مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره چهاردهم، شماره چهار، زمستان ۱۳۹۳

بررسی عددی اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی: مطالعه موردی سد البرز

رضا صدیقی هشتچین* و عسکر جانعلیزاده چوب بستی

۱- مدرس آموزشکده فنی و حرفه ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساری

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

Reza_sadighi7@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۲/٦] تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/٤/۲۱]

چکیده- در این مقاله اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی مطالعه و ارزیابی می‌شود. بیشتر پژوهش‌های انجام شده در رابطه با تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی، شامل اثر مولفه افقی آن‌ها است. یکی از ویژگی‌های مهم زلزله‌های حوزه نزدیک، دارا بودن مولفه قائم قابل توجه با محتوای فرکانسی بالاست که در بسیاری از موارد از مولفه افقی همان زلزله به مقدار قابل توجهی تجاوز می‌کند. تاکنون مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته است. برای بررسی اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی، مدلی دو بعدی از سد البرز به روش تفاضل محدود و با کمک نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ در نظر گرفته شد. در این مطالعه شتاب نگاشت‌های حوزه نزدیک و دور از یک زلزله انتخاب شد تا امکان مقایسه بهتر و دقیق‌تر فراهم شود. نتایج تحلیل‌ها بیانگر اثر قابل توجه مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی شامل افزایش نشست تاج سد تا حدود ٤٥ درصد، افزایش تغییر شکل های افقی محور سد، کاهش ضریب بزرگ‌نمایی تاج سد و همچنین لزوم توجه به اثر مولفه قائم زلزله، به ویژه در نواحی نزدیک به گسل که احتمال وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک وجود دارد، است، که این مسئله باید در جانمایی سدهای خاکی به لحاظ توان لرزه‌ای و فاصله از گسل‌های موجود در منطقه و همچنین در طراحی آنها در نظر گرفته شود.

واژگان کلیدی- مولفه قائم زلزله، تحلیل دینامیکی، سدهای خاکی، روش تفاضل محدود، زلزله حوزه نزدیک

۱- مقدمه

نخستین نشانه‌های حرکات زمین در حوزه نزدیک به گسل در زلزله‌های کرن کانتی کالیفرنیا (۱۹۵۲) و زلزله پارکفیلد (۱۹٦٦) آشکار شد[۱]. معمولا زلزله‌های حوزه نزدیک به گسل شدیدتر از زلزله‌های معمولی ثبت شده طی یک رخداد مشابه و تحت شرایط ساختگاهی یکسان است زیرا نزدیکی به چشمه لرزه‌ای اجازه کاهندگی قابل توجهی را به زلزله نمی‌دهد. بنابراین تاریخچه زمانی شتاب این نوع زلزله‌ها دارای محتوای فرکانسی بسیار بالا با دامنه بزرگ و زمان دوام کوتاه است. هر چند به طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های حوزه نزدیک تعریف کرد اما به طور معمول فرض می‌شود جنبش‌های ثبت شده در فاصله‌ای کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های حوزه نزدیک باشند[۲؛۳؛٤؛٥]. اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌تواند بیشتر از ۲۰ کیلومتر

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

باشد[٦]. به‌طور کلی آنچه که در این زلزله‌ها دارای اهمیت است، وجود برخی ویژگی‌های متفاوت با زلزله‌های حوزه دور است. یکی از ویژگی‌های مهم حرکات زمین در حوزه نزدیک به گسل که از آثار مهم حضور گسل فعال در منطقه است اثر جهت پذیری است که شامل دو نوع پیش ران و پس ران می‌شود. اگر گسیختگی گسل به سمت سایت پیشرفت کند، حرکت زمین در سایت دارای جهت پذیری پیش ران خواهد بود؛ از آن جا که سرعت انتشار گسیختگی نزدیک به سرعت موج برشی است، در منطقه دارای جهت پذیری پیش ران، بر همکنش و تقویت سازنده امواج باعث ایجاد پالس در ابتدای حرکت خواهد شد[۲]. از آن جایی که زلزله یک تغییر مکان برشی است که در نقطه ای از گسل ایجاد شده و با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی منتشر می شود، انتشار گسیختگی در جهت سایت باعث می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ای به شکل یک پالس بزرگ در شروع حرکت ظاهر شود. این نوع حرکت شامل تکان‌هایی با دامنه زیاد و مدت دوام کوتاه است که در برگیرنده تغییر مکان‌ها و سرعت‌های بزرگ اولیه‌اند[۷]. این حرکات نیرومند الزامات طراحی و تغییر شکل های بزرگ‌تری را نسبت به نگاشت‌های حوزه دور به سازه تحمیل می‌کنند.

برخلاف زلزله‌های حوزه دور که انرژی زلزله در کل زمان ارتعاش توزیع می‌شود، در زلزله‌های حوزه نزدیک بخش عمده‌ای از انرژی زلزله در یک یا چند پالس ابتدایی قرار دارد. یکی دیگر از تفاوت‌هایی که معمولا در بین زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور وجود دارد اختلاف در نسبت $\frac{PGV}{PGA}$ در تاریخچه زمانی آن‌ها است. معمولا این نسبت برای زلزله‌های حوزه نزدیک بزرگتر است، و اثر پدیده جهت پذیری را در نگاشت نشان می‌دهد و در واقع این نسبت هر چه بزرگتر باشد نگاشت پالس مانندتر خواهد بود[۹؛۱]. یکی دیگر از ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک بزرگتر بودن نسبت بیشینه شتاب مؤلفه قائم به بیشینه شتاب مؤلفه افقی در این زلزله‌ها نسبت به زلزله‌های حوزه دور است[۹؛۱۰].

بیشتر پژوهش‌های گذشته روی رفتار دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از روش‌های عددی، بدون در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله صورت می‌گرفت. سه دلیل اصلی برای در نظر نگرفتن مؤلفه قائم نگاشت زلزله در تحلیل‌های دینامیکی عبارتند از: ۱) تنش‌های برشی بوجود آمده در سدهای خاکی در اثر مؤلفه قائم نگاشت زلزله در حالت کلی بسیار کوچکتر از مقادیر نظیر برای مؤلفه افقی زلزله است، ۲) بر اساس مطالعات گسترده آزمایشگاهی، تمایل به تغییر حجم و توسعه فشار آب منفذی ناشی از آن در اثر ارتعاشات قائم در مقایسه با مقادیر حاصل از ارتعاشات افقی کم‌تر است، ۳) فشار آب حفره‌ای ناشی از ارتعاشات قائم در غیاب تنش‌های برشی، فشارهای خنثی خواهد بود بنابراین تاثیری روی مقاومت برشی خاک نخواهد گذاشت. همچنین به دلیل آن که ارتعاشات قائم زمین شامل مؤلفه‌های فرکانسی بالایی است که احتمالا تاثیر زیادی در پاسخ دینامیکی سدهای خاکی نخواهد داشت و به دلیل آن که ارتعاشات قائم در مقایسه با ارتعاشات افقی برای یک زمین لرزه بسیار ضعیف‌ترند پس آثار آن‌ها کمتر مورد توجه قرار داشت. همچنین مطالعات گذشته بیانگر ضغیف بودن ارتعاشات قائم در قیاس با ارتعاشات افقی زلزله است و در بسیاری موارد ضریب ۰/۵ تا ۰/٦٧ برای ارتباط بیشینه شتاب قائم با بیشینه شتاب افقی زلزله به کار می‌رفت[۱۱]. لیکن این مسئله در مورد نواحی نزدیک به گسل به طور کلی صادق نیست چرا که در بسیاری موارد بیشینه شتاب قائم حتی از بیشینه شتاب افقی همان زلزله نیز می‌تواند تجاوز کند[۱۲؛۱۳]. فنگ و همکاران، سد لیوتان در تایوان را تحت اثر زلزله چی چی بروش تفاضل محدود مورد تحلیل دینامیکی قرار دادند و نشان دادند پاسخ سد تحت اثر همزمان مولفه‌های افقی و قائم متفاوت از رفتار سد تحت اثر مولفه افقی به تنهایی است. لیکن به دلیل پایین بودن

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

بیشینه شتاب قائم در تحلیل ایشان تفاوت‌ها چندان چشم‌گیر نبودند[١٤].

در این مطالعه ضمن تاکید بر مدل‌سازی دقیق به روش عددی تفاضلات محدود، اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سد سنگریزه‌ای با هسته رسی البرز، واقع در شمال کشور بررسی می‌شود. سد مخزنی البرز بر روی رودخانه بابل رود در محل تلاقی شاخه‌های گزو و چاخانی، به ارتفاع ۷۸ متر از پی احداث شد؛ طول و عرض تاج این سد به ترتیب ۸۳۸ و ۱۲ متر، تراز تاج و تراز نرمال آب در مخزن این سد به ترتیب ۳۰۷ و ۳۰۱ متر از سطح دریا است. جدول (۱) تعدادی از گسل‌های مطرح منطقه را نشان می دهد[۱۸]. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود منطقه ساختگاه سد پتانسیل لرزه‌ای بالایی دارد.

جدول (۱) گسل های مطرح منطقه سد البرز

نام گسل	ساز و کار گسل	طول گسل (Km)	توان لرزه ای (Ms)	فاصله تا ساختگاه (Km)
کاری کلا	راست بر	۱۰	٦/٤	۰/۲۵
پاشا کلا	نرمال	۱۳/۵	٦/۵	۰/۷۵
سوخته سرا	راست بر	۲۷	٦/۸	٦
شمال البرز	رانده	٤٦	۷	۵
مشا	رانده	۱۵	۷/۳	٦
خزر	واژگون	٦۰	۷/۲	۲۰

۲- رویکرد تحلیل و مدل رفتاری

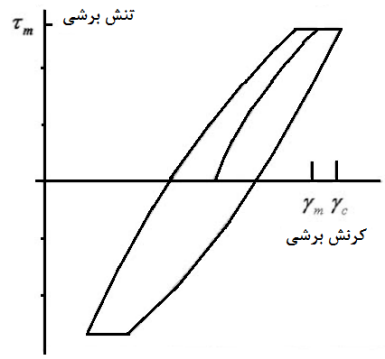
در این مطالعه برای بررسی اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی با هسته رسی از نرم افزار تفاضلات محدود $FLAC^{2D}$ نسخه ۵ استفاده شد. دو ویژگی مهم این نرم‌افزار که آن را برای تحلیل دینامیکی متمایز می‌کند عبارتند از روش حل صریح و لاگرانژی که امکان مشاهده رفتار سیستم در تغییر شکل‌های زیاد را فراهم می‌سازد[۱۵]. در این مطالعه مدل رفتاری الاستیک–کاملا پلاستیک موهرکولمب برای شبیه سازی رفتار خاک حین بارگذاری دینامیکی استفاده شد. در این مدل رفتاری، اتلاف انرژی در حین سیکل‌های بارگذاری، در اثر جریان خمیری شبیه سازی می‌شود. اتلاف انرژی در خاک و سنگ در یک بارگذاری دینامیکی، طبیعتی هیسترتیک دارد، یعنی مستقل از فرکانس بارگذاری بوده ولی تابعی از دامنه سیکل‌های بارگذاری است[١٦]. در یک رخداد لرزه‌ای، امواج تنشی در محیط نیم بی‌نهایت منتشر شده و با فاصله گرفتن از محل انتشار کاهش می‌یابند. اتلاف انرژی، تغییرات حجم و کاهش سختی مصالح، عواملی است که روی کاهش دامنه امواج تنشی موثرند؛ در طول ارتعاشات ناشی از زلزله، خاک‌ها کاهش سختی و افزایش میرایی از خود نشان می‌دهند که در نتیجه منجر به کاهش دامنه امواج تنشی در خاک می‌شود. به طور ایده‌آل این رفتار واقعی خاک‌ها باید با یک مدل رفتاری مناسب شبیه سازی شود. مدل‌های رفتاری پیشرفته احتیاج به پارامترهای زیادی دارد که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند در عوض می‌توان از مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک ساده‌تر همراه با میرایی اضافی برای اصلاح مدل رفتاری استفاده کرد[۱۷]. رویکرد دوم در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه توضیح داده می‌شود.

برای اصلاح الگوی رفتاری موهرکولمب در محدوده‌ای از کرنش‌های برشی که هنوز جریان خمیری و میرایی ناشی از آن اتفاق نیفتاده است باید از میرایی اضافی استفاده شود. در این مطالعه از یک الگوریتم جدید، میرایی هسیرزیس که در نسخه ۵ به نرم افزار اضافه شده برای شبیه‌سازی استفاده شده است. هنگامی که میرایی هسیرزیس همراه با یک مدل الاستو پلاستیک ساده مثل موهرکولمب استفاده می‌شود، تکنیک کاهش سختی در محدوده رفتاری الاستیک اعمال می‌شود و میرایی طبیعی ناشی از جریان خمیری در محدوده رفتاری پلاستیک عمل میکند. حلقه تنش برشی–کرنشی

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

برشی برای یک سیکل بارگذاری در مدل رفتاری موهر کولمب همراه با میرایی هسیرزیس در شکل (۱) نشان داده شده است. محدوده رفتاری الاستیک با رابطه $\gamma_c < \gamma_m$ مشخص می شود که مقدار γ_m از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\tau_m}{G_{max}} = \frac{\gamma_m}{1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}} \qquad (۱)$$



شکل (۱) سیکل تنش- کرنش برشی در مدل موهر کولمب با میرایی هیسترزیس

برای محدوده رفتاری الاستیک، ضریب کاهش سختی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1+\frac{|\gamma|}{\gamma_{ref}}} \qquad (۲)$$

و برای محدوده رفتاری پلاستیک یعنی $\gamma_c \geq \gamma_m$، این ضریب از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{\left(1+\frac{|\gamma|}{\gamma_{ref}}\right)\frac{|\gamma|}{\gamma m}} \qquad (۳)$$

علاوه بر آن، در محدوده رفتاری پلاستیک، اتلاف انرژی در یک سیکل بارگذاری برابر با سطح زیر حلقه نشان داده شده در شکل (۱) است. بنابراین این انرژی اتلاف شده را می توان مجموع دو مولفه در نظر گرفت[۱۵]:

$$\Delta W = \Delta W_H + \Delta W_{MC} \qquad (٤)$$

که در آن:

$$\Delta W_H = 4G_{max}\gamma_{ref}^2 \left\{ 2\left[\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}} - \left(1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}\right)\right] - \frac{\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}\right)^2}{1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}} \right\} \qquad (۵)$$

$$\Delta W_{MC} = 4\left(\frac{G_{max}}{1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}}\right)\left(\frac{\gamma_c}{\gamma_m}-1\right)\gamma_m^2 \qquad (٦)$$

بنابراین نسبت میرایی از رابطه زیر تعیین می‌شود[۱۵]:

$$D = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W_H + \Delta W_{MC}}{W} \qquad (۷)$$

که در آن W بیشترین انرژی ذخیره شده در یک سیکل بارگذاری است:

$$W = 0.5\,\tau_m\,\gamma_c \qquad (۸)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۲) و (۱۳) در رابطه (۱٤) با مقداری ساده کردن رابطه زیر حاصل می‌شود:

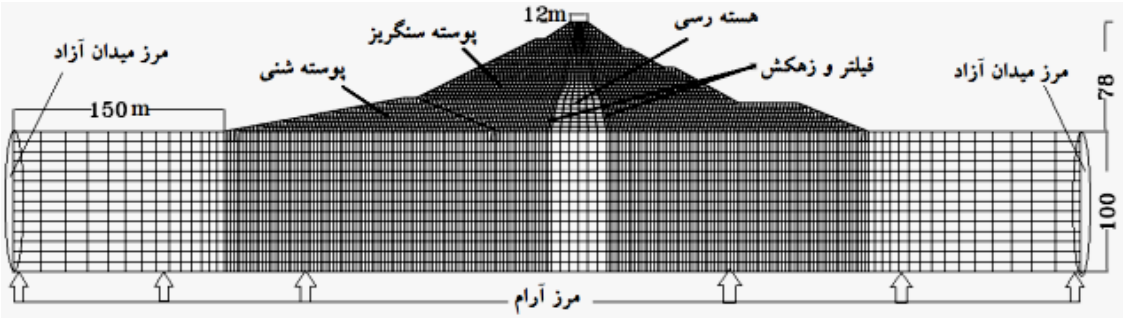
$$D = \frac{2}{\pi}\left\{ 2\frac{1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}}{\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}\right)^2}\left[\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}} - ln\left(1+\frac{\gamma_m}{\gamma_{ref}}\right)\right] - 1 \right\}\frac{1}{\frac{\gamma_c}{\gamma_{ref}}} + \frac{2}{\pi}\frac{(\gamma_c-\gamma_m)}{\gamma_c} \qquad (۹)$$

۳- هندسه مدل و ویژگی مصالح

در شکل (۲) مدل دو بعدی سد البرز با فرض برقراری شرایط کرنش مسطح مشاهده می‌شود. جدول (۲) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نواحی مختلف بدنه سد را نشان می‌دهد[۱۸].

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل (۲) ابعاد مدل (متر) و شبکه تفاضلات محدود مقطع سد البرز

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل دینامیکی یک سد خاکی مدول برشی مصالح در سطح کرنش برشی کوچک یعنی $G_{\max}$ است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مدول برشی تابعی از تنش موثر همه جانبه است. یکی از روش‌های تعیین این پارامتر، اندازه‌گیری سرعت امواج برشی در مصالح با استفاده از روش‌های ژئوفیزیک است. اما در نبود نتایج یاد شده می‌توان با دقت خوبی از روابط تجربی ارائه شده در متون فنی استفاده کرد. جدول (۳) روابط مورد استفاده در این پژوهش برای تعیین $G_{\max}$ برای مصالح نواحی مختلف بدنه سد را نشان می‌دهد. روابط یاد شده با استفاده از زبان برنامه نویسی FISH به برنامه معرفی شد.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح [۱۸]

مصالح	پوسته سنگریز	پوسته شنی	فیلتر	هسته رسی	پی
جرم مخصوص(kg/m^3)	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰	۱۹۵۰	۲۳۰۰
مدول الاستیسیته(Mpa)	٤٨	٤٥	٤٣	٣٤	٥٠٠
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/٤	۰/۳۵
چسبندگی (kpa)	۰	۰	۰	٥٠	۱۳۰
زاویه اصطکاک داخلی	رابطه (۱۸)	٤٠	۳۵	۱۱	۳۱

به طور کلی در انجام تحلیل دینامیکی امکان بروز خطا در چگونگی انتشار امواج تنشی وجود دارد. برای غلبه بر این خطا و جهت اطمینان از انتشار صحیح امواج تنشی از مدل، ابعاد المان‌ها طبق رابطه زیر تعیین شدند[۱۵]:

$$f = \frac{C_s}{10\,\Delta l} \qquad (۱۰)$$

که در آن، C_s سرعت امواج برشی و f بیشترین فرکانس مجاز قابل عبور امواج برشی برای بزرگترین بعد ناحیه شبکه تفاضل محدود مسئله است.

مطالعات گذشته نشان می دهد تنش‌های همه جانبه تاثیر زیادی در مقاومت برشی مصالح سنگریز دارد. هنگامی که مصالح سنگریزه‌ای در تنش‌های همه جانبه بزرگتری برش می‌خورند، تعداد بیشتری از سنگدانه‌ها می‌شکنند که منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک و پوش گسیختگی منحنی شکل خواهد شد. منحنی شدن پوش گسیختگی در تنش‌های متوسط و کم بیشتر است[۱۹]. کارلس و سرز نشان دادند چنین پوش گسیختگی منحنی شکل تاثیر زیادی روی پایداری شیب‌های تشکیل شده از مصالح سنگریزه‌ای دارد[۲۰]. بنابراین برای پوسته سنگریزه‌ای سد البرز از رابطه زیر برای تعیین پوش گسیختگی منحنی شکل در این مطالعه استفاده شد:

$$\varphi_p = \varphi_0 - \Delta\varphi \log\left(\frac{\acute{\sigma}_3}{P_a}\right) \qquad (۱۱)$$

که در آن φ_0 مقدار φ_p برای $\acute{\sigma}_3 = P_a$ و $\Delta\varphi$ میزان کاهش φ_p برای افزایش ۱۰ برابری در $\acute{\sigma}_3$ و P_a نیز فشار اتمسفر است. بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری روی

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

مصالح سنگریزه‌ای پوسته سد البرز مقدار $\Delta\varphi = 4°$ پیشنهاد می‌شود و رابطه فوق در این مطالعه به کمک زبان برنامه نویسی FISH با مدل رفتاری موهر کولمب تلفیق شد.

جدول (۳) مشخصات دینامیکی مصالح

مصالح	G_{max} (kpa)	Damping
پوسته سنگریز	$G_{max} = 13000\,\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}(\sigma)$ Kokusho & Esachi (1981)	ROCKFILL-Gazetas, 1992 [21]
پوسته شنی	G_{max}=8400 $\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}\ (\bar{\sigma}_0)^{0.55}$ Kokusho & Esachi (1981)	GRAVEL-Seed et al,1986 [21]
فیلتر	G_{max}=220 $k_{2max}(\bar{\sigma}_0)^{0.6}$ k_{2max}=59 Seed & Idriss (1970)	SAND-Seed et al,1970 [21]
هسته رسی	G_{max}=3270 $\frac{(2.973-e)^2}{(1+e)}\ (\bar{\sigma}_0)^{0.5}$ Hardin & Black (1968)	CLAY-Seed & Sun [21]
پی	G_{max}=1.62 Gpa [18]	ROCK-Schnabel, 1973, [21]

٤- بارگذاری دینامیکی

جدول (٤) نگاشت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد استفاده در این مطالعه را به همراه مشخصات آن‌ها نشان می دهد[۲۲]. برای فراهم نمودن امکان مقایسه بهتر و دقیق‌تر نتایج تحلیل‌ها، نگاشت‌های حوزه نزدیک و دور از یک زلزله انتخاب شدند و کلیه مولفه‌های افقی زلزله‌های یاد شده به شتاب 0/52g که معرف تراز بیشینه زلزله متحمل برای ساختگاه سد البرز است همپایه شدند. شکل (۳) تاریخچه زمانی شتاب و سرعت زلزله حوزه نزدیک ایمپریال را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

برای بررسی تاثیر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک و مقایسه آن با زلزله‌های حوزه دور، مولفه‌های قائم نیز با رعایت نسبت شتاب بیشینه مولفه قائم به شتاب بیشینه مولفه افقی نگاشت اصلی همپایه شدند که نتایج در جدول (٤) مشاهده می‌شود. پس از مشخص شدن بیشینه شتاب مولفه افقی و قائم زلزله هدف به روش یاد شده و از آن جایی که نگاشت زلزله‌ها در عمق ۱۰۰ متری در کف پی مدل اعمال می‌شود لازم است با انجام تحلیل دکانولوشن۱ روی نگاشت زلزله آن‌ها را اصلاح کرد تا پس از اعمال به کف پی در مدل، به بیشینه شتاب افقی و قائم زلزله هدف در سطح زمین برسیم[۲۳]. این کار با کمک نرم افزار SHAKE2000 صورت گرفت[۲۱].سایر اصلاحات صورت گرفته روی نگاشت‌های زلزله این گونه است:

۱. از آن جایی که عمده انرژی بارگذاری زلزله درمولفه‌های فرکانسی پایین پنهان است، می‌توان با فیلتر کردن بارگذاری و حذف فرکانس‌های بالا، امکان تشکیل شبکه تفاضلات محدود با نواحی بزرگ‌تر را طبق رابطه (۱۰) فراهم کرد.

۲. در صورت استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله به عنوان بارگذاری، لازم است ابتدا روی تاریخچه یاد شده تصحیح خط مبنا انجام شود.

۳. سازه‌های سطحی مثل سدهای خاکی در واقعیت بر روی محیط نیم بی‌نهایت قرار می‌گیرند. برای شبیه سازی محیط نیم بی‌نهایت در تحلیل عددی حاضر از مرزهای آرام۲ در کف پی و مرزهای میدان آزاد۳ در مرزهای کناری مدل استفاده شده است. بنابراین لازم است تاریخچه زمانی مولفه افقی و قائم شتاب زلزله‌ها به تاریخچه زمانی تنش برشی و تنش نرمال تبدیل و به کف پی اعمال شود[۱۵].

٤. از آن جایی که فیلتر کردن نگاشت‌های زلزله پس اصلاح نمودن نگاشت‌ها به وسیله‌ی نرم‌افزار SHAKE2000 و حذف برخی مولفه‌های فرکانسی منجر به این خواهد شد تا در سطح زمین به شتاب بیشینه مولفه‌های افقی و قائم زلزله هدف، جدول (۳) نرسیم، پس لازم است اصلاحاتی از این رو روی رکوردهای زلزله صورت گیرد. به این منظور مدلی از پی سد البرز بطور مجزا و بدون در نظر گرفتن بدنه سد،

1 Deconvolution
2 Quiet Boundary
3 Free Field

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

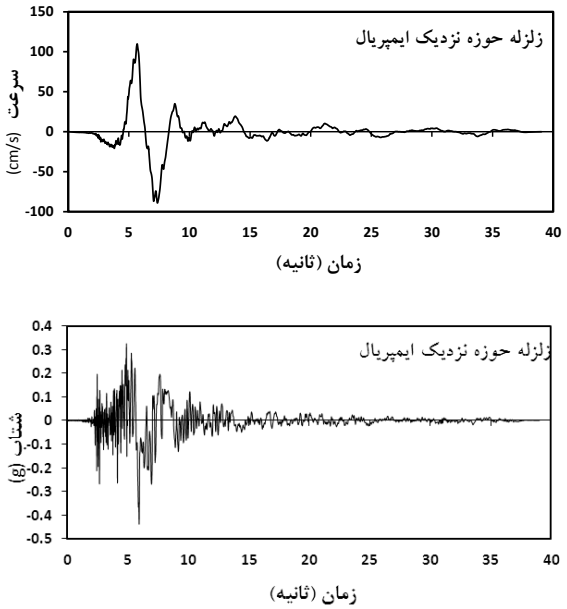
به صورت میدان آزاد در نظر گرفته شد و با اعمال تاریخچه زمانی تنش‌های برشی و تنش نرمال هر رکورد زلزله در کف پی، مولفه‌های افقی و قائم شتاب در سطح زمین ثبت شد تا در سطح زمین به بیشینه شتاب مولفه‌های افقی و قائم زلزله هدف برسیم.

طبق توضیحات بخش قبل برای اضافه کردن میرایی به مدل عددی از گزینه میرایی هیسترزیس استفاده شده است که در پژوهش حاضر از مدل چهار پارامتری این میرایی (sig4) طبق رابطه زیر استفاده شده است:

$$M_s = y_0 + \frac{a}{1+exp(-(l-x_0)/b)} \qquad (۱۲)$$

جدول (٤) مشخصات زلزله‌های انتخابی

Event, station, record	Epic. Dist (km)	M	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	$\frac{PGV}{PGA}$	$\frac{PGD}{PGA}$	$\frac{PGA(V)}{PGA(H)}$	نوع
1971, San Fernando, Pacomia Dam	2.8	6.6	1.225	112.48	35.49	0.09	0.029	0.57	نزدیک
1971,San Fernando, Pearblossom	39	6.6	0.135	5.564	1.564	0.04	0.011	0.36	دور
1994, Northridge, New Hall Fire Station	7.1	6.7	0.589	96.93	38.15	0.167	0.066	0.989	نزدیک
1994, Northridge, Featherly	84.2	6.7	0.104	7.7	0.81	0.075	0.008	0.23	دور
1979, Imperial, 942 El Centro, Array #6	13	6.5	0.439	109	65	0.25	0.15	**3.84**	نزدیک
1979, Imperial, 286 Superstition MtnCamera	26	6.5	0.195	8.7	4.28	0.045	0.022	0.39	دور
1992, Cape Mendocino, 090	8.5	7.1	1.039	41.28	120	0.04	0.11	0.74	نزدیک
1992, Cape Mendocino, Shelter Cove Airport	33.8	7.1	0.228	6.89	10	0.03	0.044	0.237	دور
1987, Whittier, San Gabriel-E Grand Av	9	6	0.3	22.79	3.3	0.077	0.011	0.75	نزدیک
1987, Whittier, Pacoima Kagel	37.9	6	0.163	6.75	0.08	0.042	0.0005	0.33	دور

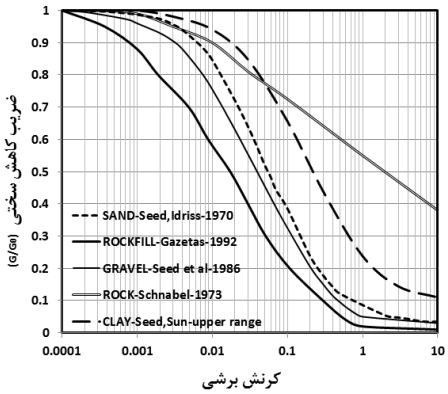


شکل (۳) تاریخچه زمانی شتاب و سرعت مولفه افقی زلزله حوزه نزدیک ایمپریال

لازم است پارامترهای این میرایی از طریق تطبیق منحنی٤های کاهش سختی-کرنش برشی، با معادله یاد شده تعیین شود. شکل (٤) منحنی‌های کاهش نسبت مدول برشی با کرنش برشی که در این پژوهش استفاده شد را نشان می‌دهد. چون میرایی هسیرزیس مؤلفه‌های فرکانسی بالا را به طور کامل میرا نمی‌کند، بنابراین مقدار کمی از میرایی رایلی متناسب با سختی نیز به‌کار می‌رود.

4 Curve Fitting

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل (٤) منحنی‌های کاهش نسبت مدول برشی برای مصالح مختلف مدل [٢١]

٥- مراحل مدل‌سازی

در این بخش مراحل مدل‌سازی سد خاکی البرز در مطالعه حاضر به اختصار شرح داده می شود:

١) پیش از احداث سد لازم است تنش‌های اولیه در پی ایجاد شود. در این مرحله سطح آزاد آب منطبق بر سطح زمین در نظر گرفته شده است.

٢) برای مطابقت با شرایط واقعی، ساخت سد و تولید تنش‌های استاتیکی به شکل مشابه آنچه در واقعیت رخ می دهد با احداث بدنه سد به صورت مرحله‌ای صورت گرفت. به این منظور بدنه سد به ١٦ لایه تقسیم شد و هر لایه با در نظر گرفتن زمان واقعی احداث از روی نمودارهای خاکریزی بدنه سد برای شبیه‌سازی پدیده تحکیم، به صورت ترکیبی (حل هم‌زمان معادلات مکانیکی و انتشار سیال) تحلیل شد.

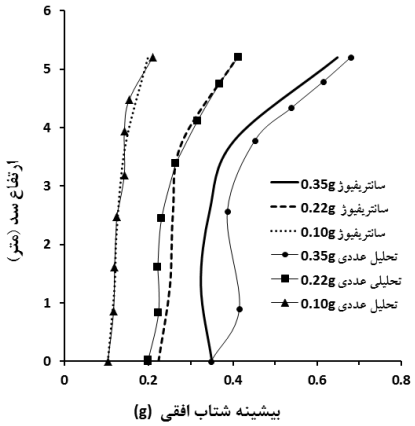
٣) در مطالعه حاضر فرض شد، زلزله زمانی رخ می‌دهد که آب دریاچه سد در تراز نرمال قرار دارد. بنابراین پس از پایان ساخت مرحله‌ای، سد تا تراز نرمال آبگیری و برای حالت تراوش پایا تحلیل شد.

٤) با توجه به هدف مطالعه حاضر، در پایان تحلیل استاتیکی، تغییر شکل‌های بدنه سد صفر می‌شود تا تنها اثر بارگذاری دینامیکی بر تغییر شکل‌ها لحاظ شود. بدیهی است تنش‌های ایجاد شده در مرحله تحلیل استاتیکی به صورت پیش فرض برای مرحله تحلیل دینامیکی باقی خواهد ماند.

٥) پس از اختصاص ویژگی دینامیکی مصالح و میرایی هسیرزیس، برای مرحله تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی شتاب اصلاح شده نخست به تاریخچه تنش تبدیل شده و تحلیل دینامیکی به مدتی برابر با زمان وقوع زلزله انجام شد که در بخش بعدی نتایج مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

٦- اعتبار بخشی به مدل سازی:

در این بخش برای صحت سنجی و اعتبار بخشی به مدل سازی پژوهش حاضر، آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی که اخیرا به وسیله‌ی کیم و همکاران روی نمونه‌ای از سد خاکی با هسته رسی به ارتفاع ١٣ سانتی‌متر صورت گرفت با نرم افزار $FLAC^{2D}$ شبیه سازی شد[٢٤]. مدل مورد استفاده در آزمایش ایشان با در نظر گرفتن ضریب مقیاس ٤٠ معرف یک سد خاکی با هسته رسی به ارتفاع ٥/٢ متر است. برای رعایت اختصار و بدون ذکر جزئیات، نتایج شبیه سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ در غالب بیشینه شتاب افقی محور سد در شکل(٥) مقایسه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توافق مناسبی بین نتایج دیده می‌شود که بیانگر صحت روش مدل‌سازی به کار رفته در این پژوهش است.

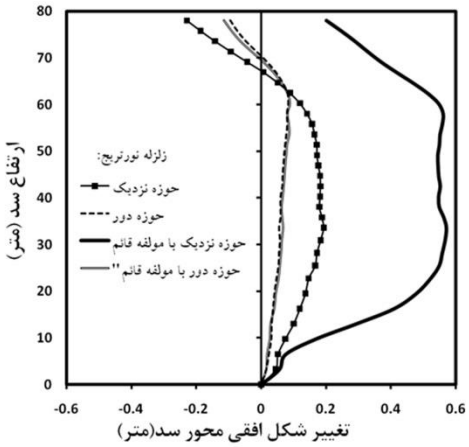


شکل (٥) مقایسه بیشینه شتاب افقی محور در مدل سازی عددی و آزمایش سانتریفیوژ

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

۷- نتایج تحلیل

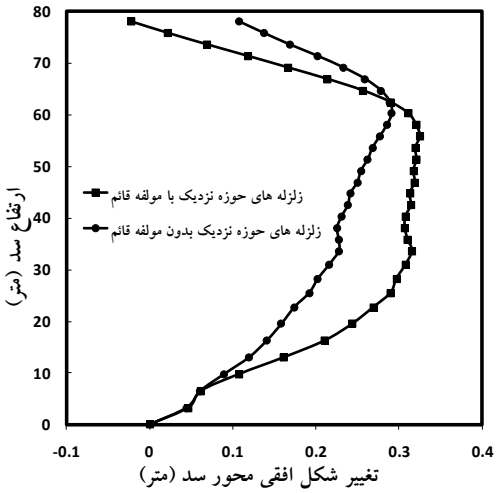
شکل (٦) تغییر شکل افقی محور سد را نسبت به تراز کف سد برای زلزله نورتریج نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود محور سد به سمت بالادست خم می‌شود چرا که اشباع بودن پوسته بالادست و در نتیجه کاهش تنش‌های موثر و مقاومت برشی سبب ایجاد تغییر شکل به سمت بالادست می‌گردد. همچنین مولفه قائم نگاشت حوزه دور تاثیر چندانی روی تغییر شکل افقی محور سد ندارد در حالی که در مورد نگاشت های حوزه نزدیک تغییر شکل‌های افقی محور سد با در نظر گرفتن مولفه قائم حدود ۳ برابر مقدار نظیر بدون در نظر گرفتن مولفه قائم است.



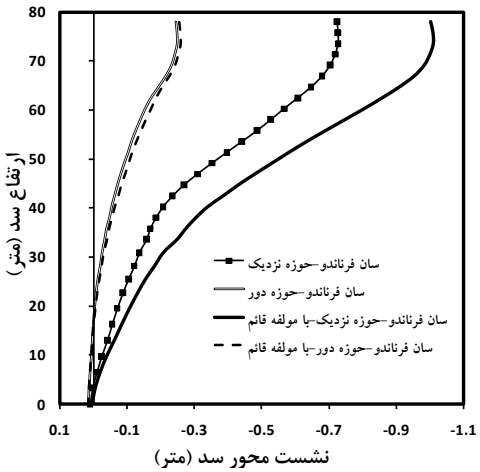
شکل (٦) تغییر شکل نسبی افقی محور سد تحت زلزله نورتریج

شکل (۷) اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک به کار رفته در این مطالعه بر میانگین تغییر شکل افقی محور سد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود در سه چهارم پایینی ارتفاع سد میانگین تغییر شکل افقی محور سد با در نظر گرفتن مولفه قائم بیشتر به سمت پایین دست و در یک چهارم فوقانی ارتفاع سد بیشتر به سمت بالادست متمایل می‌شود که این به مفهوم وضعیت بحرانی‌تر به دلیل شکل گیری توده‌های لغزشی بزرگتر در پوسته بالادست در اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک است به گونه‌ای که اختلاف در تغییر شکل‌های افقی در این دو حالت برای تراز ٤٠ متری و ۷۰ متری به حدود ۳۸ درصد می‌رسد.

شکل (۸) تغییر شکل قائم محور سد را برای زلزله سان فرناندو نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشینه نشست در حوالی تاج سد رخ می‌دهد و مقدار آن با لحاظ کردن مولفه قائم برای زلزله حوزه نزدیک به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد در حالی که برای زلزله‌های حوزه دور تاثیر چندانی دیده نمی‌شود.



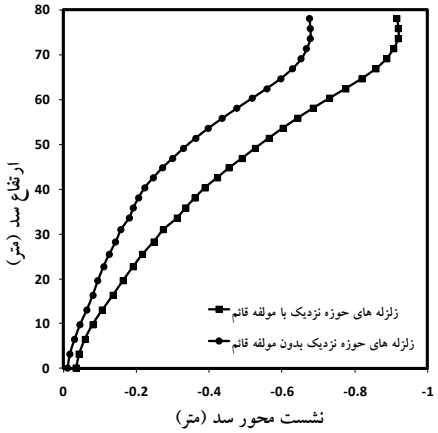
شکل (۷) میانگین تغییر شکل افقی محور سد تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با و بدون مولفه قائم



شکل (۸) نشست محور سد تحت زلزله سان فرناندو

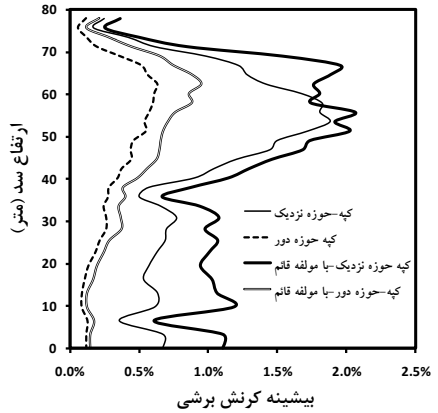
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

شکل (۹) اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک را بر میانگین نشست محور سد نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع از تراز کف سد، به تدریج اختلاف نشست‌ها در اثر لحاظ نمودن مولفه قائم بیشتر می‌شود به گونه‌ای که درمیانه ارتفاع سد به اختلافی در حدود ٤٠ درصد می‌رسد.



شکل (۹) نشست محور سد تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با مولفه قائم و بدون مولفه قائم

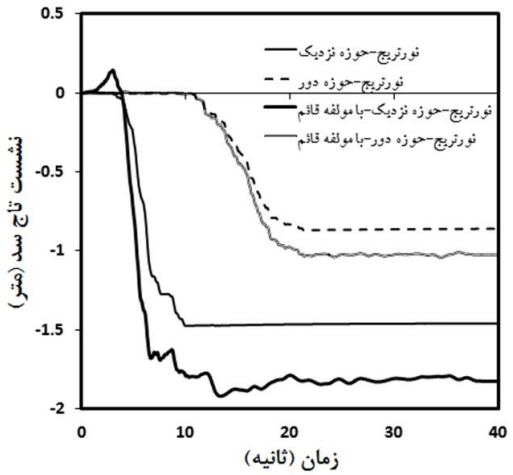
شکل (۱۰) توزیع کرنش برشی بیشینه محور سد برای زلزله کپه را نشان می‌دهد. در این مورد نیز لحاظ نمودن مولفه قائم منجر به افزایش کرنش برشی بیشینه محور سد می‌گردد و بیشینه آن در حدود تراز ٦٠ متری ارتفاع سد رخ می‌دهد که با مراجعه به شکل (٦) مشاهده می‌شود این تراز متناظر با تغییر جهت تغییر شکل‌های افقی از سمت پایین دست به سمت بالادست سد است.



شکل (۱۰) توزیع کرنش برشی بیشینه برای زلزله کپه

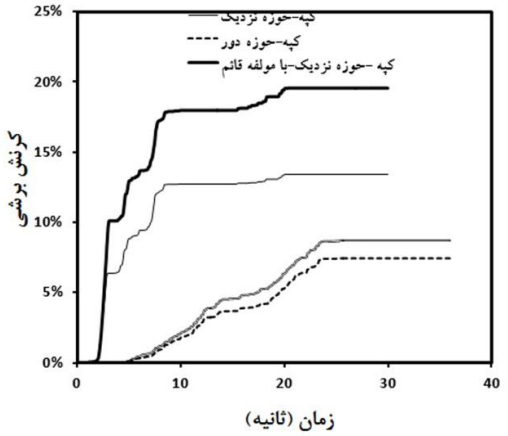
شکل (۱۱) تاریخچه زمانی نشست تاج سد را برای زلزله نورتریج نشان می‌دهد. تقریبا کل نشست تاج سد در اثر زلزله‌های حوزه نزدیک در یک بازه زمانی برابر با مدت زمان پالس غالب رخ داده است، در صورتی که در زلزله‌های حوزه دور نشست تاج سد به طور تدریجی و توزیع شده در مدت زمان زلزله ایجاد شده است. با توجه به اینکه بخش اعظم انرژی در زلزله‌های حوزه نزدیک در یک یا چند پالس ابتدایی قرار دارد، ورود کل انرژی زلزله در لحظه کوتاهی (مدت زمان پالس‌ها) سد را در معرض تغییر شکل‌های بسیار بزرگتری قرار می‌دهد. در این مورد لحاظ کردن مولفه قائم زلزله حوزه نزدیک منجر افزایش حدود ۲۵ درصدی نشست تاج سد شده است.

شکل (۱۲) تاریخچه زمانی کرنش برشی تاج سد را برای زلزله کپه نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مولفه قائم منجر به افزایش حدود ٦٠ درصدی کرنش برشی در زلزله حوزه نزدیک و افزایش حدود ۲۵ درصدی کرنش برشی در زلزله حوزه دور می‌شود، ضمن اینکه در این حالت نیز ماهیت پالس گونه زلزله حوزه نزدیک در توزیع زمانی کرنش برشی به وضوح دیده می‌شود.

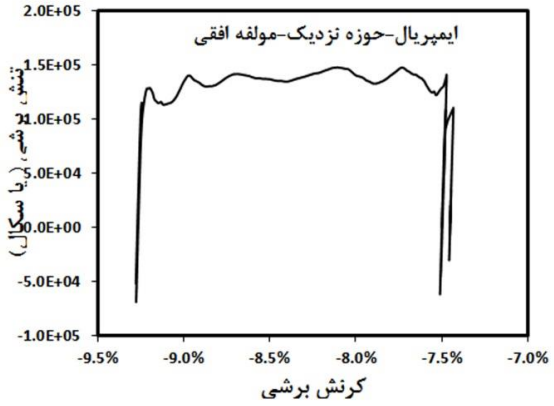


شکل (۱۱) تاریخچه زمانی نشست تاج سد تحت زلزله نورتریج

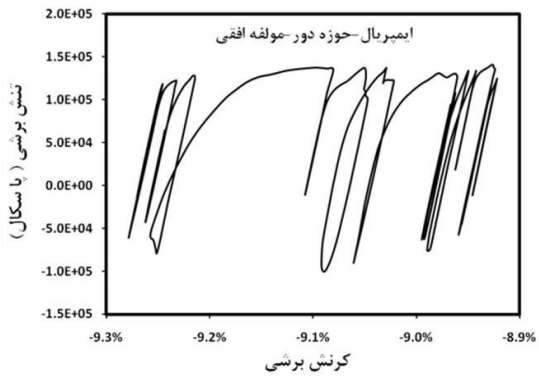
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل (۱۲) تاریخچه زمانی کرنش برشی تاج سد برای زلزله کپه



شکل (۱۳) حلقه هیسترزیس یک المان تحت زلزله حوزه نزدیک

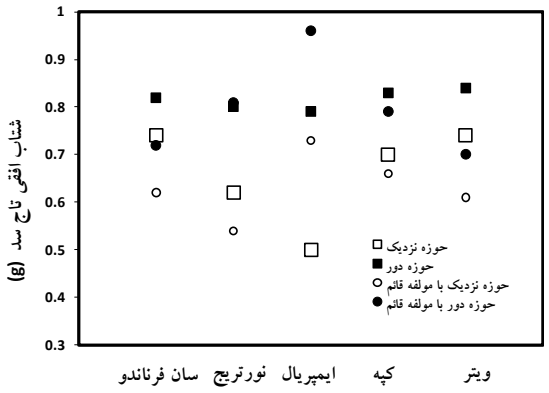


شکل (۱٤) حلقه هیسترزیس یک المان تحت زلزله حوزه دور

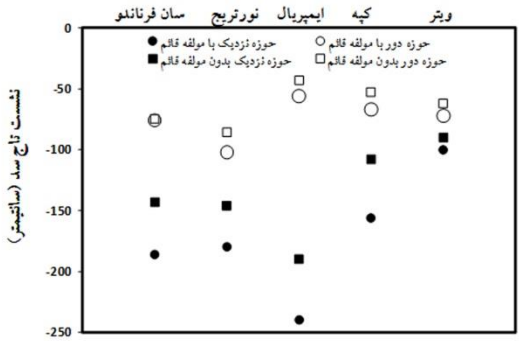
شکل (۱۳) و (۱٤) حلقه هیسترزیس را برای یک المان در میانه ارتفاع محور سد به ترتیب برای زلزله ایمپریال حوزه نزدیک و دور نشان می‌دهد. با مقایسه این دو شکل دیده می شود محدوده کرنش برشی ناشی از زلزله حوزه نزدیک حدود ٤/٥ برابر زلزله حوزه دور است. همچنین بخش تقریبا افقی در شکل (۱۳) کرنش‌های برشی ایجاد شده در بازه زمانی ٥ تا ۹ ثانیه است که با مراجعه به شکل (۳) معلوم می‌شود که این بازه زمانی متناظر با پریود پالس غالب در این نگاشت است.

شکل (۱٥) مقادیر شتاب افقی تاج سد را تحت نگاشت های بکار رفته در این مطالعه نشان می دهد. همان‌گونه که دیده می شود به طور کلی شتاب افقی تاج سد تحت اثر زلزله‌های حوزه دور بزرگتر از شتاب افقی تاج سد تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک است و این به مفهوم آن است که ضریب بزرگ‌نمایی برای زلزله‌های حوزه دور بزرگتر است. با توجه به این که بزرگ‌نمایی نتیجه پاسخ الاستیک بدنه سد است، پس زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل بزرگتر بودن دامنه ارتعاشات و ماهیت پالس گونه خود بخش‌های زیادی از بدنه سد را وارد فاز پلاستیک کرده که در نتیجه مقدار بیشتری از انرژی امواج تنشی را در اثر جریان خمیری اتلاف می کند، بنابراین با دور شدن مصالح بدنه سد از رفتار الاستیک ضریب بزرگ‌نمایی نیز کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر مولفه قائم زلزله ایمپریال برخلاف سایر نتایج است. این مسئله ناشی از نسبت بالای بیشینه شتاب مولفه قائم به بیشینه شتاب مولفه افقی این زلزله است. شکل (۱٦) مقادیر نشت تاج سد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود لحاظ کردن مولفه قائم در زلزله‌های حوزه نزدیک منجر به افزایش حدود ۱۰ تا ٤٥ درصدی نشست تاج سد می‌شود. این در حالی است که اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه دور بر نشست تاج سد به صورت بیشینه افزایش ۲٥ درصدی است. در این مورد نیز اثر مولفه قائم زلزله حوزه نزدیک ایمپریال بیشترین تاثیر را در افزایش نشست تاج سد دارد که ناشی از نسبت بالای بیشینه شتاب مولفه قائم به بیشینه شتاب مولفه افقی این زلزله است.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]



شکل (۱۵) شتاب افقی تاج سد



شکل (۱٦) نشست تاج سد

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی، مدلی دو بعدی از سد سنگریزه‌ای با هسته رسی البرز به روش تفاضل محدود در شرایط تراوش پایا تحلیل شد که نتایج به دست آمده به صورت زیر خلاصه می‌شود:

* افزایش تغییر شکل‌های افقی به سمت پایین دست برای سه چهارم میانی ارتفاع سد و به سمت بالادست برای یک چهارم فوقانی ارتفاع سد در اثر شکل‌گیری توده‌های لغزشی بزرگتر در پوسته بالادست ناشی از مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک.

* افزایش تدریجی نشست محور سد تا حدود ٤٠ درصد در میانه ارتفاع سد در اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک.

* کاهش ضریب بزرگ‌نمایی برای شتاب تاج سد در اثر اعمال مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل اتلاف بیشتر انرژی امواج تنشی ناشی از جریان خمیری مصالح.

* افزایش نشست تاج سد تا حدود ٤٥ درصد برای زلزله‌های حوزه نزدیک و حدود ٢٥ درصد برای زلزله‌های حوزه دور با در نظر گرفتن مولفه قائم نگاشت.

۸- مراجع:

[1] Moustafa, A., Takewaki, I., "Deterministic and Probabilistic Representation of Near-Field Pulse-Like Ground Motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30:412-422.

[2] Alavi, B., Kravinkler, H., "Effects of Near-fault Ground Motions on Frame Structures" , The john A.Blume earthquake engineering center, Department of civil and environmental engineering Stanford University; 2001, Report NO.138: 1-301.

[3] Bray, JD., Rodriguez-Marek, A., "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region " , Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24:815–28.

[4] Ambraseys, N.N., Douglas, J., "Near-field Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23:1-18.

[5] 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, 30:1769–1789.

[6] Zhang, J., Tang, Y., "Dimensional Analysis of Structures with Translating and Rocking Foundations under Near-Fault Ground Motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29: 1330-1346.

[٧] تهرانی زاده، محسن؛ طاهری، حامد؛ " عوامل موثر بر طیف طراحی در حوزه نزدیک گسل و طیف پیشنهادی با استفاده از رکوردهای دارای پالس جهت پذیری " ، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ی ٢-٢٧ شماره١٣٨٨،١، ص ١٠٧- ١١٣.

[8] Ghahari, S.F., Jahankhah, H., Ghannad, M.A., "Study on elastic response of structures to near-fault

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]

ground motions through record decomposition", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30: 536–546.

[9] Beresnev, I, A., Nightengale, A, M., Silva, W , J., " Properties of Vertical Ground Motions" Bulletin of the Seismological of America, 2002, Vol. 92, No. 8, pp.3152-3164.

[10] North America-Japan Workshop on the Geotechnical Aspects of the Kobe, Loma Prieta, and Northridge Earthquakes, 1996, Workshop Report.

[11] Ambraseys, N, N., Douglas, J., "Near-field Horizontal and Vertical Earthquake Ground Motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23:1-18.

[12] 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, 1997, Technical Report NCEER-97-001.

[13] Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams, 2005 FEMA 65, Interagency Committee on Dam Safety for FEMA, Washington, D.C.

[14] Feng, Z., Tsai, P.H., Li, J. N., "Numerical Earthquake Response Analysis of the Liyutan Earth Dam in Taiwan", National Hazards and a Earth System Sciences, 2010, 10, 1269-1280.

[15] Itasca Consulting Group, FLAC., Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.

[16] Zhai, E, Roth, W., Dawson, E., Davis, C., "Seismic Deformation Analysis of an Earth Dam – a Comparison Study Between Equivalent-Linear and Nonlinear Effective Stress Approaches", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, 2004.

[17] Han, Y. and Hart, R., "Application of a Simple Hysteretic Damping Formulation in Dynamic Continuum Simulations", Proceedings of 4th International Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, 2006, Paper No.04-02.

[۱۸] گزارش زمین شناسی سد البرز، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، گزارش شماره ۳۱۱۰-۱۸۷۱۰۶۳،۱۳۷۷.

[19] Charles, J. A., Watts, KS., "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", Geotechnique, 1980, 30(4):353–67.

[20] Charles, J. A., Soares, M. M., "Stability of compacted rockfill slopes", Geotechnique; 1984, 34(1):61–70.

[21] Schnabel, Per B., Lysmer, John, & Seed, H. Bolton. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, California.

[22] http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html.

[23] Mejia, L. H., and E. M. Dawson., "Earthquake Deconvolution for FLAC" in FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (Proceedings of the 4th International FLAC Symposium, Madrid, Spain, May 2006), pp. 211-219. P. Varona & R. Hart, eds. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc

[24] Kim, M., Lee, S., Choo, Y., Kim, D., "Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 31, Issue 11, November 2011, Pages 1579–1593.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-10-12]