نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هشتم/ شماره بیست و هشتم /بهار ۱۴۰۰

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
8th Year / No. 28 / June 2021

بررسی احتمال خرابی سد خاکی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل و دور از گسل (مطالعه موردی: سد گتوند)

فرهود کلاته[1*]
سارا ایرانی ۲

چکیده

در مقالهٔ حاضر میزان اثر لحاظ مؤلفهٔ قائم زلزله در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر احتمال خرابی سد خاکی مورد مطالعه قرارگرفته است. به‌منظور صحت سنجی روند تحلیل دینامیکی غیرخطی سدهای خاکی، دو مثال مورد ارزیابی قرارگرفته و نتایج مقایسه گردید. برای ارزیابی اثر مؤلفهٔ قائم زلزله بر روی رفتار دینامیکی سدهای خاکی مدل دوبعدی از سد گتوند با استفاده از برنامهٔ تفاضل محدود FLAC-3D تهیه گردید. ۱۲ شتاب‌نگاشت شامل ۶ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و ۶ شتاب‌نگاشت متعلق به حوزه دور انتخاب شد. هرکدام از این زلزله‌ها یک‌بار تنها با مولفه افقی و بار دیگر با لحاظ مولفه قائم به همراه مؤلفهٔ افقی به سیستم سد و پی اعمال شدند. با لحاظ مؤلفهٔ قائم زلزله‌ها در تحلیل، توزیع ماکزیمم شتاب بیشینه در امتداد خط مرکزی سد به‌شدت دست‌خوش تغییر گردید. احتمال خرابی سد گتوند بر اساس تابع عملکرد معرفی‌شده محاسبه گردید. براین اساس احتمال خرابی سد در حالتی که اثر مؤلفهٔ قائم زلزله در تحلیل اعمال‌شده بود، برای زلزله‌های نزدیک به گسل ۱۴۹٪ و برای زلزله‌های دور از گسل ۲۳۱۹٪ افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی:

سد خاکی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، تفاضل محدود، FLAC-3D، مؤلفهٔ قائم زلزله، احتمال خرابی

۱*. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، f.kalateh@gmail.com
۲. کارشناس ارشد آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰ /۰۲/۱۷

مقدمه

یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین سازه‌های عمرانی، سدها هستند که به‌محض خرابی، خسارت‌های فراوانی به‌جا می-گذارند. با توجه به نتایج تجربی و تجربیات عینی از اثرات زلزله روی سدهای موجود خاکی و سنگریزه‌ای، تغییر شکل بدنه سد و ناپایداری شیب سد اشکال متداول خسارات زلزله در این سدها است (Li و همکار،۲۰۱۷؛ Lv و همکاران، ۲۰۲۰؛ Xu و همکاران، ۲۰۱۴؛ Zhou و همکاران، ۲۰۱۱). لذا بررسی و تحلیل دقیق پایداری سدها بخصوص در برابر بارهای لرزه‌ای بسیار حیاتی است. ازآنجاکه رفتار واقعی مصالح خاکی مخصوصاً تحت بارهای دینامیکی به‌صورت غیرخطی و پیچیده است (Najma و همکار، ۲۰۱۷)، پاسخ سد در برابر زلزله نیازمند تحلیل دینامیکی دقیق برای پیش‌بینی رفتار سد در حین زلزله است. (Davoodi و همکاران، ۲۰۱۳) پاسخ دینامیکی سدهای خاکی را تحت حرکت لرزه‌ای نزدیک گسل و دور از میدان با استفاده از تحلیل ۱۸۰ تاریخچه زمانی غیرخطی در سه سطح شدت، موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نشست تاج و جابجایی سطح لغزش سد خاکی برای زلزله نزدیک گسل نسبت به‌دوراز میدان بیشتر است. همچنین برای حرکت لرزه‌ای نزدیک گسل دارای پالس، شاخص‌های شدت حرکت لرزه‌ای مرتبط با سرعت، مانند سرعت پیک زمین، بسیار مؤثرتر از شتاب پیک زمین بود. (Pundrik و همکاران، ۲۰۲۰) یک سد مخزنی را با روش المان محدود تحت ۱۶ زلزله‌ی نزدیک به گسل و دور از گسل، مورد تحلیل دینامیکی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ترک‌هایی در محل پاشنه و پنجه‌ی سد دیده می‌شود. همچنین نتایج تحلیل نشان‌دهنده آن بود که زلزله‌های نزدیک به گسل به دلیل دارا بودن پالس‌هایی با پریود بیشتر (فرکانس کمتر)، منجر به پاسخ دینامیکی شدیدتر در مدل شد. در آخر نتیجه گرفتند برای تشخیص رفتار سدهای مخزنی نیاز به تحلیل‌های غیرخطی بیشتری است. (Ebrahimian،۲۰۱۲) مطالعهٔ عددی برای بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی انجام داد. رفتار خاک، مقاومت مواد پوسته و شرایط مخزن سد بر پاسخ دینامیکی سد خاکی انجام شد. جابجایی افقی و کرنش برشی افزایش و شتاب تاج سد کاهش یافت، ثانیاً تمامی این مقادیر در شرایطی ۵ سد با ارتفاع‌های ۴۰ تا ۲۸۰ متر تحت آنالیز قرار گرفت و تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت ۳ زلزله در سه سطح DBE، MDE و MCE به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شد. او نتیجه گرفت که اولاً با افزایش ارتفاع سد، جابجایی افقی و کرنش برشی افزایش و شتاب تاج سد کاهش میابد، ثانیاً تمامی این مقادیر در شرایطی که مخزن سد پر و همراه با تراوش در بدنه سد است، بیشتر از زمانی است که مخزن خالی است و این مقادیر در شرایط مخزن پر بدون تراوش از دو شرط قبلی کمتر است. (Gorai و همکار، ۲۰۱۹) یک سد مخزنی بتنی را با روش المان محدود در برنامه‌ی MATLAB مدل کردند و برای تحلیل دینامیکی، ۶ زلزله‌ی نزدیک به گسل و ۶ زلزله‌ی دور از گسل را به مدل اعمال کردند. آن‌ها مدت‌زمان غالب زلزله را در تحلیل دینامیکی موردتوجه قرار دادند و متوجه رفتارهای متفاوت در زلزله‌های نزدیک به گسل شدند. در این تحقیق، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سد نشان داد که زلزله-های نزدیک به گسل، تهدید بیشتری برای ایمنی لرزه‌ای سد ایجاد کرد، درحالی‌که زلزله‌های دور از گسل باعث بدتر شدن عملکرد سد شد؛ بنابراین، پیشنهاد دادند که برای بررسی ایمنی لرزه‌ای سد بتنی مخزنی، باید از هر دو نوع زلزله در تحلیل استفاده شود و برای بررسی دقیق‌تر رفتار سد باید تحقیقات جامع‌تر با زلزله‌های متفاوت‌تر صورت بگیرد. (Feng و همکاران،۲۰۱۰) سد لیتوان در تایوان را تحت اثر زلزله ای نزدیک به گسل به روش تفاضل محدود مورد تحلیل دینامیکی قرار دادند و نشان دادند پاسخ سد تحت اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم متفاوت از رفتار سد تحت اثر مولفه افقی به‌تنهایی است. لیکن به دلیل پایین بودن بیشینه شتاب قائم در تحلیل ایشان تفاوت‌ها چندان آشکار نبود. (Ebrahimian وVafaian ، ۲۰۰۸) رفتار لرزه‌ای سد خاکی را با شرایط انتخابی متفاوت، موردمطالعه پارامتری قرار دادند و تأثیر ارتفاع سد بر رفتار لرزه‌ای و انتخاب عرض بهینه برای تاج سد را با استفاده از نرم‌افزار FLAC-2D موردبررسی قرار دادند. معمولاً زلزله‌های نزدیک به گسل شدیدتر از زلزله‌های دیگر ثبت‌شده‌اند چراکه در نزدیکی چشمه لرزه‌ای اجازه کاهندگی قابل‌توجهی به زلزله نمی‌دهد. هرچند به‌طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصلهٔ مشخصی برای زلزله‌های

حوزه‌ی نزدیک تعریف کرد اما به‌طورمعمول فرض می‌شود جنبش‌های ثبت‌شده در فاصله‌ای کمتر از ۲۰ کیلومتر از کانون زلزله، زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک باشند (Alav و همکار،۲۰۰۱; Chopra و همکار، ۲۰۰۱). مطالعات اخیر نشان می‌دهد تأثیر زلزله‌های حوزهٔ نزدیک می‌تواند بیشتر از ۲۰ کیلومتر باشد (Zhang و همکار، ۲۰۰۹). برخلاف زلزله‌های حوزه‌ی دور که انرژی زلزله در کل زمان ارتعاش توزیع می‌شود، در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک بخش عمده‌ای از انرژی زلزله در یک یا چند پالس ابتدایی قرار دارد (Sadigi و همکار، ۲۰۱۵). بیشتر پژوهش‌های گذشته بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌های خاکی بدون در نظر گرفتن اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله صورت گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد ارتعاشات قائم در قیاس با ارتعاشات افقی زلزله ضعیف هستند و در بسیاری موارد از ضرایبی برای ارتباط مؤلفه‌ی قائم با مؤلفه‌ی افقی استفاده می‌شده است (Ambraseys همکار ۲۰۰۳). این مسئله در موارد نواحی نزدیک به گسل صادق نیست زیرا در بسیاری از موارد بیشینه شتاب قائم زلزله‌ای می‌تواند از بیشینه شتاب افقی همان زلزله تجاوز کند (Silva، ۱۹۹۷; FEMA، ۲۰۰۵). (Bayraktar و همکاران، ۲۰۰۹) نشان داد که زلزله‌های نزدیک به گسل می‌توانند جابجایی‌های بزرگ‌تری در سدهای بتنی از خود به‌جای بگذارند. (Li و همکاران، ۲۰۲۰) با بکارگیری نرم افزار تجاری ABAQUS، روشی جدید برای تحلیل آسیب لرزه‌ای سدهای سنگریزه‌ای بلند ارائه کردند. این روش نه‌تنها می‌تواند گروه‌بندی و تفاوت مصالح را در نظر بگیرد، بلکه هنگام محاسبه شاخص قابلیت اعتماد نیازی به دانستن توزیع احتمال واقعی متغیرهای اساسی ندارد. (Rapti و همکاران، ۲۰۱۸) یک مکانیسم خرابی برای یک سیستم زیربنایی که تحت بارگذاری دینامیکی قرارگرفته بود مشخص کردند. این مکانیسم به عمق لایه‌ی روانگرایی و خصوصیات زمین‌لرزه‌ی ورودی بستگی داشت. آن‌ها نتایج حاصل از تحقیق را به مدل و زمین‌لرزه ورودی محدود کردند. (Yao و همکاران، ۲۰۱۸) تحلیل دینامیکی روی سد سنگریزه‌ای با رویه‌ی بتنی بلند را تحت زمین‌لرزه‌های یکنواخت و غیریکنواخت، به روش المان محدود انجام دادند. آن‌ها نشان دادند پاسخ دینامیکی CFRD[1] تحت ورودی غیریکنواخت به‌طورکلی کمتر است که نشان‌دهنده تحلیل محافظ کارانه است، درحالی‌که تنش کششی دینامیکی در اطراف لبه‌های صفحه دال بتنی در واقعیت خیلی بیشتر است. سرانجام نتیجه گرفتند مدل‌های دینامیکی برای محیط‌های سنگی، ساده هستند و باید مدل‌های پلاستیکی بهتری ارائه شوند. (Vecchietti و همکاران، ۲۰۱۹) عملکرد لرزه‌ای یک سد سنگریزه‌ای در جنوب ایتالیا را با دو روش[2]نیومارک و DDBA[3] مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و منحنی‌های شکنندگی را برای این سد ترسیم کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند این دو روش می‌توانند به‌عنوان ارزیابی اولیه مورداستفاده قرار بگیرند، زیرا خصوصیات و عملکرد خاک‌ریز (مثل جابجایی وجه نفوذناپذیر بالادست) با این روش‌ها، نمی‌تواند به‌درستی ارزیابی شود. در مطالعهٔ حاضر با مدل‌سازی به روش تفاضل محدود اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله روی رفتار دینامیکی سد گتوند واقع در جنوب کشور تحت اثر زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل و دور از گسل بررسی گردیده و احتمال خرابی سد در اثر کاهش ارتفاع سد به دلیل نشست تاج احتمال وقوع روگذری استخراج گردیده و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. سد گتوند علیا بزرگ‌ترین سد خاکی کشور به ارتفاع ۱۷۶ متر و عمق پی ۱۸۰ متر از نوع سد سنگریزه‌ای با هسته رسی است. حجم کل مخزن ۴٫۵ میلیارد مترمکعب است که بر روی رودخانه کارون در جنوب‌غربی ایران ساخته شده است. در این تحقیق پاسخ دینامیکی سد خاکی، تحت زلزله‌های مختلف دور و نزدیک، موردبررسی قرار گرفت، به‌طوری‌که ۶ زلزله دور و ۶ زلزله نزدیک یک‌بار فقط با مولفه افقی و بار دیگر با مولفه افقی و قائم، به سیستم اعمال گردید و بر اساس آن، مدل تحلیل شد. نتایج در قالب نمودارهای تغییرشکل افقی و قائم تاج سد و شتاب در نقاط مختلف بدنه سد ارائه شده است.

روند تحلیل و مدل رفتاری

در این پژوهش برای تحلیل دینامیکی از نرم‌افزار تفاضلات محدود صریح FLAC-3D ورژن ۵ استفاده شد. این برنامه رفتار سازه‌هایی را که در آن خاک، سنگ و یا

[1] Concrete Face Rockfill Dam
[2] Newmark
[3] Direct Displacement-Based Assessment

سایر مصالحی که ممکن است بعد از حد تسلیم به حالت پلاستیک برسند به‌خوبی مدل‌سازی می‌کند، همچنین توانایی مدل‌سازی انواع مدل‌های رفتاری خاک را داراست و امکان مشاهده‌ی رفتار سیستم در تغییرشکل‌های زیاد در این برنامه وجود دارد (Group Itasca Consulting، ۲۰۱۸). در طول ارتعاشات ناشی از زلزله، خاک‌ها کاهش سختی و افزایش میرایی از خود نشان می‌دهند که درنتیجه منجر به کاهش دامنه‌ی امواج تنشی در خاک می‌شود. به‌طور ایده‌آل این رفتار واقعی خاک‌ها باید با یک مدل رفتاری مناسب شبیه‌سازی شود که البته این مدل‌های پیشرفته نیازمند پارامترهایی است که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. در عوض می‌توان از مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک ساده‌تر همراه با میرایی اضافی برای اصلاح مدل رفتاری استفاده کرد (Han و همکار،۲۰۱۵). در این مطالعه ابتدا از مدل رفتاری الاستیک-کاملا پلاستیک موهرکولمب[1] سپس از مدل فین برای شبیه‌سازی رفتار خاک حین بارگذاری استفاده شد. برای اصلاح الگوی رفتاری مدل در محدوده‌ای از کرنش‌های برشی که هنوز جریان خمیری و میرایی ناشی از آن اتفاق نیفتاده است، باید از میرایی اضافی استفاده شود. هنگامی‌که میرایی هیسترزیس[2] همراه با یک مدل الاستوپلاستیک ساده استفاده شد. تکنیک کاهش سختی در محدوده‌ی رفتاری الاستیک اعمال‌شده و میرایی طبیعی ناشی از جریان خمیری در محدوده‌ی رفتاری پلاستیک عمل می‌کند.

فرمول‌بندی تفاضل محدود در مدل‌سازی دینامیکی در FLAC همانند فرمول‌بندی‌های کلاسیک تفاضل محدود است. سختی هر یک از زون‌های موردمطالعه با توجه به رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$k_z = (\mathrm{K} + \frac{4}{3}\mathrm{G})\frac{L_d{}^2}{A_z} \qquad (۱)$$

که در آن، k_z: سختی هر زون، K : مدول بالک، G: مدول برشی، L_d : طول قطر المان، A_z : مساحت المان است و T: ضخامت صفحه طراحی‌شده که برای حالت کرنش صفحه‌ای برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین از رابطه زیر برای محاسبه گام‌های زمانی استفاده می‌شود:

$$\Delta t_{crit} = \min \left\{\frac{A}{C_p \Delta x_{max}}\right\} \qquad (۲)$$

در این رابطه، Δt_{crit}: گام زمانی حل، C_p: سرعت موج فشاری[3] ، A: مساحت زیر منطقه[4] مثلثی و Δx_{max}: طول بیشینه زون موردمطالعه است. در حالتی که میرایی وجود ندارد از یک ضریب اطمینان نیز استفاده‌شده تا بتوان از آن طریق تخمینی از بازه زمانی بحرانی ارائه داد. لذا در این حالت رابطه زیر برای محاسبه گام‌های زمانی حل پیشنهاد می‌شود.

$$\Delta t_d = \Delta t_{crit}/2 \qquad (۳)$$

که در آن، Δt_d: گام زمانی در نبود میرایی است. چنانچه میرایی نیز در معادلات استفاده شود، گام‌های بازه زمانی کاهش‌یافته و طبق رابطه بلیچکو[5] مقدار آن برابر خواهد بود با:

$$\Delta t_\beta = \left\{\frac{2}{\omega_{max}}\right\}\left(\sqrt{1+\lambda^2} - \lambda\right) \qquad (۴)$$

که در آن، Δt_β: گام زمانی حل در صورت استفاده میرایی در معادلات، ω_{max}: سرعت زاویه‌ای ناشی از بیشترین فرکانس ارتعاشی سیستم و λ: کسری از میرایی بحرانی است. با استفاده از روابط زیر می‌توان مقدار این دو پارامتر را تخمین زد.

$$\omega_{max} = \frac{2}{\Delta t_d} \qquad (۵)$$

$$\lambda = \frac{0.4\beta}{\Delta t_d} \qquad (۶)$$

$$\beta = \zeta_{min} / \omega_{min} \qquad (۷)$$

ζ_{min}: نسبت میرایی و ω_{min}: فرکانس زاویه‌ای برای حالت میرایی رایلی است. به دلیل پیچیدگی این میرایی، حساسیت کم پی سد و همچنین نبود نمودار برای مصالح پی سد در این قسمت از میرایی موضعی و در قسمت بدنه سد از میرایی هیسترزیس استفاده‌شده است. برای اعمال میرایی هیسترزیس توسط رابطه‌ی sig3، یک سری نمودارهایی وجود دارند که از آزمایش‌های مربوطه نتیجه شده‌اند. برای به دست آوردن پارامترهای لازم باید رابطهٔ (۸) به‌صورت سعی و خطا برای ۳ پارامتر حل شود.

$$\mathrm{M_s} = \frac{\mathrm{a}}{1+\exp\left(-\frac{\mathrm{L}-\mathrm{X_0}}{\mathrm{b}}\right)} \qquad (۸)$$

پارامترهایی هستند که با سعی و $\mathrm{X_0}$ و b، a که در آن

[1] Mohr-coulomb
[1] Hysteresis damping

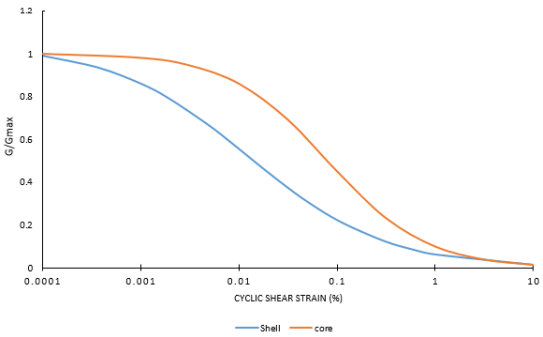
[2] P-wave
[3] Sub-zone
[4] Belytschko

، لگاریتم کرنش‌های موجود در Lخطا به دست می‌آیند، : نام نمودار مربوطه است. پس M_sمحور افقی نمودار است و از کالیبراسیون برای مصالح هسته و پوسته‌ی سد، نمودار کاهش مدول برشی به‌صورت شکل (۱) استخراج شد.

