

محاسبه محتمل ترین امتداد بحرانی شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

محمد داودی^{۱*}، فربرز سنجرى^۲، محمد کاظم جعفرى^۳، نوید هادیانی^۴ و عباس پوردیلیمى^۵

^۱ دانشیار، پژوهشکده ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، پژوهشکده ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۳ استاد، پژوهشکده ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۴ استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران
^۵ استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

چکیده

در تحلیل‌های لرزه‌ای دوبعدی در سازه‌ها معمولاً از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده استفاده می‌شود؛ در صورتی که، شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده وابسته به امتداد دستگاه‌های شتاب‌نگار بوده و با چرخش دستگاه، رکورد‌های متفاوتی ثبت می‌گردد. بنابراین این پرسش پیش می‌آید که استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده با چه درصد اطمینانی منجر به پاسخ‌های حداکثر مورد نظر می‌شوند. برای بررسی این موضوع با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، مدل‌های عددی متعددی بر پایه سدهای خاکی موجود در مناطق زلزله‌زده کرمانشاه شبیه‌سازی شد. سپس هرکدام از رکورد‌های انتخاب‌شده زلزله کرمانشاه در امتداد‌های مختلف از صفر تا ۱۸۰ درجه دوران داده‌شده و تحلیل‌های تاریخیچه زمانی انجام شد و پاسخ‌های حداکثر جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سد و امتداد‌های بحرانی متناظر با هرکدام از این پاسخ‌ها محاسبه شد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، احتمال این که شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده منجر به پاسخ‌های بحرانی شوند، محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند که پاسخ‌ها و امتداد‌های بحرانی، وابسته به مشخصات سد، رکورد ورودی زلزله و پاسخ در نظر گرفته‌شده می‌باشند. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده معمولاً منجر به پاسخ‌های حداکثر نمی‌شوند و ضرورت محاسبه محتمل‌ترین امتداد بحرانی نگاشت‌های لرزه‌ای ضرورت دارد.

واژه‌های کلیدی: امتداد‌های بحرانی، پاسخ لرزه‌ای، روش مونت کارلو، سدهای خاکی

۱ مقدمه

که منجر به بیشترین طیف الاستیک شتاب در آن امتداد گردد. به عنوان نمونه هاوارد و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از ۱۵ زلزله ناشی از گسل‌های امتداد-لغز و ۱۴ زلزله ناشی از گسل‌های معکوس، امتداد بحرانی را مورد بررسی قرار دادند. در نگاشت‌های انتخاب شده توسط این محققان نزدیک‌ترین فاصله از محل ثبت تا نقطه گسلش حداکثر برابر با ۱۰ کیلومتر بوده است. نتایج ایشان نشان داد که برای نگاشت‌های ناشی از زلزله‌های امتداد لغز که در فاصله کمتر از ۵ کیلومتر از گسل قرار دارند، در بیشتر مواقع مؤلفه عمود بر گسل طیف شبه‌شتاب بزرگ‌تری ایجاد می‌کند و می‌تواند به عنوان امتداد بحرانی استفاده شود. این در حالی است که برای نگاشت‌های حاصل از گسل‌های معکوس لزوماً امتداد بحرانی، جهت عمود بر گسل نمی‌باشد.

مطالعات مشابهی توسط بور و همکاران (۲۰۰۶) انجام گرفت. مطالعات ایشان نشان داد برای نگاشت‌هایی که در فاصله کمتر از ۳ کیلومتر از گسل ثبت شده‌اند، در پیوندهای بلند امتداد بحرانی جهت عمود بر گسل می‌باشد؛ در صورتی که برای پیوندهای کوتاه امتداد بحرانی به صورت تصادفی منطبق بر جهت حداکثر شتاب زلزله می‌باشد. همچنین برای نگاشت‌هایی که در فاصله بیشتر از ۳ کیلومتر از گسل ثبت شده‌اند، امتداد بحرانی به ندرت منطبق بر جهت حداکثر شتاب می‌باشد.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۸)، تعداد ۱۴۷ زوج شتاب‌نگاشت با مشخصات ($M_w < 6/5$, $R < 15\text{km}$) را از پایگاه NGA انتخاب کرده و نسبت‌های بین امتدادهای GMROtI50، MD و FN/FP را بررسی کردند. آنها نشان دادند که این نسبت‌ها تابعی از پیوند و جهت‌پذیری زلزله بوده و در مناطق نزدیک گسل مقدار MD بزرگ‌تر بوده و در نظر گرفتن مؤلفه عمود بر گسل غیرمحافظة کارانه می‌باشد.

در تحلیل تاریخیچه زمانی سازه‌ها در مقابل نیروهای زلزله نیاز به شتاب‌نگاشت‌های زلزله وجود دارد. نحوه انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها و مقیاس کردن آنها تأثیر زیادی بر روی نتایج به دست آمده می‌گذارد. شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده بستگی به جهت دستگاه‌های شتاب‌نگار داشته و با چرخش دستگاه، شتاب‌نگاشت‌های متفاوتی ثبت خواهد شد. با توجه به این که امتداد دستگاه‌های شتاب‌نگار نسبت به امتدادهای اصلی سازه و امتداد گسل مسبب تصادفی می‌باشد، در نظرگیری محورهای مرجع مشخصی برای رکوردهای زلزله، ضروری به نظر می‌رسد. هر چند آیین‌نامه‌ها به به صورت کلی مسئله امتدادهای بحرانی در پاسخ سازه‌ها را در نظر گرفته‌اند، اما در مورد امتدادهای شتاب‌نگاشت‌ها (محورهای مرجع شتاب‌نگاشت‌ها) راهنمای مشخصی وجود ندارد و در حالت کلی از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده استفاده می‌کنند. در این میان روابط کاهندگی و معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs) پروژه NGA بر اساس امتداد GMROtI50 (میانگین هندسی مستقل از امتداد دستگاه‌های شتاب‌نگار) بوده، و در آیین‌نامه ASCE/SEI 7-10 به طور مشخصی از امتداد MD (امتداد منطبق بر پاسخ حداکثر) و امتداد FN/FP (امتداد موازی و عمود بر گسل) استفاده شده است. هر چند هنوز توافق جمعی در مورد استفاده از امتداد مشخصی وجود ندارد و تحقیقات نشان می‌دهد که هیچ کدام از امتدادهای GMROtI50، MD و FN/FP منجر به پاسخ‌های حداکثر نمی‌شوند.

