

# روش شبه‌استاتیک برای تحلیل سدهای خاکی با در نظر گرفتن اثر پی (مطالعه موردی: سد مسجدسلیمان)

علی قنبری<sup>۱</sup>، محمد داودی<sup>۲</sup>، مصطفی نصراله تبار آهنگر<sup>۳\*</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

۲- استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه خوارزمی

ghanbari@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۲۷

**چکیده**- روش شبه‌استاتیک روشی کاربردی برای تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی است. اولین گام برای رسیدن به نتایج دلخواه با روش شبه‌استاتیکی، انتخاب ضریب لرزه‌ای مناسب است. نظرات زیادی بدون توجه به مشخصات هندسی، مشخصات دینامیکی سازه و همچنین آثار ساختگاه، برای تخمین ضریب شتاب لرزه‌ای ارائه شده است. در این پژوهش، سد مسجدسلیمان برای مطالعه‌ی موردی انتخاب شده و با بهره‌گیری از نتایج کاوش استاتیکی، شبه‌استاتیکی و دینامیکی با روش اجزاء محدود، با مجموعه نرم‌افزاری Geosudio-Geoslop 2007، اثر پی و اثر زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک بر ضریب لرزه‌ای شبه‌استاتیک، بررسی و روشی نوین برای به‌دست آوردن ضریب شبه‌استاتیک پیشنهاد شده است. با توجه به این‌که در روش جدید نیاز به استخراج دو شاخص  $\alpha$  و  $\beta$  است، در این پژوهش، در حالت‌های گوناگون مشخصات پی (سختی، نسبت میرایی و ابعاد هندسی) این دو شاخص استخراج شده است. نتایج، نشان‌دهنده‌ی تأثیر غیر قابل انکار شرایط پی در روش پیشنهادی است؛ البته تأثیر شاخص  $\beta$  محسوس بوده اما شاخص  $\alpha$  روند نسبتاً ثابتی داشته است.

**واژگان کلیدی:** سدهای خاکی، روش شبه‌استاتیک، تحلیل دینامیکی، سد مسجدسلیمان، پی

## ۱- مقدمه

ها، فراوانی امکانات و سهولت کار با امکانات نرم‌افزاری روش‌های تحلیل شبه‌استاتیکی، از دلایلی است که استفاده‌ی گسترده از روش تحلیل شبه‌استاتیکی را توجیه می‌کند. یکی از اولین مطالعات برای بررسی اثر پی در پاسخ لرزه‌ای سدها به‌وسیله‌ی Chopra and Perumalswami (1971) انجام شده است که در آن، پی به‌وسیله‌ی یک محیط نیم فضای الاستیک مدل‌سازی شده است. پس از آن

معرفی آثار دینامیکی پیچیده و گذرای لرزش‌های زلزله با یک شتاب ثابت و منفرد یک‌بعدی شبه‌استاتیکی قطعاً بسیار تقریبی خواهد بود. محدودیت‌های دیدگاه شبه‌استاتیکی حتی در دوران نوپایی آن نیز شناخته شده بود. با این حال، پیچیدگی و وقت‌گیر بودن روش‌های آنالیز دینامیکی، گران-قیمت بودن آزمایش‌های تعیین دقیق خواص دینامیکی خاک-

قرار زیر است:

۱- ضریب شبه‌استاتیک شتاب افقی برای تحلیل سدهای خاکی، تابعی از شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه سد و آثار پی است که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای شهرهای مختلف کشور معرفی شده است. برای این منظور از شاخص شتاب مبنای طرح استفاده شده است.

۲- با توجه به این که مطالعات عددی گویای افزایش شتاب در ارتفاع سد است، ضریب لرزه‌ای تحلیل شبه‌استاتیک با ارتفاع متغیر فرض شده است. بنابراین ضریب لرزه‌ای در پی و بخش مدفون سد، ثابت و در ارتفاع آن به صورت خطی افزایش می‌یابد. بیشینه مقدار ضریب لرزه‌ای در تاج سد خواهد بود.

۳- میزان افزایش شتاب در ارتفاع سد، تابع شرایط هندسی بدنه‌ی سد و میزان میرایی مصالح آن در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- رابطه‌ی استفاده‌شده

بر اساس فرضیات پایه‌ای بیان شده، ضریب شتاب افقی شبه‌استاتیک برای تحلیل لرزه‌ای سدهای خاکی به صورت تابع  $K_{ih}(Z)$  تعریف می‌شود، که مقدار  $K_{ih}(Z)$  در تراز پی سد، معادل ضریب لرزه‌ای پایه  $K_{ihB}$  است. اساس روش پیشنهادی (Ghanbari et al. (2008) در روابط (۱) و (۲) آمده است.

$$K_{ihB} = \alpha A \quad (1)$$

$$K_{ih}(Z) = K_{ihB}(1 + \beta Z) \quad (2)$$

$K_{ih}(Z)$  تابع ضریب لرزه‌ای شبه‌استاتیک است که به‌طور خطی از پی تا تاج سد، افزایش می‌یابد و در تاج سد با علامت  $K_{ihw}$  نمایش داده می‌شود. نسبت افزایش شتاب در ارتفاع، تابع شرایط هندسی سد و میرایی مصالح بدنه است.  $K_{ihB}$  ضریب شبه‌استاتیک پایه است که به شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه و آثار پی سد وابسته است. شاخص  $A$  که نسبت شتاب مبنای

Dakoulas (1993) و Dakoulas and Hsu (1995) روش‌های تحلیلی، اثر دره در پاسخ لرزه‌ای سد را بررسی کرده‌اند. این محققین نشان دادند که دامنه پاسخ لرزه‌ای سد، تحت تأثیر امپدانس بین سد و ساختگاه است. Papalou and Bielak (2001, 2004) اثر سختی ساختگاه بر رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی را بررسی کرده‌اند. این محققین نشان دادند که در نظر گرفتن آثار سختی ساختگاه سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای سد می‌شود. قائمیان (۱۳۸۶) اثر ساختگاه سد بتی امیرکبیر بر رفتار لرزه‌ای بدنه سد را بررسی و اینگونه نتیجه‌گیری کرده است که شکل و ابعاد پی، تأثیر چشم‌گیری بر نتایج تحلیل‌ها نداشته است. خالدی (۱۳۸۶) اثر سختی ساختگاه بر رفتار لرزه‌ای سدهای هسته آسفالتی را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده است که در برخی موارد، مدل‌سازی ساختگاه نقش چشم‌گیری در دستیابی به نتایج واقعی دارد.

اکنون برای طراحی نهایی سد، تحلیل شبه‌استاتیکی کافی نیست؛ ولی در فازهای اولیه‌ی طراحی این سازه‌ها به‌خاطر محدودیت‌های موجود، مهندسین مشاور همچنان از این روش استفاده می‌کنند.

با توجه به مطالب گفته‌شده و توجه به این امر که دقت روش شبه‌استاتیکی بستگی به دقت تعیین مقدار ضریب لرزه‌ای دارد، ارائه‌ی روشی که مقدار ضریب موردنظر را با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن، ارائه دهد، می‌تواند محققان و طراحان را در استفاده از این روش تحلیلی (حتی اگر در مراحل اولیه‌ی طراحی استفاده شود) یاری دهد.

## ۲- بررسی روش پیشنهادی

### ۲-۱- فرضیات پایه‌ای در روش پیشنهادی

فرضیاتی که در این نوشتار برای بیان رابطه ضریب شتاب افقی تحلیل شبه‌استاتیک سدهای خاکی در نظر بوده است، به

شاخص  $z = \frac{y}{h}$ ، بیانگر مختصات نقطه‌ی مورد نظر در ارتفاع سد است. مرکز مختصات برای شاخص  $y$  روی پایه‌ی سد است و  $h$  ارتفاع سد است. پس برای تاج سد،  $Z=1$  است. منظور از ارتفاع سد، ارتفاع بخش مدفون نشده‌ی آن و عرض سد در پی، بزرگ‌ترین عرض غیرمدفون بدنه‌ی سد می‌باشد. چون روش پیشنهادشده، براساس تغییرات خطی ضریب شبه‌استاتیک در ارتفاع سد است، برای هر گوه‌ی بررسی شده در تحلیل‌های تعادل حدی، این ضریب مقدار خاصی دارد. اگر نرم‌افزارها در مدل‌سازی شرایط گفته‌شده ناتوان باشند، می‌توان از ضریب متوسط برای تحلیل هر گوه استفاده کرد.

### ۲-۳- روند تعیین شاخص‌های روش پیشنهادی

مقدار ضریب لرزه‌ای، مطابق روش پیشنهادی، تابع دو شاخص  $\alpha$  و  $\beta$  است. شاخص  $\beta$  بیانگر مقدار تشدید شتاب در ارتفاع سد و تابع خصوصیات هندسی و مشخصات مصالح بدنه‌ی سد است؛ پس مقدار این شاخص از نتایج تحلیل‌های دینامیکی به دست می‌آید. در این پژوهش، مدل هندسی موردنظر با استفاده از چهار شتاب‌نگاشت حوزه‌ی دور و دو شتاب‌نگاشت حوزه‌ی نزدیک، از نظر دینامیکی کاوش و با ارزیابی نحوه‌ی تغییر شتاب بیشینه در ارتفاع سد، شاخص  $\beta$  استخراج شده است. پرسش دیگر این است که نتایج کاوش شبه‌استاتیکی با چه مقدار ضریب لرزه‌ای، نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی، دقت کافی دارد؟

برای رسیدن به پاسخ این پرسش، اثر هر دو روش بر گوه‌هایی از بدنه‌ی سد [با استفاده از یک شاخص مشترک (ضریب اطمینان)]، که روند دستیابی به آن برای هر دو روش کاملاً مشابه باشد] مقایسه خواهند شد. بنابراین ابتدا با انجام تحلیل‌های شبه‌استاتیکی، ضرایب اطمینان گوه‌های بررسی شده محاسبه خواهند شد؛ سپس تحلیل‌های دینامیکی

طرح نامیده می‌شود، برابر بیشینه شتاب مبنای طراحی (MDE) با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله بوده و بیانگر آثار لرزه-خیزی ساختگاه است و در صورتی که مطالعات خاص لرزه-خیزی انجام نشده باشد، برای مناطق مختلف ایران از آیین-نامه‌ی ۲۸۰۰ زلزله ایران استخراج می‌شود.

$a$  ضریب شتاب مبنای طرح به شتاب معادل استاتیکی است که با توجه به آثار ساختگاه، از  $0.3$  تا  $0.6$  تغییر می‌کند. همچنین  $\beta$  ضریبی است که آثار هندسه‌ی سد در بزرگ‌نمایی ضریب لرزه‌ای پایه و همچنین آثار خواص ژئوتکنیکی مصالح بدنه‌ی سد را بیان و به‌طور معمول بین صفر تا  $1/5$  تغییر می‌کند. بنابراین بیشینه‌ی ضریب لرزه‌ای در تاج،  $2/5$  برابر ضریب شتاب افقی در پایه‌ی سد است. باید توجه داشت که این گونه افزایش شتاب در ارتفاع برای شتاب‌های کم و رفتار الاستیک خطی کاملاً محرز است. در صورتی که رفتار سد از الاستیک خطی خارج شود و یا جسم سد به مرحله‌ی تسلیم برسد، نه تنها افزایش شتاب از قاعده تا تاج سد مشاهده نمی‌شود بلکه ممکن است حتی سبب کاهش مقدار شتاب شود.

برای سدهای با ارتفاع بیش‌تر و نیز سدهایی که شیب-های تندتری دارند، انتظار می‌رود که ضریب  $\beta$ ، نسبت به سدهای کوتاه‌تر و همچنین سدهای با شیب‌های کندتر، مقادیر بیشتری داشته باشند؛ چرا که در سدهای عریض به خاطر قابلیت کم‌تر حرکت عرضی بدنه، شتاب کم‌تری ایجاد می‌شود. از سوی دیگر هر چه نسبت عرض تاج به عرض سد در پی، افزایش می‌یابد، آزادی حرکت بدنه‌ی سد کاهش یافته و ضریب  $\beta$  نیز کاهش می‌یابد؛ پس سرانجام افزایش میرایی، متناسب با کاهش تشدید است و  $\beta$  کاهش می‌یابد. موارد گفته‌شده، رفتاری است که از سد خاکی انتظار داریم و میزان دقیق این متغیرها باید به‌وسیله‌ی محققان گوناگون ارزیابی شود.

### ۳- سد مسجد سلیمان

طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در استان خوزستان و در ۲۵/۵ کیلومتری شمال شرقی شهر مسجد سلیمان، در ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباسپور، بر روی رودخانه‌ی کارون ساخته شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی، پی سد، روی سازندهای بختیاری و آغاجاری که از کنگلومرای سخت با میان لایه‌های رسی تشکیل شده، واقع شده است.

حجم کل مخزن، ۲۲۸ میلیون متر مکعب و حجم مفید، برابر ۲۰۰ میلیون متر مکعب است. بدنه‌ی اصلی سد حجم ۱۳/۵ میلیون متر مکعب، ارتفاع ۱۷۷ متر از پی، طول تاج ۴۸۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، عرض سد در پی ۷۸۰ متر و حجم حفاری ۱/۸ میلیون متر مکعب دارد.

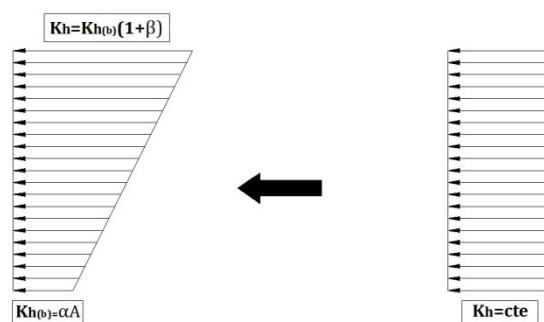
### ۴- کاوش‌های انجام شده

#### ۴-۱- تحلیل استاتیکی

برای کاوش استاتیکی و سپس دینامیکی، در این پژوهش همه‌ی مطالعات روی مدل سد مسجد سلیمان انجام شده و مقطع عرضی بحرانی براساس جانمایی و مقاطع ارائه شده در آلبوم نقشه‌های فنی بدنه‌ی سد، استخراج شده است. مقطع بحرانی که تجزیه و تحلیل شده، شامل ناحیه‌بندی سد: هسته، فیلترها، پوسته، ناحیه‌ی انتقالی و قسمتی از پی آبرفتی در بالادست و پائین دست سد، مدل شده است.

در این مدل سعی شده از افزایش بیش از اندازه‌ی تعداد المان‌ها جلوگیری شود و تا جایی که ممکن است جزئیات واقعی هندسه‌ی سد، منظور شود. بنابراین مصالح پوسته‌ی بالادست و پایین دست، فیلترهای بالا و پایین دست و هسته به‌طور جداگانه در مدل قرار داده شده است. مرزهای مدل باید به اندازه‌ی کافی از مدل دور باشند تا از ناهنجاری‌های ناشی از بازتاب امواج در آنالیزهای دینامیکی جلوگیری شود. پس مرزهای پی به

انجام شده و با استفاده از نرم‌افزار Slope/w، ضریب اطمینان در حوزه‌ی زمان به دست می‌آید. با توجه به این که ضریب اطمینان در حوزه‌ی زمان تغییر زیادی می‌کند، این سوال پیش می‌آید که ضریب اطمینان در چه لحظه‌ای به عنوان ضریب اطمینان دینامیکی منظور شود؟ در این حالت، تغییرات ضرایب اطمینان در یک گوه‌ی متناظر با شتاب‌نگاشتی که منجر به تغییر مکان مجاز در گوه شده، مترادف با ضریب اطمینان ۱ فرض خواهد شد. ابتدا شتاب‌نگاشت‌های موجود به مقادیر شتاب بیشینه مختلف مقیاس شده و با استفاده از هر کدام، مقدار تغییر مکان گوه‌ها به دست می‌آید؛ سپس با نتایج تحلیل دینامیکی، با استفاده از شتاب‌نگاشتی که در گوه تغییر مکان مجاز (۳۰ سانتی‌متر) ایجاد کرده است، تغییرات ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. این تغییرات ضریب اطمینان، برابر ۱ فرض شده و از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از شتاب‌نگاشت اصلی، مقدار ضریب اطمینان دینامیکی برای هر گوه تعیین می‌شود. از مقایسه‌ی ضرایب اطمینان دینامیکی و شبه‌استاتیکی، مقدار ضریب اطمینان مورد نظر تعیین می‌شود. سرانجام، پخش شتاب افقی متناظر با ضریب اطمینان گفته شده با پخش خطی شتاب افقی پیشنهاد شده در این مقاله، مقایسه شده [شکل ۱] و از آن جا که مقدار  $\beta$  از نتایج آنالیزهای دینامیکی استخراج می‌شود،  $\alpha$  با استفاده از معادله‌ی تعادل افقی تعیین خواهد شد.



شکل (۱) نحوه‌ی در نظر گرفتن پخش ضریب شبه‌استاتیک

(قنبری و همکاران، ۲۰۰۸)

وجود داشته و مصالح رفتار زهکشی شده دارند.

#### ۴-۲- تحلیل دینامیکی

برای تحلیل دینامیکی مدل در این پژوهش، رکوردهای زلزله که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، به‌عنوان زلزله‌ی ورودی برای کاوش دینامیکی، در بستر سنگی اعمال می‌شوند.

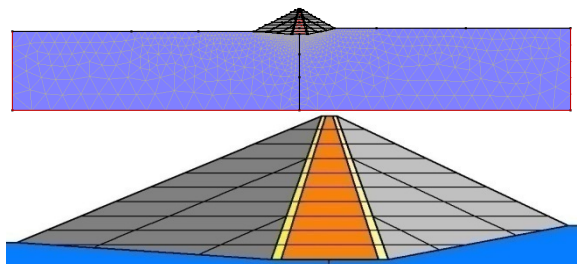
در تحلیل دینامیکی سد مسجدسلیمان از روش الاستیک خطی معادل برای مصالح بدنه و روش الاستیک خطی برای مصالح پی برای تعیین پاسخ لرزه‌ای استفاده شده است. در جدول ۳ و شکل‌های ۳ و ۴، مشخصات دینامیکی مصالح نشان داده شده است.

مسیر کلی انتخاب شاخص‌های مصالح به این صورت بوده است که ابتدا با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی و ستون تشدید، مقادیر معرفی شده به‌وسیله‌ی مشاور طراح سد، مقادیر بیشینه‌ی مدول برشی و ضریب پواسون در قسمت‌های مختلف مصالح بدنه و پی سد انتخاب شده و تحلیل‌های دینامیکی انجام شده است. سپس با در نظر گرفتن سرعت موج برشی در لایه‌های سطحی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های ژئوسایز میک و ایده گرفتن از منحنی‌های تجربی تغییرات سرعت موج برشی با عمق، مقادیر بیشینه‌ی مدول برشی در قسمت‌های مختلف بدنه و پی سد، درست شده است. میرایی در نظر گرفته شده در کاوش‌های دینامیکی براساس نسبت‌های میرایی رایلی است.

اندازه‌ی کافی (عمق پی، ۳ برابر ارتفاع و عرض آن از هر طرف، ۳ برابر عرض پی سد) دور در نظر گرفته شده است. همچنین برای منظور کردن اثر کاوش لایه‌به‌لایه، بدنه‌ی سد در ۱۰ لایه طراحی شد. تراز آب مخزن در ارتفاع ۱۶۰ متری قرار داده شد و نتایج در حالت تراوش پایدار بررسی شده است. در شکل ۲، شبکه اجزاء محدود و ناحیه‌بندی مصالح در بدنه و قسمتی از پی نشان داده شده است. فاصله مرزها در راستای افق، سه برابر بیشترین مقطع عرضی بدنه و در راستای قائم، سه برابر ارتفاع سد در نظر گرفته شده است.

در بخش تحلیل استاتیکی برای مصالح بدنه‌ی سد از مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار موهر-کولمب استفاده شده است.

شاخص‌های مورد نیاز تحلیل استاتیکی در جدول ۱ معرفی شده است.



شکل (۲) الف- شبکه اجزاء محدود سد مسجدسلیمان ب- ناحیه‌بندی مصالح در بدنه و قسمتی از پی

برای انتخاب مشخصات  $\phi$  و  $c$  مصالح بدنه چنین فرض شده که در آنالیز تراوش پایدار، زمان کافی برای زهکشی کامل

جدول (۱) مشخصات مصالح مورد استفاده شده در آنالیز لایه‌به‌لایه مدل سد خاکی مسجدسلیمان [دادی، ۱۳۸۲]

Zone	C (kpa)	$\phi$	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\psi$	E(*10 <sup>5</sup> kPa)				
						12m	31m	43m	93m	148m
Core (End of construction)	50	10	0.34	2050	0	-	0.3	-	0.7	1.6
Core (Steady seepage)	40	19	0.34	2200	0	-	0.3	-	0.7	1.6
Upstream Shell	0	45	0.4	2350	22	0.86	0.64	-	1.09	1.33
Down Stream Shell	0	37	0.38	2200	18	-	-	0.7	1.02	1.3
Saturated Filter	0	40	0.36	2350	0	-	0.49	-	0.94	1.44
Wet Filter	0	40	0.36	2200	0	-	0.7	-	1.06	1.55
Foundation	700	30	0.3	2500	-	3.8722				

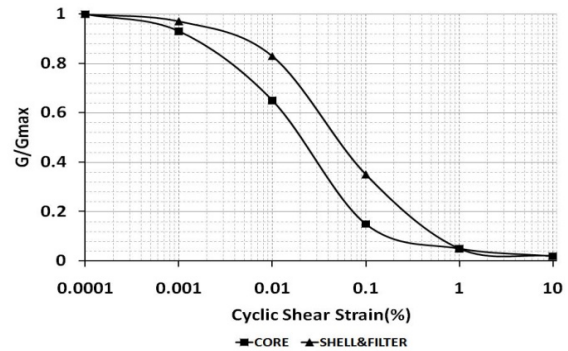
جدول (۲) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده‌شده در تحلیل‌های دینامیکی

Earthquake Record	Year	Magnitude	Epicentral Distance (km)	PGA (g)	PGV (cm/S)	PGD (cm)
KOBE	1995	6.9	24.2	0.2668	21.66	7.6
LANDERS	1992	7.28	72.51	0.0847	5.46	1.7
NORTHRIDGE	1994	6.69	70.45	0.0658	5.99	1.37
SAN FERNANDO	1971	6.61	42.75	0.1008	10.94	5.26
CAPE MENDOCINO	1992	7.01	10.36	1.3455	90.38	27.79
NORTHRIDGE	1994	6.69	11.1	0.3298	30.9	12.8

جدول (۳) شاخص‌های استفاده‌شده در تحلیل دینامیکی سد مسجدسلیمان [داودی، ۱۳۸۲]

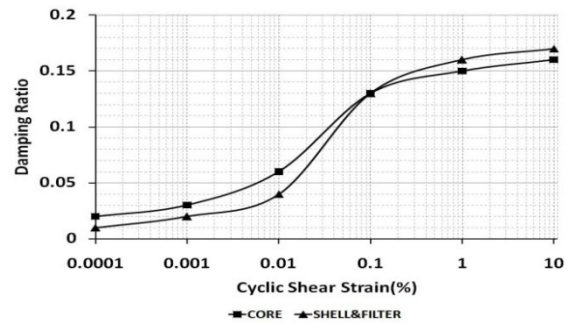
Zone	C (kpa)	$\varphi$	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\psi$	E(*10 <sup>6</sup> kPa)				
						12m	31m	43m	93m	148m
Core	40	19	0.45	2200	0	-	2.23	-	3.85	4.214
Upstream Shell	0	45	0.4	2350	22	-	2.35	-	2.99	3.15
Down Stream Shell	0	37	0.4	2200	18	0.88	-	3.85	5.4	5.8
Saturated Filter	0	40	0.4	2350	0	-	1.34	-	1.71	1.82
Wet Filter	0	40	0.4	2200	0	-	1.74	-	3.07	3.3
Foundation	-	-	0.3	2500	-	10.92				

تغییرات سختی پی، تغییرات میرایی پی و تغییرات ضخامت پی ارائه شده است؛ سپس به شکل‌هایی که از نتایج این کاوش به دست آمده است، اشاره خواهد شد. در این شکل - ها مقدار میانگین به دست آمده از شش شتاب‌نگاشت مختلف نمایش داده شده است.