در جدول (۱) آمده است. چون میرایی X_0 و b، aمقادیر هیسترزیس مؤلفه‌های فرکانسی بالا را به‌طور کامل میرا نمی‌کند، بنابراین مقدار اندکی از میرایی رایلی متناسب با سختی نیز در این تحلیل معرفی گردید.

جدول (۱) پارامترهای مربوط به میرایی هیسترتیک فرمول sig3

نام مصالح	X_0	b	a
Clay core	-۰/۹	−۰/۷	۱/۰۱
Rockfill A,B,C	-۱/۹	−۱/۰۶	۱/۱



شکل (۱): منحنی‌های کاهش نسبت مدول برشی برای مصالح مختلف مدل

مکانیزمی که در مدل رفتاری Finn از آن استفاده‌شده است، توسط Byrne در سال ۱۹۹۱ ارائه شده‌است. رابطه زیر جهت محاسبه $\Delta\varepsilon_{vd}$ است:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1\exp(-C_2(\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma})) \qquad (۹)$$

در این رابطه: $\Delta\varepsilon_{vd}$: کاهش حجم توده خاک، C_1 و C_2 : ثوابت رابطه و ε_{vd}: کرنش حجمی تجمعی می‌باشند.

در برخی از مواقع می‌توان رابطه $C_2 = \frac{0.4}{C_1}$ را بین این دو ثابت برقرار دانست و درنتیجه رابطه ۹ تنها یک ثابت نامعلوم خواهد شد. بااین‌حال چنانچه کرنش برشی حدی نیز در محاسبات مدنظر باشد باید از ثابت سومی به نام C_3 نیز در فرمول‌بندی برن استفاده کرد. در تحلیل روانگرایی، علاوه بر اعمال پارامترهای معمول خاک (مانند زاویه اصطکاک، مدول حجمی و ...) باید سه ثابت برای رابطه ۹ به FLAC معرفی شود. ثوابت C_1 و C_2 از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$C_1 = 7600\ (D_r)^{-2.5} \qquad (۱۰)$$

که در آن، C_1: ثابت معادله و Dr: تراکم نسبی دانه‌ها است.

$$D_r = 15\ (N_1)_{60}{}^{1.2} \qquad (۱۱)$$

که در آن، Dr: تراکم نسبی دانه‌ها و $(N_1)_{60}$ عدد آزمایش نفوذ استاندارد است.

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}{}^{-1.25} \qquad (۱۲)$$

به‌طوری‌که در آن، C_1: ثابت معادله و $(N_1)_{60}$ عدد آزمایش نفوذ استاندارد است.

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \qquad (۱۳)$$

در معادله ۱۳، C_1 و C_2 همان ثوابت رابطه ۱ می‌باشند.

هندسه مدل و مشخصات مصالح

در تحلیل‌های دینامیکی، ابعاد المان‌ها باید آن‌گونه انتخاب شوند که امواج زلزله بتوانند از المان‌ها عبور کنند و اصطلاحاً پالایه نشوند. جهت محاسبه ابعاد المان از شرط توصیه‌شده توسط کولیمر و لیسمر[1] استفاده‌شده است. این دو محقق پیشنهاد داده‌اند اندازه زون‌های موجود در محیط پیوسته موردمطالعه کوچک‌تر از مقدار رابطه زیر باشد:

$$\Delta l = \frac{\lambda_{min}}{8} \sim \frac{\lambda_{min}}{10} \qquad (۱۴)$$

$$\lambda_{min} = \mathrm{VT} = \frac{V}{f_{max}} \qquad (۱۵)$$

در این رابطه، Δl: طول المان و λ طول‌موج مولفه ای از امواج زلزله است که دارای بیشترین فرکانس است. V و f_{max} نیز به ترتیب سرعت امواج در مدل و حداکثر فرکانس حاصل از زلزله می‌باشند. سرعت امواج از روابط معمول دینامیکی خاک قابل‌محاسبه است. به‌عنوان‌مثال سرعت موج‌برشی عبارت است از:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (۱۶)$$

که در آن، V_s: سرعت موج‌برشی، G و ρ به ترتیب مدول برشی و جرم مخصوص مصالح می‌باشند. شکل‌های (۲) و (۳) مدل عددی و مش بندی سد را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مشخصات دینامیکی مصالح

نوع مصالح	G_{max} (Pa)
شن پوسته بالادست 3A,3B	$G_{max}=5500P_{at}(\frac{\sigma_3}{P_{at}})^{0.65}$
سنگ‌ریز پوسته 3C	$G_{max}=3500P_{at}(\frac{\sigma_3}{P_{at}})^{0.6}$
هسته رسی	$G_{max}=2200P_{at}(\frac{\sigma_3}{P_{at}})^{0.38}$
پی گل‌سنگ	۱/۷e۹
پی ماسه‌سنگ	۳e۹

[1] Kuhlemeyer & Lysmer

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل دینامیکی یک سد خاکی مدول برشی مصالح در سطح کرنش برشی کوچک یعنی G_{max} است(Sadigi و همکار، ۲۰۱۵). جدول (۲) روابط مورداستفاده در این پژوهش را برای تعیین G_{max} برای مصالح نواحی مختلف بدنه سد را نشان می‌دهد. روابط یادشده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH به برنامه معرفی شد. در جدول (۳) نیز مشخصات مصالح مورداستفاده در سد آورده شده است(Jabalbarezi و همکاران،۲۰۱۳).

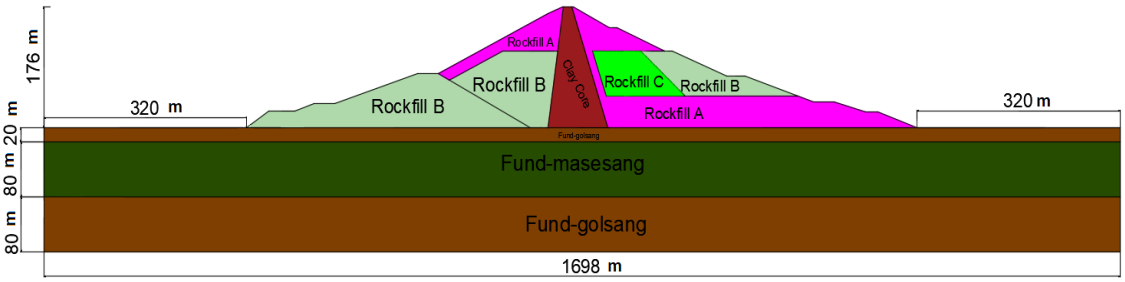
بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

در این تحقیق زلزله یا همان بار دینامیکی به‌صورت تاریخچه تنش به مدل اعمال گردید. برای از میان بردن موج‌های تولیدشده ناخواسته در مدل در سطوح مرزی از لایه‌های میرا یا ساکن استفاده می‌شود. از شرایط مرزی آزاد در مرزهای کناری و شرایط مرزی آرام در مرزهای کناری و تحتانی استفاده شد. برای محاسبه بارگذاری تنش از نمودار سرعت نگاشت از روابط زیر استفاده شد:

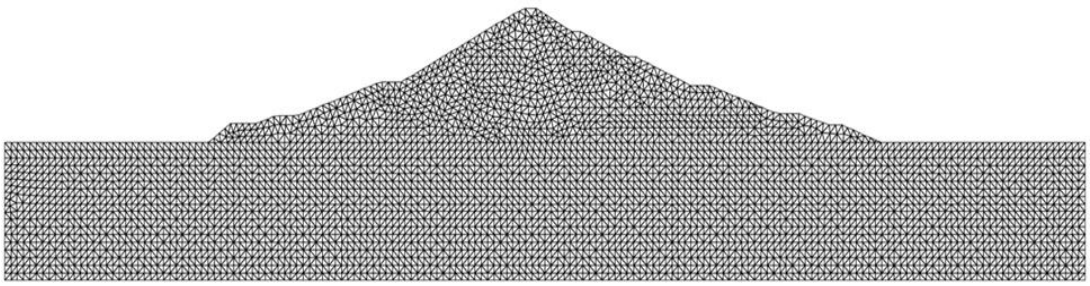
$$\sigma_n = 2(\rho C_p)V_n \quad (۱۷)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)V_s \quad (۱۸)$$

در این روابط،σ_n: تنش فشاری،σ_s: تنش برشی، ρ: جرم مخصوص،C_p: سرعت موج P در محیط پیوسته،C_s: سرعت موج S در محیط پیوسته،V_n: سرعت ورودی موج فشاری وV_s: سرعت ورودی موج‌برشی است.



شکل (۲): زون بندی مدل



شکل (۳): مش بندی مدل

جدول (۳): مشخصات مصالح سد گتوند

نوع مصالح	وزن مخصوص (KN/m^3)	K	n	چسبندگی (KN/m^2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	نسبت پواسون
شن پوسته بالادست 3A,3B	۲۱/۵	۳۵۰	۰/۷	۱۰	۴۴	۰/۳
سنگ‌ریز پوسته 3C	۲۰	۲۵۰	۰/۶	۰	۳۵	۰/۳
هسته رسی	۱۹	۸۲	۰/۸۷	۲۰	۲۶	۰/۳۵
پی گل‌سنگ	۲۴	-	-	۵۸۰	۳۴/۲	۰/۳
پی ماسه‌سنگ	۲۶	-	-	۴۸۰	۳۶/۲	۰/۲۵

جدول (۴): مشخصات زلزله‌های ورودی نزدیک گسل

No	Event	Station	M_w	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (cm)	A_P/V_p (Hz)	T_P(s)	T_g (s)	Arias intensity (m/s)
Ap/Vp < 5 Hz										
۱	Chi-Chi, Taiwan 1999	TCU068	۷/۶۲	۰/۵۱۱	۲۴۹/۶	۲۹۴/۱۳	۲/۰۰۸	۱۲/۳	۹/۳۵	۳/۳
۲	Chi-Chi, Taiwan 1999	TCU036	۷/۶۲	۰/۱۳۶	۵۷/۵۵	۵۹	۲/۳۱۸	۵/۳۸	۵/۳۶	۷
5 Hz <Ap/Vp< 8 Hz										
۳	Landers 1992	Lucerne	۷/۲۸	۰/۷۲۵	۱۳۳/۴۳	۱۱۴/۳	۵/۳۳	۵/۱۲	۴/۳۲	۷
۴	Northridge 1994	LA Dam	۶۹/۶	۰/۴۲۶	۷۴/۸۳	۱۹/۰۳	۵/۵۸۹	۱/۶۲	۱/۲۶	۱/۸
8 Hz < Ap/Vp										
۵	Tabas،Iran 1978	Tabas	۷/۳۵	۰/۸۵۴	۹۹/۱	۳۵/۵	۸/۴۵۴	۶/۱۲	۰/۸۶	۱۱/۸
۶	San Salvador 1986	Geotech Investig Center	۵/۸	۰/۷	۷۹/۹۵	۱۲/۵۵	۸/۵۸۹	۰/۸۵	۰/۷۱	۲/۵

جدول (۵): مشخصات ورودی زلزله‌های دور از گسل

No	Event	Station	M_w	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (cm)	A_P/V_p (Hz)	T_g (s)	Arias intensity (m/s)
Ap/Vp < 8 Hz									
۷	Tabas, Iran 1978	Kashmar	۷/۳۶	۰/۰۴۷	۹/۶۴	۴/۳۷	۳/۶۶	۱/۸۳	۰/۱
۸	Landers 1992	Anaheim W Ball Rd	۷/۲۸	۰/۰۴۷	۱۲/۴۸	۱۰	۳/۶۹	۳/۵۲	۰/۱
8 Hz <Ap/Vp< 12 Hz									
۹	Imperial Valley06 1979	Coachella Canal #4	۶/۵۳	۰/۱۳۴	۱۶/۲۹۹	۳	۸/۰۶۵	۰/۵۸	۰/۲
۱۰	Chi-Chi-05 1999	TAP078	۶/۲	۰/۰۱۱	۱/۳۳۶	۰/۳۶	۸/۰۷۸	۱/۷۱	۰
12 Hz <Ap/Vp									
۱۱	Loma Prieta 1989	Bear Valley #1 Fire Station	۶/۹۳	۰/۰۷۳	۵/۹	۱/۹	۱۲/۱۱	۲/۵۴	۰/۱
۱۲	Coyote Lake 1979	SJB Overpass, .Bent 3 g.l	۵/۷۴	۰/۱۱۶	۸/۳۸	۱/۱۶	۱۳/۵۸	۰/۴۶	۰/۱

مقادیر مربوط به موج‌های p و s به ویژگی‌های مقاومتی محیط موردمطالعه وابسته است و مقادیر آن از روابط زیر قابل‌محاسبه است:

$$C_p = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}} \qquad (۱۹)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \qquad (۲۰)$$

که در آن، C_p: سرعت موج P در محیط پیوسته، C_s: سرعت موج S در محیط پیوسته، K: مدول حجمی (بالک)، G: مدول برشی، ρ: جرم مخصوص است. در انتخاب شتاب‌نگاشت مناسب برای یک ساختگاه، لازم است خصوصیات ساختگاه و منبع زلزله ازنظر بزرگای زلزله، مکانیسم گسلش، عمق کانونی، فاصله ساختگاه تا منبع زلزله، زمین‌شناسی منطقه، شتاب حداکثر، محتوای فرکانسی، مدت زلزله و انرژی موردتوجه قرارگیرد و تا حد امکان این ویژگی‌ها با خصوصیات ساختگاه طرح و زلزله محتمل در آن همسان باشد. به‌طورکلی تاریخچه‌های شتاب برای یک ساختگاه، دارای عدم قطعیت است. ازاین‌رو بهتر است که برای این نوع از تحلیل دینامیکی از بیش از ۳ تاریخچه زمانی زلزله برای هر سطح لرزه‌ای استفاده شود. در این تحقیق دو مجموعه از تحریک‌های لرزه‌ای، یعنی زلزله‌های نزدیک به گسل و دور از گسل از سایت PEER استخراج شدند.

زیرمجموعه ۱ این مطالعه شامل ۱۲ زلزله نزدیک به گسل دارای پالس انتخاب‌شده‌اند که به سه گروه با نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ متفاوت طبقه‌بندی‌شده‌اند: نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ کم ($\frac{A_P}{V_p}$<5Hz)، نسبت $\frac{A_P}{V_p}$متوسط (5Hz<$\frac{A_P}{V_p}$<8Hz) و نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ زیاد (8 Hz<$\frac{A_P}{V_p}$). زیرمجموعه ۲ این مطالعه شامل ۱۲ زلزله دور از گسل بدون پالس انتخاب‌شده‌اند که به سه گروه با نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ متفاوت طبقه‌بندی شده‌اند: نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ کم ($\frac{A_P}{V_p}$<8Hz)، نسبت $\frac{A_P}{V_p}$متوسط (8Hz<$\frac{A_P}{V_p}$<12Hz) و نسبت $\frac{A_P}{V_p}$ زیاد (12Hz<$\frac{A_P}{V_p}$). مشخصات زمین‌لرزه‌ها در جدول (۴) و (۵) قابل‌مشاهده است

(Yaghmaei-Sabegh و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحلیل ابتدا شتاب‌نگاشت‌ها از سایت PEER استخراج‌شده و بعدازآن با استفاده از برنامه Deep soil تحلیل دکانولوشن[1] آن برای عمق ۱۸۰متری پی شامل سه لایه از گل‌سنگ و ماسه‌سنگ انجام شد. پس‌ازآن، اصلاحات مربوط به خط پایه و همچنین فیلتر کردن زلزله برای فرکانس‌های بیش از ۱۰هرتز صورت گرفت. شکل (۵) تاریخچه‌ی زمانی شتاب و سرعت و جابجایی زلزله حوزهٔ نزدیک طبس را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

مراحل مدل‌سازی

در این تحقیق ابتدا مدل دوبعدی از سد گتوند در برنامه Rhinoceros ساخته شده و به محیط برنامه FLAC-3D وارد شد. سپس در مرحله اول (پیش از احداث سد)، با استفاده از مدل الاستیک و اعمال تنش‌ها و فشار آب منفذی اولیه، تحلیل استاتیکی بر روی پی سد صورت گرفت. در این مرحله سطح آزاد آب منطبق بر سطح زمین در نظر گرفته شد. برای مطابقت با شرایط واقعی، ساخت سد و تولید تنش‌های استاتیکی به شکل مشابه آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، احداث بدنه سد، به‌صورت مرحله‌ای صورت گرفت. به این منظور بدنه سد به ۲۲ لایه (هر لایه به ضخامت ۸ متر) تقسیم شد و هر لایه برای شبیه‌سازی پدیده تحکیم، به‌صورت ترکیبی (حل هم‌زمان معادلات مکانیکی و انتشار سیال) تحلیل شد. مرحله تحلیل استاتیکی روی کل بدنه سد ابتدا با مدل الاستیک و سپس با مدل موهر-کولمب انجام شد و به تعادل رسید. یکی از مدهای تحلیل در FLAC تحلیل مدل تحت حضور فشار آب حفره‌ای است. در مطالعه حاضر فرض شد که زلزله زمانی رخ می‌دهد که آب در مخزن سد، در تراز نرمال قرار دارد. ساده‌ترین مدل‌سازی جریان آب در FLAC به‌گونه‌ای است که جریان در داخل خاک اشباع ایجادشده و مرز جریان در یک خط فریاتیک[2] از ناحیه خشک بالای آن جدا شود. در این تحقیق برای رسیدن به خط فریاتیک، مدل در برنامه Geo-Studio تحلیل گردید. سپس نتیجه در قالب خط فریاتیک حاصل‌شده، به محیط Auto Cad وارد شد و مختصات خط، تحت عنوان Water Table وارد محیط برنامه FLAC-3D شد. درنتیجه تحلیل سد در حضور فشار آب منفذی هم انجام‌شده و مدل قبل از تحلیل دینامیکی به تعادل رسید. در این مرحله شمارگرهای تنش‌های کل، مؤثر و فشار آب حفره‌ای حاصل شد. سپس بعد از اختصاص ویژگی‌های دینامیکی مصالح و میرایی هیسترزیس، زلزله به‌صورت تاریخچه-ی تنش برای تحلیل دینامیکی در مدت‌زمان معلوم زلزله به مدل اعمال شد.

صحت‌سنجی

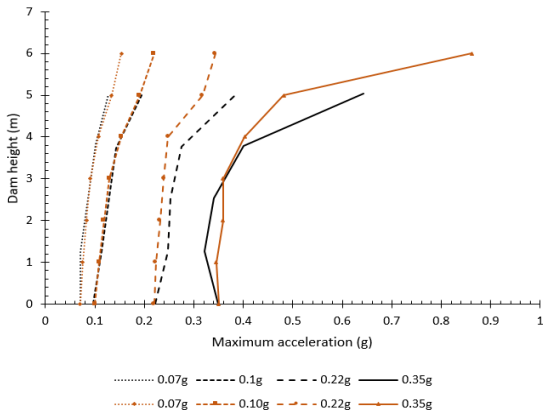
مثال اول

در این بخش، از آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی که توسط (Kim و همکاران،۲۰۱۳) روی نمونه‌ای از سد خاکی با هسته رسی به ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر صورت گرفت، استفاده شد. با استفاده از ضریب مقیاس معرفی‌شده در مقاله (۴۰)، سد خاکی با هسته رسی به ارتفاع ۵,۲ متر در برنامه FLAC-3D با پی ۲ متری مدل شد. نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ در غالب بیشینه شتاب افقی محور سد در شکل (۴) مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توافق مناسبی بین نتایج عددی حاصل از برنامه FLAC-3D و نتایج تجربی مشاهده می‌شود که بیانگر صحت روش مدلسازی به‌کاررفته در این پژوهش است.

مثال دوم

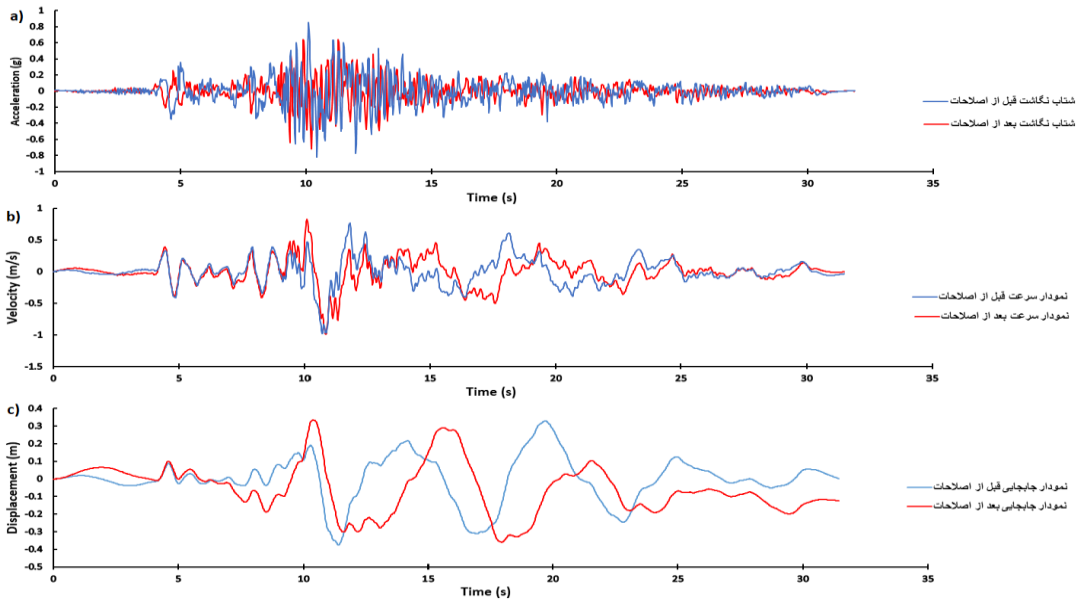
در این بخش، از نتایج تحلیل عددی مقاله (Khoei و همکاران،۲۰۰۴) استفاده شد. سد سنگریزه‌ای با هسته رسی مهاباد به ارتفاع ۴۶ متر و عمق پی ۲۱ متر در برنامه FLAC-3D مدل شد. در این تحلیل از مدل الاستیک-کاملا پلاستیک موهر-کولمب برای تحلیل استاتیکی و آبگیری سد استفاده‌شده. برای رعایت اختصار و بدون ذکر جزئیات نتایج شبیه‌سازی عددی در غالب تاریخچه‌ی تغییر مکان تاج سد در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توافق مناسبی بین نتایج عددی حاصل از برنامه FLAC-3D و نتایج عددی مقاله موردمطالعه مشاهده می‌شود که بیانگر صحت روش مدل‌سازی به‌کاررفته در این پژوهش است.

به‌طورکلی عوامل متفاوتی در نتایج یک تحلیل عددی و آزمایشگاهی دخیل هستند که به‌طور خلاصه می‌توان به عوامل و خطای انسانی و مقیاس مدل آزمایشگاهی، تفاوت در مدل رفتاری انتخابی، تفاوت در نوع مش بندی، تفاوت در اندازه مش بندی، تفاوت در نوع میرایی، تفاوت در پارامترهای میرایی یک میرایی ثابت و... اشاره کرد؛ که همین عوامل باعث تفاوت جزئی در نتایج مطالعه حاضر و مثال‌های صحت‌سنجی ذکرشده می-شوند.

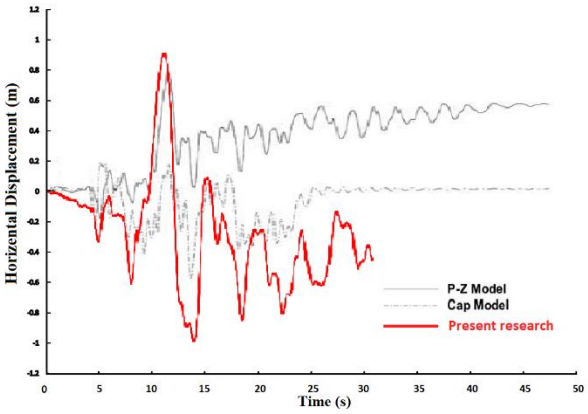


شکل (۴): مقایسه بیشینه شتاب افقی محور در مدل‌سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ

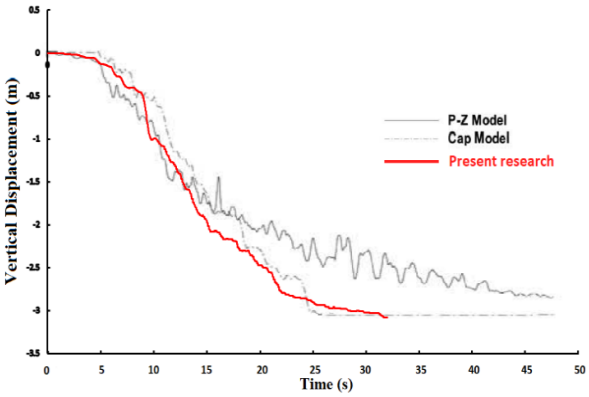
[1] Deconvolution
[2] Phreatic Line



شکل (۵): نمودارهای مربوط به زلزله Tabas-Iran، a) مقایسه شتاب‌نگاشت قبل و بعد اصلاحات، b) مقایسه نمودار سرعت قبل و بعد از اصلاحات c) مقایسه نمودار جابجایی قبل و بعد از اصلاحات



شکل (۶): مقایسه جابجایی افقی تاج سد



شکل (۷): مقایسه جابجایی قائم تاج سد

تحلیل نتایج

در این تحقیق دو نوع تحلیل روی مدل صورت‌گرفت. ابتدا ۱۲ زلزله فقط با مولفه افقی به مدل اعمال گردید و بار دیگر تأثیر همان زلزله‌ها همزمان با مولفه افقی و قائم موردبررسی قرار گرفت. در این بخش نتایج نهایی حاصل از تحلیل دینامیکی تفاضل محدود (FDM) در نرم‌افزار FLAC در قالب نمودارهای جابجایی افقی و قائم تاج سد ارائه می‌شود. در ادامه نمودارهای جابجایی افقی و قائم تاج سد برای زلزله‌های نزدیک به گسل و زلزله‌های دور از گسل به تفکیک در دو بخش، یک‌بار بدون درنظرگرفتن اثر مؤلفهٔ قائم زلزله و بار دیگر با در نظر گرفتن آن تحلیل و استخراج‌شده‌اند. شکل‌های (۸) تا (۱۱) جابجایی افقی و قائم تاج سد را برای زلزله‌های ورودی نشان می‌دهند. منظور از h در این نمودارها، تحلیل‌هایی است که در آن، اثر مولفه قائم زلزله لحاظ نشده است و منظور از h+v، تحلیل با اعمال مولفه قائم زمین‌لرزه است. همچنین شماره‌های موجود در شکل‌ها، همان شماره زلزله‌های مربوطه است که نام آن‌ها در جدول شماره (۴) و (۵) آمده است. با توجه به این نمودارها، به‌طورکلی زمانی که اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله در تحلیل لحاظ می‌شود، نسبت به حالتی که تنها اثر افقی زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شود، جابجایی‌ها افزایش می‌یابند. این تغییرات بیشتر در جابجایی‌های قائم دیده می‌شوند. همچنین به‌طورکلی تفاوت دو نمودار در زلزله‌های دور از گسل بسیار مشهودتر از زلزله‌های نزدیک گسل است. در جابجایی‌های افقی تغییر چندانی در شکل نمودار تاریخچه‌ی زمانی دیده نمی‌شود، این در حالی است که نمودارها در جابجایی‌های قائم کاملاً فرق کرده‌اند. در حالت کلی مؤلفه قائم زلزله بیشتر روی جابجایی‌های قائم و زلزله‌های نزدیک گسل تأثیر می‌گذارد. شکل (۱۲) نمودارهای بیشینه شتاب در نقاط مشخص‌شده روی سد را نشان می‌دهد.

پس از اتمام تحلیل‌ها، نمودار شتاب افقی در نقاط مشخص‌شده روی سد (داخل شکل (۱۲)) استخراج شد. سپس شتاب پیک آن نمودارها به‌صورت نمودار شکل (۱۲) ارائه شد.

محور افقی، پاسخ سد خاکی به زلزله مربوطه و نمودار قائم، ارتفاع نقطه موردمطالعه در بدنه سد را نشان می‌دهد (موقعیت طولی (x) تمامی نقاط یکسان است). همچنین در نمودار، منظور از h، تحلیل‌هایی است که در آن‌ها فقط مولفه افقی زلزله اثر داده‌شده است و h+v، نشان‌دهنده تحلیل‌هایی است که در آن‌ها اثر مولفه قائم زلزله نیز اعمال‌شده است. شماره‌های موجود در شکل، مربوط به شماره زلزله‌هاست که نام آن‌ها در جدول (۴) و (۵) آمده است. از نمودار شتاب شکل (۱۲) معلوم شد که شتاب بیشینه در هر دو حالت تحلیل (با اعمال اثر مولفه قائم و بدون حضور آن)، تقریباً در یک حدود از ارتفاع سد اتفاق می‌افتد. با بررسی نمودار مشاهده شد که در زلزله‌های نزدیک به گسل بیشینه شتاب ثبت‌شده حدود در ۰٫۲۵ عمق و در زلزله‌های دور از گسل، در ۰٫۷۵ ارتفاع سد بود. برای زلزله‌های نزدیک به گسل در حالتی که اثر مؤلفهٔ قائم لحاظ شد، به‌طور متوسط برای ۶ زلزله، بیشینه شتاب، کمتر از حالتی بود که تنها اثر مؤلفه‌ی افقی اعمال شد؛ اما در زلزله‌های دور از گسل برعکس این مساله اتفاق افتاد. ولی برای نتیجه‌گیری درست‌تر نیاز به تحلیل با زلزله‌های بیشتری است.

با توجه به نمودار، هرچه شتاب بیشینه زمین‌لرزه افزایش یافت، تغییرات شتاب نیز در امتداد ارتفاع سد بیشتر شد.

استخراج احتمال خرابی سد گتوند

برای بررسی احتمال خرابی سد، تابع عملکرد سد خاکی و شاخص قابلیت اعتماد به‌صورت زیر تعریف شد (Mirshrifi همکار ۲۰۱۶):

$$Z = Ln\left(Freeboard / Max_Crest_Settlement \right) \quad (۲۱)$$

به‌طوری‌که در آن Z: تابع عملکرد، Freeboard: ارتفاع آزاد سد که برای سد گتوند ۴ متر منظور شده است و ماکزیمم نشت تاج سد در اثر هر یک از رکوردهای زلزله به‌عنوان ظرفیت سیستم می‌باشند. برای شاخص قابلیت اعتماد می‌توان نوشت:

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad (۲۲)$$

بطوریکه در آن β شاخص قابلیت اعتماد، μ_Z میانگین تابع عملکرد Z برای مجموعه زلزله‌های نزدیک گسل با لحاظ مؤلفه افقی، نزدیک گسل با لحاظ مؤلفه افقی و قائم، دور از گسل با لحاظ مؤلفه افقی و درنهایت دور از گسل با لحاظ مؤلفه افقی و قائم و σ_Z انحراف معیار تابع عملکرد در همان شرایط فوق است. با فرض اینکه ماکزیمم نشست تاج سد ناشی از بارهای لرزه‌ای متغیر تصادفی با توزیع نرمال باشد، می‌توان رابطه شاخص قابلیت اعتماد با احتمال خرابی را به‌صورت زیر نشان داد:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (۲۳)$$

بطوریکه، P_f: شاخص خرابی و Φ: تابع احتمالاتی توزیع نرمال است. پس از تحلیل و محاسبات، نتایج احتمال خرابی به‌صورت جدول (۶) استخراج گردید. با توجه به جدول (۶) به‌خوبی قابل‌مشاهده است احتمال تخریب به به‌صورت زیر قابل گزارش است:

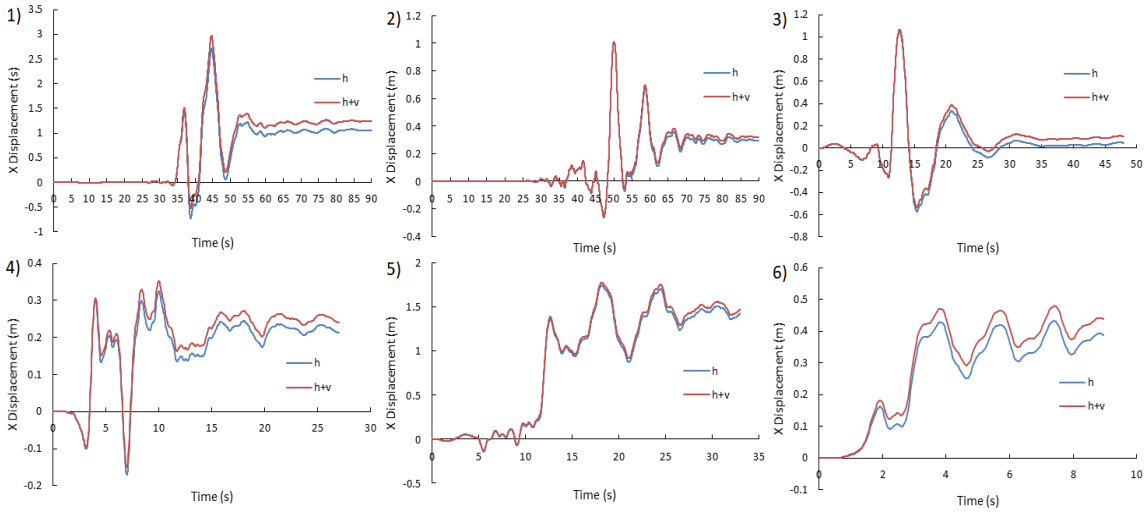
$$\left(P_f\right)_{\substack{Near-Fault\\(H+V)}} > \left(P_f\right)_{\substack{Near-Fault\\(H)}} > \left(P_f\right)_{\substack{Far-Field\\(H+V)}} > \left(P_f\right)_{\substack{Far-Field\\(H)}} \quad (۲۴)$$

بطوریکه با لحاظ مولفه قائم زلزله در زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک احتمال خرابی سد خاکی موردنظر در تحقیق حاضر به میزان ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد و این افزایش در زمین‌لرزه‌های دور از گسل در اثر لحاظ مؤلفهٔ قائم زلزله در تحلیل برابر ۲۴/۲ محاسبه گردید. این نشان‌دهنده آن است که احتمال خرابی برای سد در حالتی که مؤلفه قائم زلزله در تحلیل لحاظ می‌شود، بسیار بیشتر است. در مقایسه احتمال خرابی سد موردنظر در زمین‌لرزه‌های نزدیک و دور از گسل با لحاظ مولفه افقی به‌تنهایی و لحاظ هم‌زمان مولفه افقی و قائم مشخص می‌شود که هرچند لحاظ مولفه قائم رکوردهای زلزله در تحلیل موجب افزایش احتمال خرابی می‌گردد. ولی این تغییرات در احتمال خرابی سد در شرایطی که فقط مولفه افقی لحاظ گردیده نسبت به شرایطی که مولفه افقی به همراه مولفه قائم در تحلیل لحاظ شده است، افزایشی در احتمال خرابی به میزان ۹/۷ برابر را نشان می‌دهد، به عبارت بهتر داریم:

