

## بررسی اثرات توپوگرافی در ساختگاه سد پاکویما با روش اجزای مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان

عبداله سهرابی بیدار (نویسنده مسئول)

دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران،

asohrabi@ut.ac.ir

محسن ایثاری

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

رضا تازی‌نژاد

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

شهرام مقامی

دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

### چکیده

توپوگرافی ناهموار یکی از عوامل ایجاد تفاوت جنبش در نقاط تکیه‌گاهی سازه‌های بزرگ نظیر سدها می‌باشد. در این مقاله از روش عددی اجزای مرزی سه‌بعدی جهت حل پاسخ لرزه‌ای دره محل سد پاکویما استفاده شده و نتایج حاصله در کنار تحلیل‌های ارائه شده، با مقادیر ثبت شده طی زمین‌لرزه سال ۲۰۰۱ سد پاکویما مقایسه شده است. از مؤلفه‌های افقی زمین‌لرزه واقعی ثبت شده در کف دره پس از پردازش‌های لازم، به‌عنوان موج ورودی جهت تحلیل استفاده گردیده و تاریخچه تغییر مکان و بزرگنمایی نقاط مختلف دره محل سد ارائه و بررسی شده است. نتایج نشانگر آن است که دامنه بیشینه تغییر مکان با افزایش ارتفاع نقاط در دو سوی دره کاهش می‌یابد؛ با این حال در حوزه فرکانس، بزرگنمایی در فرکانس‌های بالا با افزایش ارتفاع نقاط دره افزایش می‌یابد. نسبت دامنه تغییر مکان‌ها در طول دره محل سد تا حدود ۳ نیز می‌رسد که این مسئله لزوم توجه به جنبش‌های غیریکنواخت در سازه‌های بزرگ را نشان می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** اثرات توپوگرافی، اجزای مرزی، حوزه زمان، مدل‌سازی عددی، سد پاکویما.

### ۱- مقدمه

زیادتی همراه می‌سازد [۱-۲]. 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 می‌باشد. عمده تحقیقات انجام شده عددی برای بررسی این پدیده معطوف به مدل‌های دو بعدی و یا سه‌بعدی با شکل‌های ساده بوده است. در بین روش‌های عددی، روش اجزای مرزی<sup>۲</sup> در حل مسئله انتشار امواج در محیط‌های خطی کاربرد فراوانی دارد و استفاده از این روش برای محیط‌های نامحدود به دلیل آنکه 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 اجزای مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان<sup>۳</sup> برای حل پاسخ لرزه‌ای و بررسی و مقایسه رکوردهای غیریکنواخت در یک دره واقعی استفاده شده است. از نظر تاریخچه استفاده از روش اجزای مرزی، فریدمن و

مطالعات محققین مختلف نشان داده است، نگاهت‌های مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند، به دلایل متعدد نظیر اختلاف سرعت انتشار و انعکاس و انکسار امواج زلزله با فاصله گرفتن از مرکز انتشار تفاوت خواهند داشت. همچنین تفاوت نوع خاک زیر تکیه‌گاه‌های یک سازه نیز سبب اختلاف جنبش‌های ناشی از زلزله می‌شود. حتی در فواصل کم ممکن است شتاب‌نگاشت‌های مربوط به یک زلزله، شباهت کمی با یکدیگر داشته باشند. یکی از عوامل اصلی تفاوت نگاهت‌های ثبت شده وجود توپوگرافی ناهموار در سطح زمین می‌باشد. این امر لزوم احتیاط در به‌کار گرفتن تنها یک نگاهت زلزله در تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها و ضرورت توجه به تحریک غیریکنواخت، به‌خصوص برای سازه‌های دارای سطح تماس گسترده با زمین را ایجاد می‌کند. علیرغم این ضرورت، عدم دسترسی به داده‌های تاریخچه زمانی قابل اعتماد در نقاط مختلف تکیه‌گاه، انجام تحلیل‌های با تحریک غیریکنواخت را با مشکلات

همگن و ناهمگن ارائه نمودند. تارینزاد و همکاران [۱۶] به بررسی و تحلیل اثرات بزرگنمایی توپوگرافی بر ساختگاه دره‌ای با استفاده از روش اجزای 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. گنمیری و همکاران [۱۷-۱۸] با استفاده از نرم‌افزار هیبرید<sup>۶</sup> [۱۴-۱۵]، به ارزیابی و محاسبه طیف ویژه ساختگاه در دره‌های همگن و آبرفتی پرداخته و بر اساس تحلیل‌های انجام شده پاسخ‌های طیفی به دست آمده برای دره همگن را با استفاده از پارامتر نسبت سطح دره به زاویه دیواره دره‌ها دسته‌بندی کردند. سهرابی بیدار و همکاران [۱۹] با توسعه روش اجزای مرزی جهت حل مسائل لرزه‌ای عوارض سه‌بعدی در حوزه زمان، پاسخ لرزه‌ای دره‌های سه‌بعدی گوسی شکل را به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. سهرابی بیدار و کمالیان [۲۰] 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. اخیراً توسعه روش‌های اجزای مرزی نیم‌صفحه<sup>۷</sup> مورد توجه قرار گرفته و پنجی و همکاران [۲۱-۲۲] روش اجزای مرزی نیم‌صفحه را برای حل مسائل لرزه‌ای دو بعدی توسعه داده و پاسخ لرزه‌ای برخی عوارض را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش با استفاده از روش اجزای مرزی سه‌بعدی در حوزه زمان، پاسخ لرزه‌ای در ساختگاه سد پاکویما<sup>۸</sup> به عنوان یکی از ساختگاه‌های شناخته شده مرتبط با اثرات توپوگرافی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور یک مدل عددی سه‌بعدی از ساختگاه سد پاکویما تهیه و از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در کف دره به عنوان بارگذاری لرزه‌ای استفاده شده است. بررسی الگوی جابه‌جایی نقاط مختلف دره، الگوی بزرگنمایی ایجاد شده و مقایسه نتایج محاسبات با داده‌های واقعی ثبت شده اهداف اصلی این پژوهش می‌باشند.

شا [۳] جزو اولین کسانی بودند که روش اجزای مرزی در حوزه زمان را برای حل مسئله پراکنش امواج به کار بردند. نیوا و همکاران [۴] روش اجزای مرزی در حوزه زمان را برای حل مسائل الاستودینامیک به کار بردند. همچنین منصور [۵]، آنتس [۶] و منصور و بریا [۷] الگوریتم کامل اجزای مرزی به صورت گام‌به‌گام برای حل مسائل الاستودینامیک را ارائه کردند. کارابالیس و بسکوس [۸] و مانولیس و همکاران [۹] الگوریتم کلی اجزای مرزی سه‌بعدی برای حل مسائل الاستودینامیک را به ترتیب بر اساس پاسخ‌های اساسی ساده شده و پاسخ‌های اساسی دلتای دیراک ارائه نمودند. ژائو و همکاران [۱۰] مسئله تفرق امواج حجمی زلزله در اثر برخورد با توپوگرافی دره را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه که در حوزه فرکانس انجام شده است، بار دینامیکی تابع زمان به فضای فرکانس منتقل شده و سپس پاسخ‌های به دست آمده در فضای فرکانس با تبدیل معکوس به فضای زمانی انتقال یافتند. هوانگ و چیو [۱۱] با نصب شش شتاب‌نگار در سطح دره فیت‌سوی<sup>۴</sup> در تایوان و انجام تحلیل‌های عددی، پدیده تشدید حاصل از توپوگرافی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با استفاده از روش معادله انتگرالی در یک مدل دو بعدی دره و انتخاب شتاب‌نگاشت کف دره به عنوان ورودی نشان دادند که رکوردهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تطابق خوبی در تغییر مکان و سرعت نشان می‌دهند. برخی محققین نظیر پائولوچی [۱۲] با استفاده از روش‌های دیگری بزرگنمایی توپوگرافی را بررسی کرده‌اند، در مطالعه ایشان ابتدا با روش رایلی فرکانس ارتعاش پایه عارضه همگن به دست آمده و سپس بر پایه تقریب اجزای طیفی<sup>۵</sup> پاسخ سه‌بعدی برخی عارضه‌های واقعی محاسبه شده است. آلواریز رویو و همکاران [۱۳] با حل پاسخ لرزه‌ای عوارض مختلف به بیان توانایی‌های روش اجزای مرزی برای بررسی رفتار لرزه‌ای دره‌های دو بعدی با توپوگرافی نامنظم و بستر رسوبی پرداخته‌اند. کمالیان و همکاران [۱۴-۱۵] فرمول‌بندی اجزای مرزی در حوزه زمان و ترکیب آن با اجزای محدود را به منظور استفاده در تحلیل لرزه‌ای ساختگاه‌های دو بعدی توسعه و پاسخ لرزه‌ای برخی عوارض توپوگرافی تحت اثر امواج لرزه‌ای درون‌صفحه را در محیط‌های