در رابطه با تعیین امتداد بحرانی هنگامی که سازه تحت اثر یک مؤلفه قرار خواهد گرفت و یا پاسخ در یک امتداد خاص مد نظر است با در اختیار داشتن دو مؤلفه افقی یک زلزله و دوران آنها امتدادی تک‌مؤلفه‌ای که باعث پاسخ حداکثر می‌شود تعیین می‌گردد. بیشتر تحقیقات انجام شده برای تعیین امتداد بحرانی، به دست آوردن امتدادی می‌باشد

آنها نشان دادند که امتداد بحرانی برای هر یک از پارامترهای شدت می‌تواند متفاوت از پارامتر شدت دیگری باشد. همچنین مقدار تغییر مکان بلوک صلب نیومارک در بسیاری از موارد دارای امتداد بحرانی متفاوت از شدت اریاس یا حداکثر سرعت زمین می‌باشد. آنها همچنین نشان دادند که در صورت استفاده از روابط همبستگی بین پارامترهای شدت و تغییر مکان بلوک صلب نیومارک در حوزه نزدیک گسل، باید اثر امتداد در نظر گرفته شود (هادیانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ هادیانی، ۱۳۹۰).

داودی و سنجری (۲۰۱۹) با استفاده از رکوردهای زلزله کرمانشاه و سدهای موجود در منطقه به بررسی امتداد بحرانی رکورهای این زلزله در سدهای خاکی پرداختند. آنها تعداد ۴ رکورد با بیشترین شتاب را انتخاب کرده و پس از اصلاح رکوردها، پاسخ‌های حداکثر شتاب، سرعت و جابه‌جایی تاج سدهای خاکی را برای امتدادهای مختلف بررسی کردند. برای این کار علاوه بر دوران رکوردها در امتدادهای مختلف به‌طور مشخصی محورهای مرجع MD، GMRot، FN/FP و PD را نیز در نظر گرفتند. با انجام تحلیل‌های پارامتری متعدد نشان دادند که امتداد بحرانی زلزله منطبق بر هیچ‌کدام از محورهای مرجع عنوان‌شده نبوده و برای به‌دست آوردن پاسخ‌های بحرانی انجام تحلیل‌های پارامتری ضروری می‌باشد.

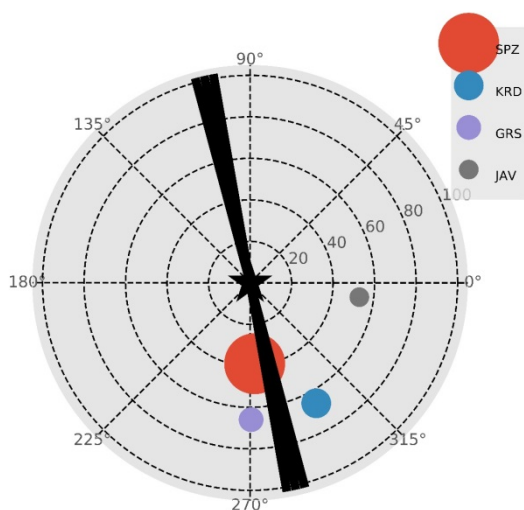
در مطالعه مشابهی داودی و سنجری (۲۰۱۸) تأثیر امتداد اعمال رکورهای حوزه نزدیک گسل را در سدهای خاکی بررسی کردند. آنها تعداد ۴ رکورد نزدیک گسل با پالس مشخص سرعت و مکانیسم‌های مختلف را از سایت PEER انتخاب کرده و تأثیر جهت‌های مختلف را در پاسخ بحرانی سدهای خاکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از رکورهای ثبت‌شده زلزله غیرمحافظة کارانه بوده و در هیچ‌یک از حالات پاسخ‌های حداکثر سد را نتیجه نمی‌دهد. با توجه به این که به‌طور معمول در تحلیل‌های دوبعدی سازه‌ها از شتاب‌نگاشت‌های

با توجه به روش‌های مقیاس‌سازی رکوردها که بر اساس مقایسه طیف حاصل از رکورد با طیف استاندارد حاصل می‌شود، با در نظر گرفتن هرکدام از محورهای مرجع عنوان‌شده برای یک زلزله مشخص، شتاب‌نگاشت‌ها و ضرایب مقیاس متفاوتی به‌دست خواهد آمد. فونتارا و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر محورهای مرجع و امتداد اعمال شتاب‌نگاشت‌های زلزله در یک سازه بتنی یک طبقه نامتقارن پرداختند. آنها تعداد ۲۰ رکورد دو مؤلفه‌ای زلزله را با مشخصات $57/4 < R_{rup} < 6$ ، $7/3 < M_s < 5/7$ و متناسب با ساختگاه موردنظر (D) انتخاب کرده و برای محورهای مرجع (PD، As-Recorded) ضرایب مقیاس به‌دست آمده را با مقادیر آیین‌نامه‌ای مقایسه کردند.

روابط موجود برای پیش‌بینی حرکت زمین که معمولاً به‌صورت شتاب طیفی بیان می‌شود، بر اساس مقدار میانگین هندسی (GM) دو مؤلفه افقی می‌باشد. با توجه به این که میانگین هندسی دو مؤلفه افقی وابسته به جهت شتاب‌نگار می‌باشد، روابط NGA جدید براساس کارهای بور و همکاران (۲۰۰۶) از روش GMRotI50 به‌دست می‌آید، که مستقل از جهت شتاب‌نگار می‌باشد. اگرچه استفاده از GM و GMRotI50 نتایج تقریباً یکسانی را ارائه می‌دهند، ولی منجر به انحراف معیارهای متفاوتی می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد، مقدار میانه روابط MD به‌طور سیستماتیک بزرگ‌تر از روابط GM بوده و نسبت بین آنها وابسته به پیروید در محدوده ۱/۱ تا ۱/۵ قرار دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۹).

داودی و همکاران (۲۰۱۳) امتداد بحرانی را برای پاسخ‌های متفاوت سد خاکی تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل بررسی کردند. آنها رکوردهای حوزه نزدیک گسل را بر اساس پیروید پالس غالب طبقه‌بندی کرده و با استفاده از تحلیل‌های متعدد غیرخطی تأثیر پارامترهای شدت زلزله و امتدادهای بحرانی برای پاسخ‌های مختلف سد خاکی را مورد بررسی قرار دادند.

دارند، به صورت جدول ۱ استخراج گردید. رکوردهای انتخاب شده در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۲۵ هرتز فیلتر شده (Butterworth filter) و سپس اصلاح خط مبنا (Baseline correction) صورت گرفته است.



شکل ۱. ایستگاه‌های ثبت شده با شتاب حداکثر بالای ۲۰۰ گال (ستاره): مرکز زلزله، خط پر: امتداد گسل، دایره‌ها: ایستگاه‌های ثبت شده، اندازه دایره: شتاب حداکثر در ایستگاه.

۳ سدهای موجود در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زلزله

با بررسی مدارک موجود در زمینه مشخصات سدهای موجود در منطقه، سدهای بهره‌برداری در فاصله تقریبی ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زلزله و مشخصات هندسی آنها مطابق جدول ۲ استخراج گردید (مدیریت منابع آب ایران، ۲۰۱۸). در شکل ۲، منحنی‌های هم‌شتاب و محل سدهای موجود در منطقه نشان داده شده است. همچنین در این شکل می‌توان اثر جهت‌پذیری پیش رونده و انباشت انرژی در این جهت را مشاهده کرد.