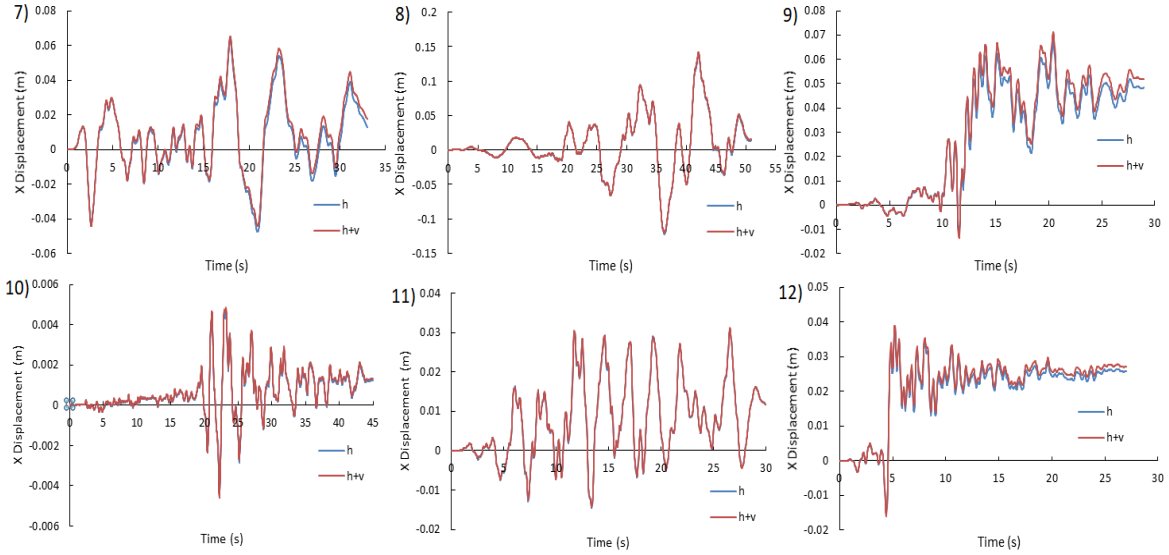
$$\frac{\left(P_f\right)_{\substack{Near-Fault\\(H)}}}{\left(P_f\right)_{\substack{Far-Field\\(H)}}} \approx 9.7 \frac{\left(P_f\right)_{\substack{Near-Fault\\(H+V)}}}{\left(P_f\right)_{\substack{Far-Field\\(H+V)}}} \quad (۲۵)$$

جدول (۶): برآورد احتمال خرابی در اثر روگذری از تاج سد

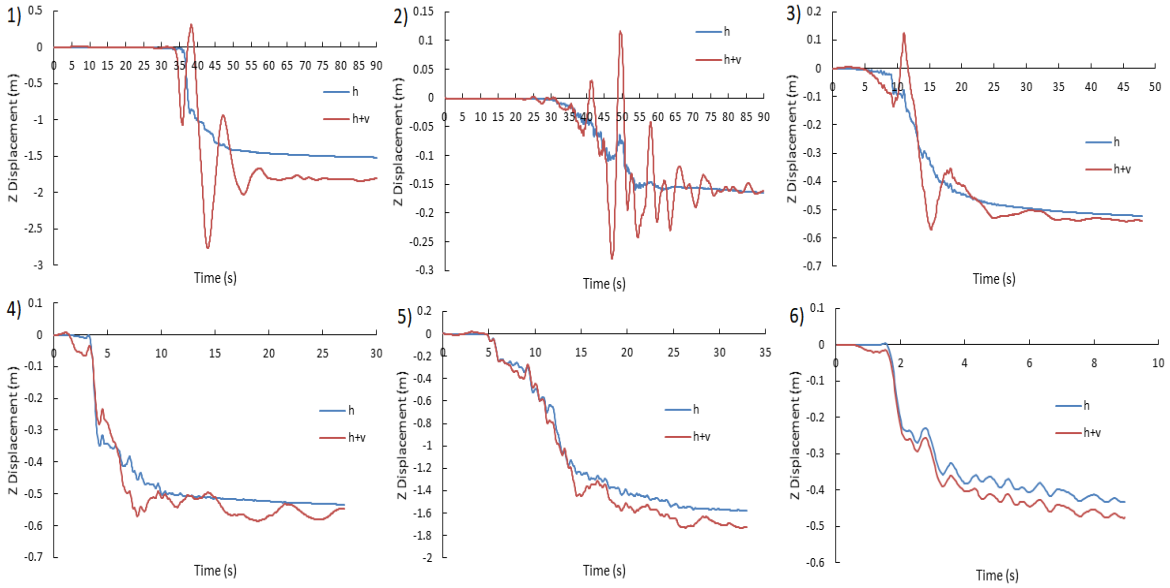
نوع زلزله	مؤلفه‌ی زلزله‌ی به‌کاربرده شده در تحلیل	β	$P_f = \Phi(-\beta)$
Near-Fault	H	۲/۴۴۱۲۵۳۳۵۴	۰/۰۰۷۳۴
	H+V	۲/۰۸۷۲۵۶۹۹۵	۰/۰۱۸۳
Far-Field	H	۵/۵۱۳۵۰۰۳۴۴	۱/۷۹e-۸
	H+V	۴/۹۱۶۷۵۱۹۶۹	۴/۳۳e-۸



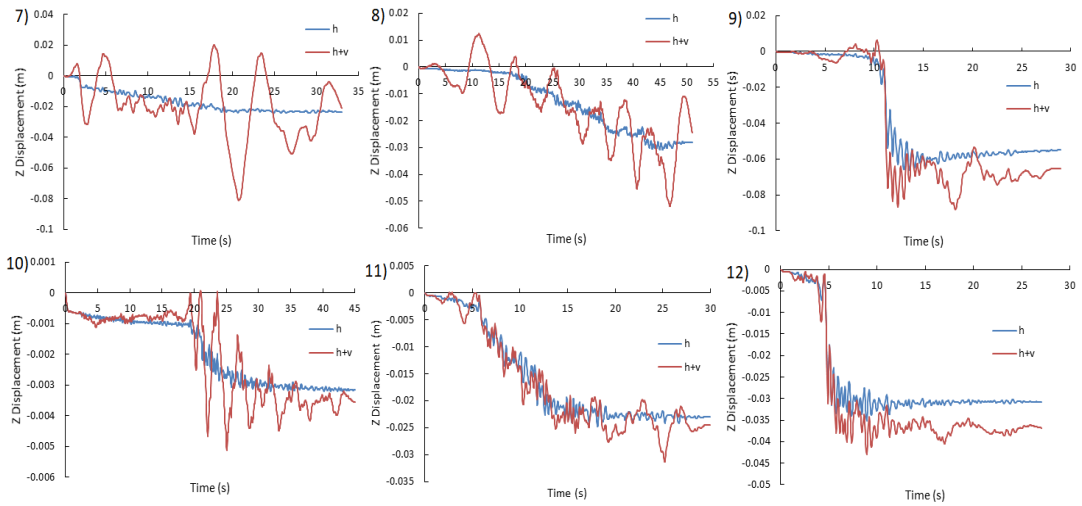
شکل (۸): مقایسه جابجایی افقی تاج سد تحت اثر مولفه قائم و در نبود آن در زلزله‌های نزدیک گسل



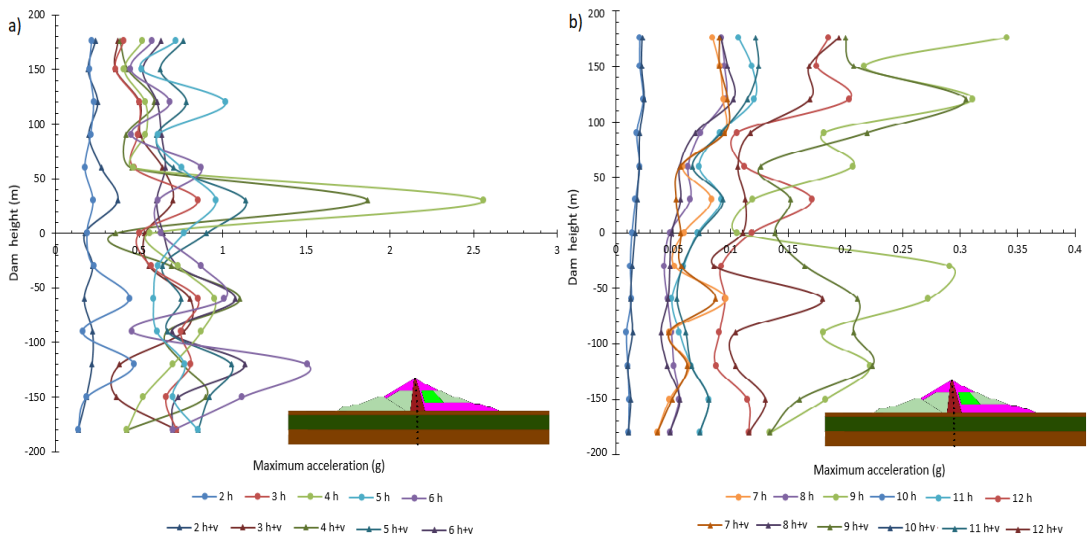
شکل (۹): مقایسه جابجایی افقی تاج سد تحت اثر مولفه قائم و در نبود آن در زلزله‌های دور از گسل



شکل (۱۰): مقایسه جابجایی قائم تاج سد تحت اثر مولفه قائم و در نبود آن در زلزله‌های نزدیک گسل



شکل (۱۱): مقایسه جابجایی قائم تاج سد تحت اثر مولفه قائم و در نبود آن در زلزله‌های دور از گسل



شکل (۱۲): نمودار بیشینه شتاب نقاط مختلف سد برای a) زلزله‌های نزدیک به گسل و b) زلزله‌های دور از گسل

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با توجه پیچیدگی بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی تلاش گردیده است روند این مدل‌سازی به‌طور واضح ارائه و در ضمن بررسی اثر زمین‌لرزه‌های دور و نزدیک گسل و همچنین لحاظ مؤلفهٔ قائم زمین‌لرزه بر پاسخ دینامیکی سدهای خاکی با تعریف تابع عملکرد سد خاکی احتمال خرابی و آسیب سد در شرایط تعریف‌شده استخراج و مورد مقایسه قرار گیرد. اهم نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی سد موردمطالعه به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

- جابجایی‌های افقی و قائم تاج سد به‌طورکلی برای زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از دور از گسل بود.
- با اعمال مؤلفه قائم زلزله در تحلیل‌ها، جابجایی‌های افقی تاج سد برای زلزله‌های نزدیک به گسل ۵٫۵۸٪، برای زلزله‌های دور از گسل ۲٫۹۶٪ و همچنین جابجایی‌های قائم تاج سد برای زلزله‌های نزدیک به گسل ۳۱٫۶۹٪ و برای زلزله‌های دور از گسل ۷۳٫۶۵٪ افزایش یافت. این نشان می‌دهد اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی نتایج قابل‌توجه است و این اثر برای جابجایی قائم تاج سد در زلزله‌های دور از گسل بیشتر است.
- همچنین به‌طورکلی تفاوت دو نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قائم در زلزله‌های دور از گسل بسیار مشهودتر از زلزله‌های نزدیک گسل است.
- هرچقدر شتاب بیشینه ورودی بیشتر شود، تغییرات شتاب در امتداد ارتفاع سد افزایش می‌یابد.
- زمانی که اثر مؤلفه قائم زلزله در تحلیل لحاظ گردید، متوسط تغییرات شتاب افقی در امتداد تاج سد برای زلزله‌های نزدیک به گسل ۱۳٫۳۸٪ کاهش و برای زلزله‌های دور از گسل ۰٫۳۳٪ افزایش یافت. البته برای بررسی اثر مؤلفه قائم بر شتاب بدنه سد به نظر می‌رسد نیاز به تحلیل با تعداد بیشتری از رکوردهای زلزله باشد.
- احتمال خرابی سد برای زلزله‌های نزدیک به گسل بیشتر از زلزله‌های دور از گسل است.

- احتمال خرابی سد در حالتی که اثر مؤلفه قائم زلزله در نظر گرفته شد، برای زلزله‌های نزدیک به گسل ۱۴۹٪ و برای زلزله‌های دور از گسل ۲۳۱۹٪ افزایش یافت.

لازم به یادآوری است نتایج مطالعه حاضر بر اساس تحلیل پاسخ سد خاکی گتوند تحت ۱۲ رکورد منتخب ارائه شده است.

مراجع

1. Alavi, B. Kravinkler. "Effects of Near-fault Ground Motions on Frame Structures," The john A.Blume earthquake engineering center, Department of civil and environmental engineering Stanford University, Report NO.138:1-301, 2001.
2. Ambraseys, N, N. Douglas, J. "Near-field Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motions," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 23, pp. 1-18, 2003.
3. Bayraktar, A. Altunişik, A. Sevim, B. Kartal, M. Türker, T. Bilici, Y. "Comparison of near- and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam–reservoir–foundation systems." Nonlinear Dynamics, vol. 58, pp. 655-673, 2009.
4. Chopra, A.K. Chintanapakdee, Ch. "Comparing Response of SDF Systems to Near-fault and Far-fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions," Earthquake Engng Struct. Dyn, 2001, pp. 1769-1789.
5. Davoodi, M. Jafari, M.K. Hadiani, N“ .Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ”,ELSVIER ,pp. 66-76, 2013.
6. Ebrahimian M. "Numerical analysis of nonlinear dynamic behavior of earth," Research Article, pp. 24-40, 2012.
7. Ebrahimian B. Vafaian M. Evaluation of Earth dam behavior under earthquake with considering height of dam and constitutive model of material, Estglal, 2008
8. FEMA "Earthquake Analyses and Design of Dams," in Federal Guidelines for Dam Safety, 2005, p. 65.
9. Feng, Z. Tsai, P.H. Li, J. N. "Numerical Eearthquake Response Analysis of the Liyutan Earth Dam in Taiwan," National Hazards and a Earth System Sciences, pp. 1269-1280, 2010.
10. Gorai, S. Maity, D. “Seismic response of concrete gravity dams under near field and far field ground motions”. ELSEVIER, Engineering Structures, 2019.
11. Han, Y. and Hart, R. "Application of a Simple Hysteretic Damping Formulation in Dynamic Continuum Simulations," in Proceedings of 4th International Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, 2006.
12. Itasca Consulting Group, "Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA." 2018.
13. Jabalbarezi A. Davoodi M. “Numerical study of the effect of flexibility of foundation of Gotvand dam with considering of near-fault earthquake”. 9 th Internationl conference of f Civil engineering, Technical university of Esfahan, 2013
14. Kim, L. Lee, S. Choo, Y. Kim, D. "Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests," ELSEVIER, vol. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, p. 1579–1593, 2011.
15. Khoei, A.R. Azami, A.R. Haeri, S.M. "Implementation of plasticity based models in dynamic analysis of earth and rockfill dams: A comparison of Pastor-Zienkiewicz and cap model," ELSEVIER, pp. 385-410, 2004.
16. Li, H. J. & Zhao, J. M. “State of art of seismic design for CFRD from earthquake-induced damage of Zipingpu Dam”. DEStech Transactions on Materials Science and Engineering, (124), 2017.
17. Li, Y. Tang, W. Wen,L. Wang, J. “Study on seismic failure probability of high earth-rock dam considering dam body deformation and slope stability”. EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL AND CIVIL ENGINEERING. 2020.
18. Lv, X. L. & Chi, S. C. “Seismic reliability analysis of high earth-rockfill dams based on deformation control criteria”. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, (in Chinese), 41(3), 519–525, 2019.
19. Mirshrifi A. Baba H. Safety of Structures based on reliabilty, Noavar publication, 2016, Tehran.
20. Najma A, Latifi M. “Predicting flow liquefaction, a constitutive model approach”. Acta Geotech 12(1):793–808, 2017.
21. Pundrik, P. Bahuguna, A. Firoj, M. “Near fault and far fault seismic analysis of concrete gravity dam“.ELSEVIER, Journal of Hydraulic Structures, 6(2): 56-79. 2020.
22. Rapti, I. Lopez-Caballero, F. Modaressi-Farahmand-Razavi, A. Voldoire, F. “Liquefaction analysis and damage evaluation of embankment-type structures”. Acta Geotechnica. 2018.
23. Sadigi H. R. Janalizadeh C. A.Numerical investigate vertical component of Near-Fault earthquake of dynamic behavior of Eath dams: Case study Alborz dam, Omran modares, vol 4,2015
24. Silva W. "Characteristics of Vertical Strong Ground Motions for Applications to Engineering Design," Proc. Of the FHWA/NCEER Workshop on the National Representation of Seismic Ground Motion for New and Existing Highway Facilities, Technical Report NCEER-97-001, 1997.
25. Vecchietti, A. Cecconi, M. Russo, G. Pane, V. “Seismic Vulnerability of a Rockfill Dam through Different Displacement-based Approaches”. JOURNAL OF EARTHQUAKE ENGINEERING. 2019.
26. Xu, B. Zhou, Y. & Zou, D. “Numerical Simulation on Slabs Dislocation of Zipingpu Concrete Faced Rockfill Dam during the Wenchuan Earthquake Based on a Generalized Plasticity Model”. The Scientific World Journal, 2014, 1–5, 2014.
27. Yaghmaei-Sabegh, S. Safari, S. Abdolmohammad Ghayouri, K. "Estimation of inelastic displacement ratio for base-isolated structures," Research article, 2017.
28. Yao, Y. Wang, R. Liu, T. Zhang, J.M. Seismic response of high concrete face rockfill dams subjected to non-uniform input motion”. Acta Geotechnica. 2018.
29. Zhang, J. Tang, Y. "Dimensional Analysis of Structures with Translating and Rocking Foundations under Near-Fault Ground Motions," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 29, pp. 1330-1346, 2009.
30. Zhou, W. Hua, J. Chang, X. & Zhou, C. “Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill Dam”. Computers and Geotechnics, 38(2), 269–280, 2011.

Investigate probability of damage of Earth dam under Near-field and Far –field earthquake: Case study Gotvand earth dam

Farhoud Kalateh[1*]
Sara Irani[1]

Abstract

The main goal of preset research is investigate the effects of vertical component of Near-Fault and Far-Field earthquake records on the probability of overtopping induced damage of earth dam due to the reduction of freeboard due to the settlement of dam crest. In this respect 12 different earthquake records are selected. Nonlinear dynamic analysis of earth dam is implemented with FLAC 3D using Finn model that relates the increment of volume decrease per cycle of shear strain to the cyclic shear strain amplitude for considering the pore pressure build-up during seismic loading. Obtained results show that the response of dam for near-fault earthquakes considerably is larger than far-field records. Applying vertical component of earthquakes in the dynamic analysis caused the horizontal maximum displacement of dam's crest increase 5.58% for near-fault records and 2.96% for far-field records and also maximum settlement for dam's crest increase 31.69% for near-fault records and 73.65% for far-field records with including vertical component of records in the dynamic analysis, Also can be get form obtained results the damage probability of dam with considering vertical component of earthquakes is increase 249% for near-fault records and increase 2419% for far-field records.

Keywords:
Earth dam; nonlinear dynamic analysis; finite difference method; Flac3D; vertical component of earthquake; Damage probability

1*Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Tabriz, Iran, Email:f.kalateh@gmail.com
2. MSc Hydraulic Structures, Civil Engineering Department, University of Tabriz, Iran.

Received: 28/01/2021 Accepted: 07/05/2021