

تحلیل دینامیکی خطی معادل سدهای خاکی - مطالعه موردی سد شمیل

عادل عساکره^۱

امید توسلی*^۲

مجتبی رزمجو^۳

چکیده

با توجه به استعداد لرزه‌خیزی بالا در بیش‌تر مناطق کشور ایران، ضرورت مطالعه‌ی رفتار سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله به‌ویژه در مناطق جنوبی به دلیل تعدد این سدها و لرزه‌خیزی رشته‌کوه زاگرس، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی تاثیر زلزله بر سدهای خاکی انجام شده است، اما این‌گونه سازه‌ها در شرایط مختلف هندسی و مشخصات مصالح گوناگون، پاسخ لرزه‌ای و رفتار دینامیکی متفاوتی را در مقابل زلزله از خود نشان می‌دهند. در پژوهش حاضر، سد خاکی شمیل واقع در استان هرمزگان با توجه به اهمیت کاربری آن به کمک روش‌های عددی با استفاده از روش معادل خطی در حالت بحرانی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار دینامیکی و پاسخ لرزه‌ای سد و پی آن تحت زلزله‌های بم، طبس و کوبه از نظر کرنش‌ها، تنش‌ها، توزیع شتاب و تغییر مکان‌ها مطالعه شده است و این نواحی از بدنه که مستعد ترک‌خوردگی هستند، بر مبنای معیارهای مربوطه شناسایی شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که ناحیه‌ی بالای هسته سد دارای پتانسیل ترک‌خوردگی بوده و مقادیر حداکثر تغییر مکان بسیار ناچیز و کمتر از یک درصد ارتفاع سد به‌دست‌آمده است، که بیانگر پایداری سد در زمان وقوع زلزله و پس از آن می‌باشد. مقایسه‌ی نمودارهای جابجایی قائم نگاشت‌های مختلف در تاج و هسته سد نشان می‌دهد که بیشترین ارتعاشات و تاثیر در اثر اعمال زلزله بم به وجود آمده و نشست معادل ۴ سانتیمتر در قسمت تاج سد محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: سد خاکی، تحلیل دینامیکی، پاسخ لرزه‌ای، تراوش پایدار، کرنش برشی، روانگرایی.

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. o.tavasoli@iauet.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقدمه

بررسی رفتار سدهای خاکی احداث شده در مناطق لرزه خیز نشان می‌دهد که برخی از آن‌ها بر اثر زلزله، خسارات یا گسیختگی‌های موضعی بسیاری را متحمل می‌شوند. ارزیابی رفتار دقیق دینامیکی سدهای در حال احداث و تحلیل بازگشتی سدهای موجود به دلیل وجود

رفتار آن تحت بارگذاری دینامیکی، روش‌های تحلیلی خطی متعارف بایستی اصلاح گردیده و رفتار واقعی غیرخطی خاک‌ها را می‌توان با در نظر گرفتن خواص معادل خطی آنها تعیین نمود.

رفتار سدهای خاکی در مراحل حین ساخت، انتهای ساخت و آگیری آنها از اهمیت به سزائی برخوردار بوده و اطمینان از ایمنی در این سه مرحله ضروری است.

ز دو^۲ در سال ۲۰۲۰ به انجام مطالعه بر روی پایداری شیب و تحلیل سد خاکی کوگا با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D مبتنی بر المان محدود پرداخت. بر اساس نتایج این مطالعه، ضریب حاصل از مقادیر ایمنی در پایان ساخت و ساز برای تحلیل پایداری استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۱/۶۲۲۱ و ۱/۳۵۹۲ بود. نتیجه جابجایی نشان می‌دهد که حداکثر جابجایی کل برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی به ترتیب ۱/۰۳۳ درصد و ۱/۶۲۸ درصد ارتفاع سد بوده است.

سانگ و همکاران^۳ در سال ۲۰۲۱ به بررسی تاثیر کاهش سریع آب بر ویژگی‌های پاسخ لرزه‌ای سنگ مخزن شیب‌ها، تحلیل‌های دینامیکی عددی و آزمایش‌های میز لرزه بر روی یک شیب سنگی حاوی ناپیوستگی‌ها با استفاده از تحلیل زمان-فرکانس از منظر ویژگی‌های انتشار طیفی و انرژی انجام دادند.

گوردن و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۲ یک بررسی جامع بر اساس ادبیات برای تحلیل دینامیکی سدهای خاکی انجام دادند. در این زمینه عوامل مهمی مانند تنش صفحه، کرنش صفحه، پایش داده‌ها، استفاده از روش اجزای محدود یا روش تفاضل محدود، تقویت، تحلیل ارتعاش آزاد، ترک‌های لرزه‌ای، روان‌گرایی در سدها، استفاده از

عوامل متعدد تاثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای آنها از جمله خواص مصالح و رفتار خاک در هنگام حرکات شدید زمین، هندسه سد، شکل دره، مشخصات بارگذاری دینامیکی و بحث اندرکنش سد-مخزن-پی، دارای اهمیت فراوان همراه با پیچیدگی‌های خاص می‌باشد (عامل سخی و همکاران^۱، ۲۰۱۰). رفتار خاک طبیعی غیرخطی داشته، که به منظور تخمین منطقی

میز لرزان و تست‌های سانتریفیوژ بر اساس مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک به منظور اعتبارسنجی هر تحلیل عددی لازم است. برای توضیح این پارامترها، مطالعات موردی مورد بحث قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که سازه‌های سد خاکی واکنش یکپارچه‌ای به افزایش شتاب یا جابجایی در تاج داشتند. در نتیجه، برهم کنش سد و مخزن و همچنین پی، عامل بسیار مؤثری برای ایجاد رفتار غیرخطی بود. به نظر می‌رسد تکنیک‌های تقویت‌شده یک رویکرد ضروری برای بهبود پاسخ سازه در هنگام زلزله باشد.

توسلی و همکاران^۵ در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ و همچنین روان‌شناس و توسلی^۶ در سال ۲۰۱۲ با مدل‌سازی نمونه‌ای استوانه‌ای از خاک مورد استفاده در آزمایش سه محوری و بدنه سد سنگریزه‌ای مارون با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D، به بررسی و تعیین تنش‌ها و جابجایی‌های افقی و قائم سد مارون ایجاد شده در مراحل ساخت و آگیری آن در مقایسه با نتایج ابزار دقیق پرداختند. چاراپانگون و همکاران^۷ در سال ۲۰۱۴، به مطالعه بررسی مکانیسم شکست احتمالی و رفتار دینامیکی سد فوجینوما که در سال ۲۰۱۱ پس از زلزله توهوکو دچار گسیختگی شده، با استفاده از معیار شکست موهر-کولمب و روش اجزاء محدود پرداختند. نتایج نشان دادند که با توجه به قسمت فوقانی تضعیف شده سد و مدت زمان طولانی لرزش قوی، جابجایی می‌تواند در هر دو طرف بدنه سد گسترش یابد. تیسومپاناکیس و همکاران^۸ در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبکه عصبی، پاسخ دینامیکی نمونه خاکریزی را با استفاده از روش اجزاء محدود ارزیابی نموده و با در نظر

⁵ Tavasoli et al.

⁶ Ravanshenas and Tavasoli

⁷ Charatpangoon et al.

⁸ Tsompanakis et al.

¹ Amel Sakhi et al.

² Zewdu

³ Song et al.

⁴ Gordan et al.