ثبت شده زلزله استفاده می‌شود، در تحقیق حاضر احتمال رخداد پاسخ‌های بحرانی در صورت استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

در ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در فاصله ۱۰ کیلومتری از گله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه، واقع در مرز ایران و عراق به وقوع پیوست. رومرکز این رویداد بر اساس لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه (IIIEES) در مختصات ۳۴/۸۸ درجه عرض شمالی و ۴۵/۸۴ درجه طول خاوری قرار دارد (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۷).

این زلزله در ۱۱۰ ایستگاه توسط دستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت شد. از این تعداد، شتاب‌نگاشت‌های اصلاح نشده در ۹۰ ایستگاه از طریق سایت مرکز تحقیقات قابل دسترسی می‌باشد (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۲۰۱۷). در شکل ۱، ایستگاه‌های با شتاب حداکثر بالای ۲۰۰ گال نشان داده شده است. در این شکل، علامت ستاره مرکز زلزله و خط پر امتداد گسل را نشان می‌دهد. دایره‌های توپر محل ایستگاه‌ها و اندازه آنها نشانگر شتاب حداکثر ثبت شده در محل می‌باشد. با توجه به شکل ۱، مشخص است که در ایستگاه‌های سرپل ذهاب، کرندها و گورسفید که در امتداد انتشار گسلش بوده‌اند، بیشترین شتاب ثبت شده است.

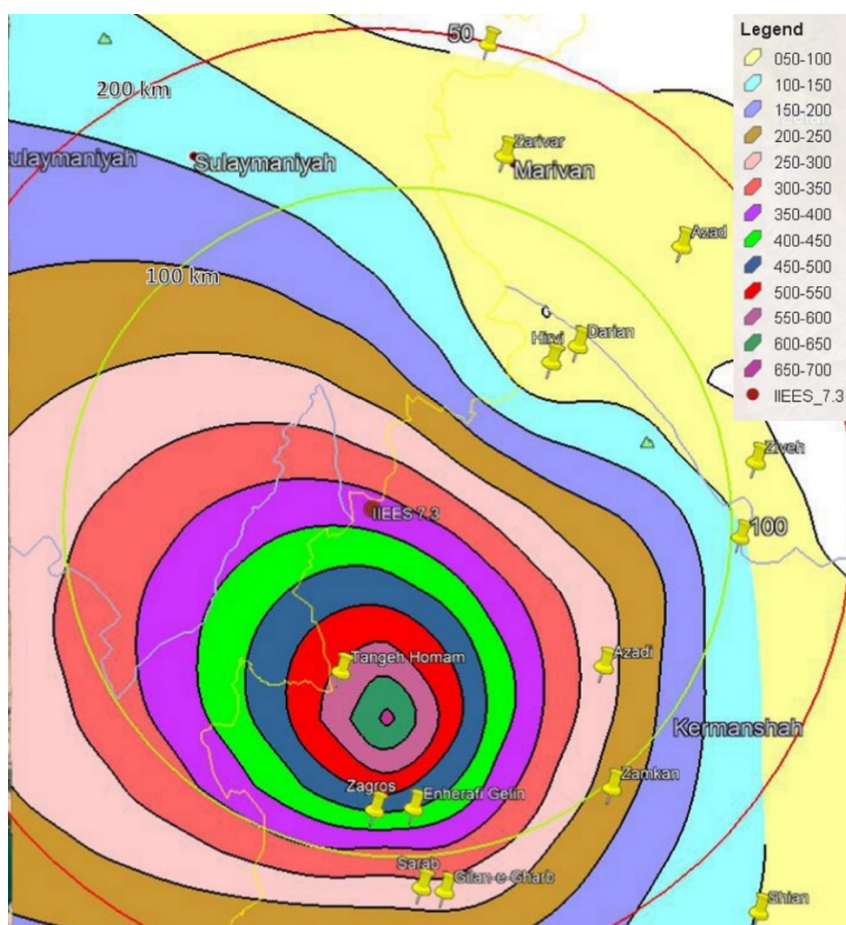
بنابراین با بررسی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در تمام ایستگاه‌ها، رکوردهایی که شتاب حداکثر بالای ۲۰۰ گال

جدول ۱. ایستگاه‌های با شتاب حداکثر بالای ۲۰۰ گال.

کد ایستگاه	نام ایستگاه	فاصله رومرکز (km)	عرض جغرافیایی ایستگاه	طول جغرافیایی ایستگاه	حداکثر شتاب زمین (cm/s ²)	سرعت موج برشی (m/s)
SPZ	سرپل‌ذهاب	۳۹/۰۳۴	۳۴/۴۶۰	۴۵/۸۷۰	۶۴۵	۶۱۹
KRD	کرد	۶۶/۱۹	۳۴/۲۸۰	۴۶/۲۴۰	۳۱۵	۸۰۰
GRS	گورسفید	۶۵/۹۲۵	۳۴/۲۲۰	۴۵/۸۵۰	۲۶۲	۴۰۳
JAV	جوانرود	۵۳/۰۶۹	۳۴/۸۱۰	۴۶/۴۹۰	۲۰۸	۲۹۸

جدول ۲. سدهای در حال بهره‌برداری در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زلزله.

عنوان	نوع سد	حجم مخزن (م.م.م)	ارتفاع از پی (متر)	طول تاج (متر)	فاصله از مرکز (کیلومتر)
سد ازگله	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۳۰/۰۰	۶۵	۴۲۳	۸
سد آزاد و سامانه انتقال	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۳۰۰/۰۰	۱۲۵	۵۹۵	۸۲/۰
سد آزادی	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۷۰/۴۷	۶۴	۷۳۷	۵۹/۷
سد داریان	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۳۳۸/۰۰	۱۷۹	۳۶۸	۵۲/۲
سد پایداری (گیلانغرب)	خاکی با هسته رسی	۲۳/۷۰	۵۱	۷۵۵	۸۴/۶
سد ایوان (کنگیر)	خاکی با هسته رسی	۱۹/۰۶	۴۲	۷۴۵	۱۱۱/۴
سد سراب گیلانغرب (دایک)	خاکی	۶/۰۰	۲۰	۱۵۰۰	۸۳/۴
سد تنگ حمام (شهدای گمنام)	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۶۷/۱۰	۶۰	۴۳۷	۳۸/۲
سد زاگرس	خاکی همگن	۵۶/۶۰	۵۱	۱۲۳۰	۶۶/۵
زِمکان	خاکی با هسته رسی	۲۳/۰۰	۵۸	۲۷۸	۷۸/۹
سد زریوار	خاکی همگن	۵۸/۰۰	۱۱	۱۷۷۰	۵۷/۷
ژاوه	سنگریزه‌ای با هسته رسی	۹۵/۰۰	۸۶	۳۰۰	۷۹/۴
سد زیویه	خاکی با هسته رسی	۱۶/۲۴	۵۲	۵۶۰	۷۹/۳



شکل ۲. منحنی‌های هم‌شتاب، اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و محل سدهای بهره‌بردار در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زلزله.

۴ شبیه‌سازی مونت کارلو

روش مونت-کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. روش‌های مونت-کارلو معمولاً برای شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شوند. روال و فرایند شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم مونت کارلو برای مسائل مختلف کمابیش مشابه است. ابتدا یک عدد تصادفی انتخاب می‌شود و سپس احتمال وقوع یک رخداد با عدد تصادفی تولید شده مقایسه می‌شود، در صورتی که عدد تولید شده معیار احتمال را برآورد کند در مرحله بعد یک فرایند یا مجموعه‌ای از تحولات رخ می‌دهد. این روال می‌تواند چندین بار تکرار شود و به‌ازای هر تکرار یک خروجی قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌شود. در

بخش نهایی مجموعه نتایج و پاسخ‌های شبیه‌سازی شده تحت‌پردازش‌های آماری قرار گرفته و مورد تفسیر قرار می‌گیرد. هر الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو شامل بخش‌های اساسی مشابهی می‌باشد. این اجزا عبارت‌اند از تولید اعداد تصادفی، تابع توزیع احتمال، قواعد نمونه‌برداری، تخمین خطا و کاهش انحراف معیار پراکندگی، موازی‌سازی و الگوریتم متروپلیس (کروز و همکاران، ۲۰۱۳؛ روبینستین و کروز، ۲۰۱۶) که شرح مختصری از اعداد تصادفی، تابع توزیع احتمال و الگوریتم متروپلیس در ادامه ارائه شده است.

اعداد تصادفی: هسته اصلی هر روش شبیه‌سازی مونت کارلو تولید اعداد تصادفی می‌باشد. امروزه الگوریتم‌های بسیار متعدد و پیچیده‌ای برای تولید اعداد

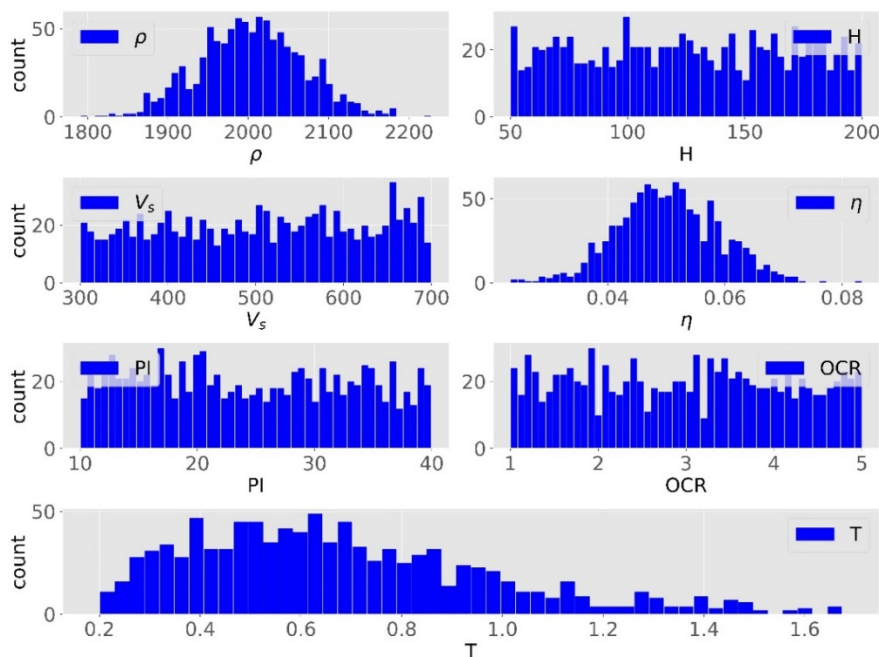
تصادفی است، که مبتنی بر تغییر وضعیت انرژی سیستم می‌باشد. به‌طور کلی هنگام شبیه‌سازی یک متغیر، اگر حرکت در جهت کاهش انرژی سیستم باشد، مقدار تصادفی تولید شده مورد قبول می‌باشد. در صورتی که حرکت در جهت افزایش انرژی سیستم باشد، مقدار انرژی نرمال شده با یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک مقایسه شده و در صورت کوچک‌تر بودن انرژی نرمال شده، مقدار در نظر گرفته شده برای متغیر مورد قبول بوده و فرایند شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. در غیر این صورت فرایند شبیه‌سازی تکرار می‌شود.

در مطالعه حاضر با بررسی سدهای موجود در منطقه و بر پایه اطلاعات موجود، بازه تغییرات مشخصات هندسی و مشخصات مکانیکی مصالح بدنه سد و توزیع‌های آماری پارامترهای تصادفی مهم، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شد.

تصادفی استفاده می‌شود. نکته مهم در فرایند تولید اعداد تصادفی اطمینان از عدم تولید داده‌های تکراری می‌باشد. در حال حاضر مولدهای تولید اعداد تصادفی در کامپیوترها پس از تولید 10^{28} دنباله از اعداد ممکن است اعداد تصادفی مشابه تولید کنند.

تابع توزیع احتمال: یکی از مهم‌ترین بخش‌های روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال برای متغیر مورد نظر می‌باشد. انتخاب مناسب تابع توزیع احتمال بسیار حساس بوده و نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مطالعه حاضر با بررسی ادبیات فنی مناسب‌ترین توابع توزیع احتمال برای متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است.

الگوریتم متروپلیس: الگوریتم متروپلیس از مهم‌ترین و ساده‌ترین الگوریتم‌های نمونه‌برداری در یک شبیه‌سازی



شکل ۳. تغییرات و توزیع‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای مختلف سد (محور افقی پارامترهای تصادفی سد و محور قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده).

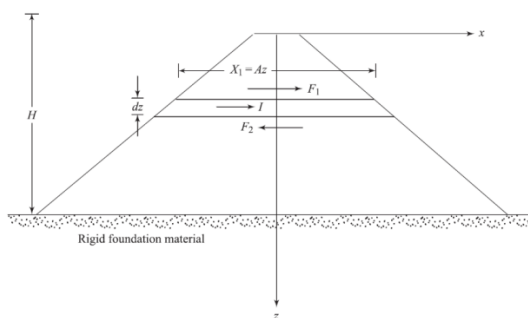
۱- چگالی مصالح (ρ) توزیع نرمال با میانگین ۲۰۰۰
۲- ارتفاع سد (H) توزیع یکنواخت در بازه ۵۰ تا ۲۰۰ متر

پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

۱- چگالی مصالح (ρ) توزیع نرمال با میانگین ۲۰۰۰

که در این رابطه J_0 و J_1 توابع بسل، β_n مقدار صفر تابع فرکانس $(J_0(\omega_n H \times \sqrt{\frac{\rho}{G}}) = 0)$ و ω_n فرکانس نامیرای طبیعی سد $(\frac{\beta_n}{H} \times \sqrt{\frac{G}{\rho}})$ می باشد.

با حل معادله ۲ جابه‌جایی نسبی در ارتفاع سد حاصل می‌شود که با مشتق‌گیری می‌توان سرعت و شتاب را محاسبه کرد. برای به‌دست آوردن پاسخ‌های مطلق باید حرکت زمین به پاسخ‌های نسبی سد اضافه شود. برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک‌ها و محاسبه پاسخ‌های سد در حالت‌های غیرخطی از روش خطی معادل استفاده شده است. انجام تحلیل‌های خطی معادل، نیازمند منحنی‌های میرایی و کاهش مدول برشی می‌باشد. برای تهیه منحنی‌های میرایی و مدول برشی از روابط کلی دارندلی (۲۰۰۱) استفاده شده است.



شکل ۴. روش تیر برشی برای محاسبه شتاب حداکثر تاج سد.

۵ تحلیل‌های پارامتری برای به‌دست آوردن

محتمل‌ترین امتداد بحرانی

با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون کدهای مربوطه تهیه شده و تحلیل‌های پارامتری متعددی انجام شده است. برای این کار ابتدا برپایه اطلاعات و مشخصات سدهای موجود در منطقه و با در نظر گرفتن توزیع‌های آماری شکل ۳ تعداد ۱۰۰۰ مدل عددی سد خاکی با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد. در مرحله بعدی، هر

۳- سرعت موج برشی (Vs) توزیع یکنواخت در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ متر بر ثانیه

۴- میرایی ویسکوز (η) توزیع نرمال با میانگین ۰/۰۵ و انحراف معیار ۰/۰۰۸۴

۵- اندیس پلاستیسیته (PI) توزیع نرمال در بازه ۱۰ تا ۴۰

۶- ضریب پیش‌تحکیم‌یافتگی مصالح بدنه سد (OCR) توزیع یکنواخت در بازه ۱ تا ۵

با در نظر گرفتن همبستگی بین پارامترهای تصادفی عنوان‌شده و توزیع‌های آماری مفروض (شکل ۳) تعداد ۱۰۰۰ مدل عددی سد خاکی با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد (گریفیث و فتون، ۲۰۰۸). در شکل ۳، محورهای افقی پارامترهای مهم در نظر گرفته‌شده و محورهای قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. نمودار میله‌ای پایین شکل ۳، مقدار پیروید غالب مدل‌های شبیه‌سازی شده و تعداد آنها را نشان می‌دهد.

۴ مدل‌سازی عددی سدهای خاکی

با توجه به حجم زیاد تحلیل‌های تاریخچه زمانی و زمانی بودن این نوع تحلیل‌ها، برای مدل‌سازی سدهای خاکی از روش مدل تیر برشی با سختی متغیر در ارتفاع استفاده شده است (داکولاس و گزتاس، ۱۹۸۵) مطابق شکل ۴، معادله دیفرانسیل حاکم بر مسئله به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2}, \quad (1)$$

با حل معادله دیفرانسیل حاکم جابه‌جایی نسبی در ارتفاع سد به صورت رابطه ۲ به‌دست می‌آید.

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0[\beta_n(z/H)]}{\omega_n \beta_n J_1(\beta_n)} \int_0^t \ddot{u}_g \sin[\omega_n(t-t')] dt', \quad (2)$$

برابر ۱۲۰ درجه می‌باشد. در صورتی که در رکوردهای دیگر و سایر پاسخ‌ها این چنین روند مشخصی وجود ندارد.

دقت در نمودارهای ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که در بیشتر موارد پاسخ‌های حداکثر در امتدادی غیر از امتداد شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده (۰ و ۹۰ درجه) رخ می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج می‌توان استنباط کرد که هرچقدر مقدار PGA رکورد پایین‌تر باشد مقدار پراکندگی در امتدادهای بحرانی بیشتر می‌باشد. برای مثال شکل‌های ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که پراکندگی امتدادهای بحرانی ناشی از رکوردهای جانرود و کرنند بیشتر از رکوردهای سرپل‌ذهاب و گورسفید می‌باشد. در رکوردهای سرپل‌ذهاب و گورسفید که PGA بالاتری دارند، امتدادهای بحرانی نسبت به دو رکورد ضعیف‌تر از روند مشخص‌تری پیروی می‌کنند. برای مثال در این رکوردها احتمال این که امتداد بحرانی در بازه ۰-۵۰ یا ۱۵۰-۱۸۰ درجه قرار بگیرند بیشتر از سایر بازه‌ها است.

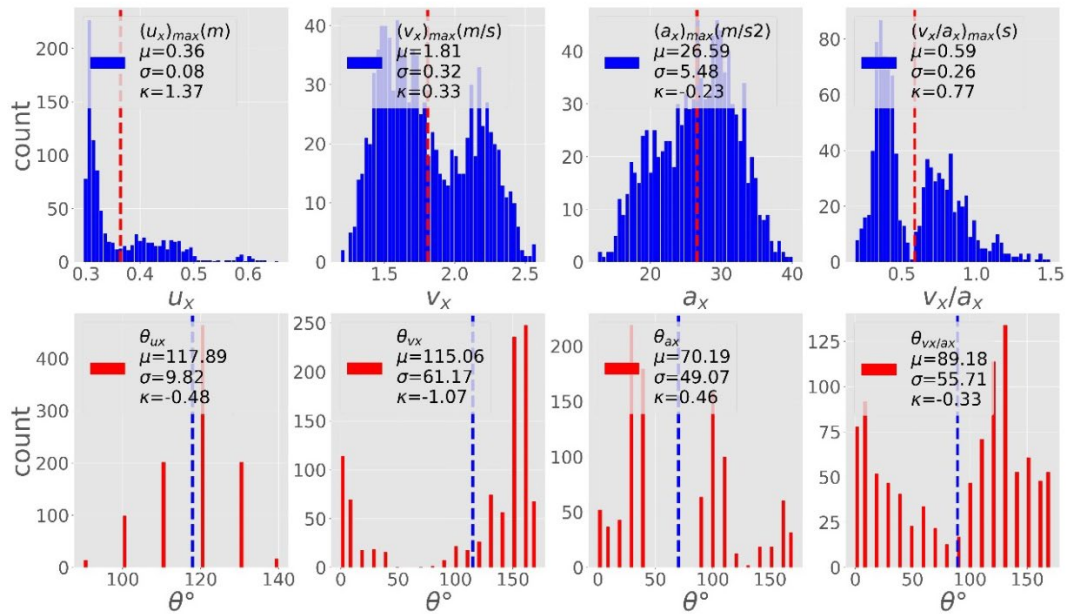
برای بررسی احتمال رخ‌دادن پاسخ حداکثر در امتدادهای شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده (۰ و ۹۰ درجه) تعداد تحلیل‌هایی که امتدادهای بحرانی در بازه مشخص (۱۰، ۱۰-) و یا بازه (۸۰، ۱۰۰) درجه قرار می‌گیرند، محاسبه شده و بر تعداد کل شبیه‌سازی (۱۰۰۰) تقسیم شده است. برای رکوردهای مختلف SPZ، KRD، GRS و JAV و برای پاسخ‌های مختلف جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب این مقادیر محاسبه شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشخص است که امتدادهای بحرانی وابسته به رکوردهای ورودی و پاسخ‌های بدنه سد می‌باشد. به‌عنوان مثال احتمال این که شتاب‌نگاشت ثبت‌شده سرپل‌ذهاب منجر به جابه‌جایی حداکثر تاج سد شود، نزدیک به ۱۰ درصد بوده در حالی که احتمال این که همین رکورد منجر به سرعت یا شتاب حداکثر تاج سد شود تقریباً ۳۰ درصد می‌باشد.

کدام از ۴ رکورد انتخاب‌شده سرپل‌ذهاب، کرنند، گورسفید و جانرود در زوایای مختلف ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام‌های ۱۰ درجه دوران داده‌شده و به هریک از مدل‌های عددی سد اعمال شد. برای هر کدام از مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده سد خاکی تعداد ۱۸ (۱*۱۸) تحلیل تاریخیچه زمانی خطی معادل انجام شد. در مجموع تعداد تحلیل‌های انجام‌شده برابر ۷۲۰۰۰ (۱۸*۴*۱۰۰۰) می‌باشد. مقادیر جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سدهای شبیه‌سازی‌شده برای جهت‌های مختلف محاسبه شد. مقادیر حداکثر پاسخ‌های شتاب، سرعت، جابه‌جایی و نسبت سرعت به شتاب تاج سد $(u_x)_{max}$ ، $(v_x)_{max}$ ، $(a_x)_{max}$ ، $(v_x/a_x)_{max}$ و امتدادهای مربوط به هر کدام از این پاسخ‌ها $(\theta_{ax})_{max}$ ، $(\theta_{vx})_{max}$ ، $(\theta_{ax})_{max}$ ، $(\theta_{vx/ax})_{max}$ برای ایستگاه‌های مختلف محاسبه شد. شکل‌های ۵ تا ۸ نمودارهای هیستوگرام پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی ناشی از رکوردهای ثبت‌شده در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب (SPZ)، کرنند (KRD)، گورسفید (GRS) و جانرود (JAV) را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محورهای افقی پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب حداکثر تاج سدهای شبیه‌سازی‌شده و امتدادهای متناظر با هر کدام از این پاسخ‌ها، و محورهای قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی‌شده سدهای خاکی را نشان می‌دهد.

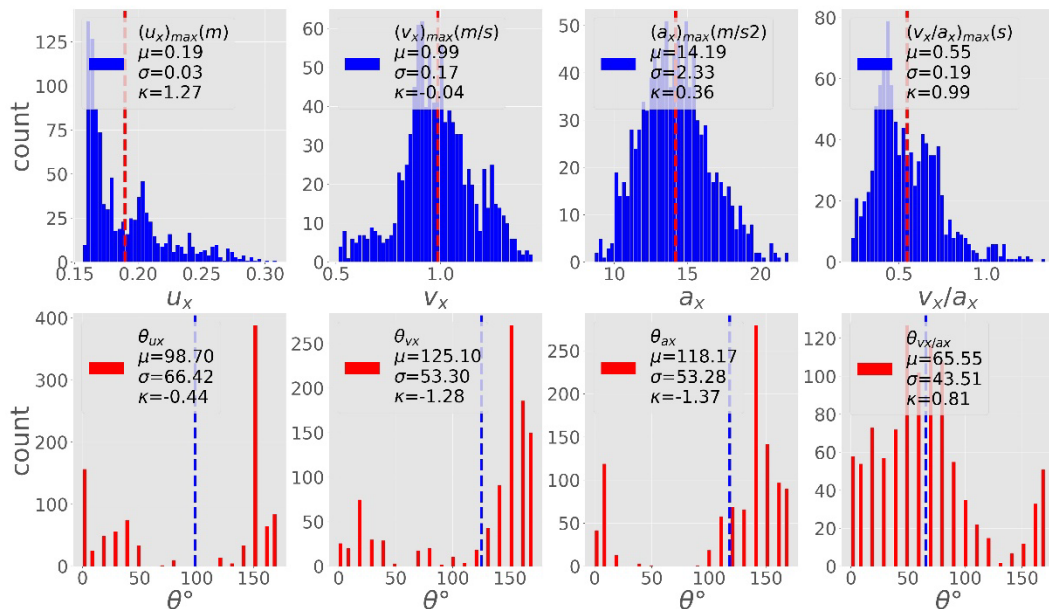
برای مثال در شکل ۵ که مربوط به رکورد سرپل‌ذهاب می‌باشد، مقادیر جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سد نسبت به رکوردهای دیگر مقادیر بالاتری دارد. با توجه به این شکل مشخص است که باوجود این که توزیع‌های مشخصی برای هر کدام از متغیرها در نظر گرفته شده، پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی از توزیع و روند مشخصی پیروی نمی‌کنند. مهم‌ترین نکته در شکل ۵ مربوط به امتداد بحرانی جابه‌جایی تاج سد می‌باشد که در بیشتر سدهای شبیه‌سازی‌شده مقدار زاویه بحرانی تقریباً

سدهای خاکی بدون در نظر گرفتن امتدادهای بحرانی می‌تواند منجر به پاسخ‌های غیرمحافظة کارانه شده و فرایندهای طراحی و تصمیم‌گیری درباره عملکرد این نوع سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

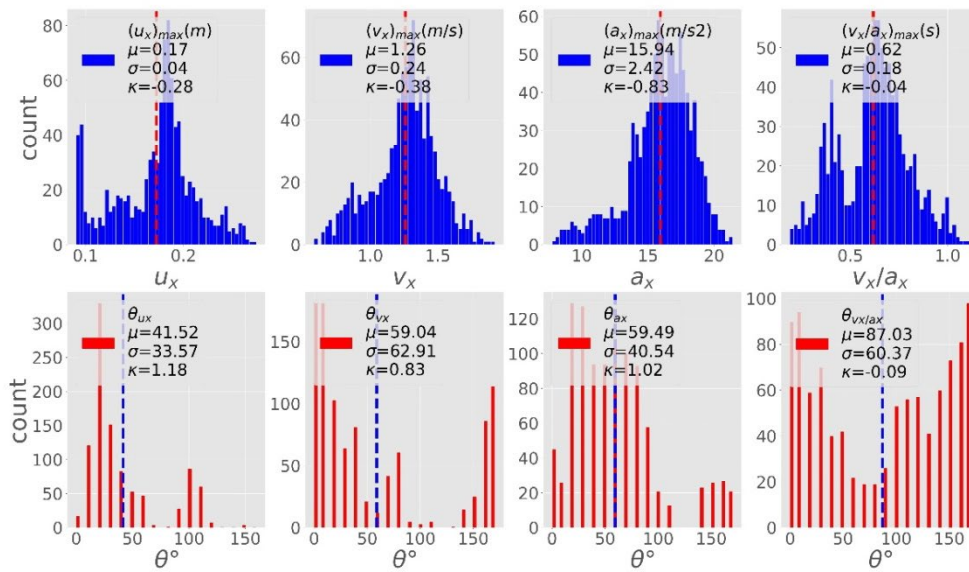
تقریباً در بیشتر مواقع احتمال رخداد شتاب حداکثر ناشی از شتاب‌نگاشت ثبت‌شده نزدیک ۳۰ درصد می‌باشد، در صورتی‌که پراکندگی نتایج در پاسخ‌های سرعت و جابه‌جایی بیشتر می‌باشد. بنابراین استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی



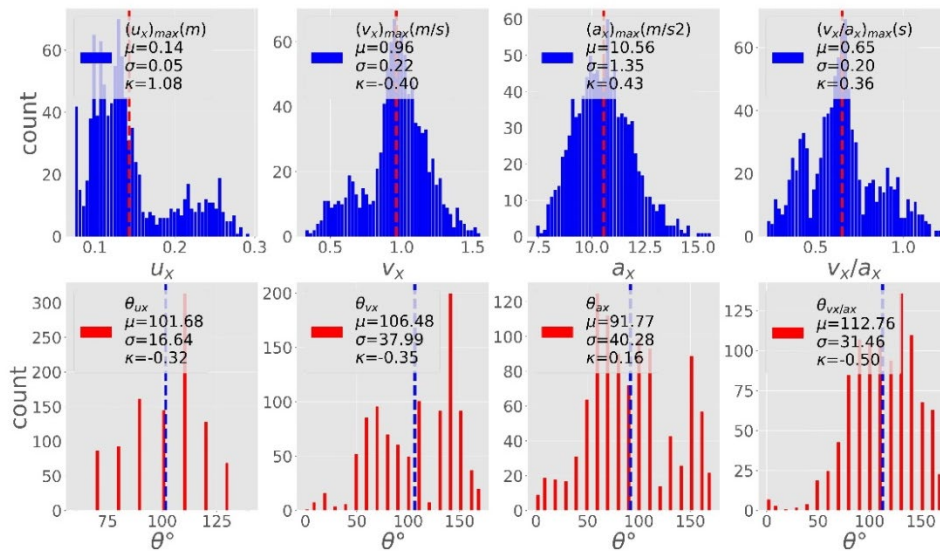
شکل ۵. نمودارهای هیستوگرام پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سدهای شبیه‌سازی شده ناشی از رکورد سرپل‌ذهاب (SPZ) (محور افقی پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی متناظر و محور قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده‌سد).



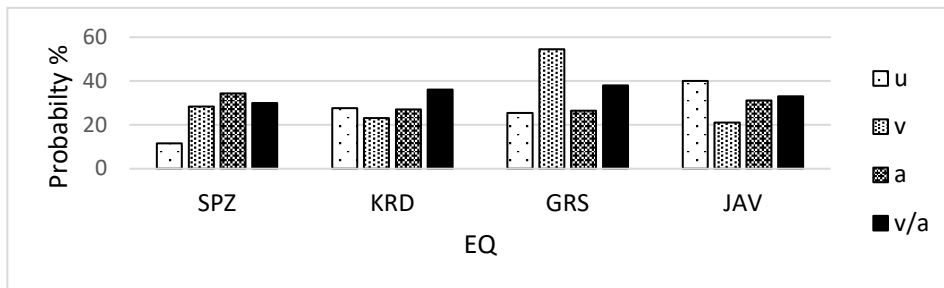
شکل ۶. نمودارهای هیستوگرام پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سدهای شبیه‌سازی شده ناشی از رکورد کرند (KRK) (محور افقی پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی متناظر و محور قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده‌سد).



شکل ۷. نمودارهای هیستوگرام پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سدهای شبیه‌سازی شده ناشی از رکورد گورسفید (GRS) (محور افقی پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی متناظر و محور قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده سد).



شکل ۸. نمودارهای هیستوگرام پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نسبت سرعت به شتاب تاج سدهای شبیه‌سازی شده ناشی از رکورد جوانرود (JAV) (محور افقی پاسخ‌ها و امتدادهای بحرانی متناظر و محور قائم تعداد مدل‌های شبیه‌سازی شده سد).



شکل ۹. احتمال حداکثر شدن پاسخ‌های تاج سد ناشی از اعمال شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله احتمال این که تحلیل‌های تاریخچه زمانی سدهای خاکی تحت رکوردهای ثبت‌شده زلزله کرمانشاه منجر به پاسخ‌های بحرانی شوند، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شده است. به‌طور کلی با بررسی پاسخ‌های به‌دست آمده نتایج زیر در مطالعه حاضر حاصل گردید:

۱- امتدادهای بحرانی (امتداد متناظر با پاسخ حداکثر) به مشخصات سد، رکورد ورودی زلزله و نوع پاسخ بستگی دارد. به‌طوری‌که امتدادهای بحرانی برای پاسخ جابه‌جایی تاج سد متفاوت از امتدادهای بحرانی برای محاسبه شتاب تاج سد می‌باشد.

۲- احتمال رخداد پاسخ‌های بحرانی در صورت استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده وابسته به رکورد ورودی زلزله و نوع پاسخ در نظر گرفته شده می‌باشد. به‌طور مثال احتمال این که رکورد ثبت‌شده ایستگاه سرپل‌ذهاب در تحلیل‌های تاریخچه زمانی منجر به پاسخ‌های بحرانی جابه‌جایی تاج سد شود، نزدیک ۱۰ درصد بوده در حالی که همین رکورد با احتمال تقریباً ۳۰ درصد منجر به پاسخ بحرانی سرعت یا شتاب تاج سد می‌شود. در رکورد ایستگاه جوانرود نتایج نسبت به نتایج قبلی متفاوت بوده و در صورت استفاده از شتاب‌نگاشت ثبت‌شده احتمال رخداد پاسخ بحرانی جابه‌جایی تاج سد نزدیک به ۴۰ درصد می‌باشد.

۳- نمودارهای هیستوگرام امتدادهای بحرانی نشان می‌دهند که در حالت کلی نمی‌توان توزیع آماری مشخصی برای امتدادهای بحرانی در نظر گرفت.

۴- هرچقدر مقدار PGA رکورد بیشتر باشد، پراکندگی امتدادهای بحرانی رکورد موردنظر کمتر می‌باشد.

در مجموع، تحقیق حاضر که با استفاده از مدل ساده تیر برشی با سختی متغیر در ارتفاع انجام شده است نشان می‌دهد استفاده متعارف از رکوردهای زلزله‌های ثبت‌شده

توسط تجهیزات شتاب‌نگاری در فرایند انجام تحلیل‌های دینامیکی سدهای خاکی می‌تواند منجر به ارائه پاسخ دست‌پایین از رفتار این‌گونه سازه‌ها شود. مطالعات تکمیلی تحلیل‌های دینامیکی در حالت استفاده از دوران امتداد شتاب‌نگاشت‌ها در برنامه کاری قرار دارد.

۷ قدردانی

تحقیق حاضر بخشی از نتایج پروژه پژوهشی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با عنوان «بررسی عملکرد لرزه‌ای سدهای خاکی تحت تحریک بحرانی ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک گسل» و کد پژوهشی ۶۳۲۳ می‌باشد.

۸ مراجع

- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N. A., 2006, Orientation-independent measures of ground motion: Bulletin of the Seismological Society of America, **96**(4A), 1502-1511.
- Dakoulas, P. and Gazetas, G., 1985, A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments: International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **4**(4), 166-182.
- Darendeli, M. B., 2001, Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves: Phd thesis, The university of Texas at Austin.
- Davoodi, M., Jafari, M. and Hadiani, N., 2013, Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation: Engineering Geology, **158**, 66-76.
- Davoodi, M. and Sanjari, F., 2018, Influence of Different Orientations and Reference Axes of Ground Motions on the Engineering Demand Parameters of an Embankment Dam: 5th International Symposium on Dam Safety, Istanbul.
- Davoodi, M. and Sanjari, F., 2019, Investigation on the Effects of Different Incident Angle of Sarpol-e-Zahab Earthquake Ground Motions on an Embankment Dam: Journal of Seismology and Earthquake Engineering, **20**(4), 1-12
- Fontara, I.-K. M., Kostinakis, Konstantinos G,

- Grigorios, E Manoukas and Asimina, M Athanatopoulou., 2015, Parameters affecting the seismic response of buildings under bi-directional excitation: *Structural Engineering and Mechanics*, **53**(5), 957.
- Griffiths, D. and Fenton, G., 2008, *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*: Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Hadiani, N., Davoodi, M. and Jafari, M., 2013, Correlation between settlement of embankment dams and ground motion intensity indices of pulse-like records: *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, **37**(C1), 111.
- Hadiani, N., 2011, Investigation of the Effect of Near-Fault Earthquakes on the Seismic Behavior of Embankment Dams, PhD Tesis, Islamic Azad University, Science and Technology Branch
- Howard, J. K., Tracy, C. A. and Burns, R. G., 2005, Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion: *Earthquake Spectra*, **21**(4), 1063-1092.
- Huang, Y.-N., Whittaker, A. S. and Luco, N., 2008, Maximum spectral demands in the near-fault region: *Earthquake Spectra*, **24**(1), 319-341.
- Huang, Y.-N., Whittaker, A. S. and Luco, N., 2009, Orientation of maximum spectral demand in the near-fault region: *Earthquake Spectra*, **25**(3), 707-717.
- International Institute of Earthquake Engineering and Sismology (IIEES), 2017, Preliminary Report of Mw 7.3 Sarpol-e Zahab Earthquake on November 12, 2017. 5th Edition, Tehran, Iran (in Persian).
- Iran Water Resources Management, Deputy of Planning and Development, accessed 20 February 2018; <http://smd.bhrc.ac.ir/Portal/fa/FastDownload>;
- Kroese, D. P., Taimre, T. and Botev, Z. I., 2013, *Handbook of Monte Carlo Methods* (Vol. 706): John Wiley and Sons.
- Road, Housing and Urban Research Center (BHRC), accessed 22 November 2017; <http://smd.bhrc.ac.ir/Portal/fa/FastDownload>;
- Rubinstein, R. Y. and Kroese, D. P., 2016, *Simulation and the Monte Carlo Method* (Vol. 10): John Wiley and Sons.

Investigation of the Most Probable Critical direction of November 12, 2017 Sarpol-e Zahab earthquake records Using Monte Carlo Simulation

Mohammad Davoodi^{1*}, Fariborz Sanjari², Mohammad Kazem Jafari³, Navid Hadiani⁴, and Abbas Pourdeilami⁵

^{1*}Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

²Ph.D. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

³Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁵Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

(Received: 30 September 2021, Accepted: 31 January 2022)

Summary

Earthquake ground motions are generally recorded by digital accelerometers in three orthogonal components (two horizontal and one vertical). The vertical component is typically ignored and two horizontal records are used for the response analysis of most structures. In two-dimensional time history analysis, a stronger horizontal component of the as-recorded ground motion is generally used to evaluate the structural responses. However, the horizontal strong ground motion depends on the orientation of the sensors as installed in the field. Simple trigonometric calculations demonstrate that by rotating the sensors, different waveforms are recorded for a specific ground motion. Considering that the orientation of the sensors is random compared to the orientation of the structures and causative fault, the question arises as to what percentage of confidence the use of as-recorded ground motions leads to the maximum desired responses.

To investigate this issue, based on the information and specifications of embankment dams in the earthquake-stricken areas of Kermanshah and considering the appropriate statistical distributions, 1000 numerical models of embankment dams were simulated using the Monte Carlo simulation method. In the next step, each of the 4 selected records of Sarpol-e Zahab, Kerand, Goorsfeid, and Javanrood were rotated in different angles from 0 to 180 degrees with 10-degree steps and applied to each of the numerical models of the dam. Equivalent linear time history analysis was performed for each of the simulated numerical models of the dam resulting in a total of 72,000 ($18 * 4 * 1000$) analyses. The values of maximum acceleration, velocity, displacement, and velocity-to-acceleration ratios of the dam crest (and the directions associated with each of these responses) were calculated for different stations. Using the simulation results, the probability that as-recorded accelerations would lead to critical responses was calculated. The results can be summarized as follow:

- Critical directions depend on the characteristics of the dam, input motions, and the type of the response;
- The probability of occurrence of critical responses in the case of using recorded accelerations depends on the input motion and the type of response considered; for example, the probability that the Sarpol-e-Zahab record would lead to critical displacement is close to 10%, while the same record with a probability of approximately 30% leads to a critical velocity or acceleration. In Javanrood station, the results are different from the previous results, and in the case of using the recorded acceleration, the probability of occurrence of critical displacement is close to 40%;
- Histograms of critical directions show that in general, no specific statistical distribution can be considered for critical directions;
- The higher the PGA value of the record, the lower the scatter of critical directions of the record.

Keywords: critical direction, seismic response, Monte Carlo Simulation, Embankment dams

*Corresponding author:

m-davood@iiees.ac.ir