شکل (۳) نحوه‌ی تعریف نسبت مدول برشی مصالح در مقابل کرنش‌های برشی دوره‌ای [داودی، ۱۳۸۲]

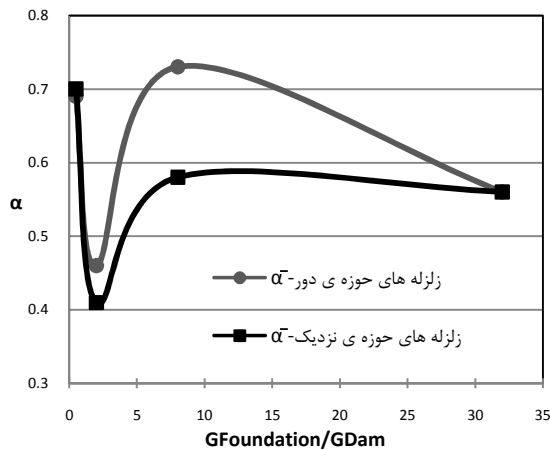
**۵-۱- بررسی تغییرات سختی پی**  
همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تغییرات سختی پی در چهار حالت مختلف در نظر گرفته شده است. از آن‌جا که پی در شرایط الاستیک تحلیل می‌شود؛ برای تبدیل سرعت‌های موج برشی به مدول برشی از رابطه  $G = \rho v_s^2$  استفاده شده است. در شکل (۵) تغییرات شتاب بیشینه در محور میانی سد و بدنه به ازای مقادیر مختلف سرعت موج برشی پی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۶ مقادیر شتاب در بدنه نسبت به شتاب پایه نرمال‌سازی شده و در ارتفاع سد نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات  $\alpha$  و  $\beta$  در برابر نسبت مدول برشی پی به مدول برشی بدنه‌ی سد برای زلزله‌های دور و نزدیک نشان داده شده است. این مقادیر در شکل ۹ به صورت میانگین دیده می‌شود.



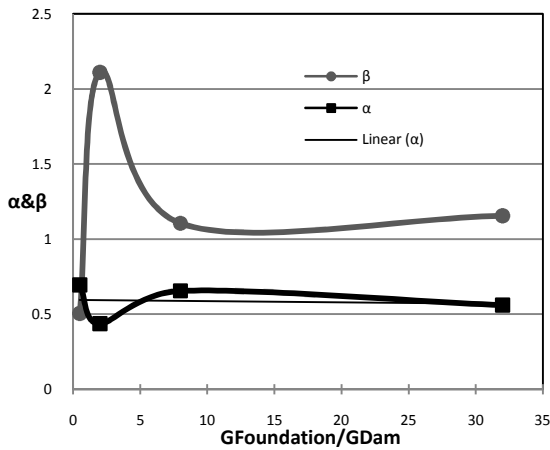
شکل (۴) نحوه‌ی تعریف نسبت میرایی مصالح در مقابل کرنش‌های برشی دوره‌ای [داودی، ۱۳۸۲]

## ۵- نتایج تحلیل‌ها

در بخش‌های قبلی، روند این پژوهش شرح داده شد. در ادامه، با توجه به اهداف این پژوهش، نتایج در سه زمینه‌ی



شکل (۸) تغییرات  $\alpha$  با نسبت مدول برشی پی به مدول برشی بدنه‌ی سد



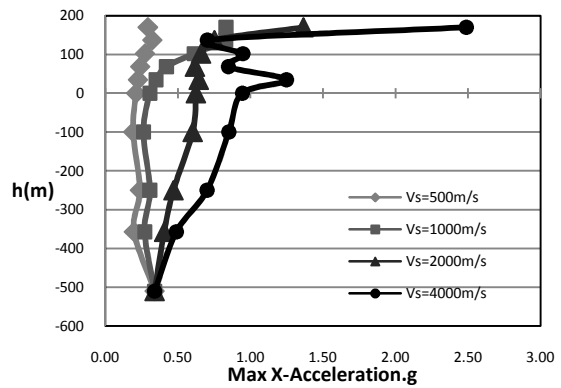
شکل (۹) تعیین شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  براساس نسبت مدول برشی پی به مدول برشی بدنه‌ی سد

### ۵-۲- بررسی تغییرات نسبت میرایی پی

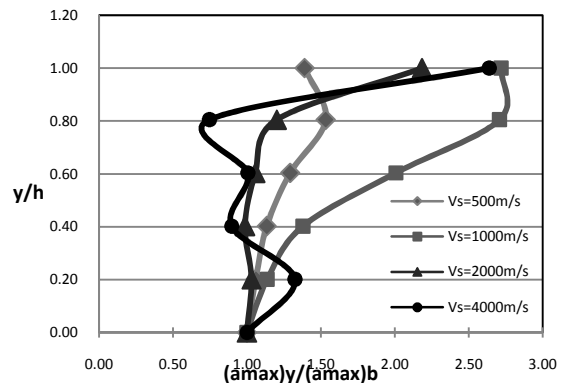
برای بررسی اثر نسبت میرایی پی، تحلیل‌های دینامیکی برای نسبت‌های میرایی یک تا پنج درصد برای ساختگاه انجام شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تغییرات بیشینه شتاب در بدنه و پی سد به ازای میرایی‌های مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  با افزایش میرایی نشان داده شده است. در شکل ۱۴ مقادیر دو شاخص گفته‌شده برای میانگین زلزله‌های دور و نزدیک نشان داده شده است.

جدول (۴) مقادیر سختی پی

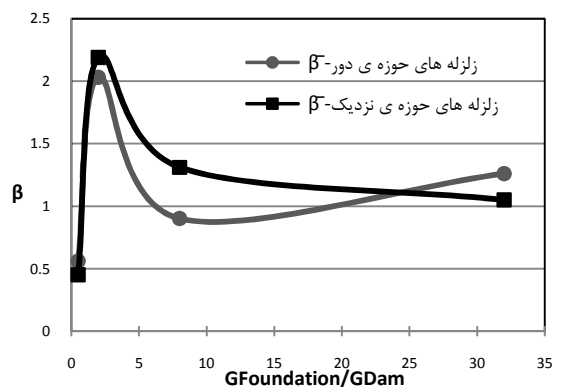
$v_s$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	G(kPa)
500	2500	625000
1000	2500	2500000
2000	2500	10000000
4000	2500	40000000



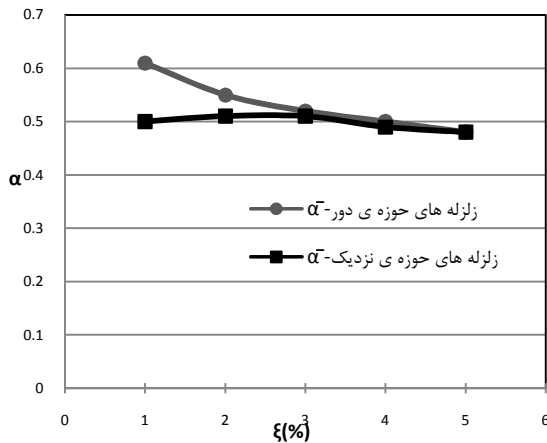
شکل (۵) تغییرات شتاب بیشینه در راستای محور مرکزی سد به ازای مقادیر مختلف برای سختی پی



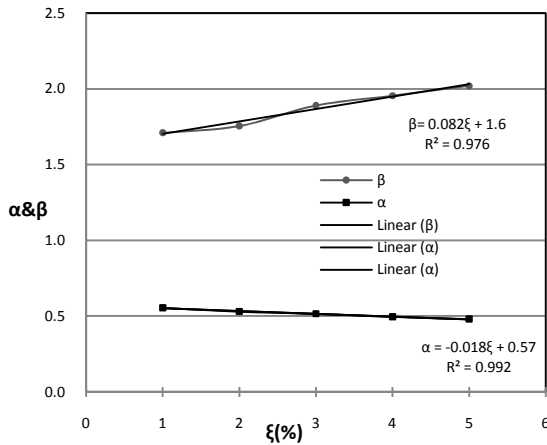
شکل (۶) نسبت تغییرات شتاب بیشینه در ارتفاع به شتاب پایه‌ی سد در محور مرکزی سد به ازای مقادیر مختلف سختی پی



شکل (۷) تغییرات  $\beta$  با نسبت مدول برشی پی به مدول برشی بدنه‌ی سد



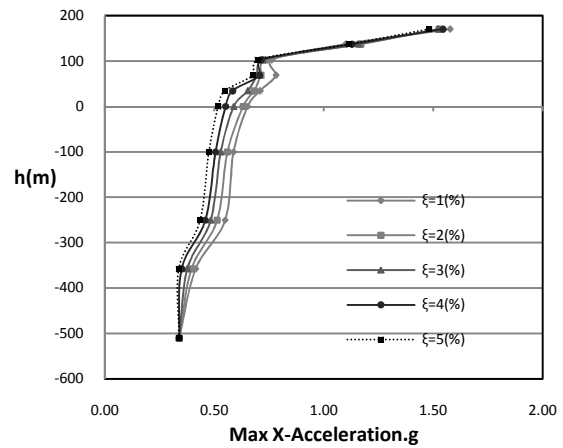
شکل (۱۳) تغییرات مقدار میانگین شاخص  $\alpha$  (تغییرات نسبت میرایی)



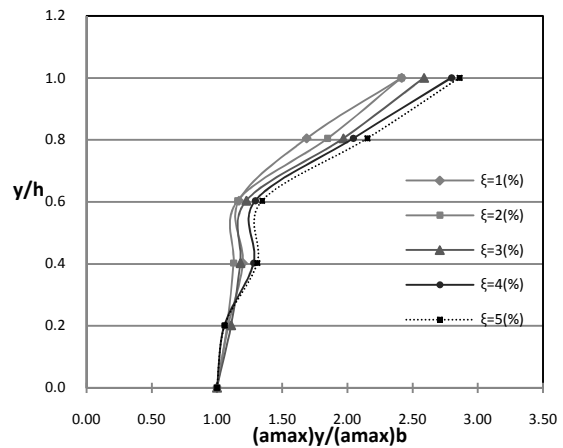
شکل (۱۴) تعیین شاخص های  $\alpha$  و  $\beta$  براساس نسبت میرایی

### ۵-۳- بررسی تأثیر تغییرات ضخامت پی

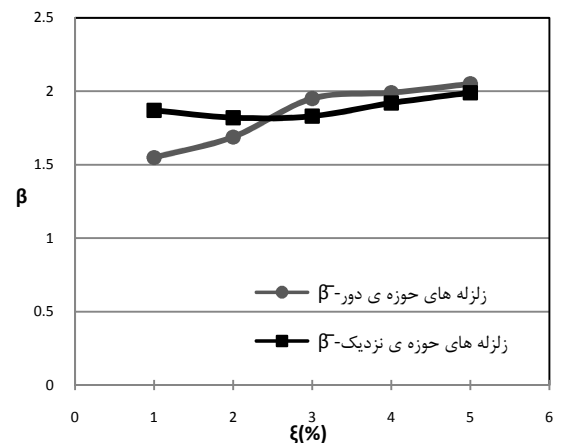
برای بررسی اثر ضخامت پی، پنج دسته تحلیل دینامیکی با ضخامت گوناگون پی انجام شده است. در این کاوش، ضخامت پی بین یک تا پنج برابر ارتفاع سد است. تغییرات شتاب بیشینه برای راستای محور مرکزی سد در پی و بدنه ی سد به ازای ضخامت های مختلف برای پی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در شکل ۱۶، این تغییرات نسبت به شتاب ایجاد شده در پایه سد نرمال سازی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش ضخامت ساختگاه، روند افزایش شتاب در ارتفاع سد از حالت



شکل (۱۰) تغییرات شتاب بیشینه در راستای محور مرکزی سد در پی و بدنه ی سد (تغییرات نسبت میرایی)

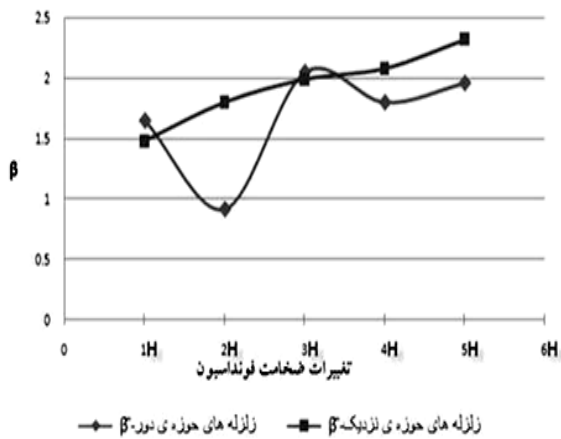


شکل (۱۱) نسبت تغییرات شتاب بیشینه در ارتفاع به شتاب پایه ی سد در محور مرکزی سد (تغییرات نسبت میرایی)

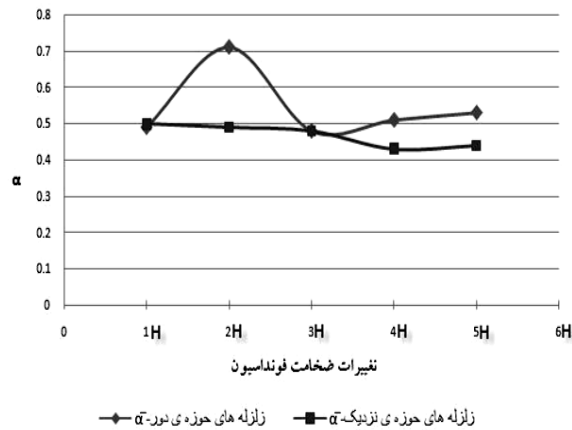


شکل (۱۲) تغییرات مقدار میانگین شاخص  $\beta$  (تغییرات نسبت میرایی)

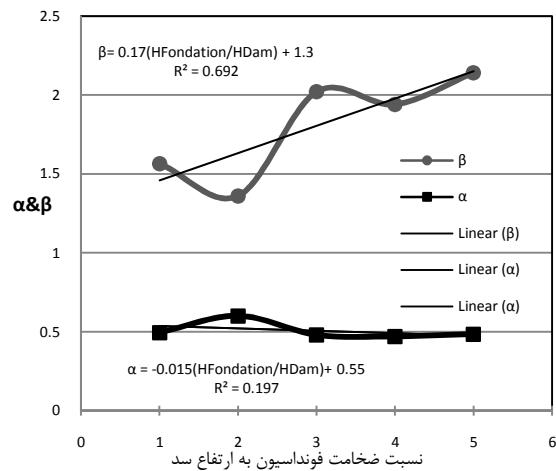




شکل (۱۷) تغییرات مقدار میانگین شاخص  $\beta$  (تغییرات ضخامت پی)



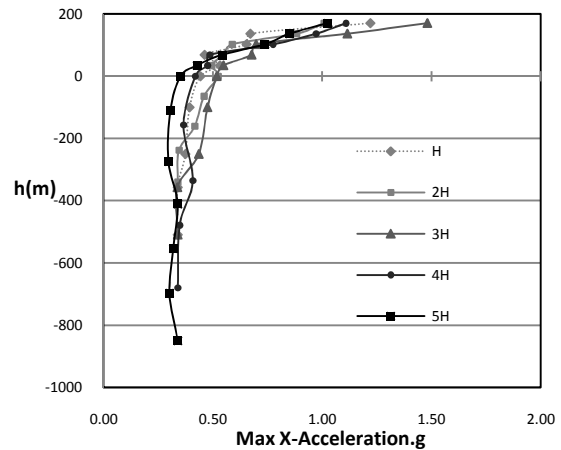
شکل (۱۸) تغییرات مقدار میانگین شاخص  $\alpha$  (تغییرات ضخامت پی)



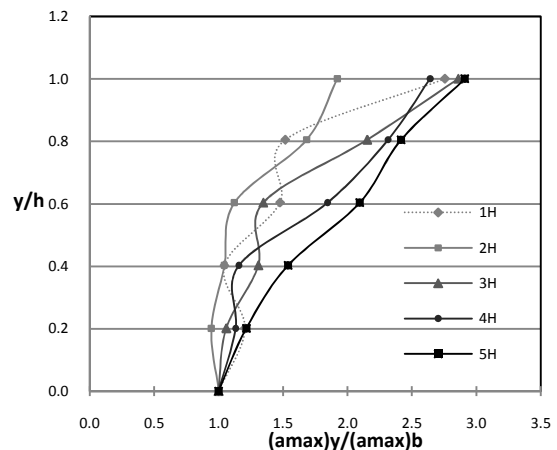
شکل (۱۹) تعیین شاخص های  $\alpha$  و  $\beta$  براساس نسبت ضخامت پی به ارتفاع سد

غیرخطی به حالت خطی نزدیک تر می شود.

تغییر شاخص های  $\alpha$  و  $\beta$  به ازای افزایش ضخامت پی برای زلزله های حوزه ی دور و نزدیک به طور جداگانه در شکل های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. در شکل ۱۹، مقادیر میانگین هر دو شاخص به ازای ضخامت های مختلف نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش ضخامت ساختگاه، شاخص  $\beta$  به طور میانگین برای هر دو نوع زلزله افزایش می یابد، ولی این روند در مورد شاخص  $\alpha$  دیده نمی شود.



شکل (۱۵) تغییرات شتاب بیشینه در راستای محور مرکزی سد در پی و بدنه ی سد (تغییرات ضخامت پی)



شکل (۱۶) نسبت تغییرات شتاب بیشینه در ارتفاع به شتاب پایه ی سد در محور مرکزی سد (تغییرات ضخامت پی)

## ۶- تفسیر نتایج به دست آمده

نتایج ارائه شده گویای آن است که با افزایش سختی پی، مقدار شتاب وارد بر پایه‌ی سد، افزایش یافته است. در واقع با افزایش سختی پی، از صلبیت بدنه در مقایسه با پی کاسته شده و رفتار بدنه در راستای افزایش انعطاف‌پذیری و فعال شدن مدهای بالاتر ارتعاش، میل کرده است و فرض تغییرات شتاب در ارتفاع بدنه‌ی سد با خطای بیش‌تری روبرو خواهد بود. در حالی که سختی پی در مقایسه با سختی بدنه، اندک است، در ۲۰ درصد بالای بدنه‌ی سد کاهش نسبتاً محسوسی در مقدار شتاب بیشینه اتفاق افتاده است؛ همچنین در حالی که سختی پی، بالا است، افزایش محسوسی در مقدار شتاب بیشینه مشاهده می‌شود. بر این اساس در مورد سدهایی که روی پی‌های با سختی زیاد ساخته می‌شوند، به نظر می‌رسد، گوه‌های گسیختگی در قسمت بالای بدنه‌ی سد، شرایط بحرانی خواهند داشت.

در هر دو حالت زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک، شاخص  $\beta$  در حالتی که  $v_s = 1000$  m/s است، بیش‌ترین مقدار و پارامتر  $\alpha$  کم‌ترین مقدار است. البته این تغییرات در حالتی که مدول برشی پی، دو برابر مدول برشی بدنه‌ی سد است؛ اتفاق افتاده است که این نتیجه با نتایج خالدی (۱۳۸۷) که این نسبت را حدود یک در نظر گرفته، متفاوت است.

از سوی دیگر، با افزایش نسبت میرایی پی، شاخص  $\beta$  افزایش و شاخص  $\alpha$  کاهش می‌یابد. میزان تغییرات شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  بسیار کم است، به گونه‌ای که می‌توان گفت تغییرات نسبت میرایی، تأثیر ناچیزی بر میزان شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  دارد. تغییرات مقدار شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  با در نظر گرفتن هر دو حالت حوزه‌ی دور و نزدیک، حدود ۲۰ درصد است. لازم به یادآوری است که نتیجه‌ی بالا در هر دو دسته تحلیل‌های مربوط به زلزله‌های حوزه‌ی دور و نزدیک مشاهده شده است.

سرانجام با توجه به نتایج گفته‌شده و با توجه به نمودارهای مورد نظر، فرمول‌هایی ارائه شده است:

- رابطه‌ی بین شاخص  $\beta$  و نسبت سختی پی به سختی بدنه‌ی سد:

$$\beta = \beta_0 + 0.1 \left( \frac{G_{\text{Foundation}}}{G_{\text{Dam}}} - \left( \frac{G_{\text{Foundation}}}{G_{\text{Dam}}} \right)_0 \right) \quad 0 \leq \frac{G_{\text{Foundation}}}{G_{\text{Dam}}} \leq 10$$

البته توجه شود که در محدوده‌ی  $1 \leq \frac{G_{\text{Foundation}}}{G_{\text{Dam}}} \leq 3$  اعمال ضریب تشدید ضروری است.

- رابطه‌ی بین شاخص  $\beta$  و نسبت میرایی

$$\beta = \beta_0 + 0.1(\xi - \xi_0)$$

- رابطه‌ی بین شاخص  $\beta$  و نسبت ضخامت پی به ارتفاع سد:

$$\beta = \beta_0 + 0.2 \left( \frac{H_{\text{Foundation}}}{H_{\text{Dam}}} - \left( \frac{H_{\text{Foundation}}}{H_{\text{Dam}}} \right)_0 \right)$$

در روابط بالا زیرنویس صفر بیانگر مشخصات سد در حالت عمومی است که  $\beta$  برای آن مشخص و معادل  $\beta_0$  است. در رابطه با شاخص  $\alpha$ ، به نظر می‌رسد که این شاخص جز تأثیرپذیری کم در ارتباط با سختی پی، در موارد دیگر، چندان تأثیرپذیر نیست و روند ثابتی داشته است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر ضخامت، میرایی و سختی پی در پاسخ لرزه‌ای سد خاکی مسجدسلیمان بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که توجه به مدل‌سازی هم‌زمان بدنه و پی، نقش مهمی در پیش‌بینی دقیق رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی دارد. بر این اساس، در نظر گرفتن سختی واقعی پی و به عبارتی دوری جستن از فرض پی صلب در تحلیل‌ها سبب کاهش پاسخ شتاب سد خواهد شد. این نتیجه، با مطالعات Papalou and Bielak (2004) مطابقت دارد. در ارتباط با شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$ ، به‌طور صریح نمی‌توان اظهار نظر کرد که

اجباری، رساله‌ی دکتری ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۸۲.

[۳] قائمیان، محسن، "اثر پی بر رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی با در نظر گرفتن اندرکنش سد و دریاچه"، دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۶.

[4] Chopra, A. K., and Perumalswami, P. R. (1971). "Dynamics of earth dams with foundation interactions." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, 97(1), 181-191.

[5] Dakoulas, P. (1993). "Response of earth dams in semicylindrical canyons to oblique SH waves." J. Engrg. Mech., ASCE, 119(1), 74-90.

[6] Dakoulas, P., and Hsu, C.-H. (1995). "Response of dams in semielliptic canyons to oblique SH-waves." J. Engrg. Mech., ASCE, 121(3), 379-391.

[7] Das. B, Principle of Soil Dynamics, 1993.

[8] Ghanbari.A, Davoodi.M and Ahmadi.B, A New Equation to calculate the seismic coefficient of pseudo-static analysis for masjed soleiman Dam, Dam Engineering, 2008, vol.XIX, No.2, 128-144.

[9] Krahn, J., "Stress and deformation modeling with sigma/w", Geo-slope International ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2007.

[10] Krahn, J., " Dynamic modeling with Quake/w ", Geo-slope International ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2007.

[11] Krahn, J., " Stablity modeling with slope/w ", Geo-slope International ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2007.

[12] Kramer, S.L., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall.1996.

[13] Papalou. A. and Bielak. J., Seismic elastic response of earth dams with canyon interaction, Journal of Geo. Geoenviron. Eng., ASCE, 2001, vol.127, No.5, 446-453.

[14] Papalou. A. and Bielak. J., Nonlinear Seismic Response of earth dams with Canyon Interaction, Journal of Geo. Geoenviron. Eng., ASCE, 2004, vol.130, No.1, 103-110.

با افزایش یا کاهش سختی، روندی منظم به صورت صعودی یا نزولی در مقدار شاخص‌های  $\alpha$  و  $\beta$  وجود دارد؛ ولی با افزایش سختی تا حد مشخصی، در مورد شاخص  $\alpha$ ، روندی کاهشی و سپس افزایشی و در مورد شاخص  $\beta$ ، ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی مشاهده می‌شود.

با افزایش مقدار نسبت میرایی پی، شتاب وارد بر پایه‌ی سد کاهش می‌یابد که البته با توجه به افزایش استهلاك انرژی این موضوع قابل پیش‌بینی بوده است. با این حال تغییرات نسبت میرایی پی در نحوه‌ی پخش شتاب در ارتفاع سد، تأثیر ناچیزی داشته، به گونه‌ای که می‌توان از تغییرات پخش شتاب چشم‌پوشی کرد.

با افزایش ضخامت پی تغییرات شتاب بیشینه در بدنه‌ی سد به سمت خطی شدن میل می‌کند. با افزایش ضخامت، از میزان تغییرات شتاب بیشینه در ضخامت پی، از سنگ بستر تا پایه‌ی سد، کاسته شده؛ به گونه‌ای که در مورد ضخامت  $H/5$ ، می‌توان گفت هیچ‌گونه تغییری مشاهده نشده و تغییرات شتاب بیشینه در ضخامت پی، ثابت است. با افزایش ضخامت آبرفت، شاخص  $\beta$  نیز افزایش یافته است، با این حال این روند در مورد ضخامت  $2H$  در حوزه‌ی دور دیده شود. با افزایش ضخامت آبرفت، شاخص  $\alpha$  کاهش یافته است؛ اما این روند در مورد ضخامت  $2H$  در حوزه‌ی دور مشاهده شود.

## ۸- مراجع

[۱] خالدی، نصار، مطالعه رفتار لرزه‌ای سدهای هسته آسفالتی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی و شبه-استاتیکی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت معلم، تهران، ۱۳۸۷.

[۲] داودی، محمد، ارزیابی مشخصات دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی و