

تأثیر در نظر گرفتن تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین لرزه در پاسخ لرزه‌های سازه‌های طویل (مروری بر چند مطالعه انجام گرفته در جهان و ایران)

محمد داودی، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه
علی جواهری، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد تهران، واحد جنوب

۱- چکیده

مطالعات مذکور نشان می‌دهد که در سازه‌های مختلف، در نظر گرفتن محرک *SVEGM* نسبت به تحریک یکنواخت به نتایج یکسانی منجر نمی‌شود و با توجه به نوع سازه، نتایج تحلیل می‌تواند متفاوت باشد. بسته به مورد ممکن است در تحلیل یک سازه، تحلیل با محرک ورودی یکنواخت، تحلیل محافظه‌کارانه‌ای باشد و در تحلیل یک سازه دیگر نتایج غیرمحافظه‌کارانه به دست آید.

کلیدواژه‌ها: زلزله، تغییرات مکانی حرکت ورودی، پل، سدهای بتنی، سدهای خاکی

تحقیقات انجام شده بر روی سازه‌های طویل نشان می‌دهد که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در تحریک ورودی زلزله در طول ابعاد پایه چنین سازه‌هایی اتفاق می‌افتد. بر این اساس در هنگام زلزله، بسته به وسعت سازه، پی پیرامون آن و مصالح مختلف پی، اثر مسیر موج، عدم انسجام و یکپارچگی و شرایط مختلف محلی ساختگاه، تحریک‌های ورودی نسبت به یکدیگر متفاوت است؛ لذا فرض تحریک یکنواخت، تقریبی است. بحث مربوط به تحریک‌های متغیر در نقاط تکیه‌گاهی با توجه به اهمیت زیاد آن مدتهاست که در طراحی پلهای با دهانه بزرگ مدنظر قرار گرفته است؛ به نحوی که حرکت ورودی زمین به صورت حرکت غیریکنواخت حوزه آزاد^۱ و در نقاط اتصال مابین سازه و خاک اعمال می‌شود. با وجود اینکه چنین مطالعاتی اخیراً بر روی سدهای بتنی آغاز شده، به نظر می‌رسد تاکنون در زمینه بررسی رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی، مطالعات جامعی انجام نشده است و عموماً تحریک‌های یکنواخت در مرز مشترک پی سد و محیط نیمه بی‌نهایت (شامل پی زیر بدنه سد و دیواره‌های دره محل احداث سد) اعمال می‌گردد. در این مقاله، ابتدا ضرورت و اهمیت مطالعه در این زمینه مطرح و مفهوم تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین لرزه^۲، روشهای مدل‌سازی و روابط موجود شرح داده شده است. در ادامه، تأثیر آن در پایداری پلها و سدهای بتنی به اختصار بیان و مثالهایی از مطالعات انجام شده در مورد تأثیر *SVEGM* در پاسخ لرزه‌ای سدهای خاکی بررسی شده است. در نهایت، به نتایج مطالعه موردی انجام شده در بررسی پایداری سد خاکی مسجد سلیمان و تأثیر در نظر گرفتن *SVEGM* بر ضرایب اطمینان سطوح مستعد لغزش سد اشاره شده است. در مجموع، نتایج

۲- مقدمه

در نظر گرفتن دقیقتر محرک ورودی زمین لرزه در مطالعات رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در زمره موضوعاتی است که همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقوله مباحثی همچون برهمکنش خاک و سازه، در نظر گرفتن امواج ورودی مورب به جای امواج تابیده موازی و قائم از مباحث جدید به شمار می‌آیند؛ ولی موضوع مورد توجه محققین در حال حاضر، فرض ناصحیح تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی بویژه در سازه‌های طویل مانند پلها و سدهاست که تاکنون به صورت معمول در تحلیل دینامیکی کلیه سازه‌ها استفاده می‌شود.

مشاهداتی که از اواخر دهه هفتاد میلادی بر روی شبکه‌های لرزه‌نگاری واقع در فواصل نزدیک به هم انجام گردید، نشان داد که شتابنگاشتهای ثبت شده در زمان وقوع زلزله در مکانهای مختلف، با یکدیگر تفاوت‌های عمده‌ای دارند. این تفاوتها در دامنه، محتوای فرکانسی و فاز ارتعاشات ثبت شده، دیده می‌شود و با افزایش فاصله بین دو ایستگاه، بیشتر می‌شود. این موضوع موجب تحقیقات

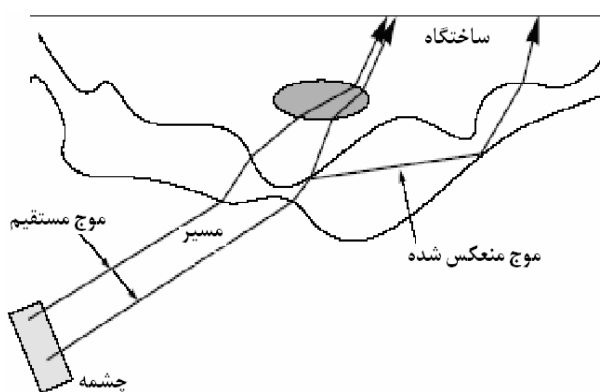
1. Free Field
2. Spatial Variation of Earthquake Ground Motion (SVEGM)

طیف انسجام دو نگاشت ثبت‌شده در یک زمین‌لرزه، می‌تواند به علت انعکاس و انکسار امواج به هنگام عبور از میان لایه‌های خاک ناهمگن به وجود آید.

۳-۱-۳- اثر شرایط محلی ساختمانگاه^۶

تفاوت‌های موجود در شرایط خاک محل در هر ایستگاه ممکن است دامنه و محتوای فرکانسی حرکات سنگ بستر را به طور متفاوتی تغییر دهد.

طرحی از پراکندگی امواج لرزه‌ای حاصل از چشمه لرزه‌زا در هنگام عبور از لایه‌های خاک و توده‌ای از خاک متراکم در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۰].



شکل (۱): انتشار و متفرق شدن امواج لرزه‌ای [۱]

۳-۲-۲- مدلسازی SVEGM

تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین‌لرزه را می‌توان به دو صورت تعینی^۷ و احتمالی^۸ در تحلیل‌ها مدل نمود. در حالت تحلیل تعینی، با استفاده از یک نگاشت و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی امواج در نقاط مختلف تکیه‌گاهی، تاریخچه زمانی حرکت در نقاط مختلف شبیه‌سازی می‌شود؛ بنابراین در تحلیل تعینی تنها اثر عبور موج منظور می‌گردد و تأثیر عدم انسجام و شرایط خاک محل در نظر گرفته نمی‌شود [۲].

برای منظور کردن اثر هر سه عامل، باید تحلیل احتمالی انجام گردد. در این تحلیل حرکت زمین در نقاط مختلف تکیه‌گاهی به صورت تابع چگالی طیفی^۹ مدل می‌شود و اثر SVEGM با تابع چگالی طیفی متقاطع^{۱۰} بین تکیه‌گاهها تعریف می‌شود (رابطه ۱):

وسیع‌تری از دهه هشتاد به بعد برای مدل کردن تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین‌لرزه گردید و سپس به منظور مشخص کردن تأثیر SVEGM بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های طولیل مانند پلها، خطوط لوله، سدها، بررسی تأثیر محرکهای مذکور بر رفتار لرزه‌ای سازه و مقایسه با تحریک یکنواخت تکیه‌گاهی آغاز شد. این مطالعات نشان داد که تحریک ورودی غیر یکنواخت گاهی می‌تواند تنش‌های داخلی بیشتری در سازه نسبت به حالت تحریک ورودی یکنواخت ایجاد کند و ایمنی سازه را به مخاطره اندازد [۲۰]. در این مقاله، پس از بیان مفهوم و نحوه مدلسازی محرکهای مذکور، نتایج مطالعات موردی صورت گرفته در چندین سازه طولیل به‌اجمال ارائه و سپس ضرایب اطمینان سطوح مستعد لغزش در سد خاکی مذکور در حالات مختلف تحریک غیر یکنواخت و یکنواخت با یکدیگر مقایسه شده است.

۳- مفهوم کلی SVEGM

تفاوت‌های مشاهده شده در دامنه، محتوای فرکانسی و فاز محرک ورودی زمین‌لرزه در سازه‌های طولیل را در حالت کلی می‌توان به اثر عبور موج، اثر عدم انسجام و اثر شرایط محلی ساختمانگاه نسبت داد. در ادامه، عوامل مذکور به اختصار شرح و سپس با بیان روش مدلسازی، روابط هر یک از این عوامل بیان شده است.

۳-۱-۱- عوامل مؤثر در SVEGM

عوامل مؤثر در تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین‌لرزه در بخشهای بعد توضیح داده شده‌اند.

۳-۱-۱-۱- اثر عبور موج^۳

به دلیل تفاوت موقعیت مکانی نقاط تکیه‌گاهی، امواج لرزه‌ای با اختلاف زمانی به نقاط مذکور می‌رسند. این مورد، سبب تأخیر زمانی حرکت در ایستگاههای مختلف می‌شود.

۳-۱-۱-۲- اثر عدم انسجام^۴

در حالت کلی، مقدار طیف انسجام^۵ دو نگاشت ثبت شده در یک محیط، نشان‌دهنده مقدار همبستگی بین هارمونیک‌های آن دو نگاشت در فرکانس مورد نظر می‌باشد. در دو نقطه تکیه‌گاهی از یک سازه طولیل نیز کاهش مقدار

6. Local Site Effect

7. Deterministic

8. Stochastic

9. Power Spectral Density (PSD)

10. Cross Spectral Density Function

3. Wave Passage Effect

4. Incoherence Effect

5. Coherency Spectrum

چگالی طیفی اصلاح شده *kanai-tajimi* استفاده می‌شود (رابطه ۵). در این رابطه، ξ_g میرایی و f_g فرکانس طبیعی ساختگاه می‌باشند؛ بنابراین دیده می‌شود که $s(f)$ عامل اثر شرایط محلی ساختگاه را لحاظ می‌کند [۲]:

$$s(f) = \left[\frac{1 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2}{[1 - (f/f_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2} \right] \times \left[\frac{(f/f_g)^4}{[1 - (f/f_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (f/f_g)^2} \right] S. \quad (5)$$

ملاحظه می‌شود که در مدل‌سازی *SVEGM* به صورت احتمالی اثر هر سه عامل تأثیرگذار لحاظ می‌گردد.

۴- مطالعات موردی صورت گرفته در پلها، سد بتنی و سد خاکی

پلها، سدهای بتنی و سدهای خاکی در میان انواع سازه‌های در معرض زلزله، با توجه به ابعاد سازه‌های طولیل جزء سازه‌هایی هستند که در نظر گرفتن تغییرات مکانی محرک ورودی زمین‌لرزه نسبت به محرک ورودی یکنواخت، می‌تواند تفاوت آشکاری در توزیع تنش‌های به وجود آمده در بدنه سازه ایجاد نماید. در قسمت بعد به این موضوع اشاره شده است.

۴-۱- تأثیر در نظر گرفتن محرک *SVEGM* در پلها

هارچندران در سال ۱۹۹۹ [۱] اثر *SVEGM* را بر روی پاسخ جانبی پل معلق گلدن‌گیت^{۱۵} به طول دهانه مرکزی ۱۲۸۰ متر و دهانه‌های کناری ۳۴۳ متر واقع در کالیفرنیا و دو پل قوسی نیو ریور جورج^{۱۶} به طول ۵۱۸ متر در ویرجینیای غربی و کلدسپرینگ کنیون^{۱۷} به طول ۲۱۳ متر در کالیفرنیا را مورد بررسی قرار دادند.

نتایج این مطالعات عبارتند از:

- استفاده از تحریکات یکسان در پل معلق موجب می‌شود که پاسخهای جانبی در بعضی از نقاط، دست بالا و در بعضی از نقاط دیگر دست پایین محاسبه گردند. این گونه خطاهای محاسباتی در پاسخ پلهای

$$S_{lm}(f) = c(v_{lm}, f) = s(f) |\gamma(v, f)| e^{i\phi(v, f)} \quad (1)$$

مشاهده می‌شود که طیف متقاطع دو ایستگاه l و m تابع c از فرکانس (f) و فاصله دو ایستگاه (v) است. در این رابطه، اثر سه عامل مؤثر در *SVEGM* به شرح زیر در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۱- اثر عبور موج

قسمت سوم رابطه (۱)، $e^{i\phi(v, f)}$ ، بیانگر اثر عبور موج است. در این رابطه، $\phi(v, f)$ به صورت رابطه (۲) ساده می‌شود:

$$\phi(v, f) = -2\pi d \quad (2)$$

در رابطه (۲)، d تأخیر زمانی انتشار است و به صورت $d = V.v/|V|$ تعریف می‌گردد. V بردار سرعت ظاهری انتشار^{۱۱} و v فاصله بین نقاط اندازه‌گیری می‌باشد. سرعت ظاهری انتشار را می‌توان به دو صورت مقدار ثابت و یا وابسته به فرکانس در نظر گرفت که عموماً در تحقیقات گذشته، ثابت در نظر گرفته شده است [۱].

۳-۲-۲- اثر عدم انسجام

قسمت دوم رابطه (۱)، $\gamma(v, f)$ ، تابع انسجام و بیانگر اثر عدم انسجام است. برای تابع انسجام توابع زیادی ارائه شده است که معروفترین و متداولترین آن تابع انسجام ونمارک^{۱۲} و هاریچندران^{۱۳} است (رابطه‌های ۳ و ۴):

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

$$(1 - A) \exp \left[-\frac{2v}{\theta(f)} (1 - A + \alpha A) \right] \quad (3)$$

$$\theta(f) = k \left[1 + (f/f_0)^b \right]^{1/2} \quad (4)$$

پارامترهای این روابط، ثوابتی اند هستند که بر حسب مشخصات هر زمین‌لرزه و ساختگاه مورد نظر محاسبه می‌شوند [۳].

۳-۲-۳- اثر شرایط محلی ساختگاه

قسمت اول رابطه (۱)، $s(f)$ ، تابع چگالی طیفی نقطه‌ای^{۱۴} است، که برای محاسبه این تابع عموماً از تابع

15. Golden Gate Bridge
16. New River Gorge Bridge
17. Cold Spring Canyon Bridge

11. Apparent Propagation Velocity
12. Vanmarke
13. Harichandran
14. Auto Spectral

در این مطالعه مشاهده شد که اگر حرکت ثبت شده در پایه سد به صورت ورودی یکنواخت باشد، پاسخ سد بسیار کمتر از حالت ورودی غیریکنواخت به دست می‌آید. همچنین از بین سه مؤلفه تحریک زمین‌لرزه، مؤلفه بالادست- پایین دست، بیشترین تأثیر را بر پاسخ لرزه‌ای سد گذاشته است. تفاوت اصلی در پاسخ سد به محرک ورودی یکنواخت و ورودی غیریکنواخت در مقدار مؤلفه شبه‌استاتیکی پاسخ است که موجب تغییر شکلها و تنش‌های بزرگ در طول تکیه‌گاههای سد برای ورودی غیریکنواخت می‌گردد [۴].

۴-۳- بررسی تأثیر SVEGM بر روی سد خاکی سانتافلیسیا^{۲۲}

مطالعاتی در خصوص پاسخ اتفاقی سد خاکی سانتافلیسیا به ارتفاع ۸۳ متر از بستر سنگی، طول ۱۳۷ متر در پی و ۳۸۸ متر در تاج واقع در کالیفرنیا توسط هاریچندران و چن^{۲۳} انجام گردید [۵]. آنها ضریب اطمینان^{۲۴} سد در مقابل گسیختگی را تحت اثر SVEGM و تحریک یکسان با استفاده از معیار گسیختگی موهر- کلمب بررسی کردند. در تحلیل سد از اثرهای برهمکنش خاک و سازه به علت قرار گرفتن سد بر روی بستر سنگی صرف‌نظر گردید. مقدار مدول برشی خاک با افزایش عمق از تاج سد به صورت تابعی از فشار محصورکننده افزایشی در نظر گرفته شد. مقطع عرضی سد در شکل (۲) نشان داده شده است.

در مطالعه انجام گرفته از یک مدل اجزای محدود غیرهمگن سه‌بعدی در نرم‌افزار I-DEAS متشکل از ۱۰۰۴ گره و ۴۱۴۰ عضو چهارضلعی استفاده گردید.

در این مطالعه، از مدل ارائه شده توسط هاریچندران و ونمارک [۱]، که با روابط (۱) تا (۵) معرفی گردید، برای برآورد محرک ورودی در جهت بالادست - پایین‌دست استفاده شد. پارامترهای طیف اصلاح شده با استفاده از نگاشت‌های زلزله‌ال‌سنتره محاسبه گردید. در این مطالعه، از تحریک تکیه‌گاهی SVEGM و تحریک یکسان در مدل عددی استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید.

معلق با افزایش طول دهانه بیشتر می‌شود. مقدار نیروی برشی در مجاورت دهانه‌های وسطی بسیار دست پایین محاسبه می‌شوند؛ زیرا مدهای غیرممتقارن با تحریکات، یکسان تحریک نمی‌شوند.

- در پلهای قوسی استفاده از تحریکات یکسان موجب محاسبه دست پایین نیروهای محوری در تمام اعضای قوسی و لنگر و برش، در بعضی از اعضای عرشه و قوس پل می‌شود. همچنین نیروهای محوری در عرشه و مهارها دست بالا محاسبه می‌شوند.

- در برآورد پاسخ جانبی پلهای قوسی، استفاده از تحریکات یکسان موجب می‌شود که نیروها در بعضی اعضا، دست بالا و در بعضی دیگر دست‌پایین محاسبه شوند. لنگرها در بعضی اعضای قوس به مقدار زیادی دست پایین محاسبه می‌شوند.

نتایج مطالعات مذکور نشان می‌دهد که در حالت کلی، استفاده از تحریکات یکسان برای پلهای دهانه طولانی غیرقابل قبول است و خطای زیادی ایجاد می‌کند [۱].

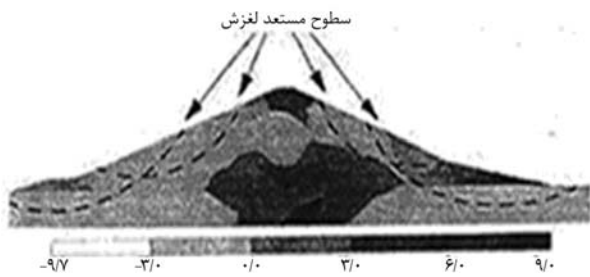
۴-۲- تأثیر در نظر گرفتن محرک ورودی SVEGM در یک سد بتنی قوسی

در تحقیقی که توسط آلوز^{۱۸} در سال ۲۰۰۵ انجام گردید، اثر ملحوظ کردن تغییرات مکانی حرکت ورودی زمین بر روی سد بتنی قوسی پاکویما^{۱۹} مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از نگاشت یک زلزله با بزرگای $M=4.3$ (رخ داده در سال ۲۰۰۱) برای به دست آوردن بزرگنمایی توپوگرافی در نقاط مختلف دره سد استفاده شده است. بزرگنمایی توپوگرافی^{۲۰} با استفاده از طیف پاسخ تغییر مکان در نقاط مختلف و در نظر گرفتن تأخیر زمانی عبور موج محاسبه شده است.

با استفاده از نتایج زلزله مذکور و یک نگاشت ثبت شده در زلزله ۱۹۹۴ نرتریج^{۲۱} این زلزله در نقاط مختلف دره شبیه‌سازی شده است. زلزله شبیه‌سازی شده به عنوان حرکت ورودی در مدل سه‌بعدی اجزای محدود سد پاکویما به کار رفته و پاسخ مدل، تطبیق خوبی با مشاهدات سد پس از زلزله مذکور داشته است.

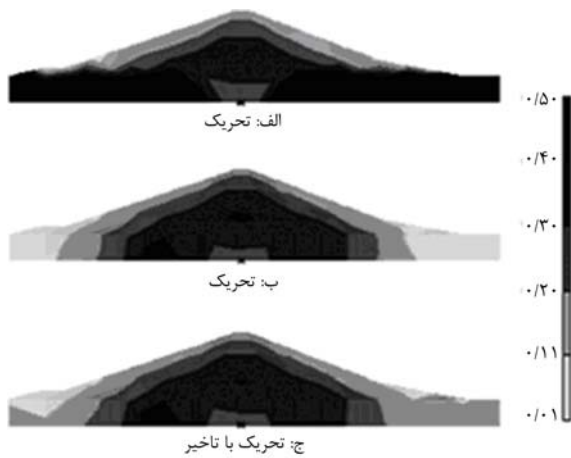
22. Santafelicia
23. Chen
24. Reliability

18. Alves
19. Pacoima
20. Topographic Amplification
21. Northridge



شکل (۴): میزان شاخص اطمینان در مقطع عرضی سد در حالت تحریک SVEGM/۵

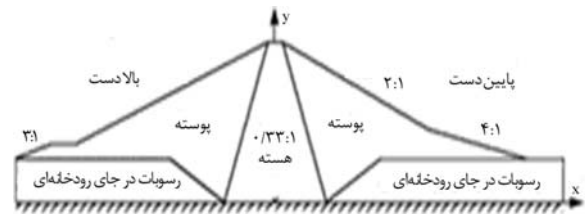
چن و هاریچندران [۶] در تحقیقی دیگر بر روی همین مدل، منحنی‌های هم‌میزان تنش برشی را در حالت تحلیل تحریک یکنواخت، تحریک با تأخیر زمانی^{۲۵} (تحریک غیریکنواخت تنها با در نظر گرفتن اثر عبور موج) و تحریک SVEGM مقایسه کرده‌اند. این منحنی‌های هم‌میزان در مقطع عرضی میانی و در کف سد در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که منحنی‌های هم‌میزان در دو حالت تحریک یکنواخت و تحریک با تأخیر زمانی، تفاوت کمی دارند؛ اما تحریک SVEGM موجب افزایش تنش برشی می‌شود.



شکل (۵): منحنی‌های هم‌میزان تنش برشی (N/mm^2) در مقطع عرضی میانی سد خاکی سانتافلیسیا در سه حالت مختلف [۶]

اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

- ۱- تغییرات مکانی حرکات زمین، تنش برشی حداکثر را به مقدار زیادی در لایه سفت شنی بستر جریان افزایش می‌دهد. مشاهده شده است که تنش برشی ایجاد شده در لایه شنی زیر پوسته، در فرکانس‌های پایین نسبت به مدل انسجام به کار رفته حساس می‌باشد.



شکل (۲): مقطع عرضی سد خاکی سانتافلیسیا [۵]

شاخص‌های اطمینان در هر گره، برای تحریک یکسان، به صورت منحنی‌های هم‌میزان در شکل (۳) مشاهده می‌شوند. از آنجا که نواحی دارای مقدار شاخص اطمینان منفی، نواحی مستعد گسیختگی را نشان می‌دهند، نیمه پایین سد نسبت به نیمه بالا، دارای شاخص اطمینان بیشتری در برابر گسیختگی است.

لازم به ذکر است با وجود اینکه در بعضی نقاط هسته و پوسته واقع در $2/3$ ارتفاع سد، مقادیر کوچک شاخص اطمینان دیده می‌شود، ولی واقعیت این است که تا زمانی که مناطق مستعد گسیختگی به صورت باریک و مجزا قرار گرفته باشند، گسیختگی لغزشی توسعه پیدا نمی‌کند؛ لیکن در صورتی که مناطق مستعد گسیختگی تا حدی گسترش پیدا کنند و به یکدیگر متصل شوند، لغزش شیب ممکن است همانند دو مورد نشان داده شده در شکل (۳) پدید آید. همچنین باید توجه کرد که در مطالعه مذکور، شاخص اطمینان به دلیل تصادفی بودن ماهیت محرک ورودی و بر اساس اطمینان در مقابل گسیختگی شکل گرفته از معیار موهر-کلمب به دست آمده است.

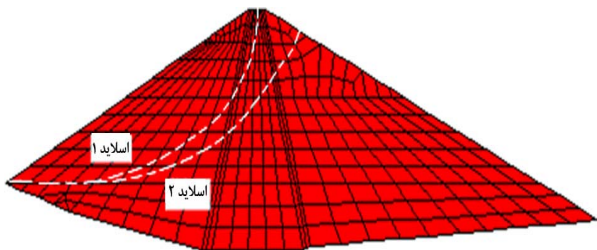


شکل (۳): میزان شاخص اطمینان در مقطع عرضی سد در حالت تحریک یکسان [۳]

شاخص‌های اطمینان در مقطع عرضی سد بر اثر تحریک SVEGM در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نواحی گسیختگی موضعی بزرگتری نسبت به حالت تحریک یکسان پدید می‌آیند. این امر بویژه در مصالح شنی بستر رسوبی نمایان تر می‌باشد؛ به طور کلی می‌توان گفت که در حالت تحریک SVEGM نواحی مستعد لغزش، گسترش بیشتری می‌یابد [۵].

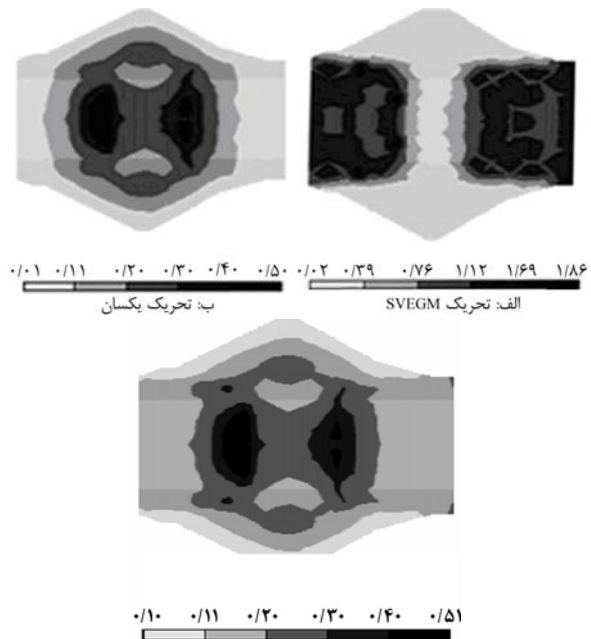
ساختگاه به علت تکیه‌گاه سنگی بدنه سد مسجد سلیمان صرف‌نظر شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی و استخراج محرک ورودی، با ایده گرفتن از طیفهای پاسخ ارائه شده توسط مشاور طراح سد [۹]، طیف زلزله با $PGA=0.23g$ فرض شده است که در جهت بالادست-پایین‌دست بر بستر پی اعمال می‌گردد. سرعت ظاهری انتشار موج، با توجه به سرعت موج برشی حاصل از آزمایش ژئوسایزیک سطحی در پی [۱۰] و با زاویه انتشار فرضی ۴۵ درجه، برابر ۱۸۴۰ متر بر ثانیه اختیار شده است. در تحقیق حاضر، از میان توابع انسجام مطرح در مطالعات *SVEGM*، سه مدل انسجام هاریچندان و ونمارک، هیندای و نوک و آبراهامسون انتخاب شده‌اند [۷].

برای بررسی تأثیر *SVEGM* در پایداری سد مسجد سلیمان، ضریب اطمینان سطوح مستعد لغزش در حالات مختلف تحلیل مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور، مطابق شکل (۷)، دو سطح لغزش فرضی در پایین‌دست سد، که با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته [۱۰]، پتانسیل زیادی برای لغزش دارند. برای محاسبه و مقایسه، ضرایب اطمینان در حالات مختلف تحلیل، در نظر گرفته شد.



شکل (۷): مدل اجزای محدود و سطوح لغزش فرضی در پایین‌دست سد

نتایج ضرایب اطمینان برآورد شده برای سطوح لغزش فرضی در حالات مختلف تحلیل، در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که ضرایب اطمینان سطوح مذکور با غیریکنواخت شدن تحریک ورودی کاهش می‌یابند. این کاهش ضرایب اطمینان، حالات مختلف تحلیل نسبت به حالت تحریک یکنواخت، برای سطح ۱ بین ۱۳ تا ۱۵ درصد و برای سطح ۲ بین ۱۵ تا ۱۷ درصد اتفاق می‌افتد؛ بنابراین با غیریکنواخت شدن تحریک ورودی ضرایب اطمینان سطوح مستعد لغزش کاهش می‌یابد؛ اما ضریب اطمینان به مدل انسجام به کار رفته حساسیت چندانی ندارد [۷].



شکل (۶): منحنی‌های هم‌میزان تنش برشی (N/mm^2) در کف سد خاکی سانافلیسیا در سه حالت مختلف [۶]

۲- در مدل *SVEGM* اثر مسیر موج در مقایسه با اثر کاهش انسجام، مهم نیست.

۳- استفاده از مدل حرکت یکنواخت زمین برای محاسبه جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها و کرنشهای حداکثر برشی در هسته موجب حاصل شدن نتایجی محافظه‌کارانه می‌شود و قابل قبول است.

۴- تحلیل مقدماتی پایداری نشان داد که گسیختگی‌های لغزش مختلفی تحت اثر *SVEGM* در مقایسه با تحریک یکسان ممکن است پدید آید [۶].

۴-۴- بررسی تأثیر *SVEGM* بر روی سد خاکی مسجد سلیمان

بر اساس مطالعات جامعی که توسط داودی و همکاران در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در زمینه بررسی رفتار دینامیکی سدهای خاکی با توجه ویژه به سد مسجد سلیمان در دست انجام است، تأثیر در نظر گرفتن *SVEGM* بر پاسخ لرزه‌ای سد مذکور مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. در این مطالعه، مدل اجزای محدود دوبعدی مقطع عرضی میانی سد در حالت پی صلب (شکل ۷) با استفاده از نرم‌افزار *ANSYS-9* [۸] تحلیل شد. در تحقیق حاضر، مدلسازی محرک ورودی در جهت بالادست-پایین‌دست، با مدل احتمالی و با در نظر گرفتن هر دو اثر عدم انسجام و عبور موج مورد استفاده قرار گرفته و از اثر شرایط محلی

2. Shinozuka, M., Saxena, V., Deodatis, G. (2000). *Effect of spatial variation of ground motion on highway structures* [Technical Report MCEER-00-0013]. USA: in Princeton University.
3. Harichandran, R. S. (1991). Estimating the spatial variation of earthquake ground motion from dense array recordings. *J. Structural Safety*, 10, 219-233.
4. Alves, S. W., Hall, Y.S. (2006). Generation of spatially nonuniform ground motion for nonlinear analysis of a concrete arch dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 1339-1357.
5. Harichandran, R. S., Chen, M. T. (1996). Reliability of an earth dam excited by spatially varying earthquake ground motion. *Proceedings 11th world conference on earthquake engineering, elsevier*. Amsterdam.
6. Chen, M. Tsang, Harichandran, R.S. (1998). Sensitivity of earth dam seismic response to ground motion coherency. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic* III, 914-925.
7. داودی، محمد؛ جواهری، علی. (۱۳۸۶). ارزیابی پایداری سطوح مستعد لغزش در سد خاکی مسجد سلیمان در حالات تحریک لرزه‌ای ورودی یکنواخت و غیریکنواخت *مجله بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*، جلد ۹، شماره ۴، صفحات ۲۲۹ الی ۲۳۹
8. ANSYS Theory Manual, ANSYS Release 9. Canon Sburg, USA: ANSYS INC. Available at: WWW.ansys.com, 2005.
9. Mahab-Godss. (1994). Seismic hazard analysis of Godar-E-Landar Site [Report]. Tehran: Mahab-Godss Consulting Engineer.
10. داودی، محمد. (۱۳۸۲). *ارزیابی مشخصات دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری*. رساله دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

جدول (۱): ضرایب اطمینان سطوح لغزش فرضی در حالات مختلف تحلیل و درصد اختلاف نسبت به حالت تحریک یکنواخت

ضرایب اطمینان سطوح لغزش فرضی				نوع تحلیل
سطح ۲		سطح ۱		
اختلاف (%)	S.F	اختلاف (%)	S.F	
۰/۰	۱/۵۲	۰/۰	۱/۲۰	یکنواخت
۱۷/۱	۱/۲۶	۱۵/۰	۱/۰۲	هارچندران و ونمارک
۱۵/۱	۱/۲۹	۱۳/۳	۱/۰۴	هیندای و نواک
۱۶/۵	۱/۲۷	۱۴/۲	۱/۰۳	آبراهامسون

۵- نتیجه‌گیری

اهم نتایج این مطالعه عبارتند از:

- در سازه‌های مختلف، ملحوظ نمودن محرک *SVEGM* نسبت به تحریک یکنواخت به نتایج یکسانی منجر نمی‌شود و با توجه به نوع سازه، نتایج تحلیل می‌تواند متفاوت باشد.
- بسته به مورد ممکن است در تحلیل یک سازه، تحلیل با محرک ورودی یکنواخت، تحلیل محافظه‌کارانه‌ای باشد و در تحلیل یک سازه دیگر نتایج غیرمحافظه‌کارانه به دست آید.
- ممکن است در تحلیل با محرک ورودی یکنواخت یک سازه مشخص، بعضی از پاسخها دست بالا و بعضی دیگر دست پایین محاسبه شوند؛ بنابراین مطالعه اثر *SVEGM* در تحلیل هر سازه طویل و با اهمیت ضروری به نظر می‌رسد و صرف نظر کردن از آثار آن ممکن است در برخی موارد به برآورد نتایج غیر واقعی منجر گردد.
- به طور خاص، مطالعات صورت گرفته بر روی سدهای خاکی سانتافلیسیا و مسجد سلیمان نشان داد که لحاظ کردن اثر *SVEGM* نسبت به تحلیل با محرک ورودی یکنواخت، موجب گسترش سطوح مستعد لغزش به نواحی پایدار و یا کاهش ضرایب اطمینان سطوح مستعد لغزش می‌گردد.

۶- مراجع

1. Harichandran, R. S. (1999). *Spatial variation of earthquake ground motion* [Report]. Michigan: Michigan State University, Department of Civil and Environmental Engineering.