

بررسی توزیع تنش- کرنش دینامیکی سدهای خاکی در حالات مختلف VEGM

محمد داودی*^۱، آرش رزم خواه^۲ و علی جواهری^۳

^۱ استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

^۳ کارشناسی ارشد عمران، شرکت مهندسی مشاور ایران استن

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۵/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۸/۲۳، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۹/۳۰)

چکیده

در مطالعه حاضر، تأثیر تغییرات مکانی حرکت زمین لرزه بر پاسخ احتمالی سد خاکی مسجد سلیمان مورد بررسی قرار گرفته است. زمین لرزه ورودی به صورت احتمالاتی و در ده حالت مختلف، با لحاظ کردن دو اثر عبور موج و عدم انسجام شبیه‌سازی شده است. همچنین، تحلیل ارتعاش تصادفی بدنه سد با استفاده از مدل اجزای محدود دو بعدی در حالت فونداسیون صلب، جهت برآورد پاسخ سد مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه توزیع تنش‌های σ_x ، σ_y ، τ_{xy} ، کرنش برشی γ_{xy} و همچنین مقادیر حداکثر این پاسخ‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با غیریکنواخت‌تر شدن محرک ورودی، تمامی پاسخ‌های سد شامل تنش‌ها، کرنش‌ها و جابجایی در جهت بالادست- پائین‌دست سد افزایش چشمگیری می‌یابند بطوریکه بسته به حالات مختلف تحلیل و نوع پاسخ، این افزایش از حدود ۵۰٪ تا ۱۸۰٪ تغییر می‌کند. همچنین پاسخ‌های سد به تعداد دسته بندی $S(f)$ حساس می‌باشد ولی به تابع انسجام بکار رفته حساسیت چندانی ندارد.

واژه‌های کلیدی: رفتار لرزه‌ای، سد خاکی، محرک چندتکیه‌گاهی، تحریک زلزله.

مقدمه

توزیع غیریکنواخت زلزله باشد [۱ و ۲]. از سوی دیگر، در مطالعه رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی، گرچه به نظر می‌رسد با افزایش نسبت طول به ارتفاع سد می‌توان به جای تحلیل‌های سه بعدی از تحلیل‌های دو بعدی استفاده نمود اما باید توجه داشت که در این صورت، تحریک‌های متغیر تکیه‌گاهی احتمالاً تأثیر بیشتری بر پاسخ بدنه سد خواهند داشت و لذا در این حالت فرض تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی، می‌تواند در پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل‌ها، اثرات گمراه‌کننده داشته باشد.

در مقاله حاضر و در راستای پاسخگویی به برخی سوالات مذکور، پس از بررسی خصوصیات و شرح برخی انواع حالات مدلسازی تحریک ورودی SVEGM، به مطالعه پاسخ لرزه‌ای یک سد خاکی نمونه در ایران در حالات مختلف تحریک ورودی پرداخته خواهد شد و توجه ویژه‌ای به نحوه تغییر توزیع تنش و کرنش در بدنه سد مذکور در حالات مختلف تحریک معطوف خواهد گردید.

مطالعاتی که تاکنون بر روی سازه‌های طویل در دنیا انجام شده است، تغییراتی در تحریک ورودی زلزله در نقاط مختلف تکیه‌گاهی (Spatial Variation of Earthquake Ground Motion, SVEGM) نشان می‌دهد. بر اساس این مطالعات به هنگام زلزله، بسته به وسعت سازه، پی پیرامون آن، خصوصیات مختلف مصالح پی، اثر مسیر موج، عدم انسجام و یکپارچگی و شرایط مختلف ساختگاه، تحریک‌های ورودی نسبت به یکدیگر متفاوت بوده و لذا فرض تحریک یکنواخت دارای تقریب می‌باشد [۱]. از طرف دیگر، پاسخ لرزه‌ای سازه‌های طویل مانند پلها در حالت تحریک یکنواخت نیز متفاوت از تحریک متغیر تکیه‌گاهی است.

در تحلیل‌های لرزه‌ای مرسوم در سدهای خاکی، پاسخ سد به تحریک‌های یکنواخت در مرز مشترک پی سد و محیط نیمه بینهایت محاسبه می‌شود در حالیکه مطالعات محدود انجام شده در سدهای خاکی نیز نشان می‌دهد تنش‌های دینامیکی حاصل در سد در اثر توزیع یکنواخت حرکت زمین می‌تواند متفاوت از تنش‌های حاصله در اثر

مشخصات سد و سابقه مطالعات صورت گرفته

سد سنگریزه‌ای مسجد سلیمان با ارتفاع 177 متر از پی سنگی، طول تاج 492 متر، هسته رسی قائم و پوسته سنگریزه‌ای، حجم بدنه سد در حدود 13.4 میلیون متر مکعب از مجموعه سدهای بتنی و خاکی احداث شده بر روی رودخانه کارون می‌باشد که در فاصله 25 کیلومتری شمال شرق شهر مسجد سلیمان و در 26 کیلومتری پایین دست سد شهید عباسپور واقع شده‌است. مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد بستر، تکیه‌گاه‌های بدنه سد و بخش اعظمی از مخزن بر روی سنگ‌های سازند بختیاری قرار دارند. این سازند عمدتاً در واحدهای سنگی فوقانی، از کنگلومرای سخت با میان لایه‌های بسیار نازک رسی تشکیل یافته است. مطالعات لرزه‌خیزی مشاور نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن تأثیر کلیه گسل‌های فعال منطقه، حداکثر شتاب افقی و قائم زمین برای لرزه مبنای طرح DBE برابر 0.26g و 0.19g، برای حداکثر لرزه طراحی MDE برابر 0.34g و 0.26g و برای حداکثر لرزه محتمل MCE برابر 0.45g و 0.36g برآورد می‌گردد [۳].

به منظور تعیین مشخصات دینامیکی و تدقیق مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های ارتعاشی درجا شامل آزمایش ارتعاش اجباری، آزمایش ارتعاش محیطی و ثبت پاسخ سد به انفجارهای مختلف سائیتی بر روی سد مذکور انجام شده‌است [۴]. سابقه مطالعات مذکور بر روی سد مسجد سلیمان به همراه دستگاه‌های شتابنگار دائمی مستقر در نقاط مختلف بدنه سد، سد خاکی مسجد سلیمان را در موقعیتی قرار داده است که مطالعات دقیق‌تر لرزه‌ای می‌تواند آنرا به یک سد مرجع تبدیل کند تا بتوان سطح استاندارد طراحی و اجرای سدهای خاکی در کشور را مورد ارزیابی دقیقتر قرار داد.

مدل اجزای محدود سد

در این مطالعه، مدل اجزای محدود دو بعدی مقطع عرضی میانی سد مطابق شکل 1، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-9 [۵] مورد تحلیل قرار گرفته است. جهت انتخاب منصف‌سازی بهینه حالات مختلف تعداد اجزا بررسی شده و گزینه شامل ۳۳۱ جزء چهار گره‌ای و ۳۸۴ گره

انتخاب شده‌است [۴]. همچنین، رفتار لرزه‌ای سد در حالت مدلسازی خطی بررسی شده است. این در حالی است که جهت بررسی رفتار سد تحت زلزله‌های قویتر مانند حداکثر زلزله محتمل MCE، باید مدل غیرخطی سد مورد مطالعه قرار گیرد و تغییرات فشار آب حفره‌ای نیز لحاظ شود. از آنجائیکه با استفاده از نرم افزارهای موجود، اعمال مدل‌های رفتاری غیرخطی با در نظر گرفتن کلیه حالات SVEGM امکان‌پذیر نیست، بنابراین در تحقیق حاضر، در مدل کردن حالات مختلف SVEGM در محرک ورودی، به فرض رفتار خطی مصالح اکتفا شده‌است و با محدود کردن محرک ورودی زمین لرزه به زلزله‌های متوسط و ضعیف، مدلسازی عددی با استفاده از تحلیل ارتعاش تصادفی صورت گرفته‌است.

مقادیر پارامترهای دینامیکی استفاده شده در مدل‌سازی عددی بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های ژئوفیزیکی انجام شده بر روی بدنه سد، و اصلاح مقادیر پارامترهای مشاور سد بر اساس آزمایش‌های ارتعاشی درجا و مدل عددی، برآورد شده‌اند [۶]. با توجه به سختی بالای بستر سنگی سد که از جنس کنگلومرای سخت تشکیل شده است، پی سد به صورت صلب انتخاب شده‌است.

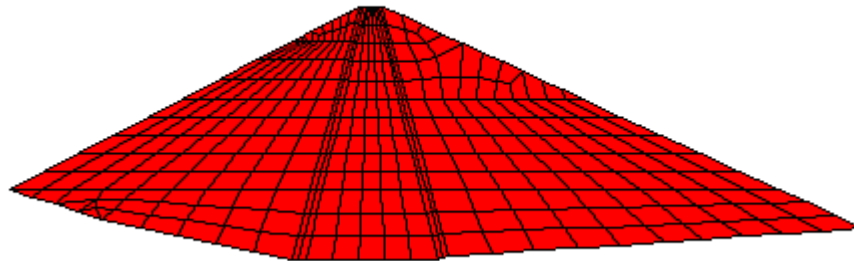
علیرغم فرض خطی در بخش تحلیل دینامیکی، رفتار مصالح در بخش تحلیل استاتیکی به صورت غیرخطی فرض (باتوجه به دقت بالاتر و امکان انجام آن) و از مدل رفتاری الاستیک - پلاستیک کامل (با معیار دراکر - پراگر) استفاده شده‌است. جهت انتخاب مشخصات مصالح مختلف بدنه سد، چنین فرض شده است که در اولین آبیگری، رفتار زهکشی نشده در هسته اتفاق می‌افتد که در نتیجه می‌توان از پارامترهای حاصل از آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) در حالت عدم اشباع کامل استفاده کرد. همچنین پارامترهای مصالح پوسته و فیلتر نیز باتوجه به نفوذپذیری بسیار بالا، از آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD) بدست می‌آید [۴].

لازم به ذکر است در تحقیق حاضر و در برآورد تنش‌های اولیه بدنه سد که با انجام تحلیل استاتیکی صورت گرفته است، از فرض واقع‌بینانه آبیگری سریع مخزن (که با وضعیت سد در زمان آزمایش‌های ارتعاشی درجا نیز سازگاری دارد)

با علم به این موضوع و باتوجه به اینکه تاکنون، مراحل طراحی مهمترین سدهای خاکی کشور از جمله سدهای مارون و مسجدسلیمان (و همینطور، بسیاری از سدهای خاکی دنیا) با انجام تحلیلهای دوبعدی صورت گرفته است، بنابراین در تحقیق حاضر، احساس نیاز شد که صحت فرض تحریک یکنواخت در تحلیلهای دوبعدی سدهای خاکی به چالش کشیده شود. لازم به ذکر است در ادامه تحقیق حاضر و در قالب یک طرح جامع مطالعات SVEGM بر روی سدهای خاکی، مطالعات مدل‌های عددی سه‌بعدی نیز به‌مراه تحلیل‌های تاریخیچه زمانی با روش تنش مؤثر، رفتار غیر خطی مصالح و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری پی در حال انجام است.

استفاده شده‌است. در این حالت، فرصتی برای برقراری جریان حالت دائم در داخل هسته سد ایجاد نمی‌شود بنابراین، بارگذاری اعمال شده بر مدل عددی به صورت اعمال فشار هیدرواستاتیک بر رویه بالادست هسته و نیروی غوطه‌وری در پوسته و فیلتر اشباع در نظر گرفته شده است. با توجه به تمرکز مقاله حاضر بر روی ارائه نتایج تحلیل دینامیکی، از ذکر جزئیات تحلیل استاتیکی خودداری می‌شود و برای مشاهده پارامترهای مصالح و نتایج تحلیلهای استاتیکی، به مرجع [۱۳] ارجاع داده می‌شود.

باتوجه به مدل عددی دوبعدی معرفی شده در شکل ۱ و لحاظ کردن ابعاد هندسی سد مورد مطالعه، ممکن است صحت نتایج تحلیل با ابهاماتی مواجه گردد. این ابهام می‌تواند از اینجا ناشی شود که در سدهای خاکی با نسبت طول به ارتفاع کوچک، تأثیر سختی تکیه‌گاه‌های کناری در رفتار لرزه‌ای مدل دوبعدی سد در نظر گرفته نمی‌شود. لیکن



شکل ۱: مدل دو بعدی اجزای محدود سد مورد مطالعه

در این تحقیق، مدل احتمالاتی SVEGM شامل هر دو اثر عدم انسجام و عبور موج، جهت مدل‌سازی حرکت ورودی لرزه‌ای در جهت بالا دست - پایین دست، مورد استفاده قرار گرفته و از اثر شرایط ساختگاه به علت سنگی بودن تکیه‌گاه بدنه سد صرف‌نظر شده‌است. در این مدل، تابع چگالی طیفی متقاطع بین شتاب نگاشت‌های نقاط تکیه‌گاهی 1 و m به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

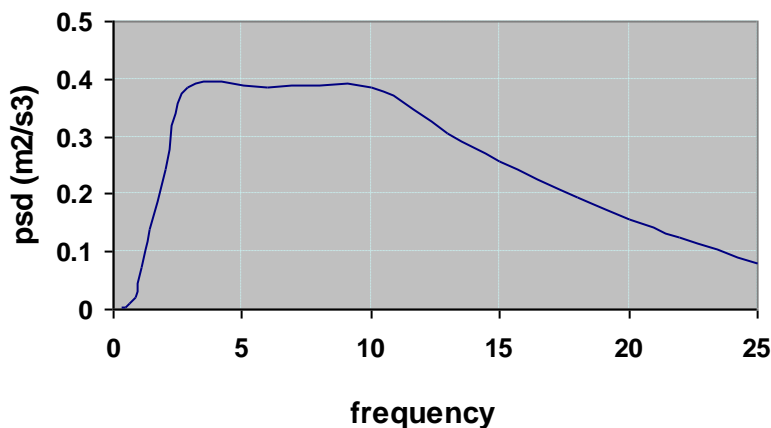
$$S_{im}(f) = s(f) |\gamma(v, f)| e^{-i2\pi f v / V} \quad (1)$$

مدل‌سازی تحریک ورودی زمین لرزه

تغییرات مکانی حرکت زمین لرزه به سه عامل اثر عبور موج (wave passage effect)، اثر عدم انسجام (incoherence effect) و اثر شرایط ساختگاه (site effect) نسبت داده می‌شود. SVEGM را می‌توان به دو صورت تعینی و احتمالاتی مدل نمود. در مدل‌سازی تعینی، تنها اثر عبور موج با در نظر گرفتن یک تأخیر زمانی بین نقاط تکیه‌گاهی لحاظ می‌گردد در حالیکه در روش احتمالاتی، اثر هر سه عامل تأثیرگذار در مدل کردن SVEGM مدنظر قرار می‌گیرد [۲ و ۷].

تابع چگالی طیفی

جهت برآورد تابع چگالی طیفی در مطالعه حاضر، $s(f)$ ، طیف فوریه ارائه شده توسط مشاور طرح با ضریب 1.5 مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. دلیل بزرگنمایی این طیف، بررسی تفاوت پاسخ سد در حالات مختلف تحریک تحت اثر زلزله‌های شدیدتر بوده است. تابع چگالی طیفی محاسبه شده، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: تابع چگالی طیفی

[۱۰] انتخاب شده‌اند. در ادامه به بیان دلیل انتخاب این مدل‌ها و همچنین مقادیر پارامتری آنها پرداخته می‌شود: - مدل Harichandran & Vanmarcke (1986) مطرح‌ترین و متداول‌ترین مدل در این زمینه می‌باشد:

$$|\gamma(v, f)| = A \exp \left[-\frac{2v}{\alpha \theta(f)} (1 - A + \alpha A) \right] + (1 - A) \exp \left[-\frac{2v}{\theta(f)} (1 - A + \alpha A) \right] \quad (2)$$

$$\theta(f) = k \left[1 + (f / f_0)^b \right]^{-1/2} \quad (3)$$

که در این روابط، A ، α ، k ، f_0 و b ، پارامترهایی هستند که با توجه به مشخصات هر زلزله و ساختگاه آن برآورد می‌شوند [۹]. در تحقیق حاضر، از مقادیر پارامتری مدل

که در این رابطه، $s(f)$ تابع چگالی طیفی، $|\gamma(v, f)|$ تابع انسجام، v فاصله بین تکیه گاههای l و m ، V سرعت ظاهری انتشار و f فرکانس بر حسب Hz می‌باشند که در ادامه به شرح چگونگی انتخاب هر یک از پارامترهای فوق پرداخته می‌شود.

سرعت ظاهری انتشار

سرعت ظاهری انتشار موج، با توجه به سرعت موج برشی حاصل از آزمایش ژئوسایز میک سطحی در پی [۴] و با زاویه انتشار فرضی 45 درجه، برابر 1840 متر بر ثانیه اختیار شده است که نشانگر سنگی بودن پی سد می‌باشد.

تابع انسجام

تفاوت اصلی در مدل‌سازی احتمالی SVEGM در تحقیقات گذشته، مدل انسجام به کار رفته است. بعد از نصب آرایه 1-SMART در کشور تایوان [۲]، مدل‌های مختلفی از تحقیقات مختلف نتیجه گیری شده است. دلیل تفاوت این مدل‌ها، تفاوت در رویدادهای زلزله و ساختگاههای متفاوت، تفاوت در روند عددی استفاده از اطلاعات ثبت شده و تفاوت در توابع میان‌یابی مختلف می‌باشد. در تحقیق حاضر، از میان توابع انسجام مطرح، سه مدل انسجام Hindy & Novak(1980) [۸]، Harichandran & Abrahamson(1993) و Vanmarcke(1986) [۹]

سپس با توجه به این طول‌ها، فاصله ۷ در رابطه‌های توابع انسجام و طیف فاز را در نظر گرفت.

در تحقیق حاضر، جهت مطالعه تأثیر این تقسیم‌بندی در پاسخ سد، عرض سد در کف به سه حالت متفاوت تقسیم بندی شده‌است. حالت‌های ۴ دسته (145.75 متر)، ۵ دسته (116.6 متر)، و ۶ دسته (97.17 متر) برای تحلیل انتخاب شده‌اند. بنابراین سه حالت دسته بندی $S(f)$ و برای هر حالت تقسیم‌بندی سه حالت مدل انسجام، انتخاب شده‌اند که مجموعاً ۹ حالت تحلیل را در بر می‌گیرند و با احتساب حالت تحریک یکنواخت، در مجموع ۱۰ حالت تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده‌است. جهت معرفی، حالت‌های مختلف تحلیل ذکر شده به صورت جدول ۲ نامگذاری شده‌اند که بخش اول این نام بیانگر تعداد دسته های $S(f)$ و بخش دوم آن مخفف مدل انسجام به کار رفته می‌باشند. جهت مشاهده منحنی‌های انسجام حالات مذکور می‌توان به مرجع [۱۳] مراجعه نمود.

تحلیل ارتعاش تصادفی

در این مطالعه روش تحلیل ارتعاش تصادفی (Random Vibration Analysis) مورد استفاده قرار گرفته‌است. جزئیات روش تحلیل ارتعاش تصادفی خطی با استفاده از مدل المان محدود توسط Harichandran و wang در سال 1990 [۱۱] ارائه شده‌است. در این روش پاسخ کل به دو مؤلفه دینامیکی و شبه استاتیکی تفکیک می‌شود. با فرض ارتعاش مانا، می‌توان پاسخ را طبق رابطه ۵ تفکیک نمود:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_d}^2 + \sigma_{z_s}^2 + 2Cov(z_s, z_d) \quad (5)$$

که در این رابطه $\sigma_{z_s}^2$ و $\sigma_{z_d}^2$ ، به ترتیب پراش (واریانس) پاسخ شبه استاتیکی و دینامیکی، $Cov(z_s, z_d)$ هم‌پراشی (کواریانس) بین دو مؤلفه پاسخ شبه استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. پاسخ شبه استاتیکی، با صرف‌نظر کردن از اثرات دینامیکی (اینرسی و میرایی)، محاسبه می‌گردد [۱].

عمومی Harichandran، مطابق جدول ۱، استفاده شده‌است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدل عمومی (General) مدل Harichandran [۱۱]

A	α	k	f_0	b
0.736	0.147	5210	1.09	2.78

تحقیقات انجام شده توسط Santa-Cruz و همکاران در سال 2000 نشان می‌دهد نتایج بدست آمده از دو مدل Harichandran و Hindy & Novak، نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری دارد [۱۲]. رابطه ۴ مدل Hindy & Novak را نشان می‌دهد:

$$|\gamma(v, \omega)| = \exp\left\{- (\alpha v \omega)^\beta\right\} \quad (4)$$

در این مدل از مقادیر پارامتری Case II این مدل ($\beta=0.31, \alpha=0.0778$) استفاده شده‌است [۱].

- دلیل انتخاب مدل Abrahamson مستقل بودن این مدل از مشخصات زلزله و شرایط ساختگاه می‌باشد. همانطور که ذکر گردید، مقادیر پارامتری توابع مختلف انسجام، با توجه به مشخصات زلزله و ساختگاه آن محاسبه می‌گردند. در حالیکه مقادیر این پارامترها برای ساختگاه سد مسجدسلیمان موجود نیست، استفاده از مدل Abrahamson به دلیل مستقل بودن از شرایط زلزله و ساختگاه مد نظر قرار گرفته است [۱].

تعداد دسته‌های تحریک یکنواخت

یکی از چالش‌های مدل‌سازی احتمالاتی در این تحقیق، تعداد دسته‌های $S(f)$ می‌باشد. به این معنی که عرض سد در کف را می‌توان به تعداد دسته‌های متفاوتی تقسیم بندی نمود. به طور مثال عرض سد مسجدسلیمان در کف، 583 متر می‌باشد. این فاصله را می‌توان به عنوان مثال به 4 دسته 145.75 متری یا 5 دسته 116.6 متری تقسیم نمود.

نتایج حاصل از تحلیل

نتایج تحلیل ارتعاش تصادفی مدل بدنه سد در حالت تحریک ورودی یکنواخت نشان می‌دهد که در نظر گرفتن 15 مود ارتعاش برای همگرا نمودن پاسخ بدنه سد کفایت می‌نماید. به عنوان نمونه شکل ۳ حداکثر پاسخ تنش برشی در حالات از ۱ تا ۱۵ مود نشان می‌دهد. در ادامه به نحوه توزیع پاسخ‌ها در بدنه سد و مقایسه مقادیر حداکثر آنها پرداخته می‌شود.

کنتورهای تنش و کرنش دینامیکی

در این بخش، نحوه توزیع تنش‌های σ_x ، σ_y و τ_{xy} و کرنش برشی γ_{xy} در حالات مختلف تحلیل مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این کنورها، فقط نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی را نشان می‌دهند.

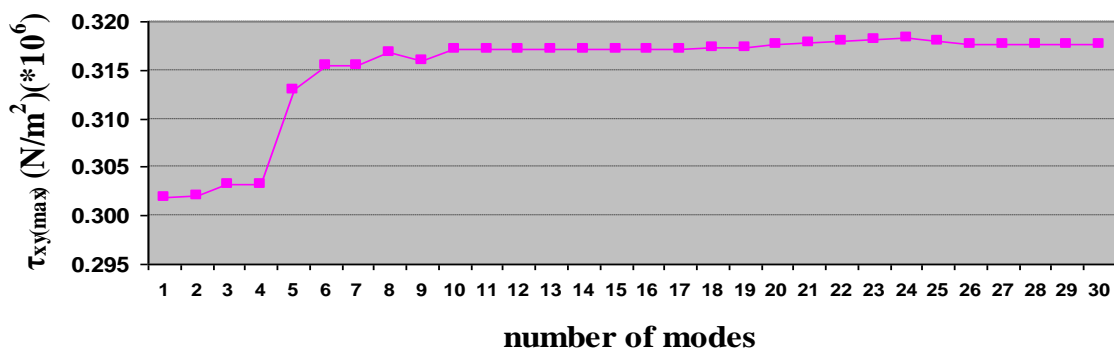
نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد، مقادیر و نحوه توزیع تنش σ_x در حالات مختلف دسته بندی $S(f)$ بسیار متفاوت است ولی در مجموع با غیریکنواخت‌تر شدن تحریک ورودی، مقادیر تنش σ_x افزایش می‌یابند. توزیع تنش σ_x در هر حالت دسته بندی $S(f)$ برای توابع انسجام مختلف، از تفاوت چندانی برخوردار نیست. مقادیر حداکثر تنش σ_x در حالت تحریک یکنواخت در پوسته پایین دست و در نیمه ارتفاع رخ می‌دهد. اما این مقادیر حداکثر، در تمام حالات تحریک غیر یکنواخت، در محل تماس هسته، فیلتر

پایین دست و پوسته پایین دست با تکیه‌گاه پدید می‌آید. لازم به ذکر است در حالت تعداد دسته بندی $(6S(f))$ ، توزیع تنش σ_x در بدنه سد از توزیع یکنواخت‌تری نسبت به سایر حالات برخوردار است. به عنوان نمونه، شکل ۴ تنش σ_x را در دو حالت $6S$ Harich و $uniform$ نشان می‌دهد.

مقادیر تنش σ_y نیز در حالات تحریک ورودی غیریکنواخت افزایش می‌یابند. نحوه توزیع تنش σ_y در حالات مختلف، از تفاوت کمتری نسبت به تغییرات توزیع σ_x برخوردار است. در حالت‌های مختلف دسته‌بندی، به استثناء حالت دسته‌بندی $(6S(f))$ ، نحوه توزیع تنش σ_y بسیار مشابه می‌باشد، اما در حالت دسته بندی $(6S(f))$ نحوه توزیع این تنش تغییر می‌کند. ضمن اینکه در هر حالت دسته‌بندی، توزیع تنش σ_y در حالات مختلف توابع انسجام بسیار مشابه است. بنابراین توزیع تنش σ_y ، به مانند توزیع تنش σ_x ، نسبت به تابع انسجام بکار رفته حساس نمی‌باشد. ضمن اینکه در تمامی حالات تحلیل به استثناء حالت دسته بندی $(6S(f))$ ، مقادیر حداکثر σ_y در قسمت‌های زیرین هسته متمایل به پوسته بالا دست پدید می‌آید. اما در حالت دسته بندی $(6S(f))$ ، مقادیر حداکثر σ_y در محل تماس فیلتر پایین دست و تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه، شکل ۵ تنش σ_y را در دو حالت $6S$ Harich و $uniform$ نشان می‌دهد.

جدول ۲: نام گذاری حالات مختلف تحلیل دینامیکی

نام حالت تحلیل	توضیح
Uniform	تحریک ورودی یکنواخت
4S Harich	تحریک با 4 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Harichandran
4S Hindy	تحریک با 4 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Hindy&Novak
4S Abrah	تحریک با 4 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Abrahamson
5S Harich	تحریک با 5 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Harichandran
5S Hindy	تحریک با 5 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Hindy&Novak
5S Abrah	تحریک با 5 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Abrahamson
6S Harich	تحریک با 6 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Harichandran
6S Hindy	تحریک با 6 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Hindy&Novak
6S Abrah	تحریک با 6 دسته تابع چگالی طیفی $S(f)$ و مدل Abrahamson

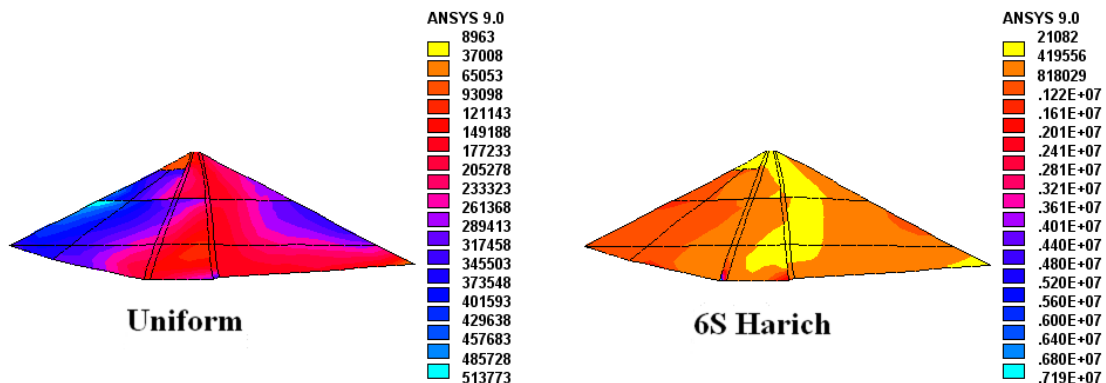


شکل ۳: حداکثر پاسخ τ_{xy} نسبت به تعداد مود

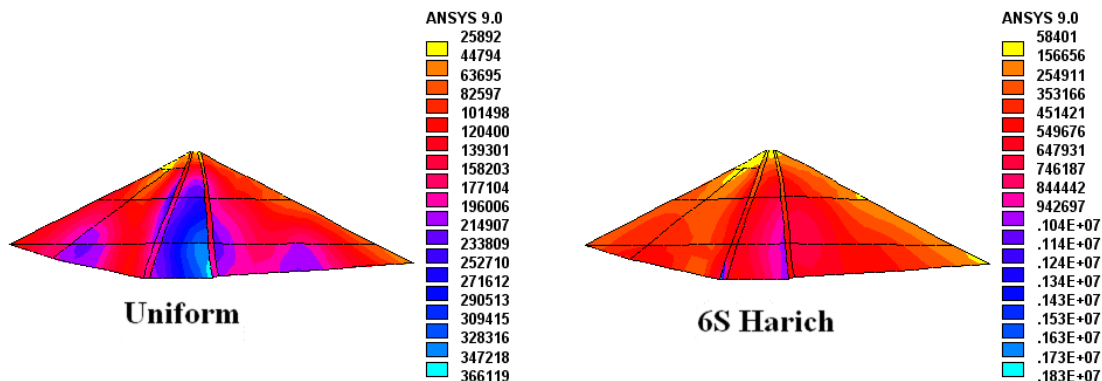
به مانند تنش برشی τ_{xy} ، در حالات مختلف بسیار مشابه می‌باشد. این نحوه توزیع به مانند τ_{xy} نسبت به حالات مختلف دسته بندی $S(f)$ و حالات مختلف توابع انسجام حساس نیست. در تمامی حالات تحلیل، مقادیر حداکثر کرنش برشی γ_{xy} ، در فیلتر بالادست اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه، شکل ۷ کرنش برشی γ_{xy} را در دو حالت **uniform** و **6S Harich** نشان می‌دهد. جهت مشاهده کنتورهای نتایج حالات مختلف تحلیل می‌توان به مرجع [۱۳] مراجعه نمود.

مقادیر تنش برشی τ_{xy} نیز در حالات تحریک ورودی غیریکنواخت افزایش می‌یابند. نحوه توزیع تنش برشی τ_{xy} در حالات مختلف بسیار مشابه می‌باشد. این نحوه توزیع نسبت به حالات مختلف دسته بندی $S(f)$ و همچنین حالات مختلف توابع انسجام به کار رفته، حساسیت چندانی ندارد. در تمامی حالات تحلیل، مقادیر حداکثر تنش برشی τ_{xy} تقریباً در نواحی مرکزی نزدیک به کف سد اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه، شکل ۶ تنش برشی τ_{xy} را در دو حالت **uniform** و **6S Harich** نشان می‌دهد.

مقادیر کرنش برشی γ_{xy} نیز در حالات تحریک ورودی غیریکنواخت افزایش می‌یابند. نحوه توزیع کرنش برشی γ_{xy}



شکل ۴: تنش σ_x در دو حالت تحلیل **uniform** و **6S Harich**

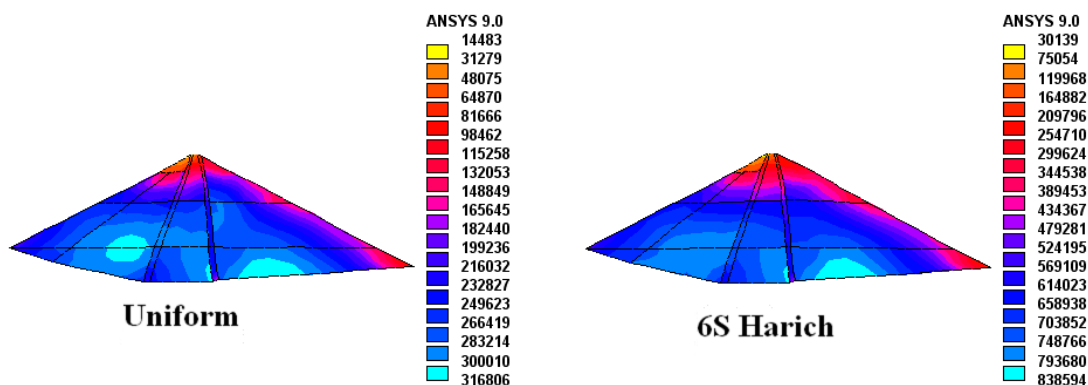


شکل ۵: تنش σ_y در دو حالت تحلیل Uniform و 6S Harich

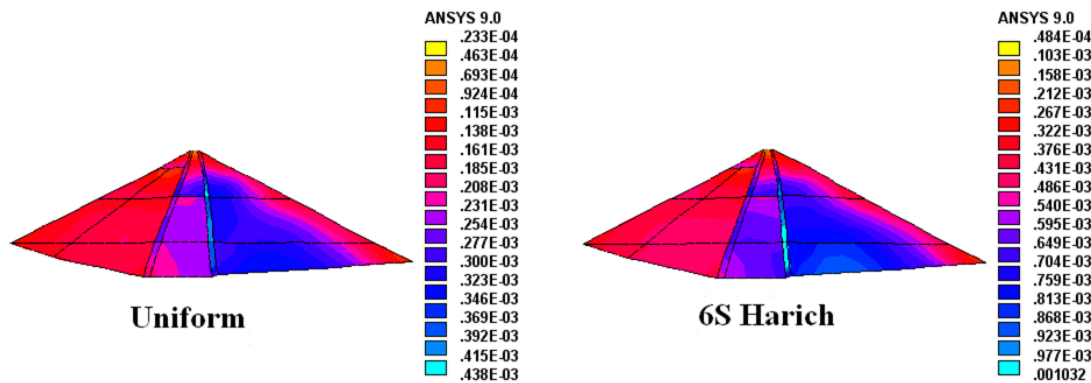
می‌دهد. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌گردد، با غیریکنواخت‌تر شدن تحریک ورودی، مقادیر حداکثر هر سه پاسخ افزایش چشمگیری می‌یابند. این افزایش بسته به حالات مختلف تحلیل، برای تنش برشی بین 73% تا 167%، برای کرنش برشی بین 55% تا 139% و برای جابجایی در جهت بالادست-پایین‌دست بین 73% تا 176% متفاوت می‌باشد.

مقادیر حداکثر پاسخ‌های دینامیکی

در مطالعه رفتار لرزه‌ای سیستم‌های خاکی، به طور معمول نحوه توزیع و مقادیر حداکثر تنش برشی و کرنش برشی در پتانسیل پایداری سیستم نقش تعیین کننده‌ای دارند. نحوه توزیع این پاسخها در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت به بررسی مقادیر حداکثر این پاسخها در حالات مختلف تحلیل پرداخته شده‌است. جدول ۳ مقادیر حداکثر پاسخ‌های تنش برشی، کرنش برشی و جابجایی در جهت بالادست-پایین‌دست (X) را نشان



شکل ۶: تنش برشی τ_{xy} در دو حالت تحلیل Uniform و 6S Harich



شکل ۷: کرنش برشی γ_{xy} در دو حالت تحلیل Uniform و 6S Harich

شده در تحقیق حاضر که نشان از افزایش توزیع تنش در بدنه سد در حالت تحریک SVEGM نسبت به یکنواخت را دارد و اتفاقاً، سازگاری مناسبی نیز با تنها مطالعه موردی موجود در ادبیات فنی دنیا در زمینه سدهای خاکی و همچنین سدهای بتنی و پلها دارد [۱ و ۲]، اهمیت بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی با لحاظ کردن تحریکات SVEGM را به مهندسين مشاور طراح سد نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نتایجی که در تحقیق حاضر بدست آمد با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در نرم‌افزار مورد استفاده جهت انجام تحلیل دینامیکی SVEGM سد خاکی مسجده سلیمان (از جمله محدودیت تحلیل طیفی در مقابل تحلیل تاریخچه زمانی، محدودیت تحلیل دوبعدی در مقابل سه‌بعدی و محدودیت تحلیل خطی در مقابل تحلیل تنش مؤثر و رفتار غیرخطی مصالح) قابل تفسیر است. بدیهی است جهت تعمیم‌دهی نتایج مطالعه موردی حاضر به سدهای خاکی، لازم است مطالعات مذکور بر روی سدهای خاکی دارای هندسه مختلف، مشخصات مصالح مختلف و سطوح مختلف زلزله طرح صورت گیرد و صحت نتایج حاصل از این مطالعات، با نتایج تحلیلهای دقیق‌تر در حوزه زمان و با روشهای غیرخطی کنترل گردد. هم‌اکنون، این بخش از مطالعات در حال انجام است.

پاسخ دینامیکی در مقطع میانه ارتفاع

به دلیل اینکه بازه کنتورهای ارائه شده در بخش‌های قبل یکسان نیست، امکان بررسی دقیق چگونگی افزایش تنش در بدنه سد میسر نمی‌باشد. جهت انجام این بررسی، مقطعی در میانه ارتفاع سد در نظر گرفته شده و مقادیر تنش در حالات مختلف تحلیل در این مقطع رسم گردیده است. مقادیر تنش‌های σ_x ، σ_y و τ_{xy} در مقطع مذکور به ترتیب در اشکال ۸ الی ۱۰ نشان داده شده‌اند. همانطور که از این اشکال ملاحظه می‌گردد، تأثیر SVEGM در افزایش تنش σ_x در پوسته‌ها بیش از قسمت‌های مرکزی (هسته و فیلترها) می‌باشد. در حالیکه نتیجه تنش σ_y کاملاً برعکس است و افزایش تنش σ_y در قسمت‌های مرکزی بیشتر از پوسته‌ها می‌باشد. یعنی تغییرات مکانی حرکت زمین‌لرزه موجب افزایش بیشتر تنش σ_x دینامیکی در پوسته‌ها و افزایش بیشتر تنش σ_y دینامیکی در قسمت‌های مرکزی (هسته و فیلترها)، نسبت به سایر نقاط سد می‌گردد. این درحالیست که افزایش تنش برشی تقریباً در تمام نواحی مشابه می‌باشد و ناحیه خاصی از افزایش بیشتری برخوردار نیست. علت وقوع این پدیده را می‌توان به ماهیت تحلیل‌های طیفی نسبت داد که پاسخ دینامیکی سد را از حاصل جمع مشارکت چندین مود اول ارتعاشی بدنه سد بدست می‌آورند. درواقع، وقوع پدیده مذکور به‌خوبی تأثیر تفاوت مودهای ارتعاشی بدنه سد را در دو حالت تحریک یکنواخت و تحریک متفاوت نقاط تکیه‌گاهی نشان می‌دهد که قبلاً در برخی مراجع به آن اشاره شده بود [۱]. در مجموع، نتایج مشاهده

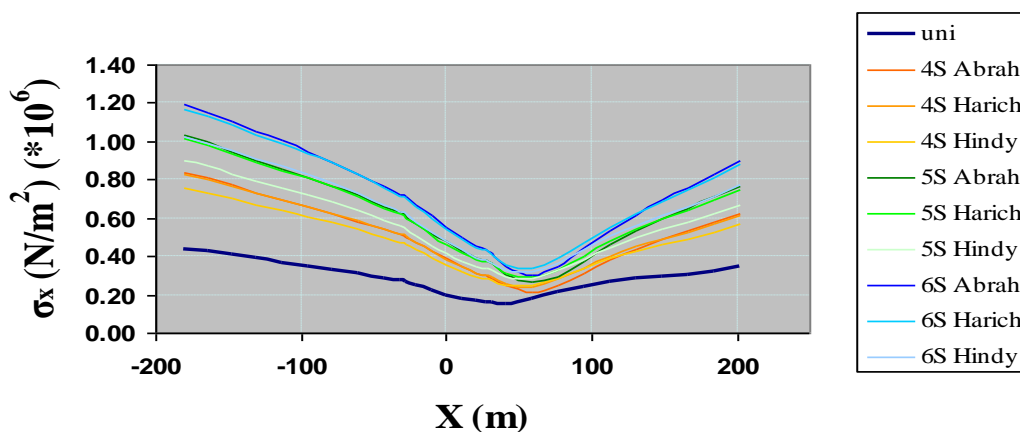
جدول ۳: مقادیر حداکثر پاسخها و درصد اختلاف نسبت به حالت یکنواخت

حداکثر تنش برشی (N/m^2)		حداکثر کرنش برشی		حداکثر جابجایی در جهت X (m)		حالت تحلیل
مقدار	درصد اختلاف نسبت به حالت یکنواخت	مقدار	درصد اختلاف نسبت به حالت یکنواخت	مقدار	درصد اختلاف نسبت به حالت یکنواخت	
317100	0	0.00044	0	0.0336	0	Uniform
591960	87	0.00073	66	0.0639	90	4S Harich
548380	73	0.00068	55	0.0581	73	4S Hindy
591500	87	0.00075	70	0.0655	95	4S Abrah
726130	129	0.00088	100	0.0774	130	5S Harich
654630	106	0.00079	80	0.0685	104	5S Hindy
731220	131	0.00090	105	0.0797	137	5S Abrah
837570	164	0.00102	132	0.0898	167	6S Harich
739450	133	0.00090	105	0.0782	133	6S Hindy
846940	167	0.00105	139	0.0926	176	6S Abrah

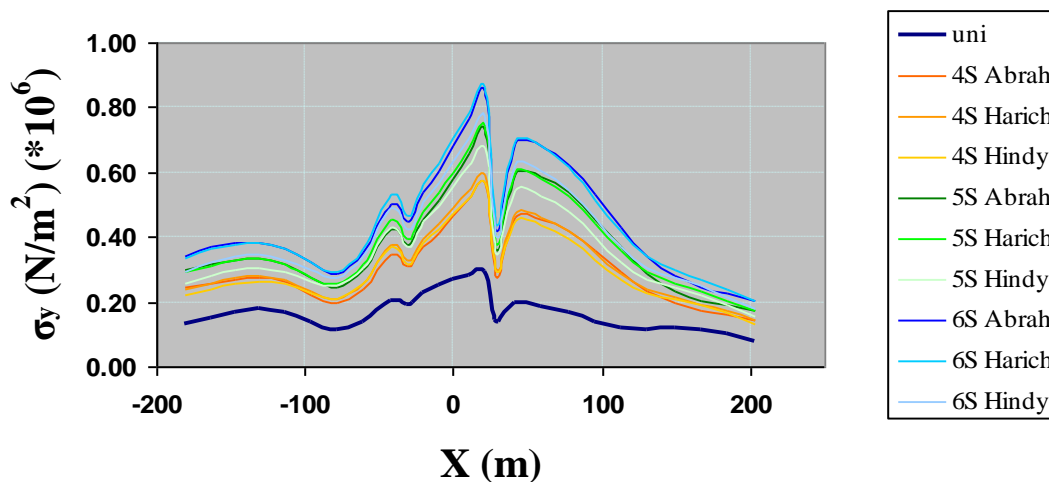
نتیجه گیری

در مقاله حاضر، تأثیر لحاظ کردن تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین لرزه در پاسخ لرزه‌ای یک سد خاکی نمونه در ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، مدل اجزای محدود دو بعدی سد تهیه شده و پاسخ دینامیکی بدنه سد به ده نوع مختلف محرک ورودی SVEGM با استفاده از

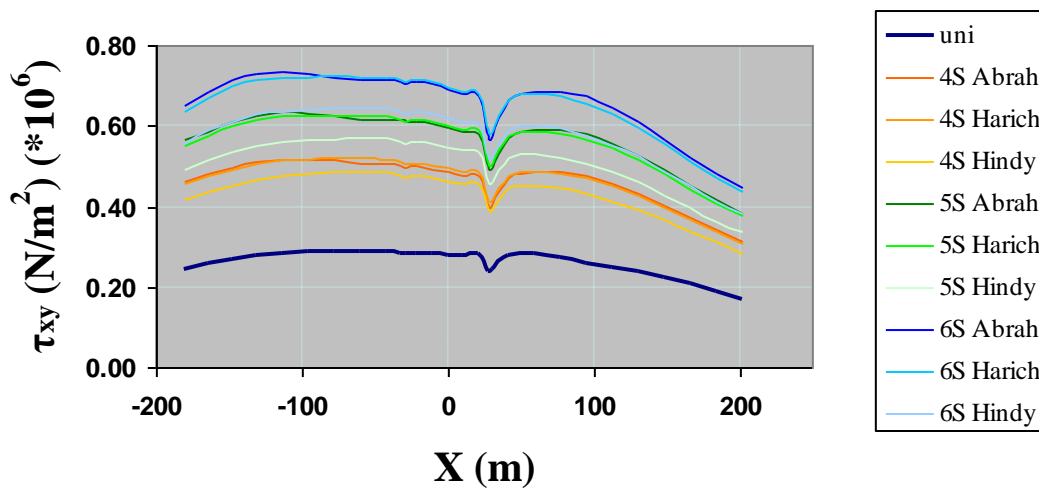
روش تحلیل ارتعاش تصادفی در محدوده خطی بدست آمده است. در مجموع از تحقیق حاضر نتایج کلی زیر بدست می‌آید:



شکل ۸: چگونگی توزیع تنش دینامیکی σ_x در مقطع نیمه ارتفاع



شکل ۹: چگونگی توزیع تنش دینامیکی σ_y در مقطع نیمه ارتفاع



شکل ۱۰: چگونگی توزیع تنش دینامیکی τ_{xy} در مقطع نیمه ارتفاع

• تغییرات مکانی حرکت زمین‌لرزه موجب افزایش بیشتر تنش σ_x دینامیکی در پوسته‌ها و افزایش بیشتر تنش σ_y دینامیکی در قسمت‌های مرکزی (هسته و فیلترها)، نسبت به سایر نقاط سد می‌گردد. این درحالیست که افزایش تنش برشی تقریباً در تمام نواحی مشابه می‌باشد و ناحیه خاصی از افزایش بیشتری برخوردار نیست.

درمجموع، مطالعات مذکور اهمیت در نظر گرفتن تغییرات مکانی حرکت زمین‌لرزه در برآورد رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی را بخوبی نشان می‌دهد. لیکن با توجه به محدود بودن مطالعات مذکور به مدل‌های دوبعدی و محدوده رفتار خطی مصالح (که به دلیل محدودیت‌های کنونی نرم‌افزارهای دارای قابلیت مدل‌کردن SVEGM، امری اجتناب ناپذیر بوده‌است) لزوم تداوم مطالعات جهت برآورد دقیق‌تر رفتار دینامیکی سه‌بعدی سدهای خاکی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح تحت محرک‌های ورودی غیریکنواخت بخوبی آشکار می‌گردد.

• به طور کلی، با غیریکنواخت‌تر شدن تحریک لرزه‌ای ورودی، تمامی پاسخ‌های سد شامل تنش‌های σ_x ، σ_y و τ_{xy} ، کرنش برشی γ_{xy} و جابجایی در جهت بالادست- پائین‌دست سد افزایش چشمگیری می‌یابند. این افزایش بسته به حالات مختلف تحلیل متغیر است. افزایش پاسخ حداکثر برای تنش برشی بین 73% تا 167%، برای کرنش برشی بین 55% تا 139% و برای جابجایی در جهت بالادست - پائین‌دست بین 73% تا 176% برآورد می‌گردد.

• نحوه توزیع تنش‌های دینامیکی σ_x و σ_y بسته به تعداد دسته بندی $S(f)$ ، متفاوت می‌باشد ولی نحوه توزیع تنش برشی τ_{xy} و کرنش برشی γ_{xy} در تمامی حالات تحلیل از الگوی مشابهی پیروی می‌کنند. در تمامی حالات تحلیل دینامیکی، حداکثر تنش برشی دینامیکی در محل تماس پوسته بالادست و تکیه‌گاه و حداکثر کرنش برشی دینامیکی در فیلتر بالادست پدید می‌آید.

• پاسخ‌های سد به حالت تعداد دسته بندی $S(f)$ حساس می‌باشد ولی در هر حالت تعداد دسته بندی $S(f)$ ، مقادیر پاسخ‌ها و نحوه توزیع آنها در بدنه سد به تابع انسجام بکار رفته چندان حساس نیست.

مراجع

1. Chen, Mu-Tsang and Harichandran, R.S., (1998), "Sensitivity of Earth Dam Seismic Response to Ground Motion Coherency" Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic III, 914-925.
2. Harichandran, R. S., (1999), "Spatial Variation of Earthquake Ground Motion", Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State university.
3. Mahab-Ghodss, Final Report of "Seismic Hazard Analysis of Godar-E-Landar Site", (1994), Mahab-Godss Consulting Engineer, Tehran, May.
4. Davoodi, M. (2003) "Dynamic characteristic evaluation of embankment dams by forced and ambient vibration tests" Ph.D. Thesis, International Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, I.R. Iran, (in Persian).
5. "ANSYS Theory Manual, ANSYS Release 9" (2005), ANSYS INC, Canon Sburg, USA, WWW.ansys.com.
6. Jafari, M.K. and Davoodi, M., (2006), "Dynamic Characteristics Evaluation of Masjed Soleiman Dam Using In-situ Dynamic Tests" Canadian Geotechnical Journal, 43(10): 997-1014.
7. Shinozuka, M., Saxena, V. and Deodatis, G., (2000), "Effect of Spatial Variation of Ground Motion on Highway Structures", Technical Report MCEER-00-0013.
8. Hindy, A., Novak, M., (1980), "Pipeline Response to Random Ground Motion", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 106(EM2), 339-360
9. Harichandran, R. S., Vanmarcke, E. H., (1986), "Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 112(2), 154-174
10. Abrahamson, N. A., (1993), "Spatial Variation of Multiple Support Inputs", Proceedings, 1st US Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges, Department of Civil Engineering and California Department of Transportation, University of California at Berkeley, San Francisco, California

11. Harichandran, R. S. and Wang, W., (1990), "Response of Indeterminate Two-Span Beam to Spatially Varying Seismic Excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. VO1.19, 173-187.
12. Santa-Cruz, S., Heredia-Zavoni, E. and Harichandran, R. S., (2000), "Low-Frequency Behavior Coherency for Strong Ground Motion in Mexico City and Japan", 12WCEE, No.0076.
13. Javaheri, Ali., (2007), "Comparison of dynamic behavior of one earth dam in uniform and non-uniform excitations", MSc thesis, Islamic Azad University, South of Tehran branch.