

ارزیابی رفتار سدهای خاکی در برابر زلزله با توجه به ارتفاع سد و مدل رفتاری مصالح آن

بابک ابراهیمیان* و محمود وفائیان**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۳/۱۱/۲۰ - دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۸/۲۹)

چکیده - گرچه سابقه بررسی تاثیر زلزله بر سدهای خاکی به چند دهه قبل بر می گردد ولی پیچیدگیهای رفتاری این گونه سازه‌های خاکی در شرایط مختلف هندسی و فیزیکی و نیز تفاوت ویژگیهای زلزله‌ها موجب می‌شود که مطالعات دقیقتر با ابزار محاسباتی قویتر، نتایج جدید یا متفاوتی از وضعیت رفتاری بدنه سد را در مقابل زلزله نشان دهند. در مطالعه حاضر مدل رفتاری ساده الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کولمب برای وضعیت پلاستیک‌شدگی خاک و نیز از قاعده میرایی ریلی در محاسبات استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا صحت کارکرد مدل‌های عددی از طریق تحلیل دینامیکی موردهای واقعی مانند سدهای خاکی "لانگ‌ولی"، "سانتافله‌سیا" و مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج حاصل از اندازه‌گیریهای واقعی و یا نتایج ارائه شده توسط دیگر محققان بررسی شده است. همچنین در مطالعه حاضر علاوه بر تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی و بررسی پایداری آنها، به شیوه شبه‌استاتیکی هم پایداری سدهای خاکی بررسی شده است لذا به منظور اعتبارسنجی نتایج تحلیلهای شبه‌استاتیکی و کنترل نتایج نرم‌افزار در محاسبه ضریب اطمینان شبه‌استاتیک، سد "کارسینگتون" تحلیل شده است. مقادیر ضرایب اطمینان به دست آمده از مطالعه حاضر تطابق بسیار نزدیکی با نتایج ارائه شده در گزارشهای دیگر دارد. از طرفی رفتار گسیختگی حاصل از تحلیل این سد نیز توانایی دقیق نرم افزار را در مشخص کردن سطح گسیختگی نشان می‌دهد. در بخش اصلی تحلیلهای رفتاری لرزه‌ای سدهای خاکی با شرایط انتخابی متفاوت مورد مطالعه پارامتری قرار گرفته است و به ویژه تاثیر ارتفاع سد بر رفتار لرزه‌ای و انتخاب اندازه بهینه عرض تاج سد بررسی شده است و نتایج این تحلیلهای به صورت نمودارهایی ارائه شده‌اند.

واژگان کلیدی: سد خاکی، زلزله، ارتفاع سد، عرض تاج، تحلیل دینامیکی.

Evaluation of Earth Dam Behavior against Earthquake with respect to Dam Height and Constitutive Model of Dam Materials

B. Ebrahimiyan and M. Vafaeian

Department of Civil Engineering, University of Tehran
Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *In spite of the fact that the effect of earthquake on earth dams has been widely studied during the past decades, the complicated behavior of such earth structures against different seismological characteristics is still unknown. Such ambiguities necessitate more accurate studies using more comprehensive computation tools to achieve new results describing the behavior of such structures subjected to earthquake loading. In the present study, the simple soil model of elastic, perfectly plastic (based on the Mohr-Coulomb criterion), and Rayleigh damping criterion have been adopted for the soil. First, the numerical model employed was verified by dynamic analysis of real cases such as "Long Valley" and "Santa Felecia" earth dams. The computational results were then compared with real recorded data or with those reported by other researchers. In addition to evaluating seismic stability of earth dams, their seismic stability was verified using pseudo-static analyses. Therefore, the "Carsington" dam was analyzed to verify the results of pseudo-static analyses and to check the results of FLAC software in calculating the pseudo-static factor of safety. The values of calculated factors of safety in the present study are in good agreement with the published results in the literature. Furthermore, the failure behavior revealed in the analysis shows the ability of FLAC software in defining the failure surface. In the main part of the analyses, a parametric study was conducted for different selected conditions and specially the effect of dam height and the optimum size of crest width were investigated. The results are presented in relevant diagrams.*

Keywords: Earth dam, Earthquake, Dam height, Crest width, Dynamic analysis, Seismic load.

۱- مقدمه

به علت تنوع گزینه‌های محتمل برای هر گروه از عوامل مذکور و نیز تاثیرگذاری عوامل دیگر (با اهمیت کمتر)، پیش‌بینی دقیق رفتار واقعی یک سد خاکی در برابر وقوع زلزله (که هنوز اتفاق نیفتاده است) چندان واضح نیست و هنوز هم به‌علت تاثیرگذاری پاره‌ای احتمالات پاسخها را باید در هاله‌ای از ابهامات جستجو کرد. از طرفی عمده مطالعات در این زمینه را می‌توان در سه گروه، به شرح زیر تقسیم کرد:

۱- مطالعات، مشاهدات و حتی اندازه‌گیریهای رفتار سدهای خاکی در مقیاس واقعی در ضمن وقوع زلزله یا بعد از آن.
۲- مطالعات تجربی در مقیاس آزمایشگاهی و یا مطالعات تجربی در اثر ارتعاش اجباری یا محیطی به‌منظور پدیده‌شناسی.

۳- مطالعات محاسباتی و تحلیلی که فراوان و متعددند. از سوی دیگر، از یک برنامه تحقیقی و مطالعاتی تحت عنوان "بررسی واکنش سد خاکی در برابر زلزله" غالباً انتظار می‌رود که از دو نوع تحلیل (که منجر به دو بخش نتایج می‌شود) صحبت شود: بخش اول در مورد پاسخ رفتاری بدنه

با توجه به اینکه عوامل متعددی بر چگونگی پاسخ سدهای خاکی در برابر زلزله موثر است، مطالعاتی که تاکنون در مورد بررسی رفتار سدها صورت گرفته است به نتایجی منجر شده است که کرارا خود موجب مطرح شدن پرسشهای جدید شده است. در حال حاضر بر محققان در این زمینه پوشیده نیست که میزان اعتماد به پاسخهای محاسباتی، وابسته به مجموعه‌ای از عواملی است که عمده آنها را می‌توان در پرسشهای زیر خلاصه کرد:

- ۱- با چه ابزار محاسباتی و با چه دقتی محیط خاکی جسم سد (در شرایط دوبعدی یا سه‌بعدی) مدل می‌شود؟
- ۲- چه خواص فیزیکی-مکانیکی مشخصی برای مصالح بدنه سد در نظر گرفته می‌شود؟
- ۳- مدل رفتاری جسم سد در بخشهای مختلف چگونه فرض می‌شود؟
- ۴- شتاب نگاشت زلزله (یا به عبارت کلی‌تر، تکانهای زلزله) به چه نحوی به بدنه سد تحمیل می‌شود؟

سد در ضمن عملکرد زلزله قبل از گسیخته شدن بخشی از آن، و بخش دوم در مورد پاسخ رفتاری بدنه سد به صورت تخریب یا گسیختگی یا نشستها و دگرشکلیهای نهایی در ضمن گسیختگی (یعنی دگرشکلیهای شدید) است.

خوشبختانه در حال حاضر، نرم افزارهای مناسب موجود، امکان ارزیابیهای رفتاری سدهای خاکی را در برابر بارهای لرزه‌ای فراهم کرده‌اند (یا لاقلاً انتظار می‌رود که به این توانایی رسیده باشند). در مطالعه حاضر، از نرم افزار فلک^۱ استفاده شده است و انتظار از (یا اعتماد بر) این نرم افزار به این علت است که تدوین کنندگان این نرم افزار تمام ویژگیهای خاک و پیچیدگیهای موردنظر مربوط به اثر بار ارتعاشی را در تدوین مراحل محاسباتی منظور کرده‌اند. علاوه بر این چون در این کد محاسباتی ماتریسی تشکیل نمی‌شود لذا محاسبات دوبعدی وسیعی را می‌توان بدون نیاز به حافظه اضافی انجام داد. البته در ساختار برنامه "فلک" سختی محیط برای شناسایی و محاسبه گامهای زمانی مورد نیاز معرفی می‌شود ولی دسترسی به مفهومی با نام ماتریس سختی و یا جرم برای کاربر امکانپذیر نیست. نرم افزار "فلک" از روش غیرخطی کامل برای تحلیل‌های دینامیکی سازه‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌کند. برخلاف آنچه که در روش خطی معادل انجام می‌شود و روند حل بر پایه تکرار همگرایی است، در روش غیرخطی کامل فرایند تکراری وجود ندارد و کل زمان ارتعاش فقط در یک مرحله تحلیل می‌شود. این روش کاملترین و دقیقترین روش برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه‌هاست که در صورت استفاده از مدل رفتاری مناسب برای مصالح، جوابهای به دست آمده از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار خواهند بود.

۲- مروری بر تاریخچه پژوهشهای قبلی در این زمینه

در این بخش برای اشاره مختصر به سوابق تاریخی مرتبط با موضوع به چند مورد توجه می‌شود:

نمونه‌ای از مجموعه مطالعات پژوهشگران در این زمینه در مقاله‌های مروری "گازتاس"^۲ [۱] مربوط به سدهای خاکی،

"گازتاس" و "داکولاس"^۳ [۲] مربوط به سدهای پاره‌سنگی و با ۱۷۴ مرجع توضیح داده شده است.

"عبدالغفار" و "اسکات"^۴ در سال ۱۹۷۹ اثر زلزله "سان‌فرناندو"^۵ را بر روی سد خاکی "سانتافله‌سیا"^۶ بررسی کردند و ضمن نشان دادن فرکانس طبیعی سد و سرعت موج برشی در مصالح، سهم نسبی موده‌های ارتعاشی مختلف را به دست آوردند و این فرکانسها را با فرکانسهای طبیعی به دست آمده از نظریه تیر برشی مقایسه کردند [۳].

"پریوو" و همکاران^۷ در سال ۱۹۸۵ با استفاده از نرم افزار "داینافلو"^۸ پاسخ دوبعدی و سه‌بعدی سد "سانتافله‌سیا" را در برابر دو زلزله متفاوت بررسی کرده و نتایج حاصل را با اطلاعات ثبت شده مقایسه کردند. برای این تحلیلها از نظریه پلاستیسیته چندسطحی با سخت‌شوندگی سینماتیکی کامل استفاده کردند و در این محاسبات اثر بعد سوم روی پاسخ دینامیکی سد به خصوص بر روی تغییر شکلهای ماندگار نشان داده شد و قابلیت تحلیل‌های دوبعدی در محاسبه پاسخ دینامیکی سد ارزیابی شد [۴].

"عبدالغفار" و "الگمل"^۹ در سال ۱۹۸۷ برای تحلیل دینامیکی غیرخطی دوبعدی و سه‌بعدی سدهای خاکی ناهمگن، از یک روش عددی-تحلیلی و با کاربرد روابط گالرکین برای معادلات حرکت استفاده کردند. برای مدل کردن رفتار مصالح از ایده پلاستیسیته نموی با همان فرض رفتاری در تحلیل "پریوو" را به کار بردند و نتایج را برای سد "سانتافله‌سیا" با نتایج نامبرده مقایسه کردند [۵ - ۸].

"پریوو" و "گریفیت"^{۱۰} در سال ۱۹۸۸ یک تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی سد "لانگولی"^{۱۱} انجام دادند و نتایج را با مقادیر اندازه‌گیری شده پاسخ سد تحت اثر زلزله مقایسه کردند [۹].

"ویلند" و "مالا"^{۱۲} در سال ۲۰۰۲، پایداری لرزه‌ای سد خاکی "مات‌مارک"^{۱۳} با ارتفاع ۱۱۷ متر را که در کشور سوئیس بر روی یک فونداسیون ضخیم ۸۸ متری قرار گرفته بود، ارزیابی کردند. تحلیل دینامیکی با استفاده از روش اجزای محدود دوبعدی

برای مدل سد و فونداسیون انجام شد. نگاشت ورودی شامل سه سری متفاوت از شتابهای مصنوعی بود که دارای شتابهای ماکزیمم افقی و قائم $0/42g$ و $0/28g$ بودند. خواص دینامیکی مصالح سد بر پایه آزمایشهای دینامیکی و استاتیکی و اطلاعات موجود انتخاب شد. تحلیلها نشان داد که سطوح لغزش سطحی می‌توانند در حین زلزله به میزان ۲ تا ۳ متر حرکت کنند. برای سطوح لغزش عمیقتر، ماکزیمم تغییر مکان کمتر از ۸۰ سانتیمتر بود و نشستهای لرزه‌ای بر پایه کاهش سختی برشی مصالح در طی زلزله تخمین زده شد [۱۰].

بر اساس مقاله "فین"^{۱۴} و همکاران [۱۱] مسیر توسعه بخشی از نرم‌افزارهای تحلیل سد خاکی در برابر زلزله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

"اشنابل" و همکاران^{۱۵} در سال ۱۹۷۲ با استفاده از روش خطی معادل بر اساس کارهای "سید" و همکاران^{۱۶} در کالیفرنیا برنامه رایانه‌ای "شیک"^{۱۷} را نوشتند. "ادریس" و همکاران^{۱۸} در سال ۱۹۷۳ و "لیسمر" و همکاران^{۱۹} در سال ۱۹۷۵ با استفاده از روش خطی معادل به ترتیب برنامه‌های "کواد"^{۲۰} و "فلاش"^{۲۱} را تهیه کردند. این برنامه‌ها مدول برشی و میرایی را از روی کرنشهای برشی محاسبه می‌کنند. در برنامه "کواد"^۴ میرایی از نوع ریلی و حل از طریق انتگرالگیری مستقیم در حوزه زمان انجام می‌شود.

"مارتین" و همکاران^{۲۲} در سال ۱۹۷۵ مدلی را برای ایجاد فشار آب منفذی در طول زلزله بر مبنای پاسخ کرنشی خاک توسعه دادند. این مدل که به MFS معروف است، در تحلیل‌های دینامیکی تنش موثر و محاسبه مستقیم جابه‌جاییها به کار می‌رود. "دسرا"^{۲۳} اولین برنامه رایانه‌ای یک‌بعدی برای تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بر اساس تنشهای موثر و بر مبنای مدل فشار آب منفذی MFS است که توسط "فین" و "لی" در سال ۱۹۸۷ تهیه شد. "دسرا ۲ آر"^{۲۵} نسخه تصحیح شده "دسرا ۲" است که به جای مدل فشار آب حفره‌ای MFS از مدل راحت‌تری استفاده می‌کند.

"فین" و همکاران در سال ۱۹۸۶ برنامه رایانه‌ای "تارا"^{۲۶} را

تهیه کردند. این برنامه قادر به انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تحت شرایط تنشهای کل و موثر است و می‌تواند تغییرشکل‌های ماندگار را به صورت مستقیم محاسبه کند. تکمیل شده همین برنامه در سال ۱۹۸۹ قادر است تغییرشکل‌های بزرگ پس از روانگرایی را با استفاده از روش لاگرانژین تصحیح شده محاسبه کند.

"پلاکسیس"^{۲۷} نرم‌افزار اجزای محدود دیگری است که در تحلیل مسائل خاکی و سازه‌های در ارتباط با خاک است که در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه "دلف"^{۲۸} هلند در ابعاد مختلف و تواناییهای متنوع گسترش یافت.

"کندال" و "بورد"^{۲۹} در سال ۱۹۸۸ برنامه فلک را تهیه کردند. این برنامه از روش لاگرانژین اصلاح شده در تغییرشکل‌های بزرگ استفاده می‌کند.

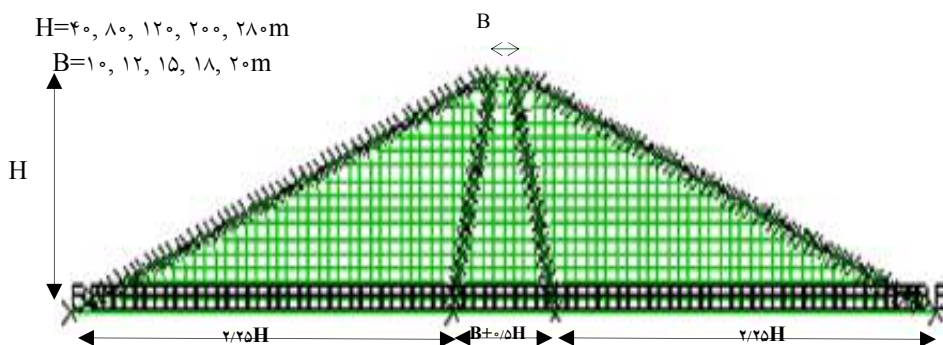
برنامه "داینارد"^{۳۰} توسط "موریواکی" و همکاران^{۳۱} در سال ۱۹۸۸ تهیه شده است. این برنامه از یک روش مبنی بر تفاضل‌های محدود استفاده می‌کند. این برنامه تحلیل تغییرشکل و پاسخ سازه‌های خاکی با اثر همزمان بارهای وزن و زلزله را با استفاده از مقاومت زهکشی‌نشده و کاهش مدول خاک زهکشی‌نشده انجام می‌دهد. رفتار غیرخطی و چرخه‌ای خاک با استفاده از مدل سطح حدی^{۳۲} انجام می‌گیرد.

"زینکوویچ" و همکاران^{۳۳} در سال ۱۹۹۰ برنامه "سوان داین"^{۳۴} را تهیه کردند. "مورالیتاران" و همکاران^{۳۵} در سال ۱۹۹۳ برنامه رایانه‌ای "دایساک"^{۳۶} را تهیه کردند که یک برنامه تحلیل دینامیکی غیرخطی کامل است. مدل‌های بنیادی بر مبنای پلاستیسیته سطوح محصور شده است. درستی برنامه با استفاده از آزمایشهای گریز از مرکز تایید شده است.

۳- مشخصات محاسباتی در تحقیق حاضر

۳-۱- مقطع هندسی سد، مدل رفتاری، شتابنگاشت و طیفهای زلزله

در این مطالعه، مقاطع مختلفی از سد خاکی مغزه‌دار در



شکل ۱- هندسه و زون‌بندی مقطع سد خاکی متقارن در برنامه محاسباتی "فلک"

در تحلیل حاضر از تحلیل دینامیکی غیرخطی مبتنی بر تاریخچه زمانی زلزله استفاده شده است که به علت منظور کردن رفتار تناوبی^{۳۷} محیط خاکی و استهلاک انرژی هیستریزس (حلقه تکراری) که منجر به تغییرشکل‌های ماندگار می‌شود، بزرگی شتابهای ورودی به قاعده سد بتدریج در امتداد قائم سد کاهش یافته و تضعیف می‌شود. از آنجا که رفتار غیرخطی، رفتار واقعی مصالح است، تاثیر تغییرات مدول برشی روی سطح کرنش برشی خود به خود در نظر گرفته می‌شود. در تحلیلهای دینامیکی از میرایی "ریلی"^{۳۸} استفاده شده است. برای انجام تحلیلهای دینامیکی در مطالعه حاضر از نرم‌افزار "فلک" دوبعدی نسخه ۴ استفاده شده است. واژه "فلک" از عبارت "تحلیل سریع لاگرانژی محیط پیوسته"^{۳۹} گرفته شده است. "فلک" یک برنامه مبتنی بر تفاضل محدود صریح است و به دلیل این که در این کد محاسباتی، ماتریسی تشکیل نمی‌شود محاسبات دو بعدی وسیعی را می‌توان بدون نیاز به حافظه اضافی انجام داد [۱۲]. مدل رفتاری مورد استفاده در این مطالعه بر اساس آغازی از وضعیت الاستیک خطی ولی تبدیل شرایط به پلاستیک شدگی بر پایه معیار گسیختگی موهر-کولمب است. این مدل از مدل‌های ساده و بسیار کاربردی از مکانیک خاک و اصولاً مباحث مربوط به خاک است. در نرم‌افزار "فلک" از مدل موهر-کولمب به عنوان یک مدل محوری و کاربردی نام برده شده است به طوری که تمام پایه و اساس مدل‌های رفتاری ارائه شده در نرم‌افزار "فلک"، مدل موهر-کولمب است و

شرایط دوبعدی (کرنش مستوی) مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج تحلیل لرزه‌ای آنها به صورت نمودارهای نشان دهنده تنشها و دگرشکلیهای ایجاد شده در مقطع سد و چگونگی تغییرات شتاب در امتداد محور قائم سد به دست آمد. همچنین وضعیت دگرشکلیهای نهایی که بیان کننده گسیختگی بدنه سد است در بعضی از تحلیلهای مشخص شد. گرچه در یک مطالعه فراگیر، تعداد زیادی عوامل موثر (مثل خواص فیزیکی و مکانیکی پوسته و مغزه، شیب پوسته، مدول برشی هسته و پوسته و نسبت استهلاک در آنها) را می‌توان در محاسبات منظور کرده و تاثیر آنها را مطالعه کرد ولی در مطالعه حاضر بسیاری از عوامل موثر، الزاما در مقدار ثابتی (مقدار متعارف یا توصیه شده) محدود شد زیرا در غیر این صورت تعداد محاسبات به صدها مورد بالغ می‌شد که مجال جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از آنها تنها به سادگی مقدور نمی‌شد، بلکه از وسع متعارف یک مقاله پژوهشی نیز فزونی می‌یافت. مقطع عمومی به کار برده شده در محاسبات حاضر در شکل (۱) نشان داده شده است. مشخصات هندسی این مقطع متقارن با ارتفاع متغییر سد (۴۰ متر، ۸۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۲۸۰ متر) و با شیب ثابت بدنه ۲/۵ بر ۱ (افقی به قائم) و شیب طرفین مغزه سد ۱ بر ۰/۲۵ (قائم به افقی) و با عرض اولیه تاج سد برابر با ۱۰ متر است. وضعیت ناحیه‌بندی محاسباتی این مقطع نیز در این شکل دیده می‌شود. در محاسبات مربوط به ارزیابی عرض تاج سد مقادیر متفاوتی برای عرض تاج منظور شده است.

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی در شرایط تنش کل و موثر برای مصالح سد

ناحیه	$\gamma \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{sat}} \text{ kN/m}^3$	C (kPa)		ϕ		K cm/s
			موثر	کل	موثر	کل	
هسته رسی	۲۰	۲۰/۵	۰	۸۰	۲۵	۸	10^{-7}
پوسته	۲۲	۲۳	۰	۰	۴۰	۴۰	10^{-2}

جدول ۲- مشخصات مصالح مختلف بدنه سد در تحلیل دینامیکی [۱۲]

ناحیه	$\gamma \text{ kN/m}^3$	$V_s \text{ m/s}$	$G_{\text{max}} \text{ Mpa}$	G	ν
هسته رسی	۲۰	۱۸۰	۶۴/۸	$0/55G_{\text{max}}$	۰/۴۹
پوسته	۲۱	۳۲۰	۲۱۵/۰	$0/55G_{\text{max}}$	۰/۳۴

و سطوح متمایز از یکدیگر استفاده شده است. لذا برای انجام تحلیلها و مقایسه نتایج، از زلزله ناغان با شتاب حداکثر $0/72g$ در سطح MDE، زلزله طبس با شتاب حداکثر $0/93g$ در سطح MCE و زلزله "سانفرناندو" با شتاب حداکثر $0/21g$ در سطح DBE استفاده شده است. شکل‌های (۲)، (۴) و (۶) تاریخچه زمانی این نگاشتها و شکل‌های (۳)، (۵) و (۷) طیف دامنه فوریه (FAS) را برای نگاشتهای یادشده نشان می‌دهند. هر یک از نگاشتها به مدت ۲۰ ثانیه در جهت افقی به قاعده سد اعمال شده‌اند. ضمناً نگاشت زلزله‌ها از طریق پایگاه اطلاعاتی دانشگاه برکلی به دست آمده‌اند [۱۴].

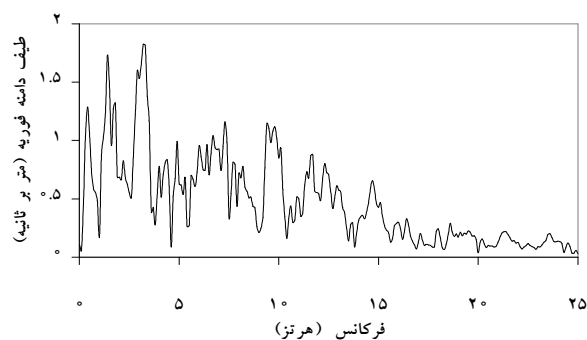
۳-۳- بهینه‌سازی محاسبات

در ساخت و شبکه‌بندی محیط، اندازه نواحی^۴ باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تاثیر مرزها بر روی رفتار مدل به حداقل برسد، ضمن اینکه معیار گذردهی امواج از داخل محیط که بر روی شبکه‌بندی و هندسه مدل تاثیر می‌گذارد باید مورد توجه باشد. در محاسبات اجزای محدود یا تفاضلهای محدود، لازم است تعدادی محاسبات مقدماتی و آزمایشی صورت گیرد تا ابعاد بهینه اجزا یا نواحی محاسبات مشخص شود. "کولمیر" و "لایسمر" [۱۵] نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج، اندازه مخصوص ناحیه (بزرگترین ابعاد

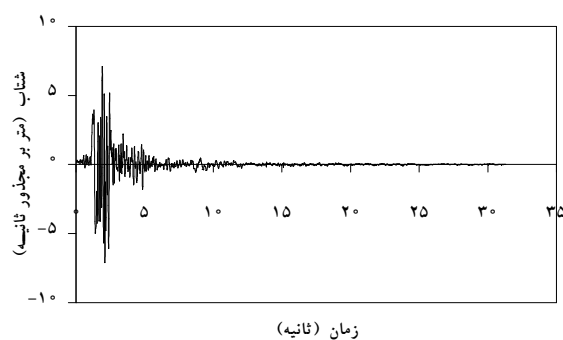
همچنین مدل دینامیکی Finn برای در نظر گرفتن افزایش فشار آب حفره‌ای که در این نرم‌افزار تعبیه شده است در داخل مدل موهر-کولمب گنجانده شده است. تحلیل تعیین ضریب اطمینان شبه‌استاتیک در نرم‌افزار "فلک" نیز بر اساس مدل موهر-کولمب است. همچنین تعیین سطوح گسیختگی مصالح در مدل "فلک" نیز تنها در مدل موهر-کولمب و مدل دراگر-پراگر تعبیه شده است. یکی از مزایای بسیار قابل اتکا در مدل موهر-کولمب تعداد پارامترهای آن است. به طوری که با تعداد پارامترهای کمی می‌توان ارزیابی نسبتاً مناسبی از رفتار خاک داشت. در مطالعات موردی که در بخشهای بعدی ارائه می‌شود، مثلاً برای سد "لانگولی" [۹] از مدل موهر-کولمب استفاده شده است لذا نگارنده مقاله نیز ترغیب شد به منظور مقایسه بین نتایج مقاله حاضر و مرجع [۹] از مدل موهر-کولمب استفاده کند. مشخصات فیزیکی- مکانیکی مصالح مغزه و پوسته در جدول (۱) داده شده است. همچنین مشخصات لرزه‌ای سد پانزده خرداد که مستند به گزارش آن است [۱۳] مطابق جدول (۲) مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲- زلزله‌های ورودی

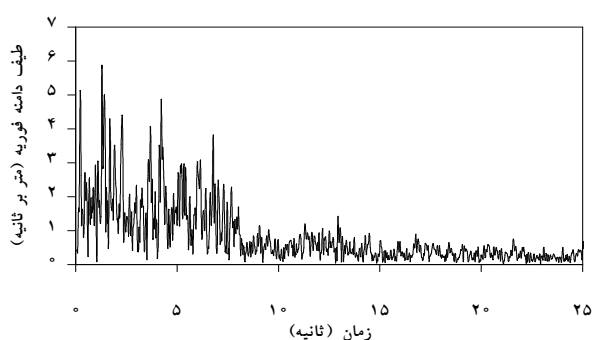
برای مطالعه رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی در این تحقیق، از سه نگاشت زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت، شتاب ماکزیمم



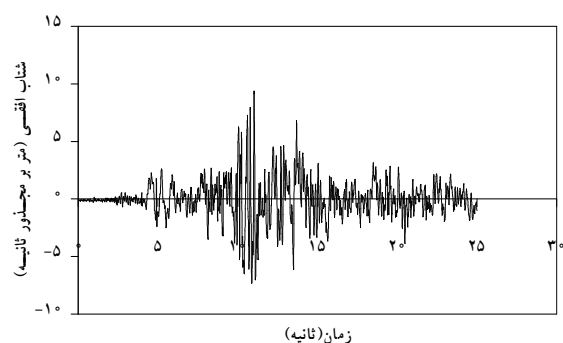
شکل ۳- طیف دامنه فوریه برای نگاشت "ناغان"



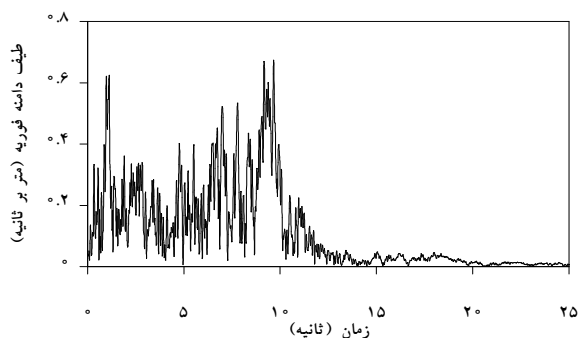
شکل ۲- نگاشت زلزله "ناغان"



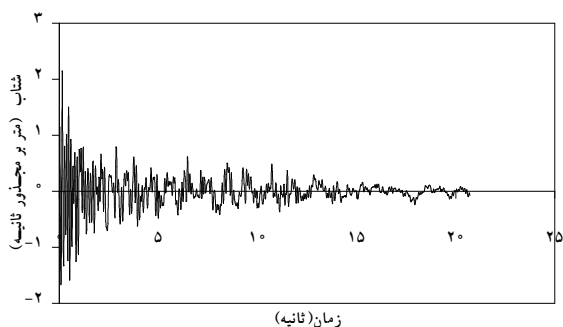
شکل ۵- طیف دامنه فوریه برای نگاشت "طیس"



شکل ۴- نگاشت زلزله "طیس"



شکل ۷- طیف دامنه فوریه برای نگاشت "سانفراندو"

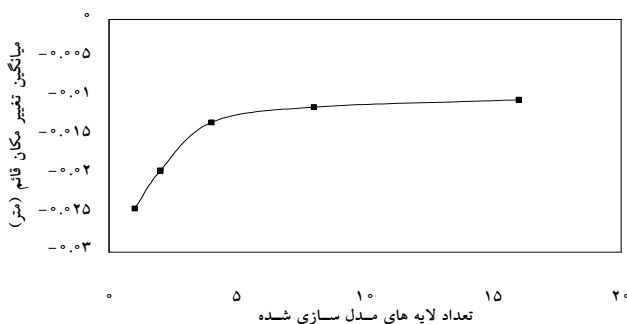


شکل ۶- نگاشت زلزله "سانفراندو"

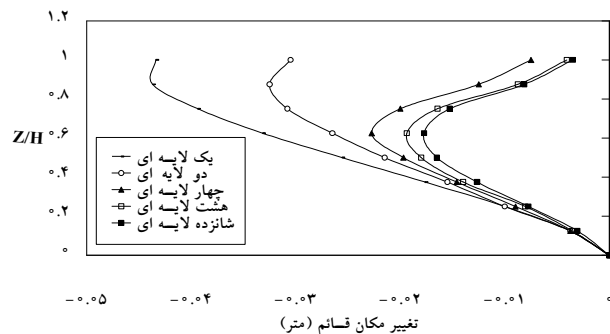
که در معادلات فوق f_{max} ، ماکزیمم فرکانس قابل عبور از سیستم و V_{min} ، سرعت مینیمم موج در محیط است. اگر فرض کنیم حداکثر فرکانس نگاشتهای ورودی ۸ Hz باشد که در تمام حالتها کمتر از این مقدار است بر این اساس نواحی مربعی با ابعاد حدود ۲/۵ متر نتایج رضایت بخشی را ارائه می دهند. از

ناحیه)، Δl باید کوچک تر از $1/8$ تا $1/10$ طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد. می توان فرض کرد که برای گذردهی مناسب امواج به طور متوسط باید شرط زیر برقرار باشد:

$$\Delta l = \lambda/9, f = V/\lambda \Rightarrow \Delta l = V_{min}/9f_{max}$$



شکل ۹- تغییرات تغییر مکان قائم متوسط با تعداد لایه های مدل سازی

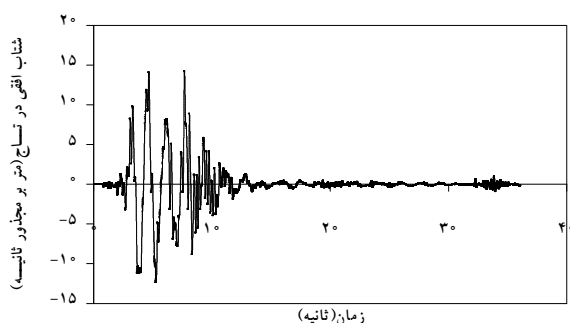


شکل ۸- تحلیل حساسیت تغییر مکان قائم در امتداد محور سد خاکی نسبت به تعداد لایه های مدل سازی

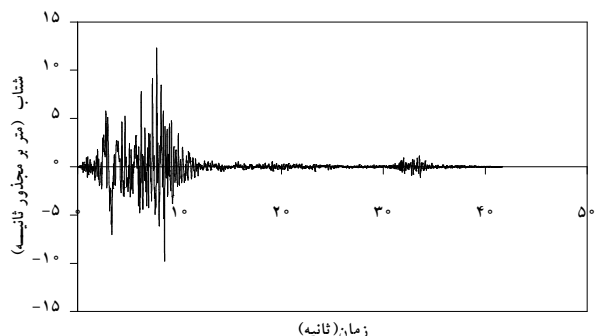
۳-۴- ارزیابی منطقی بودن نتایج محاسبات

هرچند نرم افزار "فلک" دویعدی نسخه ۴ که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، از معتبرترین نرم افزارهای مهندسی، به خصوص در مهندسی ژئوتکنیک است و از آن به طور وسیعی در تحلیل و طراحی سازه های خاکی حساس استفاده می شود، با وجود این تعدادی موارد مشخص که اطلاعات آنها در گزارشها موجود است مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل با اطلاعات اندازه گیریهای موجود مقایسه شده است. لازم به ذکر است که برای انجام تحلیل های دینامیکی، ۵ برنامه جانبی به زبان برنامه نویسی FISH (زبان برنامه نویسی در نرم افزار "فلک") به برنامه اصلی اضافه شده است که این برنامه های جانبی برای محاسبه تغییر مکان نسبی افقی و قائم در نقاط مختلف بدنه سد، محاسبه کرنشهای برشی در نقاط مختلف بدنه سد و همچنین برای محاسبه تغییر مکانهای افقی، کرنشهای برشی و شتابهای افقی در محور مرکزی سد و ذخیره این مقادیر تدوین شده اند. در بخش دیگر به شیوه شبه استاتیکی، مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده و پایداری سد بررسی شده است. برای بررسی صحت کارکرد مدل های عددی در تحلیل های دینامیکی و همچنین برنامه های جانبی اضافه شده توسط زبان برنامه نویسی FISH به نرم افزار، ابتدا سدهای "سانتا فله سیا" و "لانگ ولی" به ترتیب تحت اثر زلزله های "سان فرناندو" و "ماموت لیک"^{۲۲} تحلیل شده اند و نتایج حاصل از این تحلیل های نرم افزار با نتایج اندازه گیری شده واقعی و یا نتایج ارائه شده در مقالات توسط محققان قبلی مقایسه شده اند.

آنجا که سدهای خاکی به صورت لایه لایه و مرحله ای اجرا می شوند، لذا در مدل سازیهای عددی نیز باید مدل سازی به صورت لایه ای و مرحله ای انجام شود. برای بررسی تاثیر مدل سازی مرحله ای بر آرایش تنشها و جابه جاییها تحلیل حساسیت جابه جایی قائم نسبت به تعداد لایه های مدل سازی انجام گرفته است. نمونه این گونه ارزیابیهای اولیه در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است که مربوط به سدی با ارتفاع ۴۰ متر است. در شکل (۸) تغییرات دگرشکلی قائم در امتداد محور سد برای شرایط مختلف لایه بندی (تعداد لایه ها ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶) دیده می شود و در شکل (۹) متوسط دگرشکلیهای قائم تاج سد به صورت تابعی از تعداد لایه ها ملاحظه می شود. به طوری که مشخص است نه تنها مقادیر دگرشکلیها، بلکه شکل توزیع آنها در ارتفاع نیز به سمت حد مناسبی حرکت می کنند و مثلاً برای سد با ارتفاع ۴۰ متر در مدل کردن مقطع، از ۱ لایه تا ۱۶ لایه، می توان تعداد ۸ لایه را با تقریب قابل قبول پذیرفت، این رقم توسط بعضی پژوهشگران دیگر نیز تایید شده است [۶]. به منظور تعیین حداقل تعداد لایه های لازم در سدهای با ارتفاعهای مختلف، این محاسبات مقدماتی برای هر کدام از سدهای با ارتفاعهای متفاوت انجام شد و مشخص شد که حداقل تعداد لایه های لازم برای سدهای با ارتفاع ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۲۸۰ متر به ترتیب ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۸ لایه است، هرچند بنا به نظر "پاتز" و "دراکوچ"^{۲۱} [۱۶] برای سازه های خاکی، تعداد ۸ تا ۱۰ لایه مناسب بوده و دارای دقت کافی است.



شکل ۱۳- تاریخچه زمانی شتاب افقی به دست آمده از محاسبات در مطالعه حاضر برای تاج سد "سانتافله سیا"



شکل ۱۲- نگاهت ورودی افقی برای سد "سانتافله سیا" [۱۳]

به ترتیب $14/26 \text{ m/s}^2$ و $0/695 \text{ m}$ است. اما برای جابه‌جایی افقی، این توافق و هماهنگی دیده نمی‌شود. اختلاف در نتایج می‌تواند ناشی از نحوه مدلسازی، نوع مدل رفتاری، وجود آب مخزن و تراوش از داخل بدنه سد باشد که عمده‌ترین آن تفاوت در نوع مدل رفتاری است. این مقایسه نشان می‌دهد که در مورد حداکثر شتاب افقی تطابق رضایت‌بخشی وجود دارد در حالی‌که برای تغییر مکان افقی تفاوت بیشتر است. در شکل (۱۳) تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد حاصل از مطالعه حاضر دیده می‌شود.

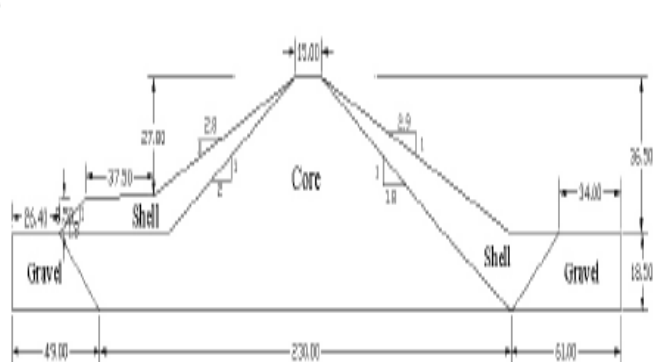
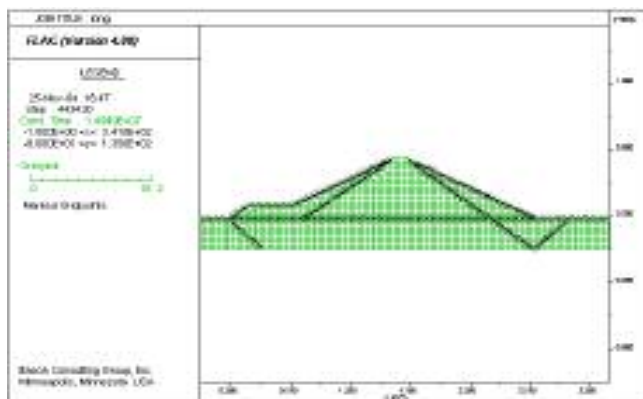
ب- تحلیل سد "لانگ ولی"

سد "لانگ ولی" از نوع خاکی بوده که در دهه ۱۹۳۰ ساخته شده است و در دره باریکی در منطقه "ماموت لیک" واقع شده است. طول تاج سد ۱۸۲ متر، حداکثر ارتفاع آن ۵۵ متر و با عرض ۲۸۰ متر در مقطع میانی و با شیب تقریبی ۳:۱ در هر دو دامنه ساخته شده است. ارتفاع تقریبی آب در مخزن ۵۰ متر است. تحلیل دینامیکی این سد به روش اجزای محدود اولین بار توسط "یایی"^{۴۴} و "سید" در سال ۱۹۸۵ انجام شد. سپس "گریفیتز" و "پریوو" با روش اجزای محدود دوبعدی و سه‌بعدی و با در نظر گرفتن مدل کینماتیک چند سطحی، تحلیل دینامیکی سد فوق را انجام دادند [۹]. و "یاگوس"^{۴۵} و "پریوو" پاسخ سد "لانگ ولی" را با فرض رفتار خاک به صورت الاستو-پلاستیک به دست آوردند [۱۷] و "وودوارد"^{۴۶} و "گریفیتز" با استفاده از

در این محاسبات رابطه تنش برشی و کرنش برشی بر اساس معادله $\tau = G_0 \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma_r} \right)$ است [۶]. که در آن γ_r کرنش مرجع است که مقدار آن در هر دو حالت برابر با $0/0013$ در نظر گرفته شده است.

در تحلیل‌های دینامیکی انجام شده بر روی سد "سانتافله سیا" توسط "الگمل" و همکاران از مدل پلاستیسیته چند سطحی با سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده شده است. منحنی هذلولی مبنای تنش-کرنش به وسیله ۱۵ قطعه خط (۱۵ سطح تسلیم در فضای تنشها) به دست آمده است. این مدل قادر به در نظر گرفتن اثر "بوشینگر" است که خاک تحت اثر بارهای دینامیکی چرخه‌ای از خود نشان می‌دهد و تغییر در مقاومت خاک در اثر اضافه فشار آب منفذی، به دلیل کم بودن مدت زمان اعمال بار نامحتمل فرض شده است. از تئوری همگرایی 10^{-4} پارامترهای نیومارک $\alpha = 0.55$ و $\beta = \frac{1}{4}(\alpha + 0.5)^2 = 0.28$ و از اندازه گام زمانی برابر با $\Delta t = 2 \times 10^{-2}$ ثانیه در تحلیلها استفاده شده است. در مطالعه حاضر از مدل رفتاری الاستیک خطی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سد و مقایسه نتایج با مرجع [۶] استفاده شده است.

تحلیل دینامیکی حاضر برای سد "سانتافله سیا" در برابر زلزله "سانفرناندو"، شتاب افقی حداکثر و تغییر مکان افقی حداکثر در تاج سد را به ترتیب برابر $13/716 \text{ m/s}^2$ و $0/518 \text{ m}$ نشان می‌دهد که این ارقام در تحلیل ارائه شده توسط "الگمل" [۶]



شکل ۱۴ - مشخصات مقطع عرضی سد "لانگولی" شکل ۱۵ - ناحیه‌بندی در مقطع سد "لانگولی" در نرم‌افزار "فلک"

جدول ۴- پارامترهای ژئوتکنیکی برای مصالح سد [۹]

C (kPa)	Φ (°)	ν	E (kPa) $\times 10^5$	γ_{wet} (kN/m ³)	رفتار	ناحیه
۴۵	۳۹	۰/۴۵	از ۴ تا ۶/۵ تابع ارتفاع	۲۰	الاستوپلاستیک	هسته رسی
۰	۴۰	۰/۳	از ۱/۶ تا ۲/۱ تابع ارتفاع	۲۰	الاستوپلاستیک	پوسته
۰	۴۰	۰/۳	۴/۹	۲۰	الاستیک	پی شنی

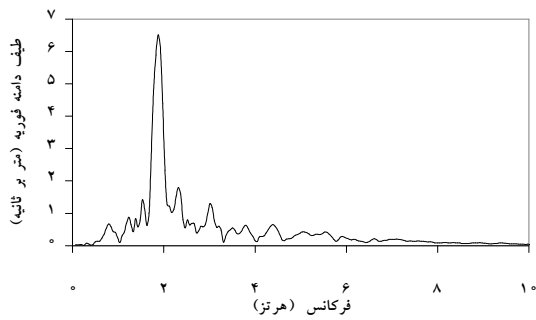
(FAS) را برای این نگاشتهای شتاب نشان می‌دهند. تحلیل دینامیکی سد برای نگاشت ورودی مذکور در طی ۱۲ ثانیه انجام شده است. ضمناً نگاشت زلزله‌ها از طریق پایگاه اطلاعاتی دانشگاه برکلی به دست آمده‌اند [۱۴].

شکلهای (۲۰) و (۲۱) تاریخچه شتاب افقی و طیف دامنه فوری محاسبه شده را برای نگاشت افقی و برای ضریب میرایی ۹٪ نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که تاریخچه شتاب افقی محاسبه شده و نیز طیف دامنه فوری محاسبه شده برای نگاشت افقی با دقت بسیار خوبی از مقادیر اندازه‌گیری شده پیروی می‌کنند. از آنجاکه فرکانس غالب موج ورودی برای حالت دوبعدی و در راستای افقی نزدیک به فرکانس غالب مد اول سد است لذا مقادیر شتاب از بستر سنگی به سمت تاج سد بزرگنمایی شده‌اند. در شکلهای (۲۲) و (۲۳)، تاریخچه شتابهای افقی و قائم در سنگ بستر و در تاج سد با هم مقایسه شده‌اند.

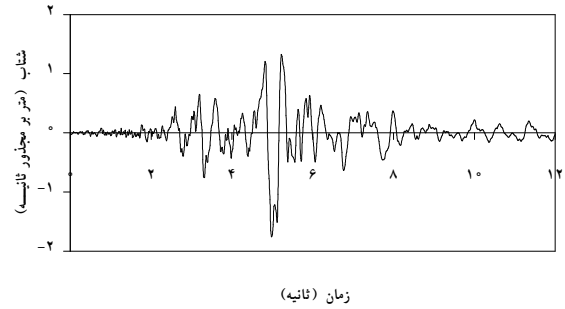
از مقایسه نتایج حاصل از مقاله حاضر با نتایج ارائه شده توسط محققان قبلی مشخص شد که تمامی روشهای نظری

روش اجزای محدود و با فرض میرایی ویسکوز و با استفاده از مدل الاستو-پلاستیک، سد مذکور را مورد بررسی قرار دادند [۱۸ و ۱۹]. در مقاله حاضر تحلیل دینامیکی با استفاده از روش تفاضل محدود (FDM) احتمالاً برای اولین بار برای سد فوق انجام شده است. از مدل رفتاری ساده الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کولمب و نیز میرایی ریلی برای افزایش سطح میرایی هیسترتیک و جبران کمبود میرایی هیسترتیک در تحلیلها بهره گرفته شده است و پاسخ سد در هر دو محدوده زمان و فرکانس به دست آمده‌اند و در انتها نتایج با پاسخهای اندازه‌گیری شده واقعی و نیز نتایج ارائه شده توسط محققان قبلی مقایسه شده‌اند. نمای کلی سد در شکل (۱۴) و مدل عددی ساخته شده در فلک در شکل (۱۵) آمده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح در جدول (۴) آمده است [۹].

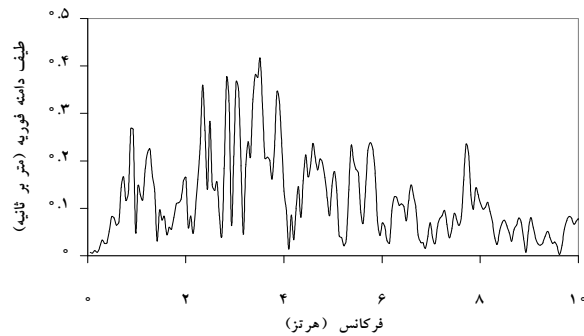
شکلهای (۱۶) و (۱۸) تاریخچه‌های شتاب افقی و قائم روی سنگ بستر و شکلهای (۱۷) و (۱۹) طیف دامنه فوری



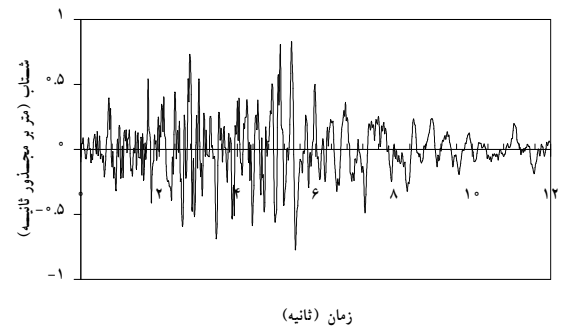
شکل ۱۷- طیف دامنه فوری برای نگاشت افقی در شکل (۱۶)



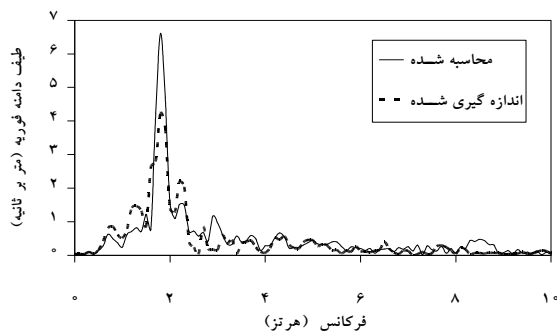
شکل ۱۶- نگاشت افقی زلزله "ماموت لیک"



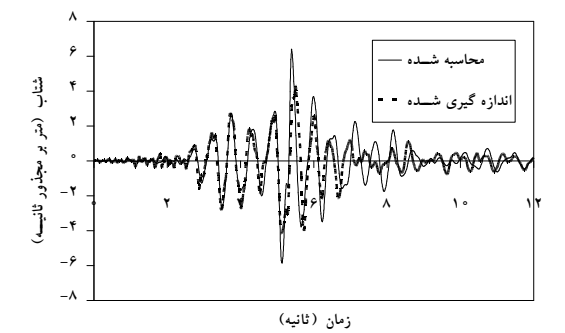
شکل ۱۹- طیف دامنه فوری برای نگاشت قائم در شکل (۱۸)



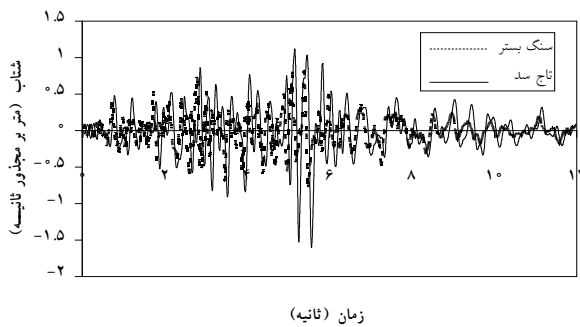
شکل ۱۸- نگاشت قائم زلزله "ماموت لیک"



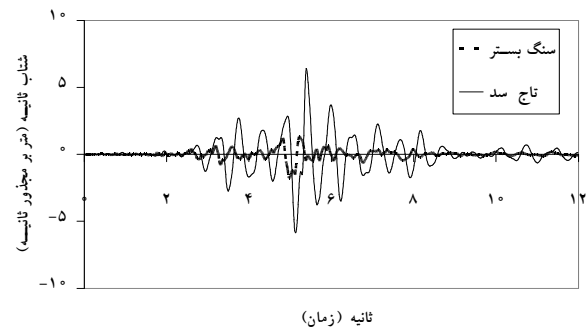
شکل ۲۱- طیف دامنه فوری شتاب افقی در اثر زلزله "ماموت لیک" در تاج سد "لانگولی"



شکل ۲۰- تاریخچه شتاب افقی در اثر زلزله "ماموت لیک" در تاج سد "لانگولی"



شکل ۲۳- تاریخچه شتاب قائم سنگ بستر و تاج سد "لانگولی"

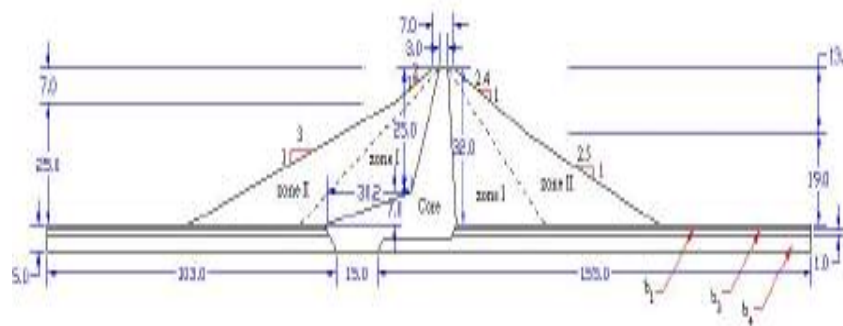


شکل ۲۲- تاریخچه شتاب افقی سنگ بستر و تاج سد "لانگولی"

جدول ۵- مقایسه نتایج تحلیلهای سد بر اساس روشهای مختلف با نتایج اندازه‌گیری شده واقعی [۹، ۱۷، ۱۸ و ۱۹]

نتایج حاصل	Y&P (1991)	خطا	W&G (1994)	خطا	W&G (1996)	خطا	تحقیق حاضر	خطا	مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی
PGA _{max}	۰/۵۳g	۳۲/۵%	۰/۷g	۷۵%	۰/۸g	۱۰۰%	۰/۶۱g	۵۲/۵%	۰/۴g
PGA _{min}	-۰/۶۵g	۳۰%	۰/۵۳g	۶%	-۰/۶۸g	۳۹%	-۰/۵۰۳g	۰/۶%	-۰/۵g

Y: Yiagos, P: Prevost, W: Woodward, G: Griffiths



شکل ۲۴- مقطع عرضی سد "کارسینگتون"

ج- بررسی گسیختگی سد "کارسینگتون"

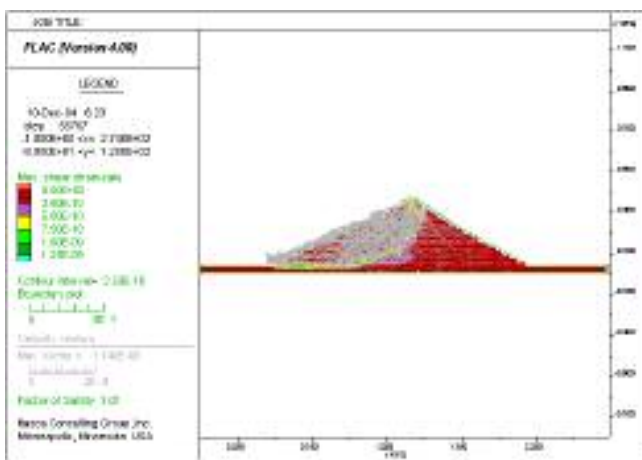
نمونه کاربردی دیگر، مدلسازی سد خاکی "کارسینگتون" در انگلستان است. اطلاعات مربوط به این پروژه [۲۰] نشان می‌دهد که ۵۰۰ متر از طول بدنه سد در ضمن ساخت (و قبل از آبیگری مخزن) فرو ریخته است و بررسیهای متعدد، نشان داده است که به علت وضعیت چکمه‌ای مغزه سد، سطح گسیختگی بدنه سد حالت دوسطحی داشته است. این سد دارای ارتفاعی برابر با ۳۲ است. عرض تاج سد ۷ متر است. مقطع سد در شکل (۲۴) نشان داده شده است. مشخصات مصالح سد در جدول (۶) آمده‌اند [۲۰-۲۲].

شکلهای (۲۵) و (۲۶) خطوط تراز نرخ کرنش برشی و بردارهای سرعت گرهی را نمایش می‌دهند و همچنین به مقدار ضریب اطمینان پایداری در آستانه گسیختگی نیز در این شکلهای اشاره شده است. شکلهای (۲۷) و (۲۸) نیز سطح لغزش بحرانی را که از تحلیل اجزای محدود و تعادل حدی به دست آمده‌اند و

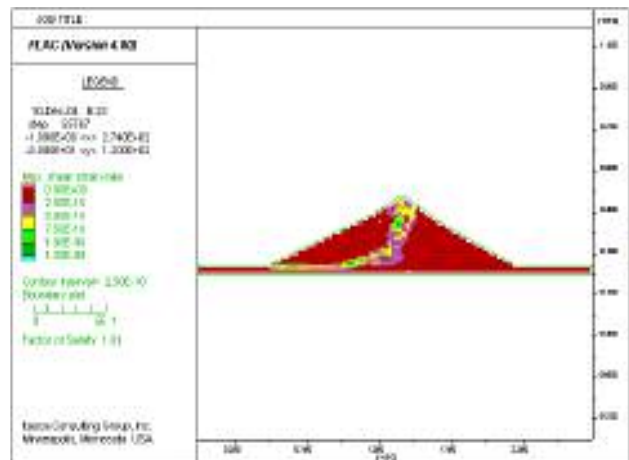
حاضر، مقادیر شتاب را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده دست بالا برآورد می‌کنند. برای شتاب افقی نزدیکترین جواب حداکثر مثبت به نتایج واقعی اندازه‌گیری شده، روش "یاگوس" و "پریوو" در سال ۱۹۹۱ است که نسبت به مقادیر اندازه‌گیری ۳۲٪ خطا دارد که البته از لحاظ شکل منحنی تاریخیچه زمانی تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده ندارد و نزدیکترین جواب حداقل به نتایج واقعی اندازه‌گیری شده برای شتاب افقی، نتایج مقاله حاضر است که نسبت به واقعیت ۰/۶٪ خطا دارد و از لحاظ شکل منحنی تاریخیچه زمانی نیز تطابق و هماهنگی بسیار خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده برقرار است لذا در کل نتایج مقاله حاضر از لحاظ مقدار و شکل منحنی تاریخیچه زمانی نسبت به نتایج ارائه شده توسط محققان قبلی دقت بسیار بالاتری دارند. به طور خلاصه می‌توان نتایج این مقایسه را در جدول (۵) خلاصه کرد.

جدول ۶- پارامترهای ژئوتکنیکی در شرایط تنش موثر برای مصالح سد [۲۱]

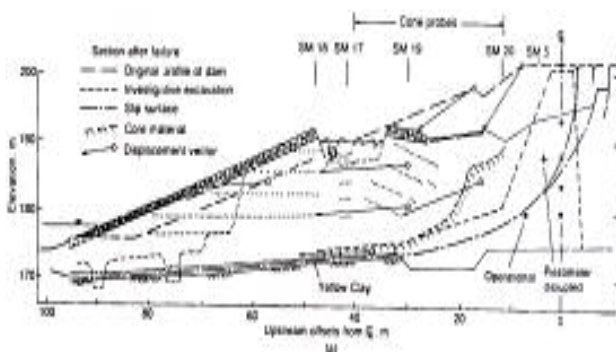
ϕ (°)		C (kPa)		ν	E (MPa)	γ_d KN/m ³	ناحیه
Residual	Peak	Residual	Peak				
۱۳	۲۱	۰	۱۵	۰/۵	۷۰	۱۳/۶	هسته رسی
	۲۲		۱۰	۰/۳	۱۲۰	۱۵/۴	زون ۱
۱۵	۲۶	۰	۱۷	۰/۳	۱۲۰	۱۸/۳	زون ۲
۱۲	۲۰	۰	۱۰	۰/۵	۷۰	۱۴	رس (b ₁)
	۲۲		۱۵	۰/۵	۷۰	۱۴	رس (b ₃)
	۲۴		۱۵	۰/۵	۷۰	۱۴	لایه سنگ (b ₄)



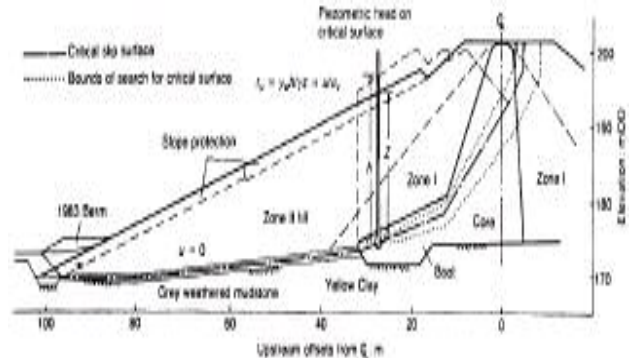
شکل ۲۶ - بردارهای سرعت گرهی در انتهای زلزله برای سد "کارسینگتون"



شکل ۲۵ - خطوط تراز نرخ کرنش پرسی محاسبه شده برای سد "کارسینگتون"



شکل ۲۸ - سطح لغزش واقعی در سد "کارسینگتون" [۲۱]



شکل ۲۷ - سطح لغزش به دست آمده از روش تعادل حدی [۲۱]

از روش تعادل حدی است. در جدول (۷) مقادیر ضریب اطمینان پایداری برای روشهای مختلف و نقل از محققان مختلف آمده است. ملاحظه می شود که مقادیر ضریب اطمینان

نیز سطح لغزش واقعی را نشان می دهند. از مقایسه شکلهای (۲۵) و (۲۶) با شکلهای (۲۷) و (۲۸) کاملاً مشخص است که سطح گسیختگی دقیقاً منطبق بر سطح گسیختگی به دست آمده

جدول ۷- مقادیر ضریب اطمینان پایداری به دست آمده از روشهای مختلف برای سد "کارسینگتون" [۲۰-۲۲]

	تعادل حدی	تحلیل حدی	تحلیل حدی
	Skempton and Vaghan (1993)	Rowe (1991)	تحقیق حاضر
در حالت مقاومت حداکثر (peak) مصالح	۱/۶	۱/۵۵	۱/۵۸
در حالت مقاومت در لحظه گسیختگی مصالح	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۱
در حالت مقاومت باقیمانده (residual)	۰/۷۷	-	۰/۷۶

کاربردی آن می‌تواند در توجیه معیارهای طراحی سدهای خاکی کاملاً موثر باشد.

از اهداف مهم این مطالعه، بررسی تاثیر نقش ارتفاع (بزرگی) سد در رفتار آن از دیدگاه رفتار قبل از گسیختگی و نیز ارزیابی تاثیر آن بر وضعیت گسیختگی و نیز بررسی ارتباط ابعاد عرضی سد با ارتفاع آن در شرایط پایداری سد است. به این علت، مقطعیهای متعددی با طیفهای مختلف مورد محاسبه قرار گرفت.

۴-۲- بررسی تاثیر متقابل عوامل متعدد بر رفتار سد در برابر زلزله

از آنجاکه عوامل متعددی بر رفتار دینامیکی سد خاکی در برابر زلزله تاثیر دارند، از این رو مدل کردن یک مقطع سد خاکی مشخص در برابر یک طیف معین زلزله قاعدتاً نمی‌تواند الگوی عمومی و جامع این‌گونه رفتار سد را نشان دهد. از عوامل موثر بر رفتار سد، ارتفاع سد، میزان مقاومت اصطکاکی مصالح و نوع طیف زلزله است. در مطالعه حاضر، علاوه بر بررسی رفتاری مبتنی بر حالت الاستیک، مراحل پلاستیک‌شدگی نیز منظور شده و تفاوت نتایج مقایسه شده است. نکته مهم که در اینجا لازم به یادآوری است، این است که پلاستیک‌شدگی بخشی یا بخشهایی از جسم سد، خود تابعی از طیف زلزله، نوع مصالح سد و ارتفاع سد است و چون پلاستیک‌شدگی جسم سد، موجب میرایی بیشتر انرژی زلزله می‌شود قاعدتاً انتظار می‌رود که دگرشکلیها، کرنشها و شتابهای دریافت شده در تاج سد به مراتب کوچکتر از مقادیر متناظر آنها در شرایط فرض جسم

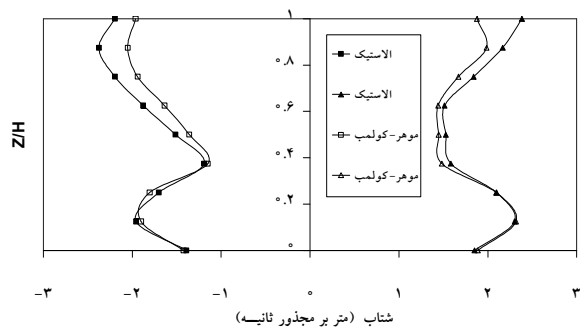
به دست آمده از مطالعه حاضر به مقادیر ارائه شده توسط محققان قبلی نزدیک‌اند و تطابق قابل قبولی دارند. به عنوان نمونه، همان‌طور که قبلاً هم ذکر گردید سطح گسیختگی برای ضریب اطمینان ۱ نشان داده شده‌اند و با شکلهای موجود در مقالات مقایسه شده‌اند.

۴- محاسبات انجام شده و نتایج آنها

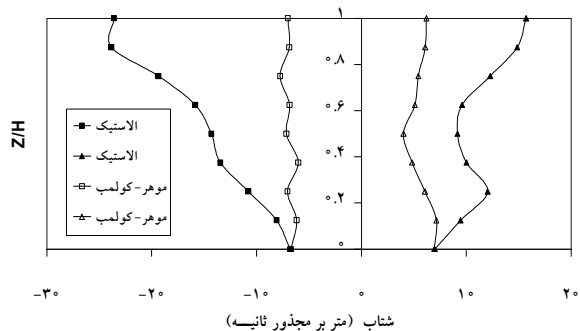
۴-۱- مشخصات لازم

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مقطع سد خاکی مورد تحلیل در این مطالعه در شکل (۱) و با مشخصات جداول (۱) و (۲) است. در این مطالعه از طیفهای متفاوتی ("ناغان"، "طبس" و "سانفرناندو") در مراحل زمانی منفصل ۰/۰۲ ثانیه‌ای و هرکدام از طیفها برای ۲۰ ثانیه در قاعده سد اعمال شده است. نتیجه محاسبات به صورت خطوط تراز جابه‌جایی افقی و کرنشهای برشی، بردارهای جابه‌جایی، شبکه تغییرشکل یافته، نقاط و نواحی پلاستیک شده به‌عنوان خروجی محاسبات به دست می‌آید.

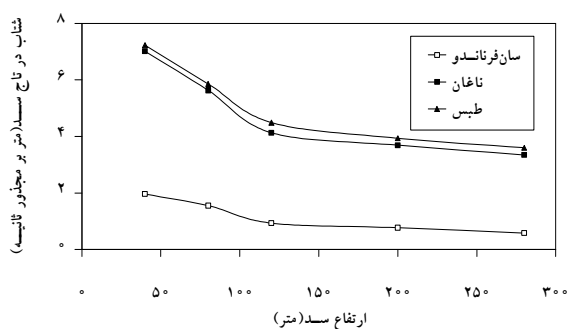
از مشخصاتی که غالباً می‌توان از نتایج محاسبات مورد بحث قرار داد و با داده‌های تجربی یا تحلیلی دیگر مقایسه کرد، چگونگی تغییرات شتاب زلزله در امتداد ارتفاع سد از قاعده تا تاج، مشاهده طیف زمانی شتاب در هر تراز از بدنه سد، (غالباً در تراز تاج سد)، چگونگی تغییرات جابه‌جاییهای افقی در امتداد ارتفاع و نیز چگونگی تغییرات کرنشهای برشی در امتداد ارتفاع است. این کمیتها هرکدام به‌نحوی بیان‌کننده بعضی از خواص لرزه‌ای جسم سد یا چگونگی تغییر و تفاوت عکس‌العمل رفتاری سد در اثر تغییر شرایط است که نتیجه



شکل ۳۰- تغییرات شتاب افقی حداکثر در ارتفاع سد ۴۰ متری برای زلزله "سانفرناندو"



شکل ۲۹- تغییرات شتاب افقی حداکثر در ارتفاع سد ۴۰ متری برای زلزله "ناغان"

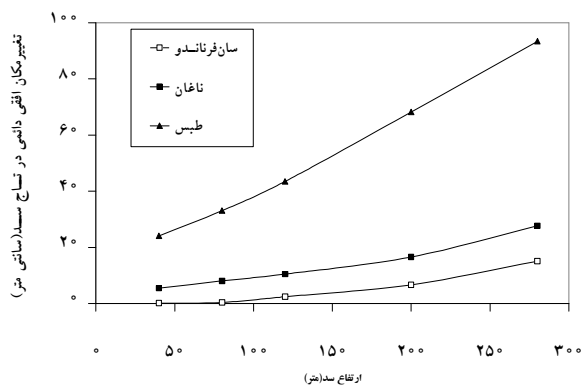


شکل ۳۱- رابطه بین شتاب افقی حداکثر در تاج سد نسبت به ارتفاع سد در اثر سه زلزله مشخص

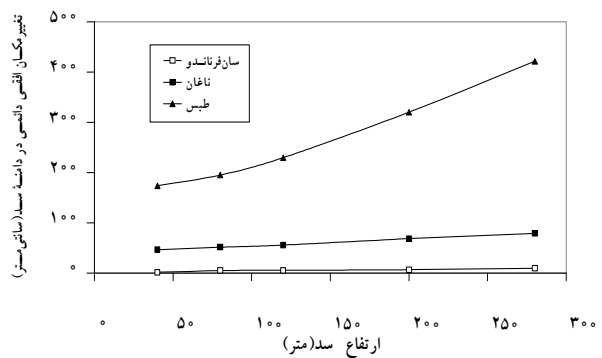
۲- تاثیر ارتفاع سد همواره به عنوان افزایش ناپایداری است ولی این تاثیر خطی نیست و نیز به علت تاثیر ارتفاع در پلاستیک شدن سریعتر جسم سد، تشدید شتابها در ارتفاع سد در سدهای بزرگتر به مراتب کمتر است. در عین حال افزایش ارتفاع سد، پتانسیل گسیختگی بدنه سد را در اثر زلزله افزایش می دهد. شکل (۳۱) این پدیده را مشخص می سازد. مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع سد برای یک نگاهت مشخص شتاب حداکثر در تاج سد کاهش می یابد و برای هیچ یک از نگاهتها تقویتی در شتاب تاج نسبت به شتاب قاعده سد مشاهده نمی شود. در عوض با افزایش ارتفاع سد، برای یک نگاهت مشخص، ناپایداری در سد افزایش می یابد یعنی تعداد نواحی پلاستیک در سد افزایش می یابد. با افزایش ارتفاع انعطاف پذیری سد بیشتر شده و شتاب در تاج کاهش می یابد یعنی سدهای با ارتفاع کمتر یا فرکانس طبیعی بالاتر، به مقدار

الاستیک باشد. این پدیده در شکلهای گوناگون قابل تصور، در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آنها به صورت نمودارهایی به شرح زیر ارائه و بحث می شود.

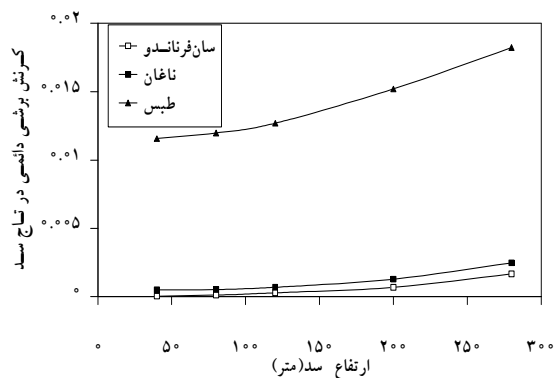
۱- مقایسه تاثیر نگاهت زلزله های ناغان، طیس و سانفرناندو روی یک سد مشخص با ارتفاع معین، نشان می دهد که چون زلزله های قوی مانند ناغان (شتاب حداکثر $7/04 \text{ m/s}^2$) و طیس (با شتاب حداکثر $9/15 \text{ m/s}^2$) موجب پلاستیک شدن بخشهایی از بدنه سد می گردد، لذا نباید انتظار داشت که در تاج سد افزایش شتاب مشاهده شود، برخلاف زلزله های ضعیف مثل سانفرناندو (با شتاب حداکثر $2/13 \text{ m/s}^2$) که چون منجر به پلاستیک شدن جسم سد نمی شود، در امتداد ارتفاع سد، تقویت شدن شتاب محسوس است. در شکلهای (۲۹) و (۳۰) مقادیر شتاب افقی در ارتفاع برای دو زلزله "ناغان" و "سانفرناندو" نشان داده شده است.



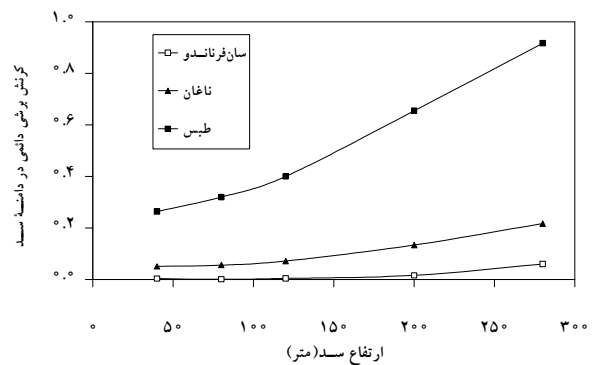
شکل ۳۳- رابطه بین تغییر مکان افقی دائمی در تاج سد نسبت به ارتفاع سد در اثر سه زلزله مشخص



شکل ۳۲- رابطه بین تغییر مکان افقی دائمی در دامنه سد نسبت به ارتفاع سد در اثر سه زلزله مشخص



شکل ۳۵- رابطه بین کرنش برشی دائمی در تاج سد نسبت به ارتفاع سد در اثر سه زلزله مشخص



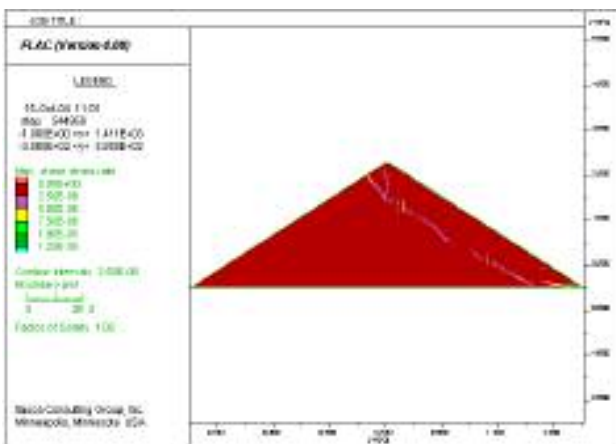
شکل ۳۴- رابطه بین کرنش برشی دائمی در دامنه سد نسبت به ارتفاع سد در اثر سه زلزله مشخص

۴- مقادیر ضریب اطمینان پایداری به شیوه شبه‌استاتیکی برای سدهای با ارتفاع متفاوت و تحت نگاشتهای مختلف در جدول (۸) آمده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع، ضریب اطمینان شبه‌استاتیکی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه شکل‌های (۳۶) و (۳۷)، سطوح گسیختگی را به ترتیب برای سدهای ۱۲۰ و ۲۸۰ متری نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که سطح گسیختگی در سد ۱۲۰ متری سطحی کم عمق است در حالی که در سد ۲۸۰ متری یک گسیختگی عمیق اتفاق افتاده است یعنی با افزایش ارتفاع سطح لغزش عمیق‌تر شده و ضریب اطمینان پایداری کاهش یافته است. یکی از عواملی که در این مطالعه مورد تحلیل قرار گرفت، ارتباط بین اندازه مناسب عرض تاج سد با ارتفاع آن در شرایط

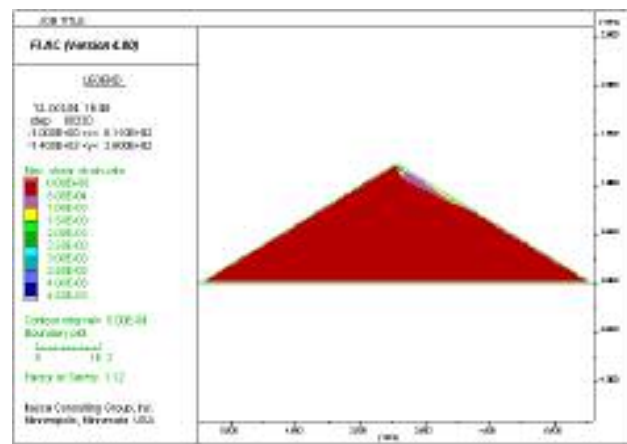
بیشتری شتاب در منطقه تاج سد را تقویت می‌کنند. ۳- شکل‌های (۳۲) تا (۳۵) نمودار تاثیر ارتفاع سد را بر جابه‌جایی افقی و کرنش برشی نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع، جابه‌جایی افقی در تاج (و همچنین کلیه نقاط بدنه سد) افزایش یافته و به عبارت دیگر ناپایداری و لغزش برای یک نگاشت معین در بدنه سدهای بزرگتر محتمل‌تر است. دقیقاً این مسئله برای کرنش‌های برشی نیز صادق است. یعنی با افزایش ارتفاع، کرنش برشی افزایش یافته و در دامنه‌ها دارای حداکثر مقدار است. لازم به ذکر است که در شکل‌های (۳۲) تا (۳۵) نقطه‌ای در دامنه انتخاب شده است که دارای بیشترین جابه‌جایی افقی و یا بیشترین کرنش برشی بوده است.

جدول ۸- مقادیر ضریب اطمینان برای سدهای با ارتفاعهای مختلف و در برابر نگاشتهای متفاوت

ارتفاع سد	سانفرناندو	ناغان	طبس
۴۰	۱/۶۱	۱/۱۳	۱/۰۱
۸۰	۱/۵۹	۱/۱۱	۱
۱۲۰	۱/۵۶	۱/۰۸	۰/۹۷
۲۰۰	۱/۵۴	۱/۰۵	۰/۹۲
۲۸۰	۱/۵۱	۱/۰۲	۰/۷۹



شکل ۳۷- خطوط تراز نرخ کرنش برشی و محل گسیختگی بدنه سد برای سد ۲۸۰ متری در برابر زلزله "ناغان"



شکل ۳۶- خطوط تراز نرخ کرنش برشی و محل گسیختگی بدنه سد برای سد ۱۲۰ متری در برابر زلزله "ناغان"

$$B = \frac{5}{3}(H)^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

$$B = 3.6(H)^{\frac{1}{3}} - 3 \quad (۵)$$

در کلیه معادلات فوق، B عرض تاج و H ارتفاع سد بر حسب متر است.

به احتمال قوی یکی از دلایل ارتباط عرض تاج با ارتفاع سد، در نظر گرفتن ارتعاشهای افقی حاصل از عملکرد زلزله بر سد است که چون با افزایش ارتفاع سد انتظار می رود که شتابها، کرنشها و جابه جاییها در قله سد افزایش یابد، لذا هرچه ارتفاع سد بزرگتر باشد لازم است که پتانسیل مقاوم سازی تاج سد قویتر و از جمله عرض تاج بزرگتر گرفته شود تا در برابر نیروهای برشی افقی مصونیت داشته باشد. در مطالعه حاضر، سدهای با ارتفاع معین و با مقادیر متغییر

لرزه ای است. یادآوری می شود که معادلات متعددی در کتابها و دستورالعملهای ساخت سدهای خاکی موجود است که ارتباط عرض تاج سد را با ارتفاع آن تعیین کرده است و غالباً علت منطقی این ارتباط مشخص نیست. عمده این معادلات عبارت اند از [۲۳]:

الف- سدهای خاکی متوسط بین ۲۰ تا ۶۰ متر (USBR)

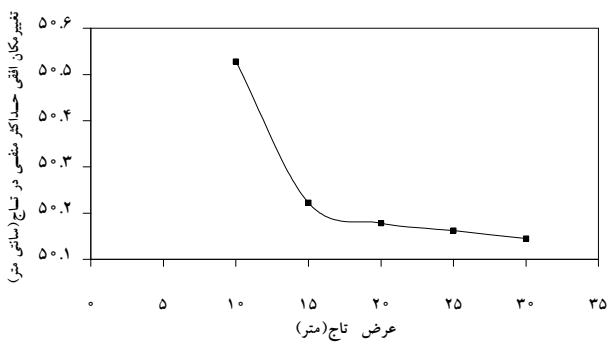
$$B = 0.55\sqrt{H} + 0.2H \quad (۱)$$

ب- سدهای خاکی متوسط بین ۶۰ تا ۱۵۰ متر (USBR)

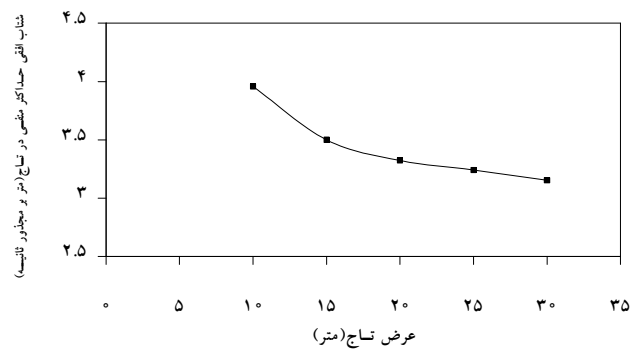
$$B = 3.6(H)^{\frac{1}{3}} \quad (۲)$$

$$B = 1.65(H + 1.5)^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

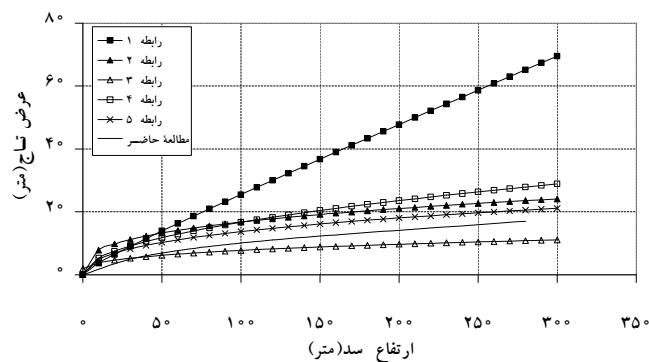
ج- در ژاپن نیز برای انتخاب عرض تاج سدهای مرتفع، معادلات زیر پیشنهاد شده است:



شکل ۳۹- رابطه جابه‌جایی افقی حداکثر منفی در تاج سد نسبت به عرض تاج سد برای زلزله "ناغان"



شکل ۳۸- رابطه شتاب حداکثر منفی در تاج سد نسبت به عرض تاج سد برای زلزله "ناغان"



شکل ۴۰- رابطه عرض تاج با ارتفاع سد در آیین‌نامه‌های مختلف و مقایسه آنها با نتایج تحقیق حاضر

از محاسبات اخیر مبتنی بر حداقل کرنشها (یا جابه‌جاییها) حد متعادلی را نشان می‌دهد که در هر حال مقادیری کوچکتر از مقادیر استاندارد ژاپنی است و به عبارت دیگر استاندارد ژاپنی حد بالایی و قابل اطمینان را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی، بررسی پایداری آنها و تحلیل پاسخ دینامیکی سدهای خاکی معین به ارتعاشات لرزه‌ای با کاربرد نرم‌افزار "فلک" دوبعدی نسخه ۴ انجام شد. در این راستا مقاطع فرضی متعددی از سدهای خاکی بر روی بستر سنگی در برابر زلزله‌های مختلف معین تحلیل دینامیکی شد و وضعیت پایداری یا گسیختگی دامنه سد، تاثیر ارتفاع بر پایداری و چگونگی توزیع شتاب در امتداد ارتفاع از قاعده به سمت تاج سد و نیز اثر ارتفاع سد بر

عرض تاج مورد محاسبه قرار گرفت و مشاهده شد که جابه‌جاییها و کرنشهای ایجاد شده در تاج سدها برای مقادیر کوچک عرض تاج، بسیار زیادتر از مقادیر متناظر آنها برای مقادیر بزرگ عرض سد (با سایر شرایط یکسان) است. نمودارهای مربوط به این تغییرات ترسیم شد و از آنها عرض حداقل لازم به دست آمد. مشاهده شد که با افزایش عرض تاج سد، شتاب و تغییرمکان در تاج سد کاهش می‌یابد. شکل‌های (۳۸) و (۳۹) نمونه‌ای از این نوع نمودارها را برای سد ۲۸۰ متری نشان می‌دهند، هر چند تغییرات در حد چند میلیمتر در شکل (۳۹) از دیدگاه اجرایی قابل توجه نیست. مقادیر عرض حداقل لازم برای هر ارتفاعی، به صورت تابعی از ارتفاع در نمودار دیگری ترسیم شد که در این نمودار، معادلات متعارف ۱ تا ۵ نیز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. این نمودار مقایسه‌ای، شکل (۴۰) نشان می‌دهد که معادله حاصل

عرض تاج در شرایط لرزه‌ای بررسی شد و نمودارهای نشان دهنده نداشت شتاب، جابه جاییها و کرنشها به دست آمد. از این مطالعات مفصل نتایج کلی زیر حاصل شد:

۱- نرم افزار مذکور توانایی بسیار ارزشمند و دقیقی در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی و به عبارت عمومی تر سازه‌های ژئوتکنیکی دارد. به منظور ارزیابی صحت کاربرد نرم افزار، رفتار لرزه‌ای سدهای "لانگ‌ولی"، "سانتافله‌سیا" و "کارسینگتون" نیز مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج آنها با اندازه‌گیریهای واقعی و یا نتایج ارائه شده مربوط به این سدها که توسط دیگر محققان گزارش شده بودند، مقایسه شد و ملاحظه شد که روند کاربرد نرم افزار و استخراج نتایج کاملا منطقی و قابل اطمینان است.

۲- تاثیر عواملی چون ارتفاع سد و نوع مدل رفتاری انتخاب شده برای مصالح سد و نوع عملکرد زلزله (مثلا شتابنگاشت) از عوامل مهم و تعیین کننده مجموعه رفتار سد در برابر زلزله است و از این رو تاثیر متقابل این عوامل بر یکدیگر را باید در نظر گرفت.

۳- برخلاف آنچه به طور رایج پذیرفته شده است که افزایش یافتن شتاب زلزله از قاعده تا تاج سد همواره مورد انتظار است، این پدیده همگانی نیست و می توان آن را محدود به سدهای بسیار محکم (که رفتار آنها در ضمن عملکرد زلزله، الاستیک

باقی می ماند) و یا مربوط به زلزله‌های ضعیف دانست. متقابلا در زلزله های قوی و یا در سدهای خاکی که بخشهایی از آنها در اثر زلزله به وضعیت پلاستیک شدگی می رسند، شتاب زلزله در امتداد ارتفاع افزایش نمی یابد هرچند در عین حال بدنه سد به تدریج تسلیم شده و ممکن است فرو ریزد.

۴- از آنجاکه یکی از دلایل ارتباط عرض تاج با ارتفاع سد، در نظر گرفتن ارتعاشهای افقی حاصل از عملکرد زلزله بر سد است و از طرفی با افزایش ارتفاع، مقادیر جابه جاییها و کرنشهای برشی افزایش می یابد (هرچند که رفتار بدنه سد به طور عمده الاستیک باقی می ماند)، لذا هرچه ارتفاع سد بیشتر باشد، باید عرض تاج نیز بیشتر انتخاب شود. مقادیر عرض تاج لازم برای سدهای با ارتفاعهای متفاوت که از این تحقیق به دست آمده است به فرمول ارائه شده توسط آیین نامه ژاپن نزدیکتر است و این آیین نامه حد بالایی و قابل اطمینانی را نشان می دهد.

۵- در صورتی که پارامترهای انتخاب شده برای اجزای مختلف بدنه سد و مدل رفتاری آن صحیح و مناسب در نظر گرفته شوند، با کاربرد این نرم افزار می توان وضعیت گسیختگی احتمالی بدنه سد در برابر زلزله و نیز ضریب اطمینان پایداری آن را در شرایط تحلیل دینامیکی و با دقت مورد بررسی قرار داد.

واژه نامه

- | | | |
|-------------------------|----------------------|--|
| 1. FLAC | 17. Shake | 33. Zienkiewicz et al. |
| 2. Gazetas | 18. Idriss et al. | 34. Swan Dyn4 |
| 3. Dakulas | 19. Lysmer et al. | 35. Muraleethuran et al. |
| 4. Abdel-Ghafar & Scott | 20. Quad 4 | 36. Dysac 2 |
| 5. Sanfernando | 21. Flush | 37. cyclic |
| 6. Santa Felecia | 22. Martin et al. | 38. Rayleigh |
| 7. Prevost et al. | 23. Desra-2 | 39. Fast Lagrangian Analysis of Continua |
| 8. Dynaflo | 24. Lee | 40. zone of continua |
| 9. Elgamal | 25. Desra-2R | 41. Potts & Zdravkovic |
| 10. Griffiths | 26. Tara-3 | 42. Mammoth Lake |
| 11. Long Valley | 27. Plaxis | 43. Carsington |
| 12. Wieland & Malla | 28. Delf | 44. Iai |
| 13. Mattmark | 29. Cundall & Board | 45. Yiagos |
| 14. Finn | 30. Dynard | 46. Woodward |
| 15. Schnabel et al. | 31. Moriwaki et al. | |
| 16. Seed et al. | 32. Bounding surface | |

1. Gazetas g., "Seismic Response of Earth Dams : Some Recent Developments," *Soil. Dynamic. and Earthquake Engineering., State-of-the-Art issue*, Vol. 6, No. 1, pp 1-47,1985.
2. Gazetas G., and Dakoulas P., "Seismic Analysis and Design of Rockfill Dams: State-of-the-Art," *Soil Dynamic and Earthquake Engineering.*, Vol. 11, pp. 27-61, 1992.
3. Abdel-Ghaffar, A., M., and Scott, R., F., "Analysis of Earth Dam Response to Earthquakes." *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT12, pp. 1379-1404, 1979.
4. Prevost, J., H., Abdel-Ghaffar, A., M., and Lacy, S., "Nonlinear Dynamic Analysis of an Earth Dam," *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 6, pp. 882-897, 1985.
5. Elgamal, A., W., M., Abdel-Ghaffar, A., M., and Prevost, J., H., "2-D Elastoplastic Seismic Shear Response of Earth Dam : Theory," *ASCE, Journal of the Engineering Mechanics*, Vol. 113, No. 5, pp. 689-701, 1987.
6. Elgamal, A., W., M., Abdel-Ghaffar, A., M., and Prevost, J., H., "2-D Elastoplastic Seismic Shear Response of Earth Dam : Applications," *ASCE, Journal of the Engineering Mechanics*, Vol. 113, No. 5, pp. 702-719, 1987.
7. Abdel-Ghaffar, A., M., and Elgamal, A., W., M., "Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams: Theory," *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 11, pp. 1293-1308, 1987.
8. Elgamal, A., W., M., and Abdel-Ghaffar, A., M., "Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams : Applications," *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 11, pp. 1309-1325, 1987.
9. Griffiths, D., V., and Prevost, J., H., "Two and Three Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of the Long-Valley Dam," *Geotechnique*, Vol. 38, No. 3, pp. 367-388, 1988.
10. Wieland, M., and Malla, S., "Seismic Safety Evaluation of a 117m High Embankment Dam Resting on a Thick Soil Layer," *12th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, London, pp. 836-843, 2002.
11. Finn, W., D., L., Ledbetter, R., H., and Marcuson, W., F., *North American Practice for Evaluating the Seismic Safety of Embankment Dams*. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed), Balkema, Rotterdam, 1997.
12. "FLAC's Manual." Itasca Consulting Group, Inc. Thresher Square East, 708 South Third Street, Suite 310, Minneapolis, Minnesota 55415 USA.
۱۳. مهندسین مشاور مهتاب قدس، "گزارشات طراحی سد پانزده خرداد،" ۱۳۶۸.
14. www.nisee.berkeley.edu
15. Kuhlmeier, R., L., and Lysmer, J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems." *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 99, No. SM5, pp. 421-427, 1973.
16. Potts, D., M., and Zdravkovic, L., *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering : Application*, Thomas Telford Publishing, 2001.
17. Yiagos, A., N., and Prevost, J., H., "Two-Phase Elasto-Plastic Seismic Response of Earth Dams: Applications." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 7, pp. 371-381, 1991.
18. Woodward, P., K., and Griffiths, D., V., "Non-linear Dynamic Analysis of the Long Valley Dam." *Compute Methods and Advances in Geomechanics*, Vol. 11, No. 6, PP. 635-644, 1994.
19. Woodward, P., K., and Griffiths, D., V., "Influence of Viscous Damping in the Dynamic Analysis of an Earth Dam Using Simple Constitutive Models." *Computers and Geomechanics*, Vol. 19, No. 3, pp. 245-263, 1996.
20. Skempton, A. W., and Vaughan P. R., "The Failure of Carsington Dam." *Geotechnique*, Vol 43, No. 1, pp. 151-173, 1993.
21. Rocke, G., "Investigation of the Failure of Carsington Dam." *Geotechnique*, Vol. 43, No. 1, pp. 175-180, 1993.
22. Rowe, P., W., "A Reassessment of the Causes of the Carsington Embankment Failure," *Geotechnique*, Vol 41, No. 3, pp. 395-421, 1991.
۲۳. وفائیان، م، "سدهای خاکی"، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.