۸ متر می‌باشد. این سد دارای مخزن مشترک با سد نیان بوده، که فاصله ساختگاه این دو سد از یکدیگر در حدود ۱۰ کیلومتر می‌باشد و حجم آب قابل بهره‌برداری از آن، ۱۶۰ میلیون مترمکعب در سال است. موقعیت جغرافیایی محل سد و نمای کلی بدنه آن در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محل احداث سد شمیل



شکل (۲): نمای کلی بدنه سد خاکی شمیل

هدف از احداث این سد و بهره‌برداری از آن، تامین بخشی از آب آشامیدنی جنوب استان هرمزگان از جمله شهرهای بندرعباس و قشم، تامین حق‌آبه‌های آبیاری دشت‌های پایین‌دست با توجه به توسعه صنعت کشاورزی در این نواحی، کنترل سیلاب‌های فصلی و همچنین تامین جریان پایه رودخانه‌های پایین‌دست منطقه برای حفظ محیط زیست می‌باشد. وجود سیلاب‌های فصلی بسیار زیاد و احتمال پر شدن مخزن و باز شدن دریچه‌های اضطراری این سد در سال‌های اخیر، موجب گردیده که بارها مناطق روستانشین و شهرنشین پایین‌دست این سد نیز به‌منظور

گرفتن رفتار غیرخطی برای مصالح خاکی، به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شتاب بیشینه زلزله و ورود مصالح به بخش غیرخطی، مدول بزرگنمایی کوچک می‌شود. ویلند و مالا^۱ در سال ۲۰۰۲، پایداری لرزه‌ای سد خاکی ماتمارک با ارتفاع ۱۱۷ متر در کشور سوئیس را با مدلسازی دوبعدی سد و شالوده آن با استفاده از روش اجزای محدود، ارزیابی کردند. تحلیل‌ها نشان دادند که سطوح لغزش سطحی می‌توانند در حین زلزله به میزان دو تا سه متر حرکت کرده و حداکثر تغییرمکان برای سطوح لغزش عمیق‌تر، کمتر از ۸۰ سانتیمتر بوده است و نشست‌های لرزه‌ای بر پایه کاهش سختی برشی مصالح در طی زلزله تخمین گردید. آریان و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۵ به بررسی پاسخ لرزه‌ای سدهای خاکی با در نظر گرفتن خصوصیات دینامیکی نواحی غیراشباع و معمولی برای سد خاکی همگن پرداخته و تاثیر نواحی غیراشباع را در پاسخ دینامیکی این سدها مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفته‌اند که در حالت غیراشباع و در بالای سطح آزاد آب، افزایش مدول برشی بر رفتار خاک اثرگذار است. پاسه و علیایی^۳ در سال ۲۰۱۴ رفتار یک سد خاکی را در دو سطح عملکردی موسوم به سطح عملکرد مینا و مطلوب، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی ارزیابی کردند، که در هر سطح عملکرد، سطوح لرزه‌ای معین و سطوح تخریب مجاز متناظر تعریف شده بود. پاپالوف و بیلاک^۴ در سال ۲۰۰۱ مدل دوبعدی سد-دره و محیط در بردارنده آن را برای بررسی رفتار لرزه‌ای الاستیک سدهای خاکی و سنگریزه‌ای شامل اثرات اندرکنش سد-پی در نظر گرفتند.

در این مقاله، به بررسی رفتار دینامیکی سد شمیل در مرحله تراوش پایدار و ارزیابی شرایط پایداری بدنه و پی آن با محاسبه تغییر مکان‌های دائمی در اثر اعمال بار لرزه‌ای از جمله زلزله حداکثر محتمل (MCL) با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته شده است.

معرفی سد شمیل در استان هرمزگان

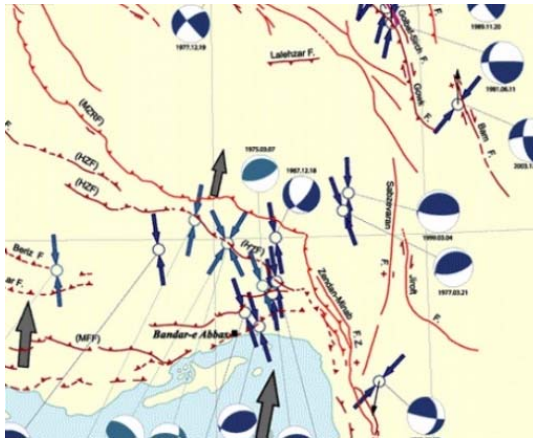
سد خاکی سنگریزه‌ای شمیل با هسته قائم از رس با پلاستیسیته پایین بر روی رودخانه‌ای به همین نام واقع در شمال شرق استان هرمزگان احداث شده و این سد دارای ارتفاع ۳۲/۳ متر، طول تاج سد ۱۲۰۰ متر و عرض

³ Paseh and Oliaei

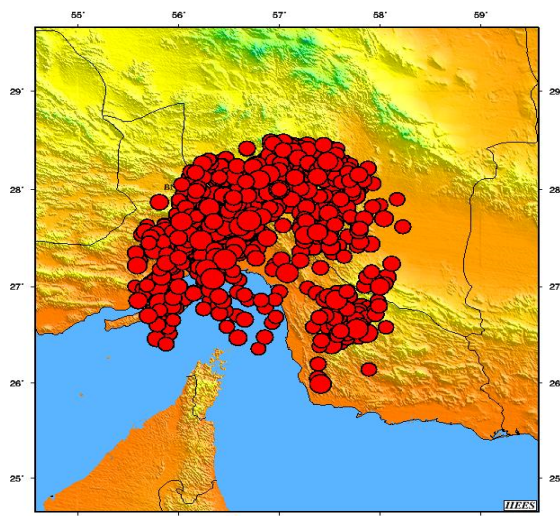
⁴ Papalou and Bielak

¹ Wieland and Malla

² Arian et al.



شکل (۳): گسل های فعال در منطقه مورد مطالعه



شکل (۴): توزیع فراوانی و موقعیت رخداد های زلزله در منطقه مورد مطالعه

در شکل (۵)، اجزای تشکیل دهنده سد و در جدول (۱)، مشخصات هندسی سد مطابق با گزارش فنی و طراحی سد شمیل در سال ۲۰۱۰ آورده شده است. عرض و عمق پی به ترتیب برابر ۲۵۵ متر و ۱۲ متر بوده و عرض مقطع سد بر روی پی معادل ۲۰۴ متر می باشد. فاصله عمق آزاد تا تاج سد نیز ۶ متر در نظر گرفته شده است.

تحلیل پایداری و رفتار استاتیکی سد شمیل

در این قسمت، به بررسی رفتار استاتیکی و تحلیل پایداری سد مورد مطالعه با استفاده از روش اجزاء محدود و در نظر

۲۰۴	عرض سد بر روی پی
۲۶	تراز آب

گرفتن شرایط اولیه مناسب پرداخته شده است. سد خاکی شمیل در دره U شکل وسیعی احداث شده و دارای طول

جلوگیری از حوادث و خطرات احتمالی تخلیه گردند. بلندی های اطراف این سد را بر اساس زمین شناسی و مطالعات منطقه ای انجام شده، کوه های شمیل، نیان و پشتکوه تشکیل داده است. رخنمون های گوناگون سنگ های رسوبی و آذرین، سنگ های آواری سازند آغا جاری و کنگلومرای بختیاری در انتهای رشته کوه های زاگرس در این ناحیه به چشم خورده، که منجر به پایین بودن نفوذ پذیری و تراوایی و بالا بودن فرسایش پذیری و همچنین لرزه خیزی بسیار زیاد منطقه گردیده است. بررسی مغزه های حفاری، مقایسه دانه بندی و نوع و درجه سیمان شدگی آنها، نشان می دهند که بیشینه ستبرای نهشته های آبرفتی حدود سه متر است. این سد در میان سه ناحیه با ساختار رسوبی متفاوت شامل آبشست های دامنه ای، آبرفت رودخانه ای و بادگانه آبرفتی قرار گرفته، که به وسیله گسل های زندان، میناب، نیان و کشکوه و سایر گسل های فعال منطقه، مطابق شکل (۳)، از یکدیگر جدا شده اند. توزیع فراوانی و موقعیت رخداد های زلزله با بزرگای بیش از ۴ در مقیاس ریشتر در شعاع ۱۵۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، تعداد زلزله های روی داده در مجاورت سد بسیار زیاد بوده و بررسی پایداری دینامیکی در حین ساخت و بهره برداری ضرورت قابل توجهی دارد. لذا با توجه به موارد اشاره شده، اهمیت وجود پایداری استاتیکی و دینامیکی جهت بهره برداری مستمر از این سد را بیش از پیش در برابر مخاطرات طبیعی از جمله زلزله و سیل مشخص می نماید.

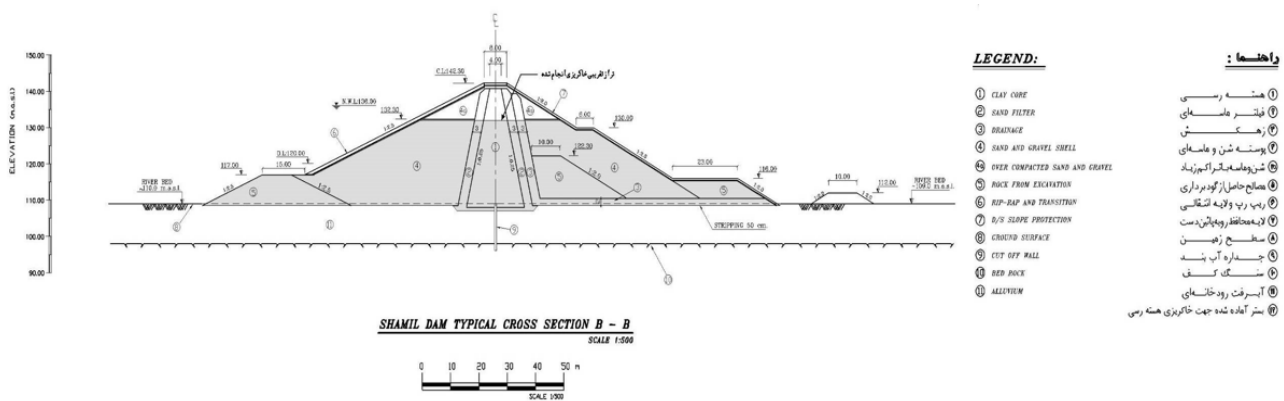
جدول (۱): مشخصات هندسی سد شمیل

مشخصه	واحد (متر)
ارتفاع سد از روی بستر	۳۳
عمق پی	۱۲
عرض تاج	۸

بزرگتری نسبت به ابعاد مقطع بدنه خود می باشد. در این حالت، شرایط کرنش صفحه‌ای حاکم بوده و مدل سازی به صورت دوبعدی با دقت کافی همراه می باشد یا به عبارتی در المان سه بعدی به دلیل بزرگتر بودن طول آن نسبت به دو بعد دیگر، بارگذاری در راستای بزرگترین بعد اعمال شده و در این حالت کرنش در راستای بزرگترین بعد، صفر می باشد. در ابتدا، هندسه سد با استفاده از نرم افزار GeoStudio مدل سازی شده و سپس با تعریف مصالح و اعمال شرایط مرزی، تحلیل پایداری استاتیکی و تراوش پس از بهره برداری از آن صورت گرفته است. لذا فرض می شود که مراحل ساخت و آبیگری سد به پایان رسیده و تراز آب دارای وضعیت پایدار بوده و افت ناگهانی روی نخواهد داد. همچنین به منظور مدل سازی مناسب تر و کسب نتایج دقیق تر، ساخت سد و پی آن در ۱۲ مرحله تعریف شده است. لازم به ذکر است که در تحلیل های انجام شده، فرضیاتی از قبیل آبیگری مرحله ای و استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب برای مصالح سد در نظر گرفته شده است. برای مش بندی از المان های مربعی چهار گرهی و المان های مثلثی سه گرهی استفاده شده است. المان ها باید به اندازه های ریز باشد که تمام محتویات فرکانسی زلزله از محیط خاک عبور کرده و نتایج عددی با دقت مناسبی بدست آید. به همین جهت از رابطه لایسمر و کولمیر^۱ ارائه شده در سال های ۱۹۶۹ و ۱۹۷۳ استفاده گردیده است. براساس این رابطه بزرگترین بعد

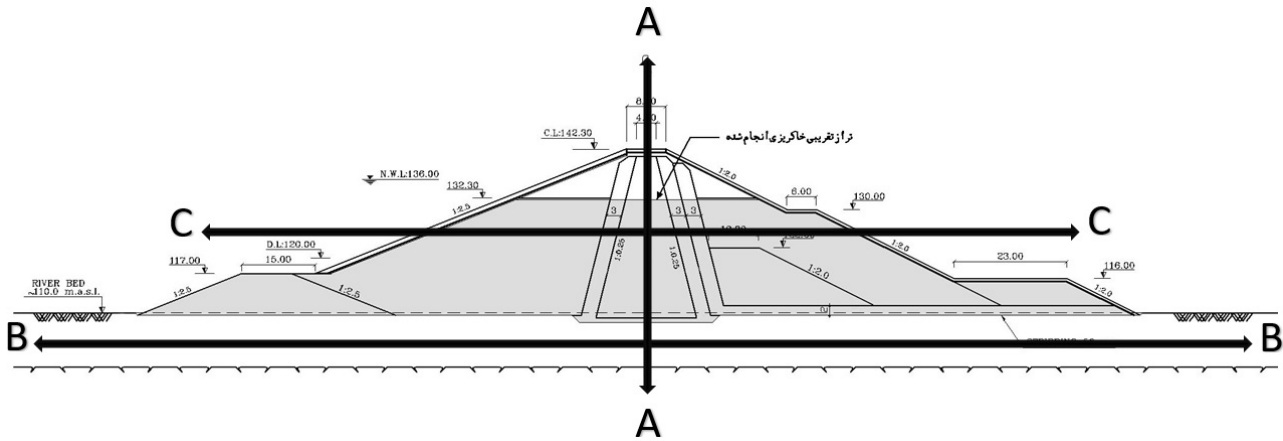
هر المان باید حداکثر به اندازه ای باشد، که بزرگترین فرکانس زلزله (کوچکترین طول موج) از آن عبور نماید. کلیه نتایج بر روی مقاطع A-A، B-B و C-C مطابق شکل (۶) مورد بررسی قرار گرفته، به طوری که مقطع A-A از روی خط تقارن مقطع و داخل دیوار آب بند عبور می نماید، در حالی که مقطع B-B از وسط عمق پی آبرفتی عبور نموده و مقطع C-C نیز در تراز ۱۰ متری بالای پی و به صورت عرضی رسم می شود. مشخصات مکانیکی و مقاومتی مصالح بدنه و پی سد مورد مطالعه جهت تحلیل استاتیکی نیز در جدول (۲) مشاهده می شود.

پس از انجام تحلیل های استاتیکی در پایان مراحل ساخت و آبیگری سد، همانطور که در شکل (۷) مشاهده می گردد، بیشینه نشست سد با توجه به قائم بودن هسته آن، در قسمت مرکزی هسته و به مقدار ۳۸ سانتیمتر به وقوع می پیوندد، که این مقدار در مقایسه با نتایج ابزار دقیق نصب شده در بدنه سد و همچنین مقادیر استاندارد نشست های متعارف دیگر سدهای دنیا که میان ۰/۵ تا ۲ درصد ارتفاع سد است، در مقایسه با گزارش تفسیر داده های ابزار دقیق سد شمیل در سال ۲۰۱۲ و نتایج پژوهش اسدیان و همکاران در سال ۲۰۱۶، در محدوده قابل قبولی قرار دارد.



شکل (۵): اجزای تشکیل دهنده سد شمیل

¹ Lysmer and Kuhlemeyer



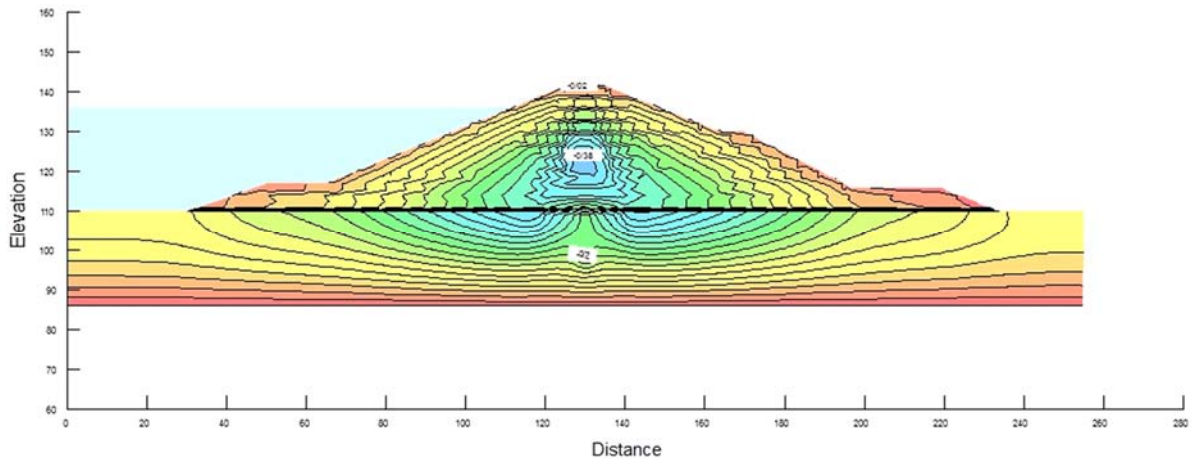
شکل (۶): مقاطع مورد بررسی در مطالعه سد شمیل

جدول (۲): مشخصات مصالح سد شمیل

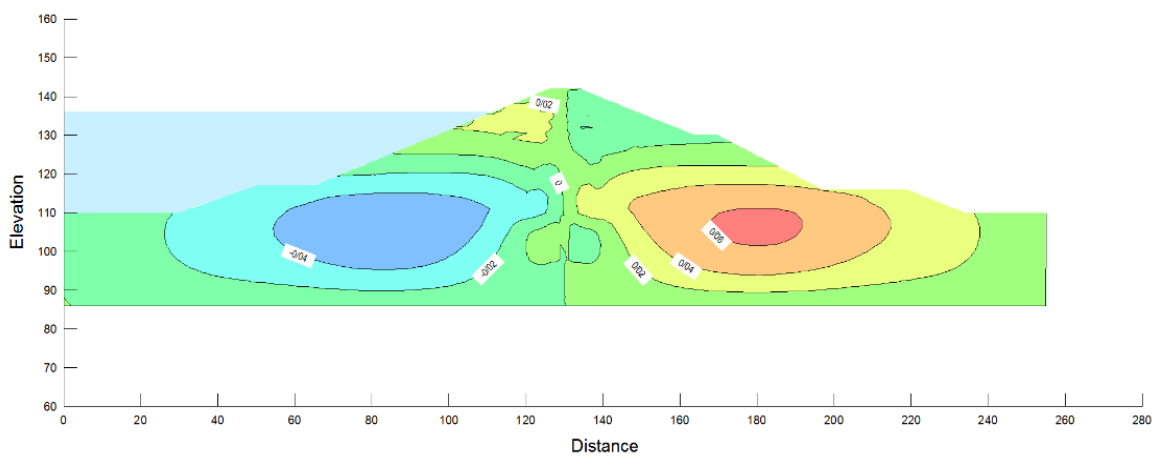
مصالح	وزن مخصوص اشباع (kN/m ³)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی (kN/m ²)	الاستیسیته (kN/m ²)
هسته رسی	۱۸/۹	۰/۳۴	۳۳	۵۰	۱۰۰۰۰
پوسته	۲۰/۸۲	۰/۳۳۴	۴۲	۱۰	۷۰۰۰۰
پی آبرفتی	۱۹/۵۸	۰/۳	۴۲	۱۰	۴۰۰۰۰
دیوار آب بند	۲۴	۰/۳۵	۳۵	۴۰۰	۲۰۰۰۰۰
سنگ کنگلومرا	۲۴	۰/۳۳۴	۳۰	۷۰	۴۰۰۰۰
فیلتر و زهکش	۲۱	۰/۳۶	۴۲	۱۰	۷۰۰۰۰

ارزیابی پاسخ لرزه‌ای و رفتار دینامیکی سد شمیل پس از تحلیل سد در حالت استاتیکی و بررسی شرایط تراوش پایدار و تحلیل حالت پیش‌تحکیمی، در این قسمت به ارزیابی رفتار دینامیکی سد شمیل و مقایسه پاسخ لرزه‌ای سد مورد مطالعه در اثر اعمال رکورد زلزله‌های مختلف پرداخته شده است. بدین منظور از دو پارامتر مدول برشی و نسبت میرایی برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک استفاده شده است. در روش خطی، این مقادیر برای هر لایه خاک ثابت است، در حالی که در روش غیرخطی، این مقادیر متناسب با تراز کرنش در هر لایه خاک تعیین می‌گردند.

علت این مسئله ناشی از وزن خاکریز بدنه سد می‌باشد، به طوری که با نزدیک شدن به پاشنه و پنجه سد و انتهای پی آبرفتی، از ارتفاع بدنه سد و وزن توده خاک کاسته شده و در نتیجه میزان تغییرات نشست در راستای قائم کاهش می‌یابد. در شکل (۸) تغییر مکان افقی پی و بدنه سد در انتهای مراحل ساخت و آبدگیری آن نشان داده شده است. از تغییر مکان‌های به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل اعمال فشار آب در جهت افقی و به سمت پایین دست، تغییر مکان افقی در قسمت بالادست کمتر از پایین دست بوده و بیشترین جابجایی در قسمت پایین دست پوسته نیز به مقدار ۶ سانتیمتر محاسبه گردید.



شکل (۷): تغییر مکان قائم بدنه و پی سد مورد مطالعه در پایان مرحله ساخت



شکل (۸): تغییر مکان افقی بدنه و پی سد مورد مطالعه در پایان مرحله ساخت

برشی و میرایی منتخب برای هر یک از مصالح بدنه سد را با تقریب مناسبی معادل متوسط مدول برشی و میرایی مصالح در طول زلزله در نظر گرفت. وقتی که خاک در معرض تنش‌های دینامیکی قرار می‌گیرد، در پاسخ به کرنش برشی دوره‌ای، دچار نرمی شده، که این پدیده با ارائه نسبت مدول برشی به مدول برشی بیشینه تعریف می‌شود. مدول برشی جدید در طول بارگذاری لرزه‌ای با استفاده از کرنش به دست آمده و مدول برشی بیشینه تعریف گردیده، که در هر تکرار محاسبه می‌شود. روابط تجربی بر اساس آزمایشات، جهت تعیین مدول برشی بیشینه (G_{max}) انواع خاک‌ها در کرنش‌های خیلی کوچک آزمایشگاهی شامل آزمایش ستون تشدید و آزمایش سه محوری سیکلی، توسط محققین مختلف ارائه شده است. مدول برشی بیشینه در هر المان با استفاده از تنش میانگین حاصل از تحلیل استاتیکی و با توجه به رابطه (۱)

جهت اطمینان از صحت استفاده و درستی تناسب این ویژگی‌ها با تراز کرنش محاسبه شده در همه لایه‌ها برای تمامی تحلیل‌ها، لازم است یک روند تکرار شونده صورت پذیرد. در تحلیل اجزاء محدود معادل خطی، ابتدا سازه خاکی توسط روش اجزاء محدود تحلیل گردیده و سپس در انتها، با استفاده از جمع آثار قوا نتایج هر مرحله با یکدیگر جمع شده تا پاسخ کلی به دست آید. رفتار تنش-کرنش برشی مصالح ژئوتکنیک یک رفتار غیرخطی و به شکل منحنی پایه است. بنابراین با توجه به این رفتار غیرخطی، مقدار مدول برشی و میرایی در طول یک زلزله ثابت نبوده و بسته به مقدار کرنش‌های برشی ایجاد شده در خاک تغییر می‌کنند. بدین ترتیب، به منظور افزایش دقت تحلیل دینامیکی خطی، لازم است اثر کلیه پارامترهای مؤثر بر مدول برشی و میرایی، از جمله تاریخچه کرنش برشی در تخمین این پارامترها لحاظ گردند، به نحوی که بتوان مقادیر مدول

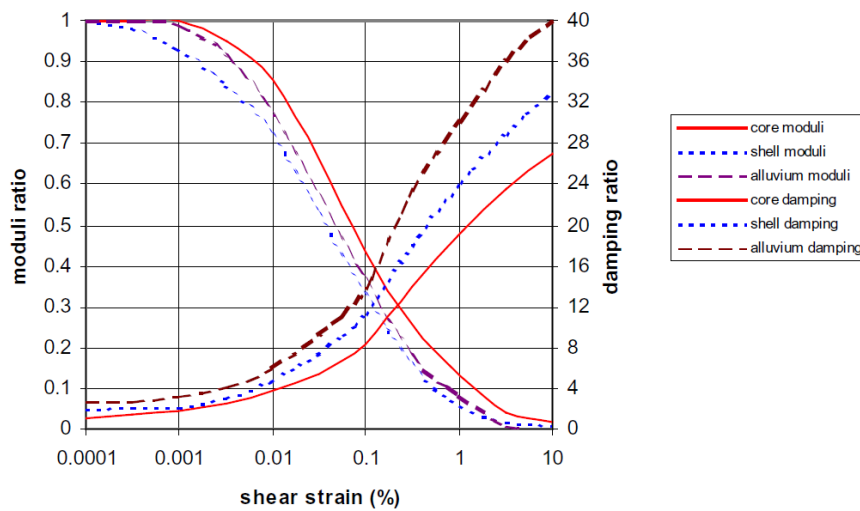
مدول برشی دینامیکی در هر مرحله از تحلیل با توجه به سطح کرنش برشی دینامیکی و روابط کاهندگی مدول برشی تعیین شده است. شکل (۹) نمودار روابط کاهندگی مدول برشی و میرایی با کرنش به صورت نسبت γ و G/G_{max} در مقابل کرنش برشی مؤثر را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها در مصالح هسته با استفاده از نمودارهای ارائه شده توسط ووستیک و دوبری^{۱۷} در سال ۱۹۹۱ و در مصالح پوسته و پی آبرفتی از نمودارهای ارائه شده توسط ایشیهارا^{۱۸} در سال ۱۹۹۶ انتخاب شده‌اند.

برای مصالح هسته و رابطه (۲) برای مصالح پوسته و پی آبرفتی محاسبه گردیده است (ووستیک و دوبری، ۱۹۹۱).

$$G_{max} = 327 \left[\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \right] (\sigma'_0)^{0.5} \quad (1)$$

$$G_{max} = 22.1 K_{2max} (\sigma'_0)^{0.5} \quad (2)$$

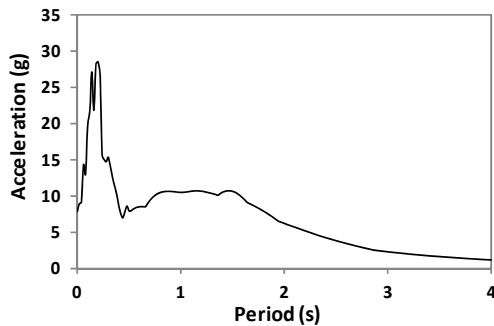
در روابط فوق، e نسبت منافذ مصالح و σ'_0 تنش مؤثر میانگین قبل از وقوع زلزله می‌باشد. همچنین مقدار K_{2max} برای مصالح پوسته برابر با ۱۵۰ و برای پی آبرفتی برابر با ۱۳۰ در نظر گرفته شده است.



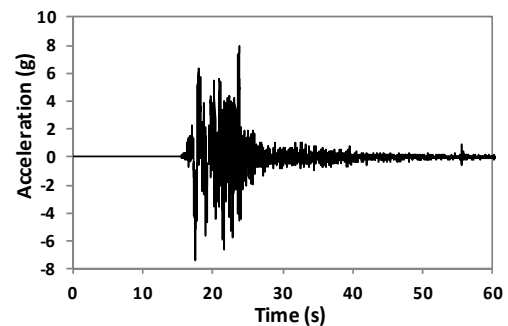
شکل (۹): منحنی‌های مدول برشی و میرایی

در شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) نشان داده شده است. در تحلیل‌های دینامیکی حاضر با به کارگیری روش الاستیک خطی معادل، تنها از مولفه شتاب افقی و با صرف نظر کردن از مولفه شتاب قائم، استفاده شده است. جدول (۳) شتاب بیشینه زلزله‌ها را نشان می‌دهد.

از شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های کوبه، بم و طیس به عنوان داده ورودی برای ساختگاه سد شمیل استفاده شده، که با مقادیر شتاب بیشینه $0.35g$ و $0.6g$ تحلیل‌های دینامیکی مورد نظر انجام گردیده است. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی و طیف‌های زلزله

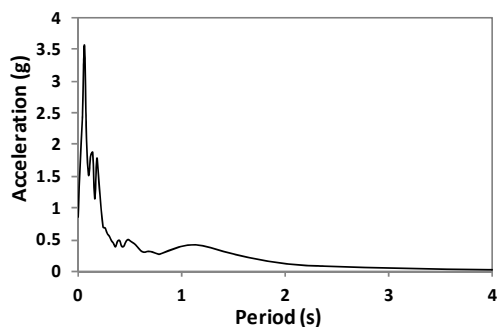


(ب)

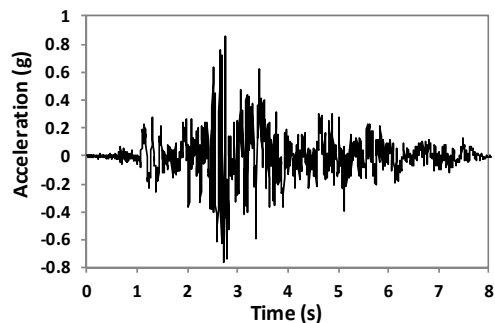


(الف)

شکل (۱۰): (الف) تاریخچه زمانی شتاب افقی (ب) طیف شتاب زلزله بم

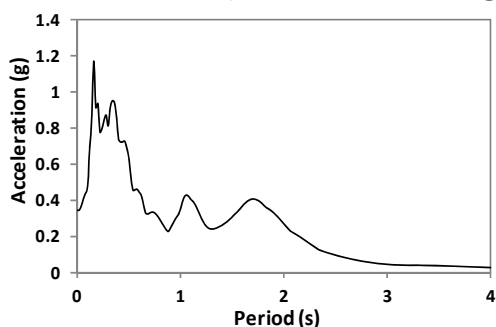


(ب)

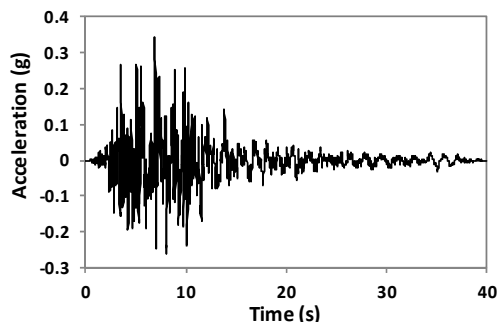


(الف)

شکل (۱۱): (الف) تاریخچه زمانی شتاب افقی (ب) طیف شتاب زلزله طبس



(ب)



(الف)

شکل (۱۲): (الف) تاریخچه زمانی شتاب افقی (ب) طیف شتاب زلزله کوبه

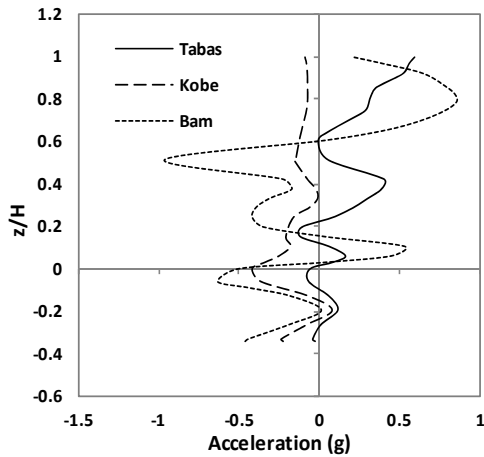
هسته، بیشترین تاثیر را اعمال می‌کند. این در حالی است که در اثر زلزله کوبه، شتاب کمتری نیز نسبت به زلزله‌های دیگر در تاج سد ایجاد گردیده، ولی با افزایش عمق بر میزان شتاب آن افزوده می‌شود. در شتاب $0.85g$ ، زلزله بم بیشترین شتاب را به یک سوم میانی بدنه سد مورد مطالعه وارد کرده و همچنین این زلزله، باعث بروز بیشترین ارتعاشات و بیشینه شتاب به بدنه سد در مقایسه با سایر زلزله‌ها شده است. زلزله طبس بیشینه شتاب خود را به مقدار $0.2g$ در تاج سد وارد نموده و با توجه به منحنی شتاب زلزله طبس، با افزایش عمق مقدار شتاب نیز به صفر نزدیک‌تر شده و در واقع هر چه به سمت پی پیش رفته است، از میزان شتاب به صورت تدریجی کاسته شده است.

جدول (۲): ماکزیمم شتاب زلزله‌ها در تحلیل دینامیکی سد

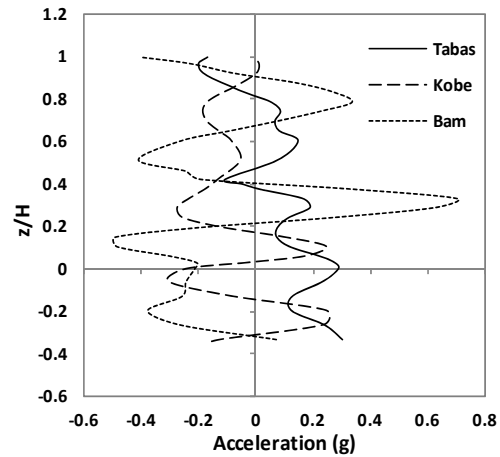
شمیل

شتاب ماکزیمم (m/s^2)	زلزله
۸/۳۵	طبس
۳/۳۷	کوبه
۶۲/۴	بم

بر اساس راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای - نشریه شماره ۶۲۴، از میانگین نتایج پاسخ سد به سه زمین لرزه اعمالی، پاسخ لرزه‌ای نهایی به دست می‌آید. در این بخش از سه شتابنگاشت مختلف و هر کدام با دو شتاب متفاوت استفاده شده است. شکل (۱۳) تغییرات شتاب افقی زلزله در مقطع A-A در بدنه سد را نشان می‌دهد. کمترین اثر زلزله بر روی سد مربوط به زلزله کوبه بوده که با شتاب $0.4g$ در یک سوم پایینی



(ب)



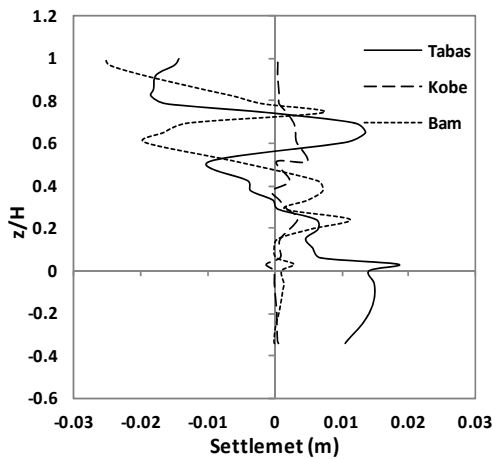
(الف)

شکل (۱۳): تغییرات شتاب افقی زلزله در مقطع A-A سد با شتاب (الف) ۰/۳۵g (ب) ۰/۶g

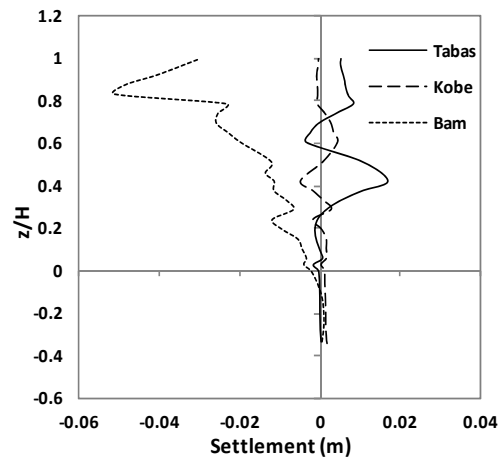
میزان جابجایی قائم سد، در تاج آن روی داده و به دلیل کاهش مقاومت برشی در این قسمت از بدنه سد، مقدار تغییر مکان عمودی روند افزایشی داشته و جابجایی بیشتری در این ناحیه اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین تاثیر را زلزله بم در تغییر مکان قائم داشته و مقدار نشست در قسمت تاج سد بر اساس منحنی جابجایی زلزله بم در حدود ۴ سانتیمتر محاسبه شده است.

با بررسی نتایج به دست آمده، می توان استنباط کرد که شتاب افقی وارده به سد به صورت نامنظم در آن توزیع می شود. اختلاف مشاهده شده می تواند ناشی از جنس خاکریز، وجود آب مخزن و تراوش از داخل بدنه سد و پارامتر زلزله های اعمالی باشد. با این حال در مجموع، بیشینه شتابها در یک سوم بالایی سد متمرکز شده است.

شکل (۱۴) تغییر مکان قائم سد در مقطع A-A را تحت شتاب ۰/۳۵g و ۰/۶g نشان می دهد. با مقایسه نمودارها و پاسخ های به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که بیشینه



(ب)



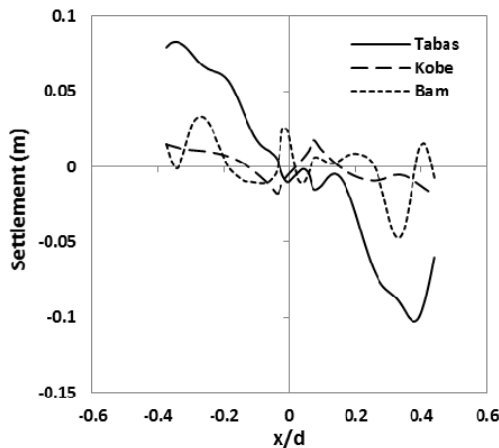
(الف)

شکل (۱۴): جابجایی قائم سد در مقطع A-A با شتاب (الف) ۰/۳۵g (ب) ۰/۶g

۰/۵ سانتیمتری در راستای قائم در تاج سد شده است. نکته قابل ذکر دیگر این است که منحنی جابجایی در اثر اعمال زلزله کوبه، کمترین تاثیر را نسبت به سایر زلزله ها از خود نشان داده و بیشینه جابجایی به دست آمده در

با توجه به منحنی جابجایی قائم سد بر اثر اعمال زلزله طبرس مطابق شکل (۱۴)-الف، بیشینه جابجایی صورت گرفته در یک سوم میانی سد و به میزان ۲ سانتیمتر محاسبه شده و همچنین این زلزله، باعث بروز جابجایی

عمق، کاهش جابجایی را نشان می‌دهد. پس از گذر از بدنه سد و با وارد شدن به پی تا حدود ۱/۵ سانتیمتر جابجایی قائم به سمت بالا مشاهده می‌شود. دلیل این امر می‌تواند تاثیر توأم نیروی زلزله و فشار آب منفذی در پی آبرفتی باشد. منحنی جابجایی زلزله کوبه نیز جابجایی اندکی را در یک سوم میانی سد اعمال کرده و تاثیر محسوسی در تاج و پی سد ایجاد نمی‌کند. با مشاهده میزان جابجایی قائم سد در مقطع C-C مطابق شکل (۱۵)، چنین استنباط می‌شود که هر یک از زلزله‌های وارده رفتار متفاوتی را از خود در برابر جابجایی قائم در این مقطع از خود نشان می‌دهند. بالازدگی حاصل از این زلزله‌ها، می‌تواند به دلیل کاهش تنش برشی و مقاومت برشی خاک در پوسته بالادست در اثر لغزندگی و غیرچسبیده بودن ناشی از افزایش فشار آب منفذی باشد. در حالی که نشست حاصل از آن ناشی از اعمال توأم نیروی زلزله و وزن توده خاک در محیط اشباع بوده و بیشترین جابجایی‌ها در تاج و یک سوم بالایی سد صورت پذیرفته است.

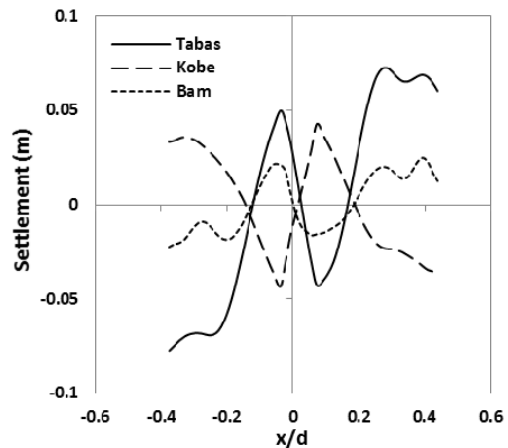


(ب)

شکل (۱۵): جابجایی قائم سد در مقطع C-C با شتاب (الف) ۰/۳۵g (ب) ۰/۱۶g

کم شدن درجه اشباع خاک‌ها تا ابتدای هسته کاهش یافته و پس از ورود به هسته، جابجایی دوباره به سمت بالا اتفاق می‌افتد. وقوع این پدیده می‌تواند در نتیجه کاهش تنش‌های موثر و مقاومت برشی هسته رسی باشد. به طوری که مقادیر جابجایی پس از عبور از هسته و با ورود به پوسته به دلیل کمتر شدن خاک‌های اشباع و افزایش مقاومت برشی در برابر ارتعاشات زلزله‌ها دوباره کاهش

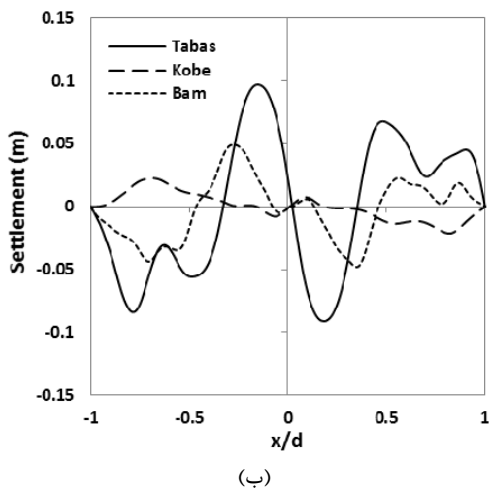
راستای قائم در حدود ۲/۵ سانتیمتر در مرکز هسته است. همچنین با افزایش عمق و پیش‌روی به سمت پی آبرفتی، مقاومت برشی در بدنه سد افزایش یافته و در نتیجه از میزان جابجایی‌ها کاسته شده است. همچنین بزرگنمایی شتاب در بدنه سد با توجه به اثرات توپوگرافی نظیر افزایش ارتفاع خاکریز و تغییر خصوصیات دینامیکی مصالح تشکیل‌دهنده آن، اتفاق افتاده و تغییر مکان‌های کمتر نیز در محل اتصال بدنه به پی مشاهده شده است. همانطور که در شکل (۱۴) -ب مشاهده می‌شود، بیشترین جابجایی محاسبه شده در مقطع A-A در قسمت تاج سد و به میزان ۳ سانتی‌متر در اثر اعمال زلزله بم رخ می‌دهد. این مسئله می‌تواند ناشی از بزرگنمایی رکورد شتاب مبنای اعمالی و متمرکز بودن بیشینه ارتعاشات زلزله بم در تاج سد و همچنین کاهش مقاومت برشی خاک در این منطقه باشد. با توجه به رفتار سد در اثر اعمال این زلزله، هر چه منحنی این زلزله به سمت پی آبرفتی پیش می‌رود، با کاهش شتاب زلزله و افزایش مقاومت برشی از میزان جابجایی‌ها نیز کاسته می‌شود. همچنین زلزله طبس بیشترین جابجایی را در یک سوم بالایی و نزدیک به تاج سد ایجاد نموده است. این منحنی در ادامه و با افزایش