## ۲- روش عددی مورد استفاده

در این مقاله جهت مدل سازی عددی پاسخ لرزه ای از روش اجزای مرزی در حوزه زمان استفاده شده است که مبتنی بر معادله انتگرال مرزی تعادل دینامیکی محیط است. معادله دیرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط های الاستیک خطی همسان و همگن، توسط رابطه زیر بیان می گردد:

$$(c_L^2 - c_T^2) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + c_T^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

که در آن  $u_i$  بیانگر تغییر مکان و  $b_i$  بیانگر نیروی پیکری محیط است.  $C_T$  و  $C_L$  سرعت های امواج طولی و عرضی محیط را نشان می دهند که به ترتیب از روابط  $c_L^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$  و  $c_T^2 = \mu/\rho$  دست می آیند.  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه و  $\rho$  دانسیته جرمی محیط هستند. معادله انتگرال مرزی حاکم بر محیط های الاستیک خطی همسان و همگن، با اعمال روش باقیمانده های وزنی بر معادله (۱) مطابق زیر به دست می آید.

$$c_{ij}(\xi) u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma \quad (2)$$

که در آن  $P_i$  ترکشن بر روی سطح مماس بر مرز  $\Gamma$  را بیان می دارد.  $u_{ij}^*$  و  $p_{ij}^*$  جواب های اساسی<sup>۹</sup> معادله دیرانسیل (۱) و به ترتیب بیانگر مؤلفه های زام جابه جایی و ترکشن نقطه  $x$  در لحظه  $t$  هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور  $i$ ، در نقطه  $\xi$  و در لحظه  $t \leq \tau$  پدید آمده اند. عبارات  $c_{ij}(\xi) u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma$  و  $u_{ij}^* * p_j$  از تکنیکی جواب اساسی  $p_{ij}^*$  ناشی می شود. این ضریب 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 لرزه ای قرار گیرد، معادله انتگرال مرزی حاکم به شرح زیر اصلاح می شود:

$$c_{ij}(\xi) u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (3)$$

که در آن  $u_i^{inc}$  تغییر مکان حاصله از موج مهاجم را بیان می دارد. 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:

$$c_{ij}(\xi) \cdot u_j(\xi, t) = - \int_{\Gamma} P_{ij}^*(x, \xi, t) \otimes u_j(x, t) \cdot d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (4)$$

برای حل مسئله به روش عددی می بایست معادله انتگرال مرزی (۴) به گونه ای بیان شود که مجموعه ای از معادلات خطی حاصل گردیده و با حل آنها جواب مسئله مقدار مرزی به دست آید. به منظور تبدیل معادله انتگرالی حاکم به شکل مطلوب، معادله ابتدا در زمان و سپس در مکان جداسازی می شود [۱۹-۲۰، ۲۳]. در نهایت معادلات به دست آمده به شکل ماتریسی زیر بیان خواهند شد:

$$\sum_{n=1}^N H^{N+1-n} U^n = U^{inc.N} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $U$  بردار جابه جایی گرهی،  $U^{inc}$  بردار جابه جایی گرهی مربوط به بارگذاری لرزه ای و  $H$  ماتریس در بردارنده هسته های ترکشن<sup>۱۰</sup> نقاط گرهی هستند.  $N$  گام زمانی جاری و  $n$  شناسه گام های زمانی قبلی است. لازم به ذکر است که محاسبه انتگرال های منفرد موجود روی قطر ماتریس با استفاده از تکنیک غیر مستقیم حرکت جسم صلب<sup>۱۱</sup> صورت می گیرد که مستلزم بسته بودن مرزهای مسئله و در نتیجه به کارگیری المان های مجازی در محیط های نیمه بینهایت است [۲۴]. با بازنویسی معادلات برای گام های زمانی مختلف معادله به شکل مطلوب زیر حاصل خواهد شد:

$$H^1 U^N = Z^N \quad (6)$$

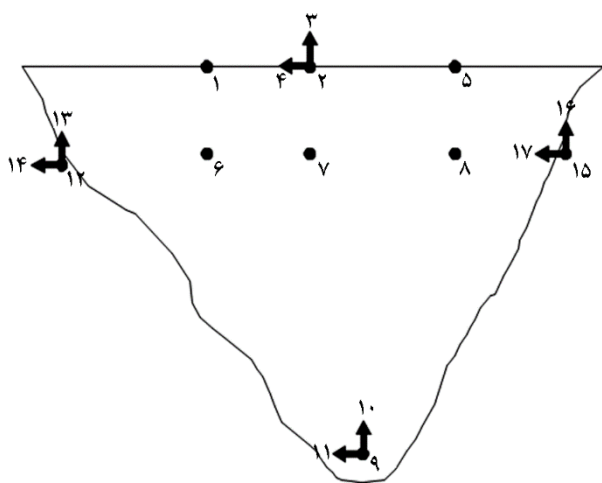
که در آن  $Z^N$  شامل تاریخچه پاسخ محیط و بارگذاری لرزه ای در گام جاری به شرح زیر می باشد:

$$Z^N = - \sum_{n=1}^{N-1} H^{N+1-n} U^n + U^{inc.N} \quad (7)$$

معادله (۶) که در بردارنده یک ماتریس مربعی است با استفاده از روش های استاندارد حل ماتریس قابل حل بوده و مقادیر مجهول جابه جایی روی مرز را در هر گام زمانی به دست می دهد.

### ۳- معرفی مسئله و پارامترها

می نمایند. با توجه به امتداد تقریباً شمالی-جنوبی محور سد، مؤلفه‌های افقی شعاعی و مماسی به ترتیب در راستای شرق-غرب (در جهت جریان) و شمال-جنوب (عمود به جهت جریان) قرار دارند. تعدد شتاب‌سنج‌های نصب شده در نقاط مختلف بدنه این سد و تعدد وقایع زمین‌لرزه ثبت شده در ساختگاه آن در کنار ساختگاه نسبتاً همگن این سد بستری مناسب برای بررسی پدیده اثرات توپوگرافی و پاسخ واقعی سد به تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی در طول یک زمین‌لرزه را فراهم کرده است [۲].



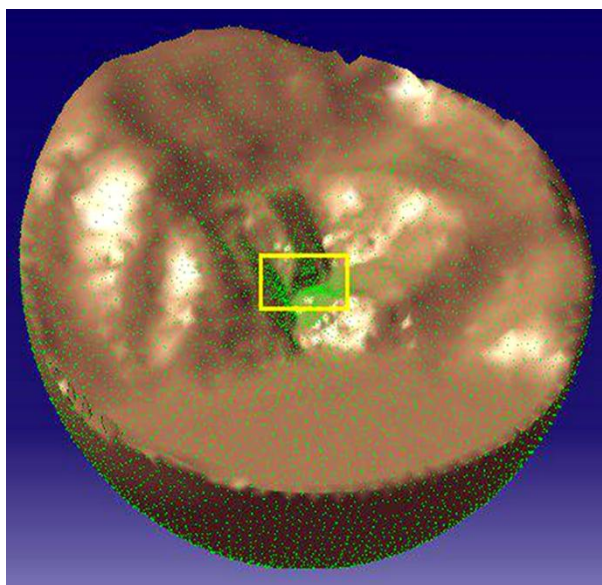
شکل (۱): مقطع سد پاکویما (نگاه از پایین دست) و محل قرارگیری تجهیزات شتاب‌سنجی.

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای، پاسخ لرزه‌ای این دره تحت رکورد‌های افقی ثبت شده در کف دره طی زلزله ۱۳ ژانویه ۲۰۰۱، بررسی شده است. بزرگی این زلزله  $4/3$  ریشتر بوده و در فاصله ۶ کیلومتری جنوب سد پاکویما و در عمق ۹ کیلومتری سطح زمین رخ داده است. در هنگام زلزله سطح آب مخزن ۴۱ متر پایین تر از تاج سد گزارش شده و مقادیر حداکثر شتاب، سرعت و جابه‌جایی ثبت شده در پی سد به ترتیب  $0/02$  شتاب ثقل،  $0/9$  سانتیمتر بر ثانیه و  $0/07$  سانتیمتر و مربوط به مؤلفه مماسی بوده است [۲۵]. چنان‌که مشخص است مقادیر جنبش ضعیف بوده و فرض رفتار خطی کاملاً مقبول خواهد بود. شکل (۲) تاریخچه زمانی نگاهت‌های شتاب افقی در محل پی سد را نشان می‌دهد.

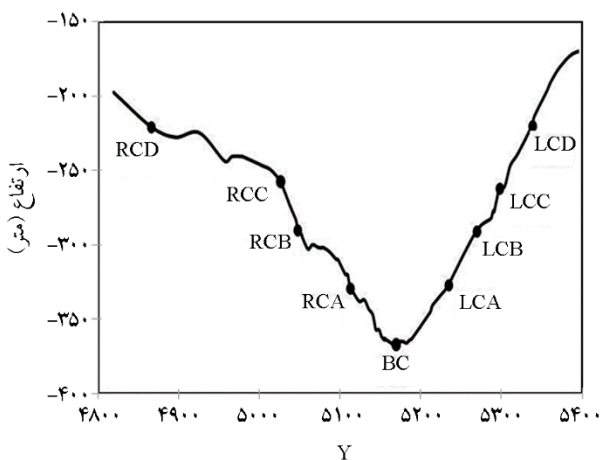
برای بررسی اثرات جابه‌جایی‌های غیریکنواخت روی پاسخ لرزه‌ای یک سد اطلاعات جابه‌جایی زمین‌لرزه در امتداد دیواره دره مورد نیاز خواهد بود. چنین اطلاعاتی در طول یک زمین‌لرزه در ساختگاه یک سد به ندرت به ثبت رسیده است و عموماً تعداد داده‌های ثبت شده نیز کفایت انجام تحلیل غیریکنواخت را نمی‌نماید. ضمن آنکه روش درون‌یابی چند جمله‌ای بین نقاط ثبت شده، برای دست‌یابی به اطلاعات نقاط مابین، به علت پیچیدگی‌های نحوه عملکرد امواج در برخورد با توپوگرافی دره و الگوی تغییرات جابه‌جایی‌های زمین مناسب نیست. در این پژوهش برای دست‌یابی به پاسخ‌های نقاط مختلف یک ساختگاه واقعی، ابتدا مدل سه‌بعدی توپوگرافی ساختگاه سد پاکویما تهیه و سپس از روش اجزای مرزی حوزه زمان جهت محاسبه پاسخ لرزه‌ای استفاده شده است.

سد پاکویما یک سد بتنی قوسی به ارتفاع ۱۱۳ متر و طول تاج ۱۸۰ متر است که در کوه‌های سان‌گابریل و در ۵ مایلی شمال سان‌فرانسیسکو و در نزدیکی لس‌آنجلس و جنوب کالیفرنیا، واقع شده است. ضخامت بدنه سد از ۳ متر در تاج تا ۳۰ متر در کف متغیر است. بدنه سد از ۱۱ کنسول به عرض  $15/3$  متر با درزهای عمودی تشکیل شده که در بین آنها کلیدهای برشی به عمق ۳۰ سانتی‌متر تعبیه شده است. آرایه شتاب‌سنج‌های نشان داده شده در شکل (۱) برای ثبت ۱۷ مؤلفه جابه‌جایی بدنه سد طراحی شده است. شتاب‌سنج‌های ۱ تا ۸ بر روی بدنه سد و جهت ارزیابی پاسخ سازه می‌باشند. شتاب‌سنج‌های ۲ تا ۴ در مرکز تاج قرار دارند و حرکت در جهات مختلف را ثبت می‌نمایند. شتاب‌سنج‌های ۱ و ۵ در محل یک‌سوم راست و یک‌چهارم چپ در تراز تاج و شتاب‌سنج‌های ۶، ۷ و ۸ متناظر با شتاب‌سنج‌های ۱، ۲ و ۵ در تراز ۸۰ درصد ارتفاع سد، مؤلفه شعاعی را ثبت می‌کنند. شتاب‌سنج‌های ۹ تا ۱۷ در نزدیکی پی و تکیه‌گاه‌های سد و در رویه پایین دست سد قرار دارند. شتاب‌سنج‌های ۹ تا ۱۱ در ارتفاع ۳ متر از پای سد در رویه پایین دست نصب شده‌اند و مؤلفه‌های مختلف حرکت زمین در محل پی سد را ثبت می‌کنند. شتاب‌سنج‌های ۱۲ تا ۱۷ نیز مؤلفه‌های مختلف حرکت در محل اتصال سد به تکیه‌گاه‌ها را ثبت

توپوگرافی موجود (مدل رقومی ارتفاع) استفاده شده است. بدین منظور یک مدل سه بعدی از ساختمان به شعاع ۵۰۰ متر با ۱۲۱۸ المان ۸ گرهی آماده شده است. شکل (۳-الف) مدل سه بعدی ساختمان سد پاکویما جهت استفاده برای مدل سازی عددی را نشان می دهد. سرعت موج برشی، نسبت پواسون و چگالی در سنگ های در برگیرنده به ترتیب ۲۰۰۰ متر بر ثانیه، ۰/۲۵ و ۲/۶۴ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده و با توجه به سختی نسبتاً بالای محیط از میرایی مصالح صرف نظر شده است [۲]. ابعاد المان ها در بخش مرکزی مدل حدود ۲۵ متر است که به سمت کناره های مدل

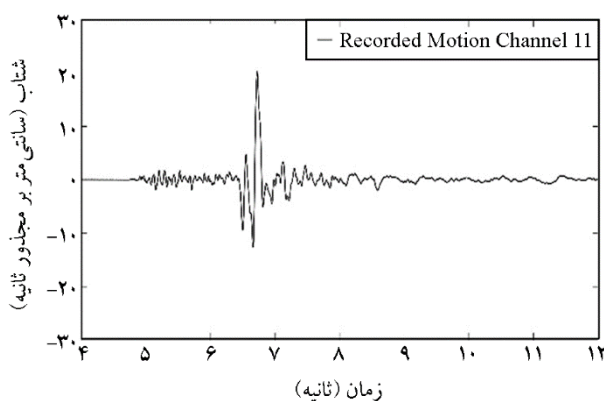
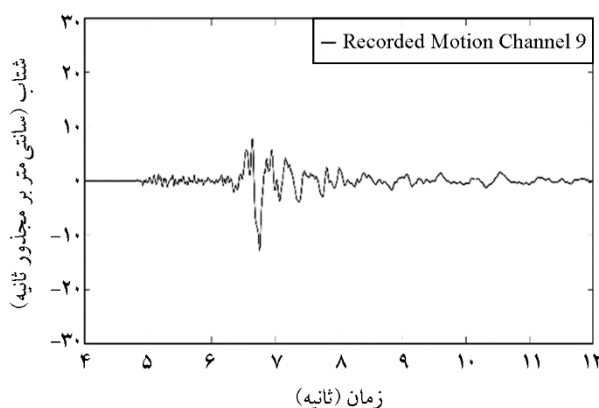


(الف)



(ب)

شکل (۳): الف) مدل سه بعدی ساختمان سد پاکویما؛ ب) پروفیل عرضی دره محل سد پاکویما (نگاه از پایین دست) همراه با موقعیت نقاط انتخابی.



شکل (۲): شتاب نگاشت های ثبت شده در کف دره در کانال های ۹ و ۱۱ در اثر زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما.

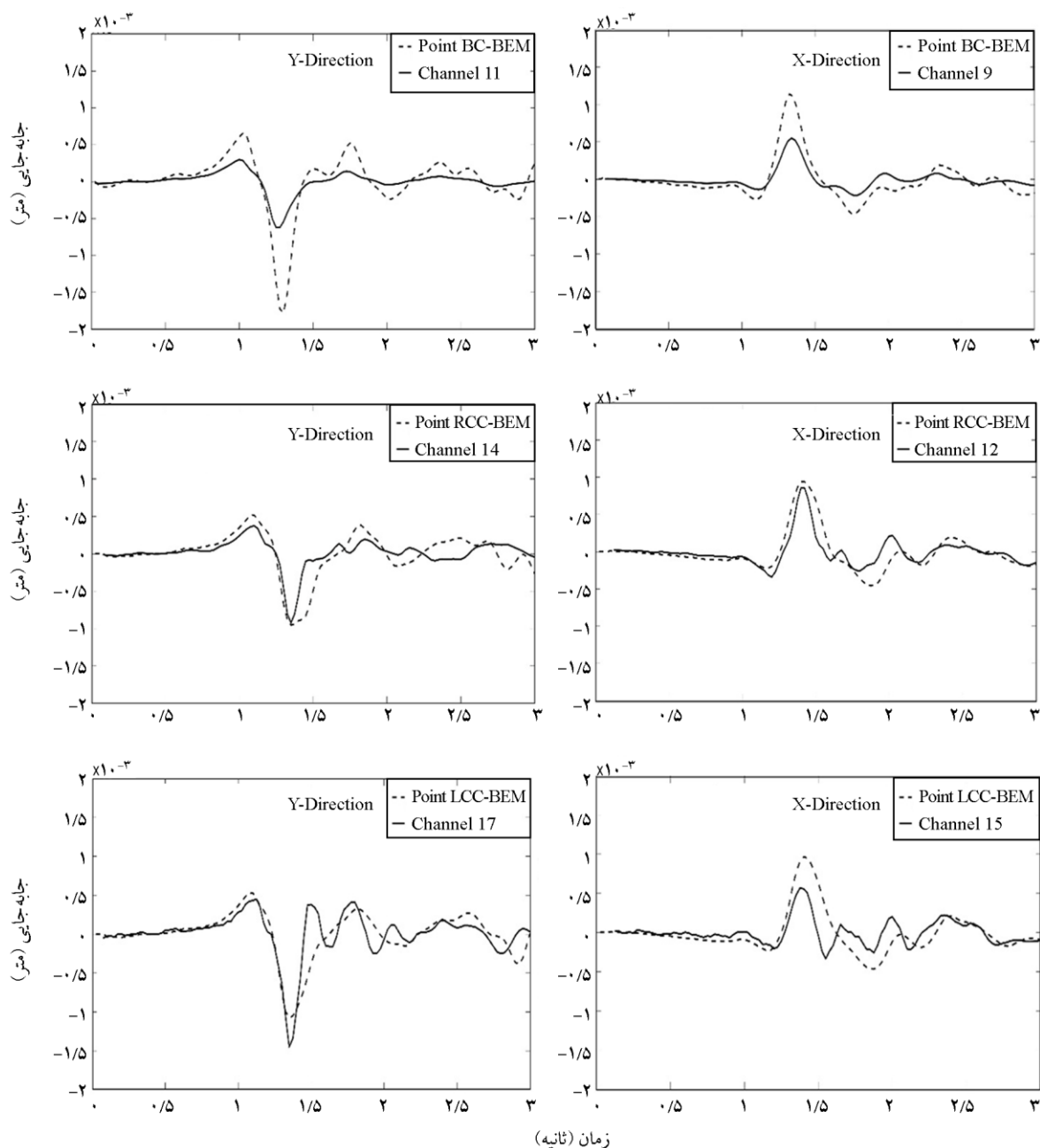
نگاشت ثبت شده در کانال ۹ در راستای طول دره (جهت x) و نگاشت ثبت شده در کانال ۱۱ در راستای عرض دره (جهت y) به عنوان تحریک ورودی، برای بررسی رفتار لرزه ای مورد استفاده قرار گرفته اند. با توجه به عمق کانونی زمین لرزه، انتشار امواج در محل ساختمان سد به صورت قائم و در هر دو حالت انتشار موج ورودی از نوع برشی در نظر گرفته شده است. به منظور آماده سازی موج تحریک از نرم افزار ساینز موسیگنال<sup>۱۲</sup> استفاده شده و ضمن اصلاح خط مبنا<sup>۱۳</sup>، با استفاده از یک فیلتر مرتبه ۴ نوع باترورث<sup>۱۴</sup> فرکانس های بالاتر از ۱۲ هرتز حذف گردیده اند.

جهت بررسی پاسخ لرزه ای از کد کامپیوتری بمسا<sup>۱۵</sup> [۱۹-۲۰] که بر اساس روش اجزای مرزی برای بررسی پاسخ لرزه ای عوارض توپوگرافی سه بعدی در حوزه زمان توسعه داده شده، استفاده شده و نتایج حاصله در دو حوزه زمان و بزرگنمایی تجزیه و تحلیل شدند. جهت مدل سازی سه بعدی دره ساختمان سد پاکویما از نقشه های

#### ۴- ارزیابی نتایج مدل سازی عددی

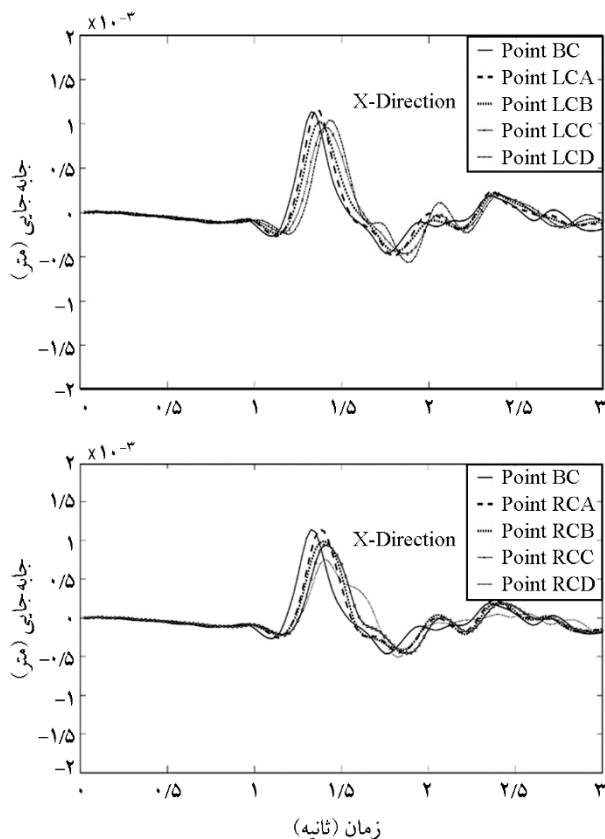
مدل سازی برای دو موج ورودی کانال های ۹ و ۱۱ صورت گرفته است که به ترتیب مؤلفه های شعاعی و مماسی یا موج برشی در جهت x و موج برشی در جهت y را شامل می شوند. شکل (۴) نمودارهای تاریخچه تغییر مکان برای سه نقطه کف دره (BC) و دیواره های راست (RCC) و چپ سد (LCC) در تراز ۸۰ درصد ارتفاع سد را نشان می دهد. نتایج ارائه شده هر دو تحلیل های

به تدریج افزایش می یابد. یکی از جذابیت های روش های حوزه زمان مشاهده پاسخ های جابه جایی- زمان نقاط مختلف ساختگاه می باشد. شکل (۳-ب) نقاطی از عرض دره محل سد که نمودارهای تغییر مکان آنها ارائه خواهد شد، نشان می دهد. اختلاف تراز نقاط A، B، C و D با کف دره به ترتیب ۳۷، ۶۶، ۹۳ و ۱۴۴ متر می باشد و نقاط واقع در تراز C تقریباً هم تراز با نقاط تجهیز شده تکیه گاه های راست و چپ به شتاب سنج ها می باشند.



شکل (۴): تغییر مکان حاصل از مدل سازی عددی در نقاط کف و دیواره دره همراه با تکاشتهای زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما.

این وضعیت راستای ارتعاش موج مهاجم به موازات امتداد دره محل سد می باشد و در صفحه قرارگیری سد پاکویما، انتشار موج برشی خارج از صفحه محسوب می شود. چنانکه دیده می شود، با افزایش ارتفاع نقاط، دامنه جابه جایی کاهش یافته است. همچنین مقایسه نقاط سمت چپ و راست دره نشان می دهد، به دلیل عدم تقارن دره به خصوص در قسمت های فوقانی، تاریخچه تغییر مکان نقاط هم تراز دارای تفاوت هایی در دو سمت دره هستند. به طور کلی و به خصوص در ترازهای بالاتر دره، دامنه جابه جایی در سمت چپ در مقایسه با سمت راست مقادیر بزرگ تری را تجربه کرده است. این مسئله می تواند ناشی از شیب تند دیواره سمت چپ در مقایسه با دیواره سمت راست دره باشد. مقادیر دامنه بیشینه تغییر مکان در ترازهای مختلف و در طرفین دره محل سد در جدول (۱) ارائه شده است. نسبت دامنه بیشینه تغییر مکان ها در این وضعیت تا حدود ۱/۵ می باشد.



شکل (۵): نمودارهای تاریخچه زمانی جابه جایی حاصل از مدل سازی عددی در حالت موج برشی در جهت x.

انجام شده با موج برشی در جهت x و تحلیل های انجام شده با موج برشی در جهت y را شامل می شود. در این نمودارها پاسخ های لرزه ای به دست آمده از مدل سازی عددی با نگاشت های ثبت شده در محل نیز مقایسه شده اند. نگاشت ثبت شده در نقطه کف دره همان نگاشت استفاده شده به عنوان جنبش ورودی در هر حالت هستند. چنانکه دیده می شود، سازگاری کلی قابل توجهی در نگاشت های ثبت شده و نتایج حاصل از مدل سازی دیده می شود و الگوی جابه جایی در آنها مشابهت کامل دارد. با این حال چه از نظر جزئیات و نیز دامنه جابه جایی ها تفاوت هایی دیده می شود که می تواند ناشی از ساده سازی های صورت گرفته در مدل سازی عددی در مقابل پیچیدگی بسیار زیاد محیط واقعی و به خصوص تفاوت مسئله مدل سازی شده با وضعیت موجود باشد. توجه به این نکته ضرورت دارد که در بررسی انجام شده، صرفاً توپوگرافی دره در نظر گرفته شده است در حالی که نگاشت های واقعی ثبت شده مربوط به دره ای است که اثرات اندرکنش<sup>۱۶</sup> پی و سازه سد پاکویما و دریاچه واقع در پشت سد را نیز شامل می شود. اختلاف دامنه امواج در نقطه کف دره نسبتاً زیاد است اما باید توجه داشت، عملاً در این نقطه دامنه موج مهاجم یا تحریک ورودی با دامنه موج پس از پراکنش مقایسه شده است. بر روی تکیه گاه ها سازگاری دامنه ها به مراتب بیشتر است، اگر چه با توضیح ذکر شده، انطباق دامنه ها و مقایسه کمی و دقیق آنها مورد انتظار نیست. مشابهت الگوی کلی تاریخچه زمانی نگاشت های حاصل از مدل سازی عددی و نگاشت های ثبت شده، حاکی از اثرگذاری مهم شکل دره در پاسخ لرزه ای ساختمانگاه می باشد.

#### ۴-۱- پاسخ لرزه ای موج برشی در جهت x

شکل (۵) نمودارهای تاریخچه تغییر مکان نقاط تعیین شده در ترازهای مختلف ارتفاعی در حالت هجوم موج برشی در جهت x را در دو طرف دره محل سد پاکویما نشان می دهد. در

وضعیت نیز با افزایش ارتفاع نقاط، دامنه جابه‌جایی کاهش یافته است. میزان کاهش دامنه در مقایسه با حالت موج برشی در جهت  $x$  بسیار بیشتر است. همچنین بار دیگر مقایسه نقاط سمت چپ و راست دره نشان می‌دهد، به دلیل عدم تقارن دره به‌خصوص در قسمت‌های فوقانی، تاریخچه تغییر مکان نقاط هم تراز دارای تفاوت‌هایی در دو سمت دره هستند. به‌طور کلی و به‌خصوص 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. تفاوت‌های موجود در نقاط هم تراز نیز در مقایسه با حالت موج برشی در جهت  $x$  به مراتب بیشتر می‌باشد. این مسئله اثرات نوع موج مهاجم و جهت ارتعاش موج در مقایسه با راستای دره را نشان می‌دهد. مقادیر دامنه بیشینه تغییر مکان در ترازهای مختلف و در طرفین دره محل سد در جدول (۲) ارائه شده است. نسبت دامنه بیشینه تغییر مکان‌ها در این وضعیت تا حدود ۳ نیز می‌رسد.

جدول (۲): اختلاف ارتفاع نقاط مشخص شده روی سطح دره و دامنه جابه‌جایی ثبت شده در راستای  $y$ .

D	C	B	A	Base	شناسه نقطه
۱۴۴	۹۳	۶۶	۳۷	۰	اختلاف ارتفاع نقاط از کف دره در راستای عرض (متر)
-۰/۸۶	-۱/۱	-۱/۳	-۱/۵	-۱/۸	دامنه جابه‌جایی نقاط سمت چپ (میلی‌متر)
-۰/۶۸	-۰/۹۵	-۰/۹۹	-۱/۴	-۱/۸	دامنه جابه‌جایی نقاط سمت راست (میلی‌متر)

### ۳-۴- بزرگنمایی

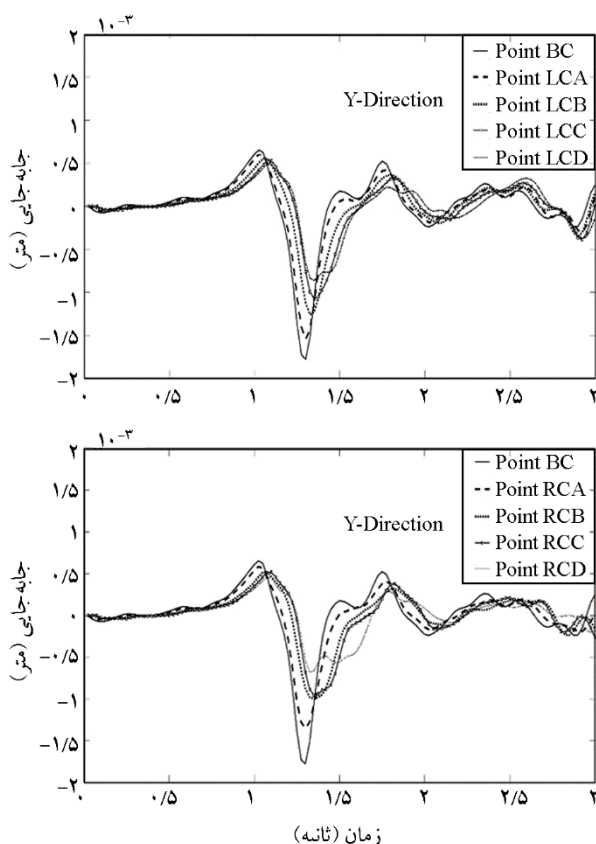
شکل (۷) نمودارهای بزرگنمایی حاصل از تحلیل عددی به روش اجزای مرزی در دیواره‌های راست و چپ دره محل سد پاکویما نسبت به کف دره را نشان می‌دهد. منحنی‌های بزرگنمایی برای هر دو حالت موج برشی در جهت  $x$  و موج برشی در جهت  $y$  نشان داده شده است. برای محاسبه منحنی بزرگنمایی در این پژوهش از نسبت طیف فوریه نگاشت‌های به‌دست آمده در هر نقطه نسبت به طیف فوریه نگاشت‌های نقطه کف دره استفاده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در حالت موج برشی در جهت  $x$ ، نقاط مختلف دره نسبت به کف آن دارای الگوی بزرگنمایی نسبتاً

جدول (۱): اختلاف ارتفاع نقاط مشخص شده روی سطح دره و دامنه جابه‌جایی ثبت شده در راستای  $x$ .

D	C	B	A	Base	شناسه نقطه
۱۴۴	۹۳	۶۶	۳۷	۰	اختلاف ارتفاع نقاط از کف دره در راستای طول (متر)
۱	۰/۹۶	۱	۱/۲	۱/۱	دامنه جابه‌جایی نقاط سمت چپ (میلی‌متر)
۰/۷۵۴	۰/۹۳۶	۰/۹۹	۱/۱	۱/۱	دامنه جابه‌جایی نقاط سمت راست (میلی‌متر)

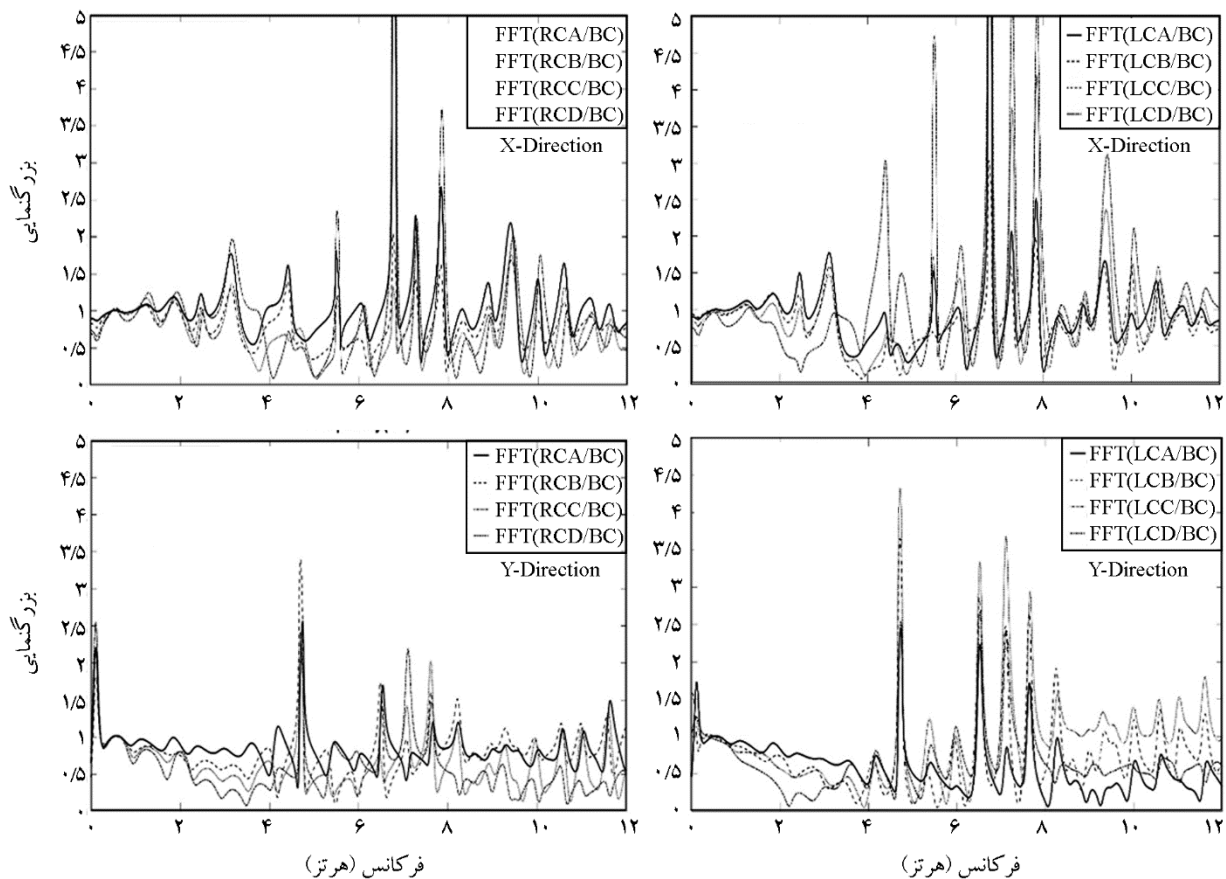
### ۲-۲- پاسخ لرزه‌ای موج برشی در جهت $y$

شکل (۶) نمودارهای تاریخچه تغییر مکان نقاط تعیین شده در ترازهای مختلف ارتفاعی در حالت هجوم موج برشی در جهت  $y$  را در دو طرف دره محل سد پاکویما نشان می‌دهد. در این وضعیت راستای ارتعاش موج مهاجم عمود بر امتداد دره محل سد می‌باشد و در صفحه قرارگیری سد پاکویما انتشار موج برشی درون صفحه محسوب می‌گردد. چنانکه دیده می‌شود، در این



شکل (۶): نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی عددی در حالت موج برشی در جهت  $y$ .

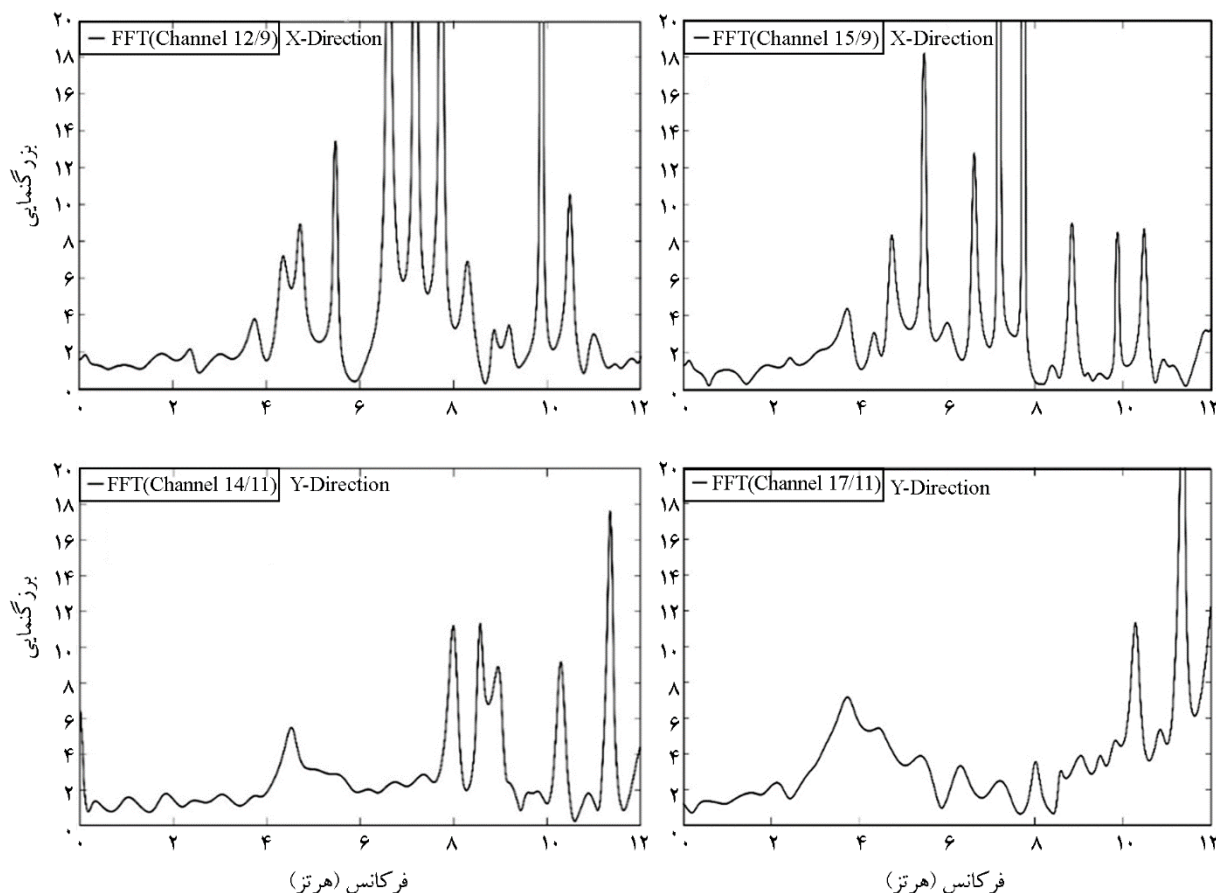




شکل (۷): بزرگنمایی حاصل از مدل سازی عددی در نقاط مختلف دره محل سد پاکویما.

شکل (۸) نمودارهای بزرگنمایی مؤلفه افقی برای مقادیر ثبت شده در اثر زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما را در دو راستای شعاعی و مماسی نشان می‌دهد. نمودارها برای دو نقطه واقع در تکیه گاه چپ و راست سد و نسبت به حرکت ثبت شده در کف دره ترسیم شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی به‌خصوص در زمینه فرکانس‌های بزرگنمایی اصلی در نگاشت‌های حاصل از تحلیل عددی و نگاشت‌های واقعی وجود دارد. در این نمودارها نیز بزرگنمایی در فرکانس‌های ۳ تا ۵ هرتز و نیز فرکانس‌های ۶ تا ۸ هرتز دیده می‌شود. دامنه بزرگنمایی در نگاشت‌های واقعی به مراتب بیشتر از مقادیر محاسبه شده است؛ اگرچه مقایسه و تطبیق کمی دامنه با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص تفاوت شرایط تحلیل عددی انجام شده با شرایط واقعی نگاشت‌های ثبت شده مورد انتظار نیست. در بزرگنمایی حاصل از نگاشت‌های واقعی قله‌های بزرگنمایی جدیدی در فرکانس‌های بالاتر ظاهر شده است که می‌تواند متأثر شرایط واقعی و وجود سازه سد در ساختمانگاه باشد.

مشابهی هستند. در اکثر نقاط قله‌های بزرگنمایی قابل توجهی در فرکانس حدود ۳ هرتز و فرکانس‌های ۶ تا ۸ هرتز قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد در هر دو سوی دره با افزایش ارتفاع، دامنه بزرگنمایی به‌خصوص در فرکانس‌های ۶ تا ۸ 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 است. در حالت موج برشی در جهت  $y$ ، بزرگنمایی با الگوی نسبتاً مشابهی قابل مشاهده است. با این تفاوت که قله‌های بزرگنمایی در این وضعیت در فرکانس حدود ۴/۵ هرتز و فرکانس‌های ۶ تا ۸ هرتز دیده می‌شوند. در این حالت نیز دامنه بزرگنمایی با افزایش ارتفاع نقاط افزایش می‌یابد. در مقایسه با موج برشی در جهت  $x$ ، در حالت موج برشی در جهت  $y$  دامنه بزرگنمایی در فرکانس‌های کم نسبت به دامنه بزرگنمایی در فرکانس‌های بالا بیشتر است. مشابه وضعیت قبلی نقاط واقع در دیواره سمت چپ در مقایسه با نقاط واقع در دیواره سمت راست بزرگنمایی بیشتری نشان می‌دهند.



شکل (۸): بزرگنمایی نکاشت‌های ثبت شده طی زلزله سال ۲۰۰۱ سد پاکویما.

## ۵- نتیجه‌گیری

دیواره سمت راست دارای دامنه بیشتر در حوزه زمان و نیز بزرگنمایی بیشتر در حوزه فرکانس می‌باشد. نتایج مطالعه حاضر بر تفاوت جنبش در نقاط مختلف تکیه‌گاه در حضور توپوگرافی ناهموار تأکید می‌نماید و کارایی روش مورد استفاده در محاسبه جنبش‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد. دامنه تغییر مکان‌ها در طول دره محل سد، در حالت موج برشی در جهت X تا حدود ۱/۵ برابر و در حالت موج برشی در جهت Y تا ۳ برابر تغییر می‌نماید.

## مراجع

1. Hariri-Ardebili, M.A. and Mirzabozorg, H. (2010) *Nonlinear Seismic Performance Evaluation of Concrete Arch Dams Using Endurance Time Method*. M.Sc. Thesis, Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

در این مقاله روش اجزای مرزی سه‌بعدی برای حل پاسخ لرزه‌ای یک ساختگاه واقعی به کار گرفته شد. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی حاصل از مدل‌سازی عددی با نگاشت‌های ثبت شده در محل سد پاکویما علیرغم تفاوت در شرایط مدل‌سازی و وضعیت واقعی ساختگاه، سازگاری کلی بین آنها را نشان می‌دهد. این سازگاری کلی می‌تواند به منزله اثرات قابل توجه شکل و مشخصات دره در پدیده اندرکنش سازه و پی سد تلقی گردد. اگرچه با افزایش ارتفاع نقاط واقع در دو سوی دره، دامنه جنبش در حوزه زمان کاهش می‌یابد، بررسی بزرگنمایی در حوزه فرکانس حاکی از افزایش بزرگنمایی در فرکانس‌های بالا با افزایش ارتفاع نقاط است. همچنین در دو سوی دره عدم تقارن سبب اختلاف دامنه در حوزه زمان و نیز مقادیر بزرگنمایی شده است. دیواره سمت چپ دره محل سد پاکویما در مقایسه با

- and *Struc. Dyn.*, **24**, 977-990.
12. Paolucci, R. (2002) Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities. *Earth. Eng. and Struc. Dyn.*, **31**, 1831-1853.
  13. Álvarez-Rubio, S., José Benito, J Sánchez-Sesma, F.J., and Alarcón, E. (2005) The use of direct boundary element method for gaining insight into complex seismic site response. *Computers and Structures*, **83**, 821-835.
  14. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi Bidar, A., Razmkhah, A. and Gatmiri, B. (2006) time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **26**, 753-765.
  15. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. and Khalaj, A. (2007) Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **23**, 871-887.
  16. Tarinejad, R., Ahmadi, M.T., and Khaji, N. (2007) Analysis of Topographic Amplification Effects on Canyon Sites using 3D Boundary Element Method. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **9**, 25-37.
  17. Gatmiri, B., Arsonb, C., Nguyen, K.V. (2008) Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method I. Theory, numerical optimization and application to topographical irregularities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**, 632-645.
  18. Gatmiri, B., Maghoul, P., Arson, C. (2009) Site-specific spectral response of seismic movement due to geometrical and geotechnical characteristics of sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**, 51-70.
  19. Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. and Jafari, M.K. (2010) Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves. *Geophys. J. Int.*, **183**, 1429-1442.
  20. Sohrabi-Bidar, A. and Kamalian, M. (2013) Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses. *Soil*
  2. 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*, **52**, 40-54.
  3. Friedman, M.B. and Shaw, R.P. (1962) Diffraction of pulses by cylindrical obstacles of arbitrary cross section. *Journal of Applied Mechanics*, **29**, 40-46.
  4. Niwa, Y., Fukui, T., Kato, S., Fujiki, K. (1980) An application of the integral equation method to two-dimensional elastodynamics. *Theory of Applied Mechanics*, **28**, 281-290.
  5. Mansur, W.J. (1983) *A Time-Stepping Technique to Solve Wave Propagation Problems Using the Boundary Element Method*. Ph.D. Dissertation, Southampton University.
  6. Antes, H. (1985) A boundary element procedure for transient wave propagation in twodimensional isotropic elastic media. *Finite Elements in Analysis and Design*, **1**, 313-322.
  7. Mansur, W.J. and Brebbia, C.A. (1985) Transient elastodynamics. Topics in Boundary Element Research. CA Brebbia, ed., Vol. 2: *Time-dependent and Vibration Problems*, Chap 5, pp. 124-155.
  8. Karabalis, D.L. and Beskos, D.E. (1984) Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time domain boundary element method. *Earth. Eng. and Struc. Dyn.*, **12**, 73-93.
  9. Manolis, G.D., Ahmad, S., Banerjee, P.K. (1985) 'Boundary element method implementation for three-dimensional elasto-dynamics'. In: *Developments in Boundary Element Methods: IV*. P.K. Banerjee, J.O. Watson, eds. *Elsevier Applied Science Publishers*: London, 29-63.
  10. Zhao, C., Valliappan, S. and Wang, Y.C. (1992) A numerical model for wave scattering problems in infinite media due to P-and SV-Wave incidences. *International Journal for Numerical methods in Engineering*, **33**, 1661-1682.
  11. Huang, H.C. and Chiu, H.C. (1995) The effect of canyon topography on strong ground motion at Feitsui Damsite: Quantitive Results. *Earth. Eng.*

- |             |              |  |
|-------------|--------------|--|
| Butterworth | ۱۴- باترورث  | <i>Dynamics and Earthquake Engineering</i> , <b>52</b> , 1-12.   |
| BEMSA       | ۱۵- بمسا     | 21. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. <i>Geophys. J. Int.</i> , <b>194</b> , 1849-1865.   |
| Interaction | ۱۶- اندر کنش | 22. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Analyzing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. <i>Geophys. J. Int.</i> , <b>197</b> , 591-607.  |
|             |              | 23. Sohrabi-Bidar, A. (2008) <i>Seismic Behavior Assessment of Surface Topographies Using Time Domain 3D Boundary Elements Method</i> . Ph.D. Dissertation Geophysics-Seismology, <i>International Institute of Earthquake Engineering and Seismology</i> .    |
|             |              | 24. Brebbia, C.A., Dominguez, J. (1989) <i>Boundary Elements, an Introductory Course</i> . Computational Mechanics Publications: Boston.   |
|             |              | 25. Alves, S.W. (2004) <i>Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Non-Uniform Ground Motion</i> . In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. <i>California Institute of Technology Pasadena, California</i> . |

## واژه نامه

- |                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Non-Uniform Excitation | ۱- تحریک غیر یکنواخت |
| Boundary Elements      | ۲- اجزای مرزی        |
| Time-Domain            | ۳- حوزه زمان         |
| Feitsui                | ۴- فیت سوی           |
| Spectral Elements      | ۵- اجزای طیفی        |
| HYBRID                 | ۶- هیبرید            |
| Half-Space             | ۷- نیم صفحه          |
| Pacoima                | ۸- پاکویما           |
| Fundamental Solutions  | ۹- جواب های اساسی    |
| Tractuin Kernels       | ۱۰- هسته های ترکشن   |
| Rigid Body Motion      | ۱۱- حرکت جسم صلب     |
| SeismoSignal           | ۱۲- ساینموسیگنال     |
| Baseline               | ۱۳- خط مبنا          |

## Topography Effects in Pacoima Dam Site Using Time-Domain Three-Dimensional BEM

**Abdollah Sohrabi-Bidar<sup>1\*</sup>, Mohsen Isari<sup>2</sup>, Reza Tarinejad<sup>3</sup> and Shahram Maghami<sup>4</sup>**

1. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran,  
\*Corresponding Author, email: asohrabi@ut.ac.ir.
2. Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Ph.D. Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

The reliable estimation of seismic loads on a structure is required in order to earthquakes resistant design of the structure. The difference in seismic loading in different support points of the structure is important in large and long structures. In general, the lack of access to the reliable time histories in different support points of the structure is the main problem of performing non-uniform excitation analyses. Numerical analyses and calculation of ground motion at different points of the foundation of the structure is one of the ways to achieve the non-uniform support excitation. This paper aims to evaluate the seismic response of Pacoima dam site by performing three-dimensional boundary element analyses in the time domain. The pattern of displacement and amplification due to seismic waves scattering in the dam site are evaluated, and calculated results are compared to the recorded ground motions.

The numerical modeling has been executed using the time-domain boundary element that is based on the boundary integral equation of the wave motion. To transform the governing integral equation into the ideal form, it has been discretized in both time and spatial domains. Finally, the obtained equations have been expressed in the matrix form and have been implemented in a computer code named as BEMSA. Earlier, several different examples of wave scattering have been solved in order to show the accuracy and efficiency of the implemented BE algorithm in carrying out the site response analysis of topographic structures.

Pacoima dam is a concrete arch dam located in the San Gabriel Mountains in Los Angeles County. The height and the length of the crest of the dam are 113 m and 180 m, respectively. The dam is instrumented by use of 17 accelerometers at different elevations on the dam body and its abutments. For site response analyses, the dam site has been subjected to vertically propagating recorded motions of the Pacoima dam 2001 earthquake with a magnitude of 4.3, depth of about 9 and epicentral distance of about 6 km south of the dam. The medium assumed to be homogeneous linear elastic with density of 2.64 ton/m<sup>3</sup>, shear wave velocity of 2000 m/s and Poisson's ratio of 0.25. The 3D topographic model has been generated up to a radius of 5000 meters, using 1218 eight-node quadrilateral isoparametric elements with the average effective element size of 25 m in the center part of the model.

In order to investigate the seismic response of the canyon, a couple of points at four levels have been considered on both sides of the canyon and the results analyzed in time and the frequency domains. Despite the actual record earthquake motions, which includes the effects of the interaction between the foundation and the dam structure as well as the lake behind the dam, the calculated motions include only the wave scattering by the topography of the canyon. Therefore, although the exact matching of the recorded and calculated motions are not expected, comparison of the motions show that the patterns of the displacements are close together. This phenomenon indicates the importance of valley shape and its important contribution to the dynamic response of the dam site. Assessment of the displacement time histories in various points at both sides of the canyon indicates that the amplitude of the motions decreases when the height of the point increase. Besides, the comparison between the motions of the left and right sides points show

have a higher frequency content and a higher shear-wave velocity. 4) In all ten soil groups, the shear wave velocity that due to the non-symmetry of the canyon, displacement amplitudes in the left side are larger than the right side. Based on the calculated displacements on the various points, the maximum amplitude along the canyon would be changed up to three times.

In the frequency domain, different points of the canyon surface have generally the similar amplification patterns. There are two main peaks of amplification in the frequency range of 3-5 Hz and the frequency range of 6-8 Hz. In both sides of the canyon by increasing the height of the points amplification is increased, especially in the frequency range of 6-8 Hz. Moreover, at the same elevation points, the amplification value in the left side is higher than the right side. Comparison of amplification curves of recorded and calculated motions, show the appearance of new peaks of amplification in higher frequency, which could be related to the real conditions of the dam site.

Finally, although the motion amplitude in time domain decreases by height increasing on both sides of the canyon, as expected, the amplification in the frequency domain, especially in high frequencies, increases. This insists that the amplification characteristics of a site should be considered and interpreted as a frequency dependence phenomenon. Moreover, the results indicate the spatial variation of the motion due to the topography effect along the canyon, in which the amplitude of peak ground displacements along the canyon has been changed up to three times.

**Keywords:** Topography Effects, Boundary Elements, Time-Domain, Numerical Modelling, Pacoima Dam.