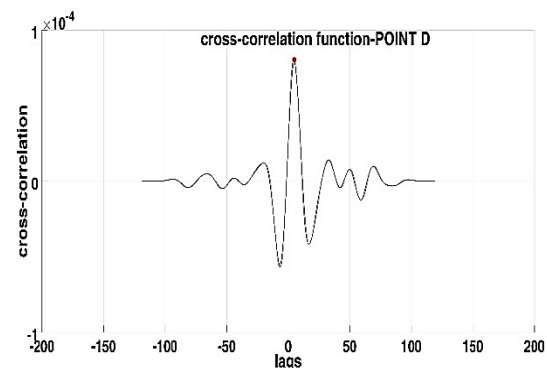
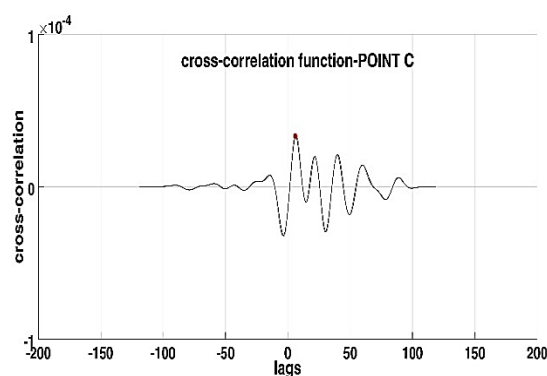
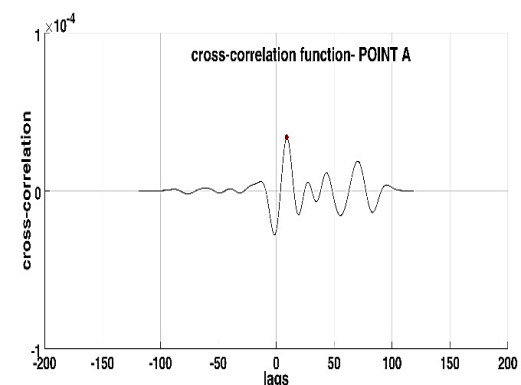
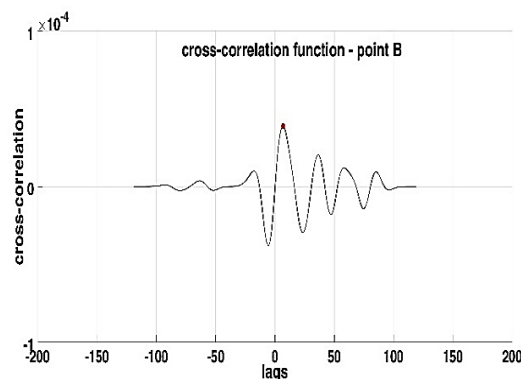
۵- تولید رکوردهای تکیه‌گاهی و مقایسه نتایج

شکل (۶) نمودار رکوردهای تکیه‌گاهی تولید شده با استفاده از روش توسعه داده شده Alves در مقایسه با رکوردهای ثبت شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، برای توسعه روش تولید رکوردهای تکیه‌گاهی، ابتدا با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان رکوردهای جایجایی در نقاط مختلف تکیه‌گاهی ایجاد شد. سپس با استفاده از توابع خطی دیگر همبستگی، تأخیر زمانی رکوردهای تکیه‌گاهی در سرعت‌ها و فرکانس‌های غالب بررسی شده، نسبت به کف دره حاصل شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزارهای قدرتمند آماری موجود، تابع تأخیر زمانی برای سمت چپ رابطه (۲۰) و برای سمت راست رابطه (۲۱) ارائه شد. روابط ارائه شده که بر مبنای تحلیل‌های آماری انجام شده، برحسب اختلاف ارتفاع از پایین‌ترین نقطه (کف دره)، فرکانس غالب و سرعت موج برشی می‌باشند.

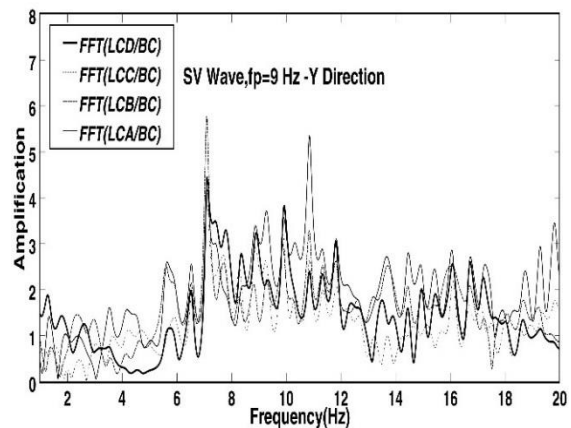
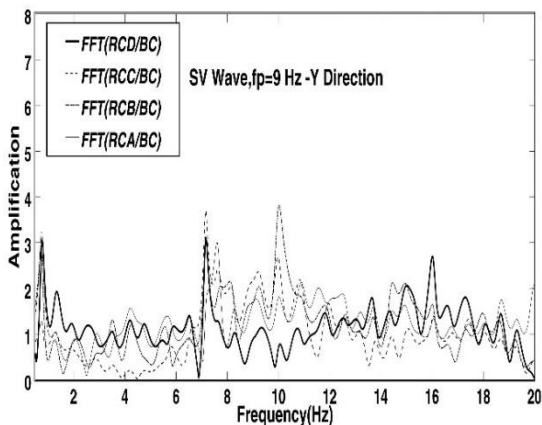
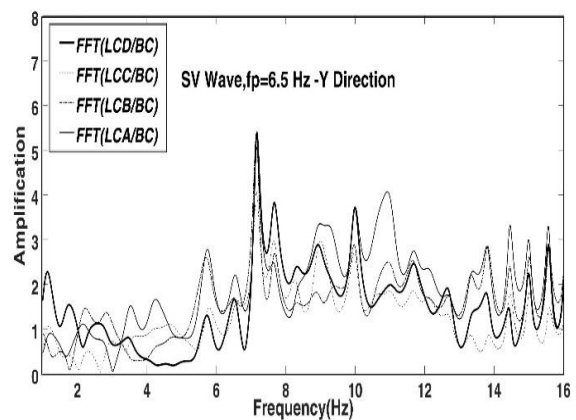
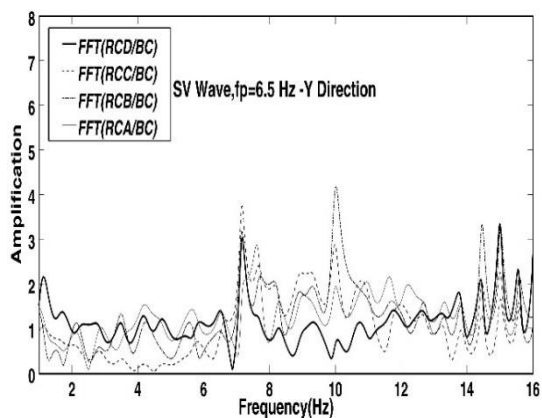
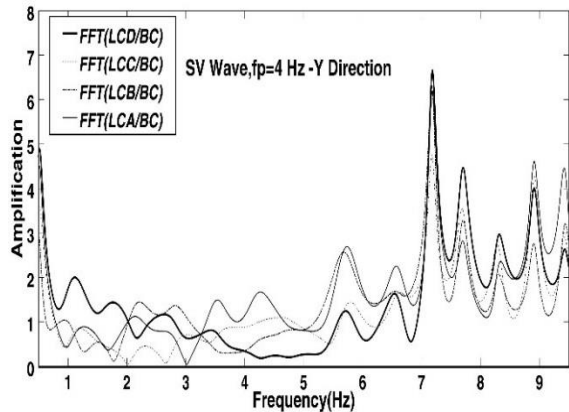
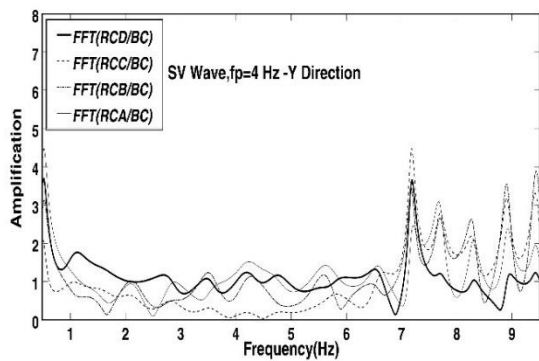
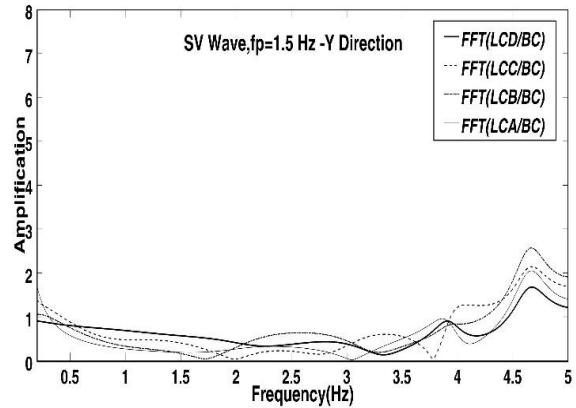
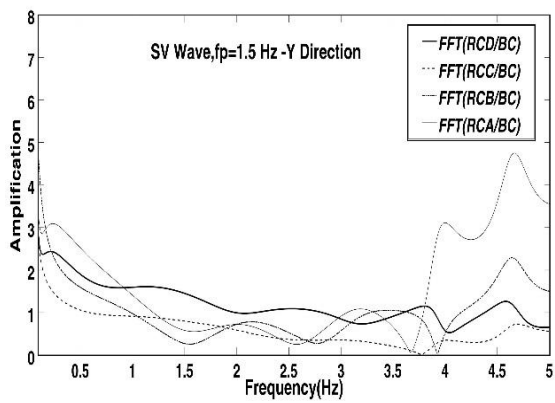
$$\tau_{n,m} = 0.989 * \left(\frac{h_{n,m}}{c}\right) - \left(\frac{0.0004067}{f_p}\right) + 0.0068 \quad (20)$$

$$\tau_{n,m} = 0.974 * \left(\frac{h_{n,m}}{c}\right) + \left(\frac{0.0445}{f_p}\right) + 0.0018 \quad (21)$$

در این روابط c سرعت موج برشی، h اختلاف ارتفاع نقطه مورد بررسی از کف دره می‌باشد. برای بررسی دقت روابط ارائه شده دو نقطه A و D در دو سوی دره انتخاب شدند.



شکل ۴- نمودار همبستگی متقاطع رکوردهای تکیه‌گاهی مربوط به نقاط A, B, C و D در فرکانس غالب $1/5$ هرتز



شکل ۶- نمودار بزرگنمایی توپوگرافی در موج SV در سمت راست دره

شکل ۵- نمودار بزرگنمایی توپوگرافی در موج SV سمت چپ دره

بنابراین روابط ریاضی ارائه شده روی این ساختگاه مناسب می‌باشند. در عین حال می‌توان با انجام روش مشابه انجام شده در این پژوهش، روی مدل‌های پارامتری، روابط ریاضی تأخیر زمانی جامع‌تری، متناسب برای ساختگاه‌هایی به شکل V را در حالت‌های مختلف نسبت شکل دره (نسبت عمق به دهانه دره) محاسبه و ارائه کرد.

برای صحت‌سنجی روابط ریاضی ارائه شده در این تحقیق، علاوه بر مقایسه رکوردهای تولید شده با استفاده از توابع تأخیر زمانی و خروجی‌های به دست آمده از روش المان مرزی در حوزه زمان، از تأخیرهای زمانی بین رکوردهای واقعی ثبت شده روی ساختگاه طی زلزله روی داده در سال ۲۰۰۱ نیز استفاده شد. در جدول (۲) نتایج این مقایسه ارائه شده است.

از نتایج حاصل شده از مقایسه رکوردهای تولید شده، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت دسترسی به یک تابع بزرگ‌نمایی متناسب با خصوصیات ساختگاه، با استفاده از رابطه (۱۷) و توابع تأخیر زمانی ارائه شده، می‌توان با داشتن یک رکورد واقعی در کف دره، شتاب‌های غیر یکنواخت متناسب با ساختگاه را در نقاط مختلف روی دره پاکویما تولید کرد.

همچنین می‌توان از روش ارائه شده، به جای روش میانه بایی Alves که برای تولید رکورد به حداقل سه رکورد ثبت شده واقعی روی ساختگاه نیاز دارد، استفاده کرد.

جدول ۲- مقایسه بین تأخیر زمانی محاسبه شده بین کف دره و نقاط روی دیواره دره طی زلزله ۲۰۰۱ و مقادیر محاسبه شده با

استفاده از روابط ارائه شده در این پژوهش

	تخمین	ثبت شده
تکیه‌گاه سمت راست و کف دره	۰/۰۶۳۸	۰/۰۶۶
تکیه‌گاه سمت چپ و کف دره	۰/۰۴۱	۰/۰۴۸

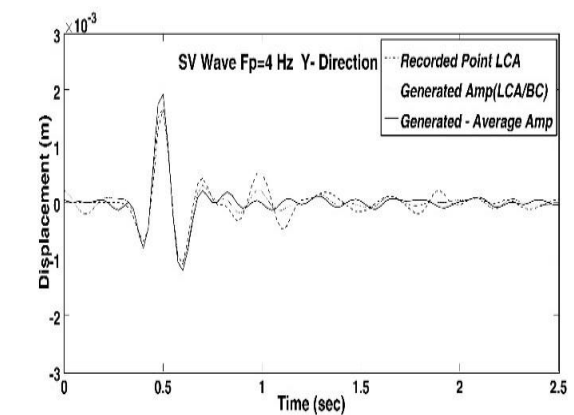
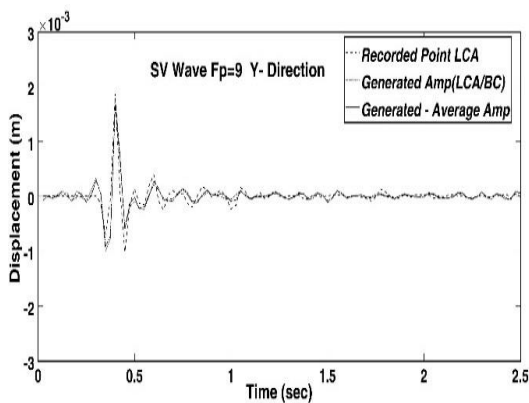
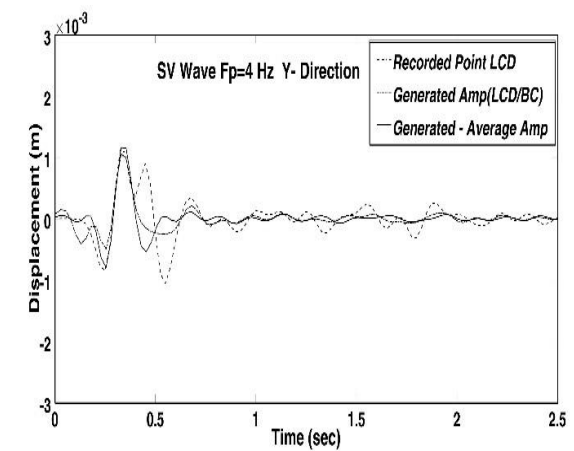
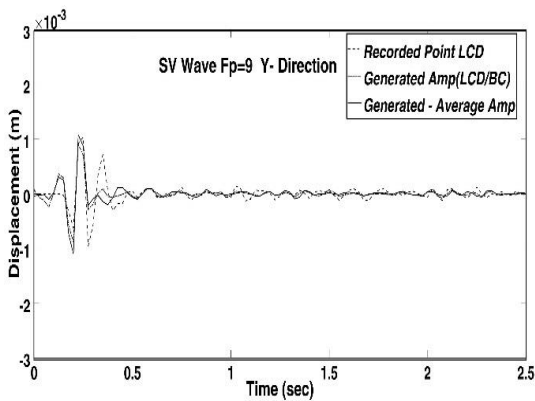
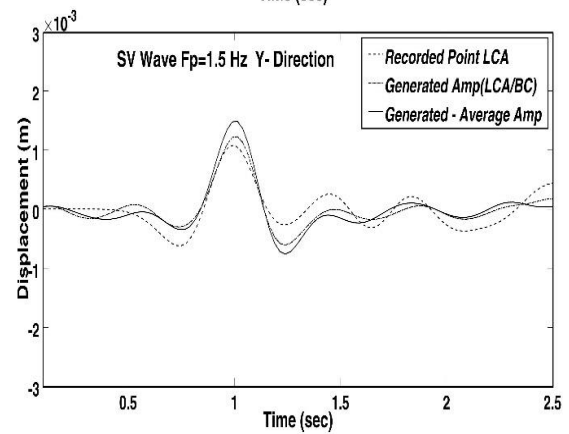
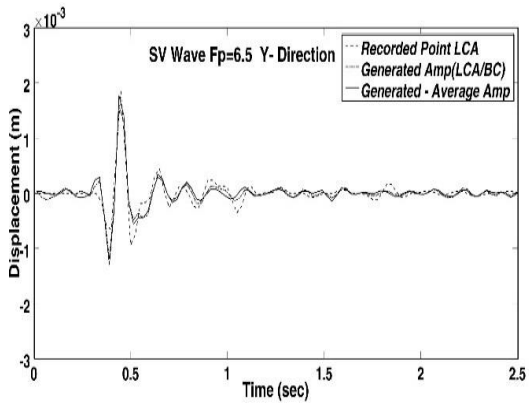
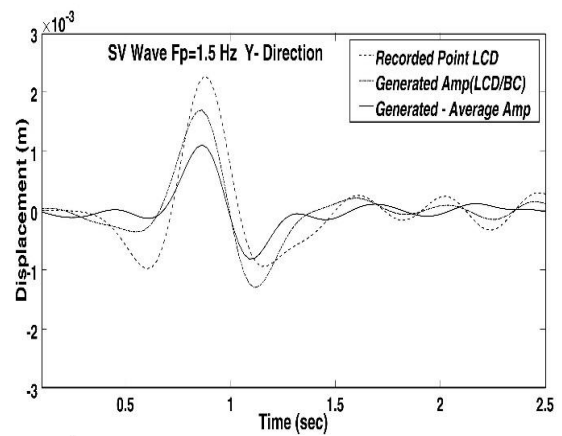
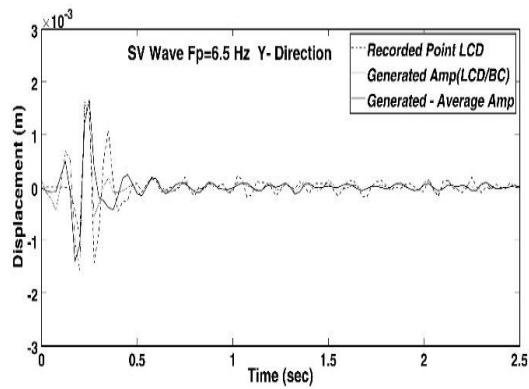
برای تولید رکوردهای تکیه‌گاهی با استفاده از رابطه (۱۷)، ابتدا تأخیر زمانی برای نقاط A و D که در نقاط مشخص شده در شکل (۳) به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف (۳۳۲ و ۹۱ متر) ارتفاع را از کف دره دارند، با استفاده از روابط آماری ارائه شده تخمین زده شد. سرعت موج برشی ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و فرکانس غالب به ترتیب ۱/۵، ۴، ۶/۵ و ۹ در نظر گرفته شد. برای تولید رکورد از بزرگ‌نمایی هر نقطه نسبت به کف دره استفاده و با جای-گذاری در رابطه (۱۷) و با گرفتن عکس تبدیل فوریه از خروجی آن نتایج در حوزه زمان برای این دو نقطه ارائه شد.

در ادامه تحلیل‌های انجام شده، برای بررسی امکان تولید رکوردهای تکیه‌گاهی با استفاده از یک تابع بزرگ‌نمایی برای تمام نقاط تکیه‌گاهی به همراه تابع تأخیر زمانی، از میانگین وزنی تابع بزرگ‌نمایی (نسبت به ارتفاع نقاط) برای مقایسه با رکوردهای ثبت شده استفاده شد. همانگونه که در شکل‌های (۷) و (۸) دیده می‌شود، استفاده از توابع تأخیر زمانی ارائه شده در کنار تابع بزرگ‌نمایی هر نقطه، نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد. بخصوص برای نقاط سمت راست انطباق نتایج نسبت به سمت چپ دره محسوس می‌باشد. علاوه بر این، نشان داده شد که استفاده از تابع بزرگ‌نمایی وزنی در کنار تابع تأخیر زمانی ارائه شده نیز نتایج نسبتاً قابل قبولی را به همراه دارد. بدین معنی است که می‌توان برای تولید رکوردهای تکیه‌گاهی فقط با داشتن تابع میانگین وزنی و تابع تأخیر زمانی با استفاده از روش Alves برای تمام نقاط در فرکانس‌های مختلف رکوردهای تکیه‌گاهی نسبتاً مناسبی را به دست آورد.

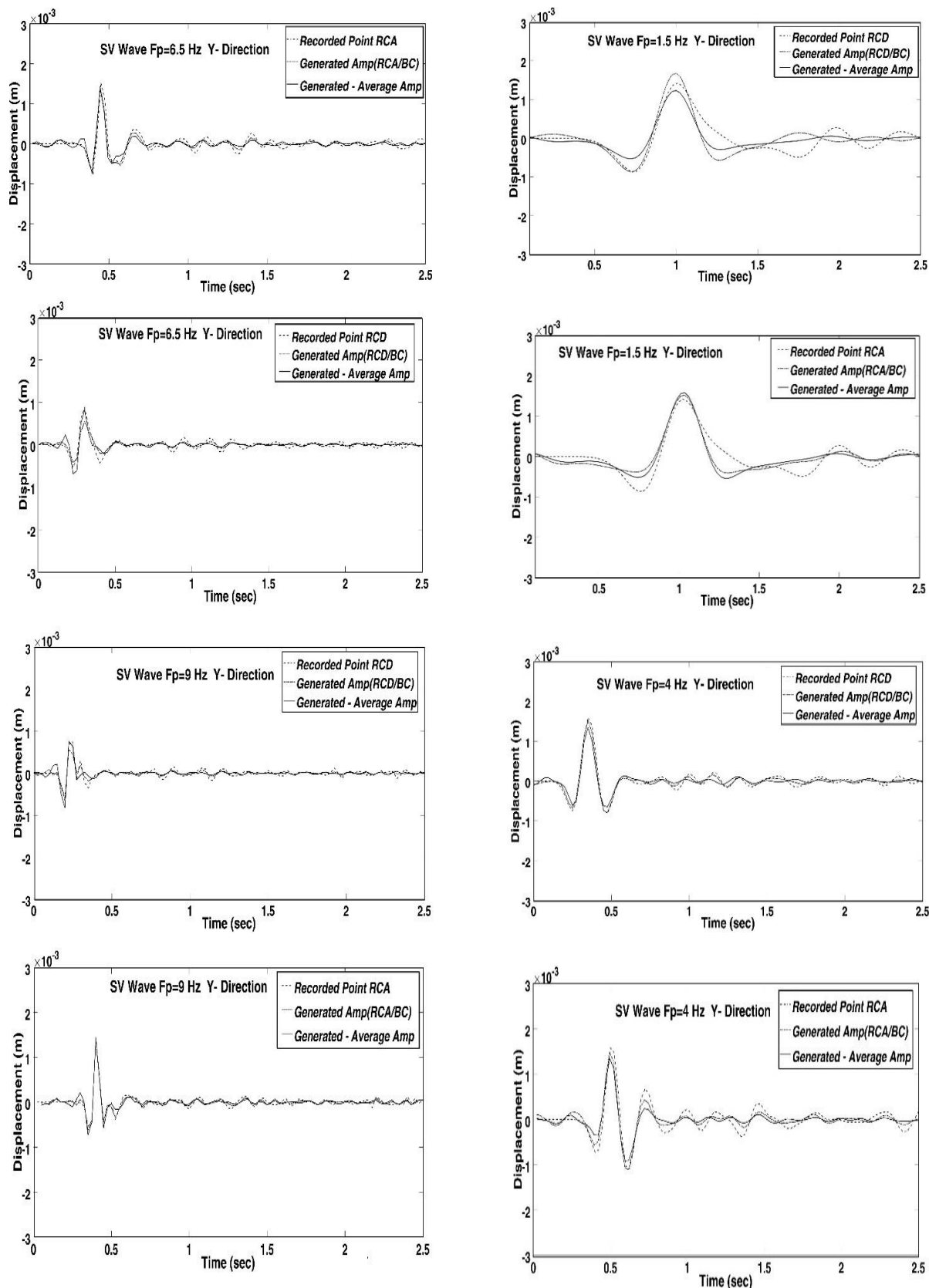
در رابطه (۲۲) پارامتر Amp بزرگ‌نمایی و h ارتفاع نقاط از کف دره می‌باشد.

$$\overline{Amp} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot Amp_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (22)$$

چنانکه در شکل‌های (۷) و (۸) دیده می‌شود، دامنه جابه‌جایی برای نقاط در سمت چپ دره در مقایسه با نقاط هم‌تراز در سوی راست دره بیشتر است. همچنین مقایسه نقاط سمت چپ و راست دره نشان می‌دهد، به دلیل عدم تقارن دره به خصوص در قسمت‌های فوقانی، تاریخچه تغییر مکان نقاط هم‌تراز دارای تفاوت‌هایی در دو سمت دره هستند. به طور کلی و به خصوص در ترازهای بالاتر دره و متأثر از عدم تقارن دره دامنه جابه‌جایی در سمت چپ در مقایسه با سمت راست مقادیر بزرگ‌تری را تجربه کرده است. چنانکه اشاره شد، توابع تأخیر زمانی ارائه شده در این پژوهش روی مدل واقعی تهیه شده از ساختگاه سد پاکویما با استفاده از خروجی‌های به دست آمده از روش المان مرزی سه-بعدی در حوزه زمان به دست آمد.



شکل ۷- نمودارهای مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی حاصل از مدل سازی عددی و تولید رکورد تکیه گاهی غیر یکنواخت با استفاده از روش Alves در سمت چپ دره



شکل ۸- نمودارهای مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی حاصل از مدل سازی عددی و تولید رکورد تکیه گاهی غیر یکنواخت با استفاده از روش Alves در سمت راست دره

Kamalian MK, Jafari A, Sohrabi Bidar A, Razmkhah B, Gatmiri, B, "Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE/BE Method", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2006, 26, 8, 753-765.

Mossessian TK, Dravinski M, "Amplification of elastic waves by a three dimensional valley", part2: Transient Response, *Transient Response, Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 119.

Papadopoulos S, Lekidis V, Sextos A, Karakostas C, "Assessment of Ec8 Procedures for the Asynchronous Excitation of Bridges Based On Numerical Analyses and Recorded Data", 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2013.

Sohrabi-Bidar A, "Seismic Behavior Assessment of Surface Topographies Using Time Domain 3D Boundary Elements Method", PhD Thesis Geophysics- Seismology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2008.

Sohrabi-Bidar, A, Kamalian M, "Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Elsevier). September, 2013, 52, 1-12.

Sohrabi-Bidar A, Kamalian M, Jafari MK, "Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves", *Geophys. J. Int.*, 2010 183, 1429-1442.

Tarinejad R, Ahmadi MT, Khaji N, "Analysis of Topographic Amplification Effects on Canyon Sites using 3D Boundary Element Method. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 2007, 9 (1), 25-37.

Tarinejad R, Fatehi R, Harichandarn RS, "Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 52, 40-54.

Tarinejad R, Pirboudaghi S, "Dynamic Analysis of Dam-Reservoir Interaction by Euler-Lagrange Approach Using Perfectly Matched Layer (PML) in Radiation Boundary", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2014, 44, 1 (74), 13-24.

Yang D, Zhou J, "A stochastic model and synthesis for near-fault impulsive ground motions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 44, 243-264.

Zhang Y, Li Q, Lin J, Williams F, "Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, doi: 10.1016/06.007.

Zhang YH, Li QS, Lin JH, Williams FW, "Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29, 620-629.

Zhang L, Chopra AK, "Three-Dimensional Analysis of spatially varying ground motions around a uniform canyon in a homogeneous half-space", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20, 911-926.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش المان مرزی سه بعدی برای توسعه روش تولید رکوردهای تکیه گاهی غیر یکنواخت در یک ساختگاه واقعی به کار گرفته شد. مقایسه رکوردهای تولید شده با استفاده از توابع تأخیر زمانی ارائه شده بر مبنای تحلیل های آماری و رکوردهای تکیه گاهی ناشی از روش المان مرزی تطابق قابل قبولی را نشان می دهد. علاوه بر این استفاده از میانگین وزنی تابع بزرگنمایی در کنار تأخیر زمانی ارائه شده، برای تولید رکورد تکیه گاهی در هر نقطه از ساختگاه در فرکانس های غالب مختلف، کارایی روش مورد استفاده در محاسبه جنبش های غیر یکنواخت تکیه گاهی را نشان می دهد. بنابراین می توان از روش توسعه داده شده در این پژوهش برای تولید رکوردهای غیر یکنواخت تکیه گاهی، از روی یک رکورد ثبت شده در کف دره استفاده کرد.

۷- مراجع

Alves SW, "Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Nonuniform Ground Motion", PhD Thesis. California Institute of Technology Pasadena, California, 2004.

Bi K, Hao H, Bilici Y, "Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2012, 29, 92-104.

Chen H, Li Y, Ren J, "Fully Nonstationary Spatially Variable Ground Motion Simulations Based on a Time-Varying Power Spectrum Model", *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 293182, 2013, 10.

Gatmiri B, Arsonb C, Nguyen KV, "Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method I. Theory, numerical optimization and application to topographical irregularities", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28, 632-645.

Gatmiri B, Maghoul P, Arson C, "Site-specific spectral response of seismic movement due to geometrical and geotechnical characteristics of sites", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29; 51-70.

Ghaffar-Zadehe H, Response Spectrum Based Generation of Spatially Varying Earthquake Using Artificial Neural Networks", *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 2013, 37, C2, 233-242. Printed in the Islamic Republic of Iran.

Kamalian M, Gatmiri B, Sohrabi-Bidar A, Khalaj A, "Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2007, 23, 871-887.

Luzon F, Sanchez-Sesma FJ, Perez-Ruiz JA, Ramirez-Guzman L, "In-plane seismic response of inhomogeneous alluvial valleys with vertical gradients of velocities and constant Poisson ratio", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29, 994-1004.

EXTENDED ABSTRACT

Extension of Algorithm for Support Non-Uniform Record Using Time Domain 3D Boundary Elements Method

Mohsen Isari ^a, Reza Tarinejad ^{a,*}, Abdollah Sohrabi-Bidar ^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 17 February 2018; **Accepted:** 17 December 2018

Keywords:

Time Delay, Boundary Element, Wave Scattering, Non-Uniform Record.

1. Introduction

It is well established that the seismic ground response of surface topographies may differ from those of free field motion during earthquakes. Although the topography effect on ground response can be crucial when the wavelength is comparable to irregularity dimensions, only a few building codes have considered this issue. This is because of the complex nature of seismic wave scattering by topographical structures, which can only be solved accurately and economically using advanced numerical methods under realistic conditions. Among the numerical methods, the BEM is a very effective tool for dynamic analysis of linear elastic bounded and unbounded media. In this research, a three-dimensional model of the Pacoima dam site is prepared. Time domain 3D boundary element method is used to apply the non-uniform excitation at the dam supports. This model is subjected to the vertically propagating incident S waves. Time delay can be characterized by calculating the value of time delay for which the cross-correlation between two records is maximized. Finally, to obtain the time delay in topographic site, a function considering effective parameters such as the height from the canyon base, wave velocity and predominant frequency, is presented. Furthermore, a code was developed for generating the spatial variation of seismic ground motions.

2. Methodology

The numerical parametric study was executed using the time- domain Boundary element formulation for three-dimensional elasto-dynamics. The governing equation for an elastic, isotropic, and homogeneous body with a small amplitude displacement field can be written as:

$$(c_1^2 - c_2^2) \times u_{j,ij}(X, t) + c_2^2 \times u_{i,jj}(X, t) + b_i(X, t) - \ddot{u}(X, t) = 0 \tag{1}$$

in which u_i denotes the displacement vector; b_i denotes the body force vector and; c_1 and c_2 are the spreading velocities of the compressional and shear waves, respectively, where $c_1^2 = \frac{(\lambda+2\mu)}{\rho}$, $c_2^2 = \frac{\mu}{\rho}$ with λ and μ being the Lamé constants, and ρ the mass density. In this paper, assuming the linear behavior of media, the body forces are disregarded. The corresponding governing boundary integral equation for an elastic, isotropic, homogeneous body, ignoring contributions from initial conditions and body forces, can be obtained using the well-known weighted residual method (Sohrabi-Bidar 2008) as:

$$c_{ij}(\xi) \times u_j(\xi, t) = \int U^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes t_j(X, t) \times d\Gamma - \int P^*_{ij}(X, \xi, t) \otimes u_j(X, t) \times d\Gamma \tag{2}$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: isari.mohsen@tabrizu.ac.ir (Mohsen Isari), r_tarinejad@tabrizu.ac.ir (Reza Tarinejad), asohrabi@ut.ac.ir (Abdollah Sohrabi-Bidar).

U^*_{ij} and P^*_{ij} are the transient displacement and traction fundamental solutions of Eq. 1, respectively, and denote the j th components of the displacements and tractions at point x at time t due to a unit point force applied in direction i at point ξ at preceding time τ . $U^*_{ij} \otimes t_j$ and $P^*_{ij} \otimes u_j$ denote the Riemann convolution integrals and c_{ij} is the discontinuity term resulting from the singularity of the traction fundamental solution. For seismic loading, assuming that the total displacement can be split into incident (u_i^{inc}) and scattered (u_i^{sc}) components. For the linear time variation of the field variable, the time integration involves the traction fundamental solution and the temporal shape function products expressed as:

$$F_{ij1}^{N-n+1} = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} P^*_{ij}(x, \xi, N \times \Delta t - \tau) \times M_1(\tau) d\tau$$

$$F_{ij2}^{N-n+1} = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} P^*_{ij}(x, \xi, N \times \Delta t - \tau) \times M_2(\tau) d\tau \tag{3}$$

where F_{ij2}^{N-n+1} and F_{ij1}^{N-n+1} are the causal time-convoluted elastodynamic traction kernels for the forward and the backward time nodes during a time step, respectively. By substituting above kernels, the time convoluted boundary element equation for linear time variation is:

$$c_{ij}(\xi) \times u_i^N(\xi) = -\sum_{n=1}^N \int F_{ijL}^{N+1-n} \times u_i^N(\xi) \times d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \tag{4}$$

takes the following matrix form:

$$\hat{F}^1 \times U^N = Z^N + U^{inc.N} \tag{5}$$

Where Z^N includes effects of the past dynamic history:

$$Z^N = \sum_{n=1}^{N-1} -\hat{F}^{N+1-n} \times U^n \tag{6}$$

Eq. (6) leads to a $3Q \times 3Q$ square matrix which can be solved for the unknown displacement values using any standard matrix solver. U^N denotes the nodal displacement vectors at the current time node.

3. Results and discussion

In this research three dimensional model of Pacoima dam site is prepared and subjected to vertical SV wave at different frequency. Using cross- correlation functions the time delay between different point on the canyon surface are calculated. Then using powerful statistical software, Functions to calculate time delay at different point on the canyon surface are presented.

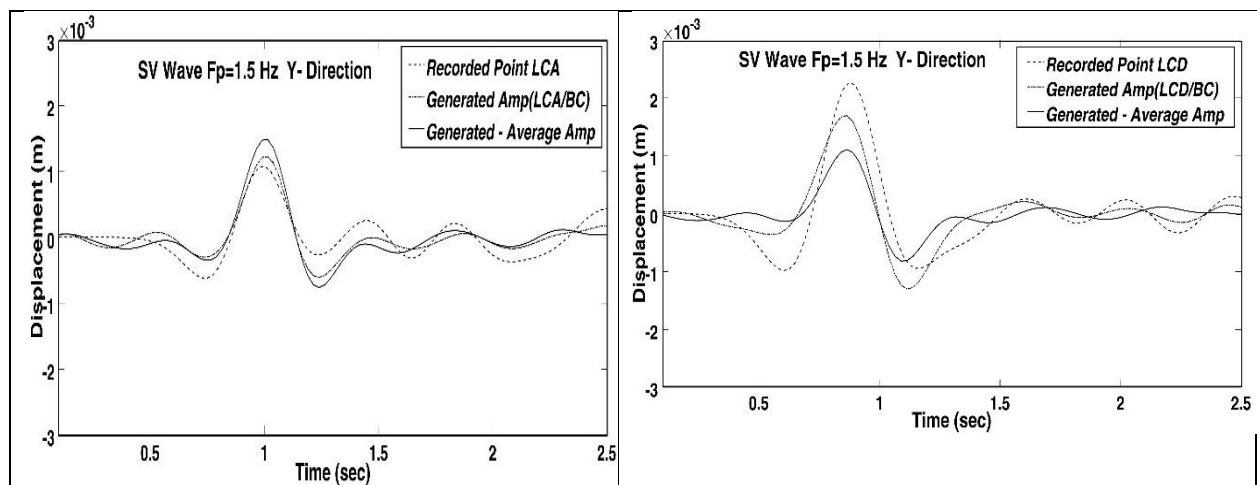


Fig. 1. Comparison between displacement record of boundary element method and Algorithm of Support Non-Uniform Record

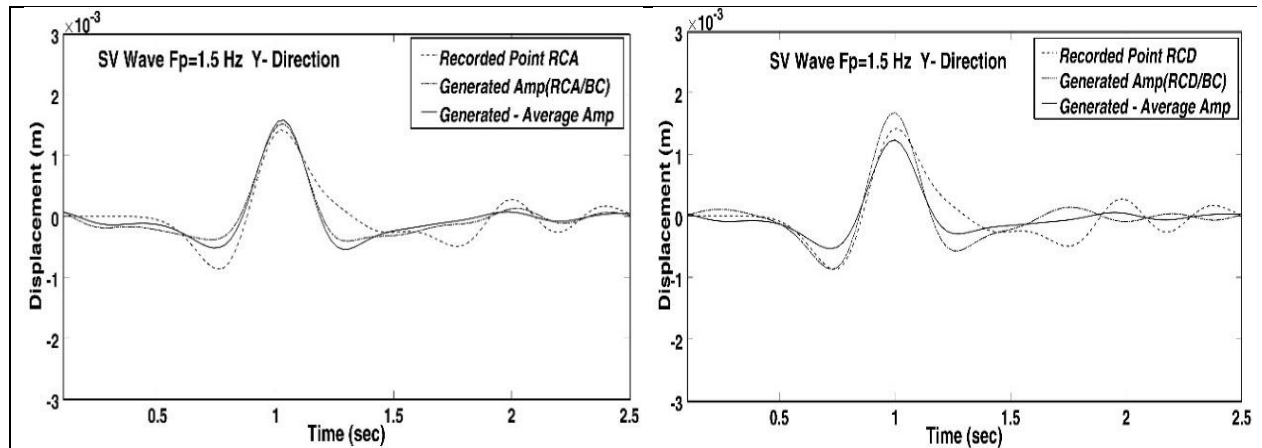


Fig. 1. Comparison between displacement record of boundary element method and Algorithm of Support Non-Uniform Record

4. Conclusions

In this paper, the three-dimensional boundary element method was used to develop the method of generating non-uniform records in a real site. Comparison of records produced using time delay functions presented on the basis of statistical analyzes and Support recordings result from the boundary element method is an acceptable result.

5. References

- Tarinejad R, Fatehi R, Harichandarn RS, "Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 52, 40-54.
- Sohrabi-Bidar A, "Seismic Behavior Assessment of Surface Topographies Using Time Domain 3D Boundary Elements Method", PhD Thesis Geophysics- Seismology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2008.