(الف)

با توجه به شکل (۱۶) که نمودار میزان جابجایی قائم سد در مقطع B-B را نشان می‌دهد، می‌توان بیان نمود که مقدار جابجایی در قسمت بالادست پوسته به دلیل اعمال نیروی زلزله بر خاک‌های اشباع که تحت فشار آب منفذی قرار گرفته‌اند بیشتر از سایر نقاط است. همچنین با توجه به اعمال هم‌زمان نیروی زلزله و فشار آب، پدیده بالازدگی در پوسته بالادست روی داده، به طوری که این جابجایی با

مکان افقی سد، با افزایش عمق به میزان کمی کاسته شده است. از دلایل اصلی این موضوع می‌توان به افزایش فشار آب منفذی با افزایش عمق و کاهش مقاومت برشی اشاره کرد. زلزله بم نیز بیشینه تغییرات افقی در محور A-A را در قسمت تاج سد ایجاد کرده و دلیل این مسئله را می‌توان در متمرکز بودن بیشینه شتاب زلزله بم در تاج و مقاومت برشی کم مصالح در این قسمت از سد دانست. همچنین منحنی تغییرات افقی زلزله کوبه، افزایش جابجایی را با افزایش عمق نشان می‌دهد، که علت آن متمرکز بودن بیشینه شتاب زلزله کوبه در این منطقه و افزایش فشار آب منفذی در این قسمت می‌باشد.

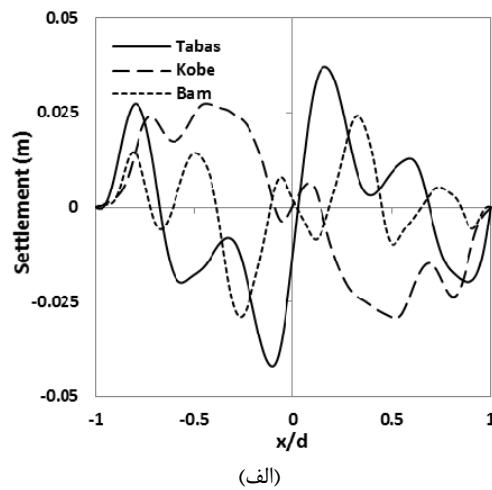


شکل (۱۶): جابجایی قائم سد در مقطع B-B با شتاب (الف) $0.35g$ (ب) $0.6g$

شده و خاک حالت مایع و روان به خود گرفته است. لذا، بیشترین احتمال وقوع پدیده روانگرایی در قسمت بالادست پوسته سد و در محلی است که بیشترین فشار آب منفذی را خواهد داشت. همچنین با کاهش فشار آب منفذی در اثر رسیدن به هسته رسی که دارای چسبندگی بیشتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به پوسته بالادست می‌باشد، از میزان احتمال روانگرایی سد کاسته شده و در ادامه به صفر می‌رسد.

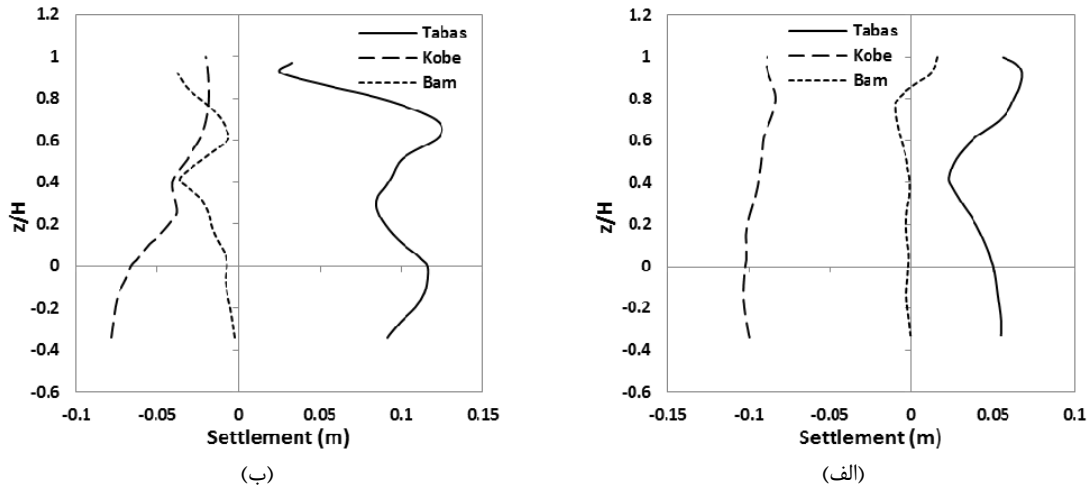
یافته است. مقایسه نمودارهای جابجایی قائم نداشت‌های مختلف، تفاوت در محل و میزان جابجایی مصالح سد را نشان می‌دهد. این تفاوت به شدت و مدت ارتعاش زمین‌لرزه‌ها بستگی داشته، ولی عمده جابجایی صورت گرفته که به شکل ترک‌هایی مویی در سد نمایان می‌شود، در قسمت تاج آن می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۷) دیده می‌شود، مقدار جابجایی در قسمت بالادست پوسته به دلیل اعمال نیروی زلزله بر خاک‌های اشباع که تحت فشار آب منفذی قرار گرفته‌اند، بیشتر است. زلزله طیس بیشترین جابجایی افقی در محور A-A را در قسمت یک سوم بالایی سد به میزان 14 سانتیمتر به وجود آورده و از نرخ تغییرات پاسخ تغییر

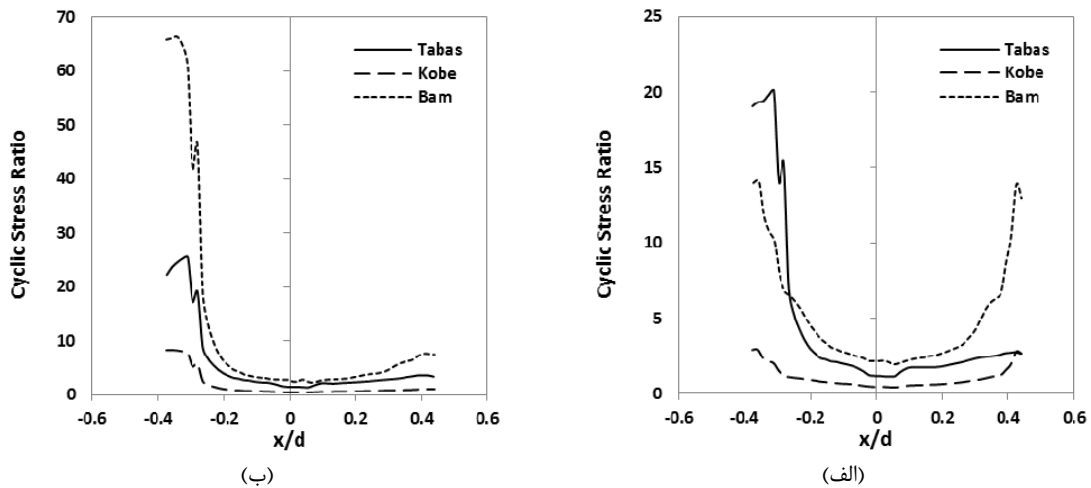


یکی دیگر از نکات حائز اهمیت این است که روانگرایی معمولاً در خاک‌های ماسه‌ای سست و اشباع رخ داده و در اثر بالارفتن فشار آب منفذی در پوسته سد، ارتعاشات زلزله باعث تغییر شکل‌های اضافی خاک‌های اشباع فاقد چسبندگی می‌شود. این موضوع، روان شدن خاک‌های ماسه‌ای فاقد چسبندگی و رس‌های غیرچسبنده را در اثر افزایش فشار آب منفذی در پی خواهد داشت.

با توجه به شکل (۱۸) می‌توان بیان نمود که ارتعاشات ناشی از زمین‌لرزه، موجب از بین رفتن چسبندگی و انسجام میان ذرات تشکیل دهنده خاک گردیده و باعث کاهش و حتی از بین رفتن کامل مقاومت برشی خاک‌ها



شکل (۱۷): جابجایی افقی سد در مقطع A-A با شتاب (الف) $0.35g$ (ب) $0.6g$



شکل (۱۸): تغییرات نسبت تنش سیکلی در مقطع C-C با شتاب (الف) $0.35g$ (ب) $0.6g$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار دینامیکی سد خاکی شمیل با هسته رسی قائم واقع در استان هرمزگان در پایان مراحل ساخت و آگیری در هنگام وقوع تراوش پایدار به روش تحلیل معادل خطی دوبعدی بررسی گردیده و پاسخ لرزه‌ای بدنه آن در اثر اعمال سه رکورد زلزله متفاوت، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. پس از استخراج نتایج و مقایسه نمودارهای به دست آمده، می‌توان بیان نمود که:

۱- شتاب افقی وارده به سد به صورت نامنظم در آن توزیع شده و بیشینه پاسخ شتاب در یک سوم بالایی بدنه سد متمرکز شده است.

۲- مقایسه نمودارهای جابجایی قائم نگاشت‌های مختلف در تاج و هسته سد نشان می‌دهد که بیشترین ارتعاشات و تاثیر در اثر اعمال زلزله بيم بوجود آمده و نشست معادل ۴ سانتیمتر در قسمت تاج سد محاسبه شده است.

۳- بررسی تغییرات تنش در راستای قائم هسته رسی سد نشان می‌دهد که با اعمال زمین لرزه، مقادیر تنش‌های وارد بر سد خاکی تغییر یافته و این موضوع، نشان دهنده تاثیر خواص مقاومتی سد خاکی بر روی تنش‌های قائم وارد بر هسته سد خاکی می‌باشد.

۴- با افزایش تنش برشی، کرنش‌های برشی متناظر نیز در بدنه سد افزایش یافته و این روند، با کاهش خاک‌های اشباع و در نتیجه کاهش تمایل به لغزنگی آنها، سیر نزولی

Embankment During an Earthquake. *Geotech Geol Eng* 40, 3–33 (2022).

[5] Tavasoli, O., Ravanshenas, P. and Rahmani, I., "Three-dimensional numerical analysis of the triaxial test to determine soil resistance parameters (Case study: Maroon Dam materials)". 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran (2011) (In Persian).

[6] Tavasoli, O., Ravanshenas, P. and Rahimi, H., "Three-dimensional numerical analysis of water intake stages of gravel earthdam (case study: Maroon Dam)". 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan, Iran (2012) (In Persian).

[7] Tavasoli, O. and Ravanshenas, P., "Three-dimensional Investigation on the behavior dam of Maroon Dam". 1st International and 3rd National Conference on Dams and hydropower, Tehran, Iran (2012) (In Persian).

[8] Charatpangoon, B., Kiyono, J, Furukawa, A. and Hansapinyo, C., "Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 64, pp. 50-62, (2014).

[9] Tsompanakis Y., D.Lagaros N., N.Psarropoulos P. and C.Georgopoulos E., "Simulating the seismic response of embankments via artificial neural networks". *Soil dynamics and earthquake Engineering*, Vol. 29, pp. 782-798, (2009).

[10] Wieland, M. and Malla, S., "Seismic evaluation of a 117 m high embankment dam resting on a thick soil layer". *Proceeding of 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, UK, (2002).

[11] Arian, M., Momeni, M. J. and Habib Agahi, Gh., "Seismic response of earth dams considering the effect of dynamic properties of unsaturated zones". 2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Qom, Iran (2015) (In Persian).

[12] Paseh, H. R., and Oliaei, M., "Based Performance Evaluation of Earth Dams under Seismic Loading". *Moades Civil Engineering journal*, Vol 14, Issue 2 (2014) (In Persian).

[13] Papalou, A. and Bielak, J. "Seismic elastic response of earth dams with canyon interaction", *Journal of Geo. Geoenviron. Eng., ASCE*, Vol. 127(5), pp. 446-453, (2001).

[14] Regional water company of Hormozgan, "Technical and design report of Shamil Dam". Hormozgan, Iran (2010) (In Persian).

[15] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 95, pp.859-878, (1969).

[16] Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems",

به خود می‌گیرد. مقدار این پارامتر در هسته سد با توجه به تغییر در خواص مصالح، بیشتر شده و پس از خارج شدن از پوسته و با کم شدن خاک اشباع، سیر نزولی دارد. بررسی نتایج کرنش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین کرنش‌ها در مرکز هسته اتفاق افتاده و این مساله می‌تواند ناشی از خواص مکانیکی خاک باشد.

۵- با بررسی رفتار جابجایی سد خاکی پس از اعمال زمین‌لرزه، تمایل تغییر شکل سد به سمت پایین‌دست به دلیل مدت و میزان شتاب نیروی دینامیکی وارده همزمان و در راستای نیروی وارده آب و تاثیر آن بر فشار وارده به بدنه سد، بیشتر و محتمل‌تر می‌باشد.

۶- بررسی پدیده روانگرایی در بدنه سد نشان داد که خاک‌های سست بر اثر تنش‌ها و کرنش‌های برشی ناشی از زلزله تمایل به کاهش حجم بیشتری دارند. لذا بیشترین احتمال پدیده روانگرایی در قسمت بالادست پوسته سد و در محلی است که بیشترین فشار آب منفذی را خواهد داشت.

۷- با توجه به تحلیل‌های دینامیکی انجام شده، رفتار لرزه‌ای سد و پی آن به لحاظ کرنش‌ها، تنش‌ها، توزیع شتاب و تغییرمکان‌ها دارای روند منطقی، معقول و قابل‌قبولی می‌باشد. تغییرمکان و آسیب‌های سازه‌ای در بدنه سد در سطح لرزه‌ای MCL ناچیز بوده و حداکثر تغییرمکان بسیار کم و به صورت ترک‌هایی مویی و کمتر از یک درصد ارتفاع سد به دست آمده است و این موضوع بیانگر پایداری قابل قبول سد در زمان وقوع زلزله و پس از آن می‌باشد.

مراجع

[1] Amel Sakhi, M., Davoodi, M., Jafari, M. K., "Studying Dam-Foundation Interaction in Masjed Soleiman Rock-Earth Fill Dam Using Recorded Earthquake Signals". *Journal of Engineering Geology*, Volume 3-2 (2010) (In Persian).

[2] Zewdu, A. "Modeling the slope of embankment dam during static and dynamic stability analysis: a case study of Koga dam, Ethiopia". *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 1963–1979 (2020).

[3] Song, D., Liu, X. and Li, B., "Assessing the influence of a rapid water drawdown on the seismic response characteristics of a reservoir rock slope using time-frequency analysis". *Acta Geotech.* 16, 1281–1302 (2021).

[4] Gordan, B., Raja, M.A., Armaghani, D.J. et al. *Review on Dynamic Behaviour of Earth Dam and*

Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 99, (1973).

[17] Regional water company of Hormozgan, "The data interpretation report of Shamil Dam instrumentation". Hormozgan, Iran (2012) (In Persian).

[18] Asadian, H., Rahimi, E., Ghafoori, M., and Bashirgonabadi, M., "Doosti dam monitoring until the end of construction using instrumentation data and numerical analyses". GEOSCIENCES, Vol. 25, No. 98 (2016) (In Persian).

[19] Vucetic, M., Dobry, R., "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), Vol. 120, pp. 220-228, (1991).

[20] Ishihara, k., "Soil behavior in earthquake geotechnics", Department of civil engineering science university of Tokyo, Japan, (1996).

[21] Technical system affairs, "Guideline for Seismic Analysis and Design of Earth and Rockfill Dams-Code 624". Mporg.ir, Iran (2013) (In Persian).

Equivalent linear dynamic analysis of earth dams - a case study of Shamil dam

A. Asakereh¹

O. Tavasoli*²

M. Razmjoo³

Abstract:

Considering the high seismic potential in most parts of Iran, the importance of studying the behavior of earth dams under earthquake loading, especially in the southern regions, is very important due to the number of these dams and seismicity of the Zagros Mountain range. In recent years, many studies have been performed on the effects of earthquakes on earth dams, but these structures exhibit seismic response and different dynamic behavior in earthquakes under different geometric conditions and properties of different materials.

In this study, the Shamil earth dam located in Hormozgan province has been investigated due to the importance of its application by means of numerical methods using the critical linear equation method. Dynamic behavior and seismic response of the dam and its following in terms of strains, tensions, acceleration and displacement distribution have been studied and the areas which susceptible to fracture were identified based on the relevant criteria. The results show that the upper part of the dam has a potential to crack and the maximum displacement is very small and occurred in less than one percent of the height of the dam, which indicates the stability of the dam during and after earthquakes.

Keywords: Earth dam, Dynamic analysis, Seismic response, Steady-state seepage, Shear strain, Liquefaction.

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Semnan, Iran

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Msc Graduate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran