

## چکیده

سدها از جمله سازه‌های عظیم مهندسی هستند که بررسی رفتار لرزه‌ای آنها تحت تکانه‌های لرزه‌ای شدید از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا آسیب و خرابی این ابرسازه‌ها می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد. در این تحقیق، مدل‌سازی اجزای محدود سد بتنی قوسی مارو پوینت در نرم‌افزار سالیید و راک انجام شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی سد با در نظر گرفتن اندرکنش سد-دریاچه-فونداسیون در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام گرفته است. در روند تحلیل غیرخطی از مدل پلاستیسیته خرابی بتن استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تأثیر چگونگی توزیع انرژی زلزله بر رفتار لرزه‌ای سد، رکوردهای ثبت شده مربوط به زلزله‌های مختلف با استفاده از تبدیل گسسته موجک به مؤلفه‌های مختلف با سطح انرژی متفاوت تجزیه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که در حوزه نزدیک گسل می‌توان مؤلفه موجکی از زلزله را یافت که با وجود دارا بودن مدت‌زمان مؤثر کمتر، در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به رکورد اصلی، پاسخ‌های نزدیک به رکورد اصلی با اختلافی کمتر از ۱۰ درصد را حاصل نماید که این خود کاهش زمان تحلیل را در پی خواهد داشت. همچنین نشان داده شده که میزان انرژی زلزله و شدت آن در واحد زمان در چگونگی بازتاب سازه مؤثر خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** سد بتنی قوسی، انرژی زلزله، پاسخ غیرخطی، تبدیل موجک.

# بررسی اثر انرژی زلزله روی رفتار لرزه‌ای سد بتنی قوسی با استفاده از تبدیل موجک

## سپیده فیروزی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه مازندران، بابلسر

## محسن بزرگ‌نسب (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه

مازندران، بابلسر

m.bozorgnasab@umz.ac.ir

## رضا تقی‌پور

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه

مازندران، بابلسر

## ۱- مقدمه

لرزه‌ای آن پیشنهاد دادند. مطالعه موردی تحلیل خطی بر روی سد بلو استون<sup>۱</sup> انجام گرفت. در این تحقیق، احتمال رخداد ترک کششی در ناحیه تاج سد و نیز لغزش پای سد بر مبنای افزایش بیشینه شتاب زمین (PGA)<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. ژانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳ مطالعاتی روی تأثیرات مدت‌زمان زلزله بر پاسخ دینامیکی و خرابی تجمعی سدهای وزنی انجام دادند. مدل این سد برای ارزیابی پاسخ دینامیکی به صورت غیر خطی تحلیل شد و مدت‌زمان زلزله بر اساس تعریف مدت‌زمان مؤثر به دست آمد و شاخص‌های خرابی کلی و موضعی جهت ارزیابی پاسخ سازه تعریف گردید. با کمک این تعاریف، نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که با افزایش مدت‌زمان مؤثر زلزله، میزان خرابی تجمعی در مجموعه بدنه سد افزایش می‌یابد.

سدها از جمله سازه‌های مهندسی هستند که با وجود تأثیر مثبت در ذخیره‌سازی آب و تولید برق، در صورت صدمه دیدن و شکسته شدن، می‌توانند مخرب و زیان‌آور باشند. یکی از عوامل مهم ایجاد چنین فاجعه‌ای، فعالیت‌های لرزه‌ای است که می‌تواند باعث از دست رفتن زندگی مردم و خسارات مالی و جانی زیادی شود. با توجه به احتمال آسیب‌پذیری سدها در برابر زلزله‌های شدید، ارزیابی مناسب از عملکرد آنها در برابر زلزله از اهمیت بسزایی برخوردار است. آگاهی از چگونگی رفتار دینامیکی سد تحت اثر زلزله‌های مختلف و شناسایی نقاط ضعف آنها در این راستا می‌تواند مد نظر قرار گیرد [۱]. تاکی و الینگ‌وود [۲] در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار روشی را برای توسعه شکنندگی سد بتنی وزنی به منظور دسترسی به عملکرد

موجک پیوسته، تکانه لرزه‌ای شدید به مؤلفه‌هایی در بازه‌های فرکانسی مختلف تجزیه و مدت زمان زلزله در هر بازه فرکانسی محاسبه شد. در ادامه بازتاب سازه در اثر مؤلفه تجزیه شده با کمک تحلیل دینامیکی فزاینده مورد بررسی قرار گرفت. کائو و فریسول [۹] در سال ۲۰۰۹ به بررسی تأثیر تمرکز انرژی زلزله بر پاسخ غیرخطی سازه‌ها پرداختند. آنها با کمک تبدیل موجک، رکورد زلزله را به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های موجک تجزیه کردند و پاسخ غیرخطی سازه را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق مزبور، همچنین تعریفی جدید از بیشینه شتاب زمین (CPGA) برای رکورد زلزله ارائه شده است. در سال ۲۰۱۶ ناصر علوی و همکاران [۱۰] به توصیف تأثیر تبدیل موجک مختلف روی تحلیل دینامیکی سازه پرداختند. از آنجایی که به کار بردن تبدیل موجک، روشی جدید جهت کاهش تلاش‌های محاسباتی به‌ویژه در بهینه‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد، آنها رکورد زلزله را با کمک تبدیل موجک، در هر مرحله از تحلیل فیلتر کردند. در این تحقیق، از تحلیل موجک گسسته استفاده شد. در نهایت، خطای استفاده از موجک‌های مختلف را بر اساس مقایسه پاسخ دینامیکی سازه با پاسخ دقیق محاسبه کردند و دریافتند که پاسخ دینامیکی سازه با استفاده از موجک دایچی و مورلت به پاسخ دقیق نزدیک‌تر می‌باشد.

در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم‌افزار سالیید و رک<sup>۶</sup> سد بتنی قوسی ماروپوینت<sup>۷</sup> مدل‌سازی گردیده و مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس و با در نظر گرفتن اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون و رفتار غیرخطی بتن مورد تحلیل قرار گرفته است. در روند تحلیل، با کمک کدنویسی در نرم‌افزار متلب و با استفاده از تبدیل موجک، زلزله‌های مورد استفاده به مؤلفه‌های مختلف تجزیه شده و از آنها در تحلیل دینامیکی غیرخطی سد استفاده شده است. هر یک از این مؤلفه‌ها دارای باند فرکانسی و درصدی از انرژی تجمعی رکورد اصلی می‌باشند.

هدف این مقاله یافتن شتاب‌نگاشت‌ها با زمان کمتر جهت کاهش حجم محاسبات و در نتیجه زمان تحلیل در شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل در نرم‌افزار آباکوس

استفاده از مفاهیم تحلیل موجک<sup>۳</sup> در مباحث لرزه‌ای سازه‌ها در دهه اخیر افزایش یافته است. در میان تحقیقات انجام شده، می‌توان به مطالعات راجاسکاران و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۶ اشاره نمود. آنها با تحقیقاتی که انجام دادند موفق شدند با کمک تحلیل موجک، رکورد اصلی را به چندین مؤلفه با باند فرکانسی مجزا تجزیه نمایند. آنها با جابه‌جایی و ترکیب این مؤلفه‌های اصلی به تولید زلزله مصنوعی پرداختند. میائو و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۱ به مطالعه خرابی سازه‌های بتنی پیش‌تنیده با کمک تبدیل موجک پرداختند. آنها ادعا نمودند که روش به‌کار رفته در این تحقیق، قادر به تشخیص آسیب‌دیدگی و موقعیت آن با سرعت و دقت مناسب می‌باشد. سان و رن [۶] در سال ۲۰۱۶ برای نخستین بار به مطالعه ظرفیت باربری سد بتنی با استفاده از تحلیل موجک پرداختند. با توجه به عملکرد مناسب تحلیل موجک در حوزه زمان-فرکانس، گسترش خرابی سد بتنی وزنی کوینا<sup>۴</sup> در برابر زلزله ۱۹۶۷ کوینا تحت ضرایب مقیاس مختلف با کمک این روش انجام شده است. همچنین در این تحقیق، یک شاخص خرابی نیز برای سد پیشنهاد شده است.

در سال ۲۰۱۰ ملایولی و بوسی [۷] به توصیف ویژگی‌های پالس‌گونه زمین‌لرزه حوزه نزدیک بر اساس انرژی موجک پرداختند. آنها با کمک تبدیل موجک و با استفاده از دو روش پردازش سیگنال مبتنی بر انرژی ورودی مطلق و نسبی در جهت تولید سیگنال ساده شده پرداختند. این سیگنال‌ها حاوی ویژگی‌های اصلی زمین‌لرزه‌های پالس‌گونه بوده است. در این تحقیق، از تحلیل موجک با موجک دایچی<sup>۵</sup> استفاده شد. با بهره‌گیری از روش مبتنی بر انرژی نشان داده شد پالس سرعتی که نتیجه پالس شتاب بزرگ باشد، اثرات مخرب تری دارد؛ زیرا پریرود این پالس‌ها معمولاً در محدوده‌ای است که باعث آسیب سازه‌ای می‌شود. به عبارت دیگر، پتانسیل خسارت در سازه می‌تواند مرتبط با پریرود پالس باشد. مونتجو و کوالسکی [۸] در سال ۲۰۰۸ به تخمین مدت زمان تکانه‌های شدید زمین برای شتاب‌نگاشت‌های تجزیه شده و اثرات آنها بر پاسخ غیرخطی سازه یک درجه آزادی پرداختند. بدین‌منظور با کمک تحلیل

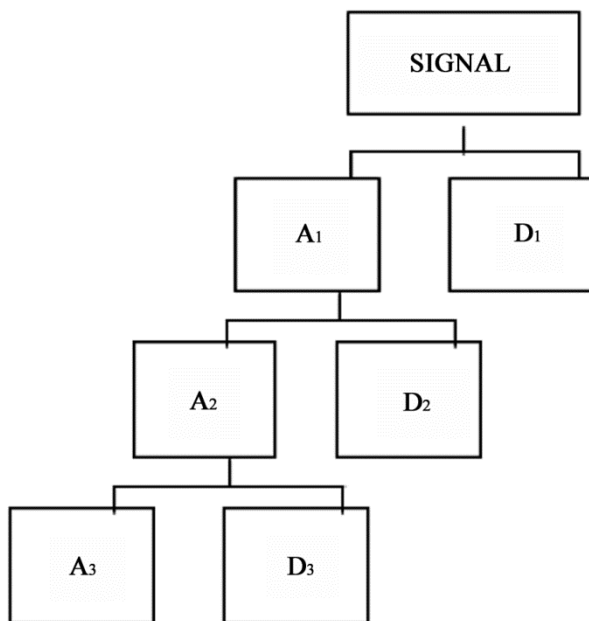
در مهندسی زلزله، معمولاً با سیگنال‌های سری زمانی گسسته مواجه هستیم که برای این سیگنال‌ها از تبدیل موجک گسسته استفاده می‌شود. رابطه (۲) تابع اولیه موجک گسسته و رابطه (۳) تبدیل موجک گسسته را نشان می‌دهند [۱۵-۱۶]:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^j \Psi(2^j t - k) \quad (2)$$

$$DWT(j, k) = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*(2^{-j} t - k) dt \quad (3)$$

در روابط فوق، ضریب مقیاس  $a$  و ضریب انتقال  $b$  مربوط به حالت پیوسته به صورت  $a = 2^j$  و  $b = k$  تبدیل شده است که در آنها  $k \in Z$ ،  $j \in Z$  و دامنه اعداد صحیح می‌باشد.

در تبدیل موجک گسسته، سیگنال اصلی در هر مرحله به دو سیگنال جزئیات<sup>۹</sup> و تقریب<sup>۱۰</sup> تجزیه می‌شود که سیگنال تقریب  $A_i$  حاوی مؤلفه‌های فرکانس پایین و سیگنال جزئیات  $D_i$  حاوی مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال است [۶]. به عبارت دیگر در هر بار تجزیه، یک باند فرکانسی از سیگنال اصلی جدا شده و باقیمانده در سیگنال تقریب ذخیره می‌شود. در حالت کلی می‌توان سیگنال اصلی را از حاصل جمع سیگنال‌های ایجاد شده به دست آورد. در شکل (۱) این روند نشان داده شده است:



شکل (۱): تجزیه گسسته موجک در سه سطح [۱۳].

می‌باشد. این موضوع با بهره‌گیری از تحلیل گسسته موجک شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده انجام شده است و نیز از اهداف دیگر این پژوهش بررسی تأثیر انرژی زلزله بر پاسخ غیرخطی سد می‌باشد. در جریان تحلیل، به تأثیر مؤلفه‌های تجزیه شده زلزله در مقایسه با رکورد اصلی در پاسخ سازه پرداخته شده است.

ساختار این تحقیق به قرار زیر است:

در ابتدا روش تبدیل موجک به اختصار آورده شده است. سپس به معرفی مدل المان محدود سد مورد مطالعه پرداخته می‌شود. در ادامه ضمن معرفی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق، با به کارگیری تبدیل موجک، رکورد اصلی زلزله به مؤلفه‌های موجک تجزیه شده و تأثیر مؤلفه‌های موجک با انرژی‌های متفاوت بر پاسخ سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن به بررسی تأثیر چگونگی توزیع انرژی در طول زمان بر رفتار لرزه‌ای سد پرداخته خواهد شد. در انتها نتایج حاصل از این تحقیق به طور مختصر ارائه خواهد شد.

## ۲- تحلیل موجک

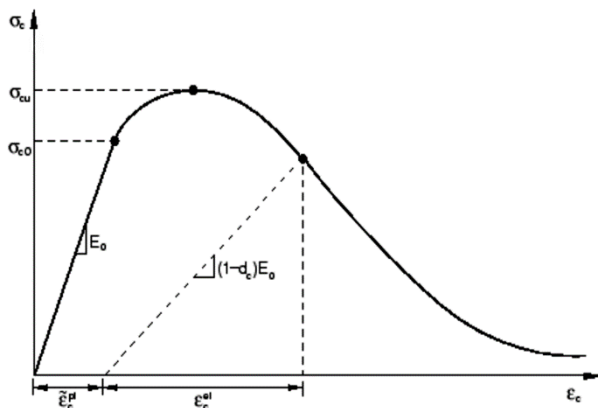
تئوری موجک توابع ریاضی هستند که برای پردازش و تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های زمان-فرکانس به کار می‌روند. این تئوری اولین بار توسط مورلت در سال ۱۹۸۴ ارائه شد [۱۱]. تبدیل موجک دارای خصوصیات محلی سازی مناسبی است که اطلاعات را به صورت هم‌زمان در دو حوزه زمان و فرکانس ارائه می‌دهد [۱۲]. در میان انواع تبدیل موجک، معمول‌ترین آنها تبدیل موجک پیوسته و تبدیل موجک گسسته می‌باشند.

تبدیل موجک پیوسته برای تابع پیوسته  $f(t)$  با ضریب مقیاس  $a$  و ضریب انتقال  $b$  چنین تعریف می‌شود [۱۱، ۱۳-۱۴]:

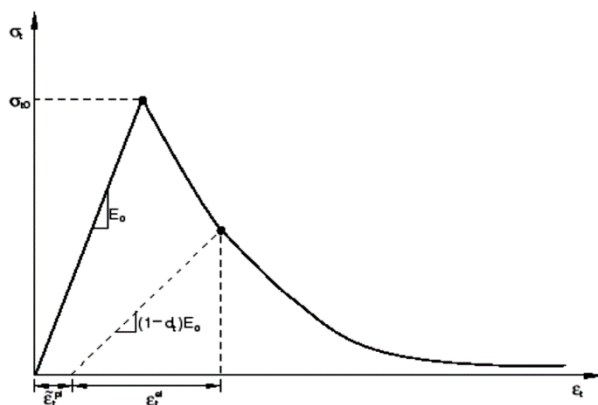
$$Wf(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

که  $\Psi(t)$  تابع پیوسته‌ای در حوزه زمان و فرکانس است و با نام موجک مادر<sup>۸</sup> شناخته می‌شود که در این پژوهش از موجک دایچی استفاده شده است.  $\Psi^*(t)$  تابع مختلط مزدوج  $\Psi(t)$  می‌باشد و  $\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  تابع پایه موجک نامیده می‌شود.

سد بتنی مورد استفاده در تحلیل دارای مدول الاستیسیته ۲۷/۵۷۹ گیگاپاسکال، چگالی ۲۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش فشاری نهایی ۳۰ مگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲ و تنش کششی ۲/۹ مگاپاسکال می باشد. برای فونداسیون، مدول الاستیسیته ۲۷/۵۷۹ گیگاپاسکال، چگالی ۲۶۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون ۰/۲ در نظر گرفته شده است و سیال مخزن دارای مدول بالک ۲/۱ گیگاپاسکال و چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد [۱۷]. به منظور ارزیابی خرابی سد بتنی، از مدل خرابی پلاستیک بتن<sup>۱۱</sup> استفاده شده است [۱۸]. در این مدل فرض می شود که دو سازوکار اصلی شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری است [۱۹]. شکل های (۳) و (۴) منحنی رفتار خرابی بتن تحت فشار تک محوره و کشش تک محوره را به ترتیب نشان می دهد و از اطلاعات مراجع [۱۲، ۲۰-۲۲] به منظور تعریف منحنی ها استفاده شده است.



شکل (۳): رفتار خرابی بتن تحت فشار تک محوره [۱۸].



شکل (۴): رفتار خرابی بتن تحت کشش تک محوره [۱۸].

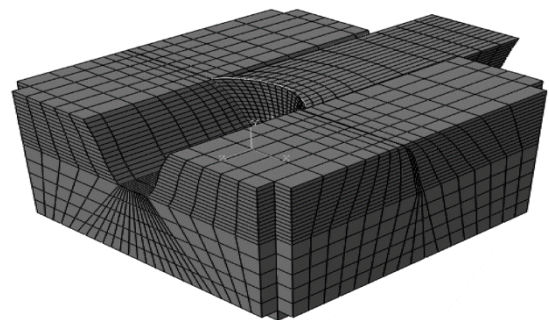
زمانی که سیگنال به مؤلفه تجزیه می شود سیگنال اصلی  $f(t)$  از جمع سیگنال های جزئیات و آخرین سیگنال تقریب به صورت زیر به دست می آید [۱۱].

$$f(t) = A_j(t) + \sum_{i=1}^{i=j} D_i(t) \quad (۴)$$

تبدیل موجک، رکورد زلزله را به مؤلفه هایی که هر کدام دارای باند فرکانسی و درصدی از انرژی جمعیتی رکورد اصلی می باشند تجزیه می کند. از آنجایی که پس از چند مرحله تجزیه، انرژی قابل ملاحظه ای در سیگنال های جزئیات و تقریب پایانی باقی نمی ماند، در این مطالعه، با استفاده از تبدیل موجک گسسته، سیگنال اصلی به ۱۰ سطح تجزیه شده است به طوری که انرژی آخرین سیگنال تقریب صفر می باشد. در این مقاله به تأثیر این تک مؤلفه ها (سیگنال جزئیات) و مقایسه بار رکورد اصلی و نیز تأثیر آن در پاسخ سازه پرداخته شده است. بدین منظور رکوردهای مورد بررسی با کمک کدنویسی در نرم افزار متلب به مؤلفه های مختلف تجزیه شده و نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- مدل عددی المان محدود

مدل المان محدود سد بتنی قوسی ماروپوینت، واقع در ایالت کلرادو آمریکا به عنوان مطالعه موردی این پژوهش در نظر گرفته شده است. این سد دارای ۱۴۳ متر ارتفاع، ۲۲۱ متر طول و ۱۶ متر عرض پاشنه می باشد. عرض تاج سد ۳/۷ متر بوده و در تحلیل سد، اثرات اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون لحاظ شده است. مدل المان محدود این سد در نرم افزار سالید ورک مدل سازی و در نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل (۲) مدل المان محدود این سد را نشان می دهد.



شکل (۲): مش بندی المان محدود سیستم سد-مخزن-فونداسیون.

شده و تجزیه آنها به مؤلفه‌هایی با سطوح انرژی مختلف، مشخصات رکورد اصلی و مؤلفه‌های موجک آنها در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. در جدول‌های زیر،  $T_{90\%}$  بیانگر فاصله زمانی بین ۵ درصد و ۹۵ درصد شدت آریاس<sup>۱۳</sup> می‌باشد. دلیل استفاده از  $T_{90\%}$  نتایج نسبتاً یکسان رکوردهای اصلی زلزله و رکوردهای با زمان محاسبه شده  $T_{90\%}$  در تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد. همچنین ستون «درصد انرژی» میزان انرژی سیگنال نسبت به انرژی اصلی را نشان می‌دهد. برای مثال رکورد مورگان هیل<sup>۱۴</sup> پس از اعمال تبدیل موجک به ۱۰ مؤلفه مختلف تجزیه شود که میزان انرژی تجمعی هر یک از مؤلفه‌ها در طول زمان زلزله و نیز انرژی کل مؤلفه‌های زلزله مربوطه در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

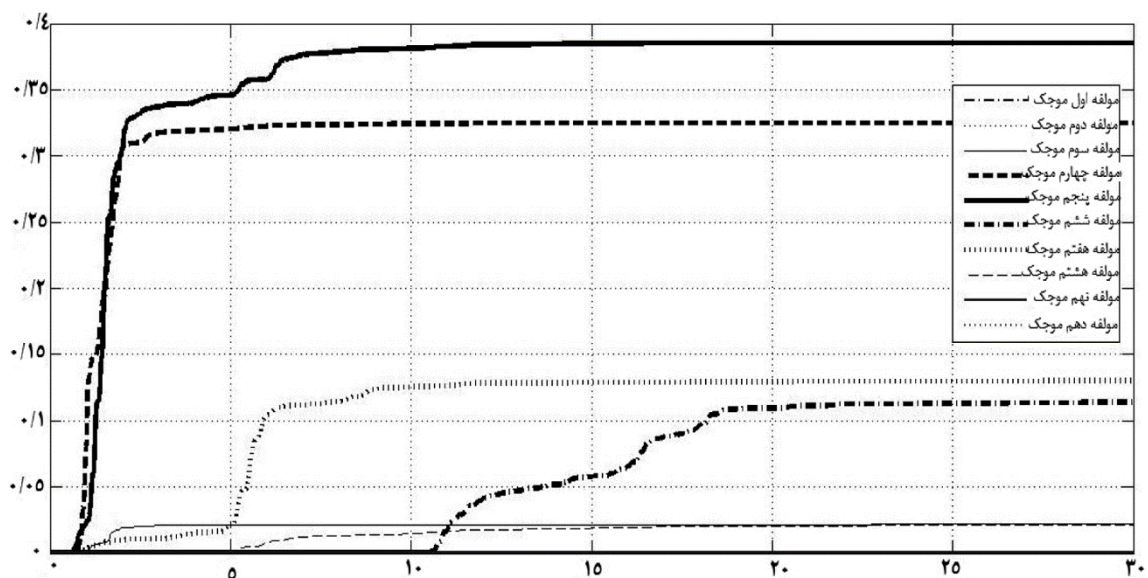
در این تحلیل، برای اعمال میرایی مصالح سد و فونداسیون، از روش میرایی رایلی<sup>۱۲</sup> استفاده شده است [۲۳]. فرکانس اصلی دورانی کل سازه در تحلیل مودال سیستم سد-مخزن-فونداسیون ۱۶/۶۴ رادیان بر ثانیه به دست آمده است. در مدل اندرکنش سد و مخزن در صفحه مشترک بین هر کدام از سد و مخزن و فونداسیون رابطه اندرکنشی به گونه‌ای تعریف شده که دو صفحه مقابل در درجات آزادی انتقالی نسبت به هم حرکت نداشته باشند و نیز شرط نفوذ ناپذیری سیال مخزن در بدنه سد رعایت شده است. به منظور تحلیل دینامیکی چهار شتاب‌نگاشت به سازه اعمال شده که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است [۲۴].

#### ۴- تأثیر انرژی مؤلفه موجک

پس از اعمال تبدیل موجک به شتاب‌نگاشت‌های معرفی

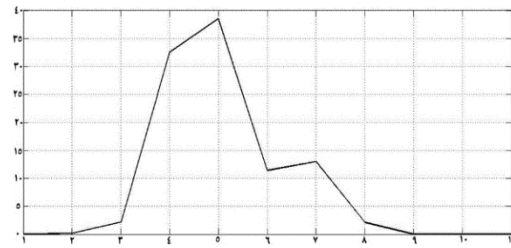
جدول (۱): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی [۲۴].

شماره	زلزله	ایستگاه ثبت	بزرگا	فاصله از مرکز (کیلومتر)	طبقه‌بندی خاک	PGA (g)
۱	Morgan Hill, 1984	Gilroy Array #6	۶/۲	۱۱/۸	B	۰/۲۹۲
۲	Loma Prieta, 1989	Gilroy - Historic Bldg.	۹/۶۳	۱۰/۲۷	B	۰/۲۵۸
۳	Kobe Japan, 1995	Kobe University	۶/۹	۰/۹	B	۰/۲۷۶
۴	Ferndale, 1954	Ferndale City Hall	۶/۵	۲۶/۷۲	B	۰/۱۶۳



شکل (۵): نسبت انرژی تجمعی هر یک از مؤلفه‌های زلزله مورگان هیل به رکورد اصلی در طول زمان زلزله.

همان طور که در جدول های فوق مشاهده می شود، ۱۰ مؤلفه موجکی که از رکورد اصلی تجزیه شده اند، هر کدام دارای درصدی از انرژی کل زلزله اصلی می باشند. همچنین مؤلفه موجکی که دارای انرژی بیشتری نسبت به سایر مؤلفه هاست، مدت زمان مؤثر کمتری نسبت به مدت زمان مؤثر رکورد اصلی زلزله دارا می باشد.



شکل (۶): میزان انرژی کل هر یک از مؤلفه های زلزله مورگان هیل در پایان زمان زلزله.

جدول (۲): مشخصات مؤلفه های موجک تجزیه شده از مورگان هیل و لوماپریتا.

زلزله	مورگان هیل		لوماپریتا	
	مدت زمان مؤثر (ثانیه) (T <sub>90%</sub> )	درصد انرژی	مدت زمان مؤثر (ثانیه) (T <sub>90%</sub> )	درصد انرژی
زلزله اصلی	۷/۲۹	۱۰۰	۸/۹۲	۱۰۰
مؤلفه اول موجک	۲۰/۸۹	۰	۳۰/۶۸	۰
مؤلفه دوم موجک	۱۲/۶۱	۰/۳	۲۴/۴	۰
مؤلفه سوم موجک	۱/۸	۲/۷	۱۴/۹۰۵	۱
مؤلفه چهارم موجک	۱/۲۷	۳۲/۵	۱۴/۰۶	۴/۵
مؤلفه پنجم موجک	۵/۳	۳۸	۹/۷۵۵	۱۴/۵
مؤلفه ششم موجک	۸/۲۶	۱۳	۶/۰۹	۳۵
مؤلفه هفتم موجک	۷/۶۷۵	۱۱	۱۳/۴	۱۲/۵
مؤلفه هشتم موجک	۱۲/۹۵	۲/۵	۷/۱۷	۲۹/۵
مؤلفه نهم موجک	۱۶/۵۶	۰	۷/۰۷۵	۳
مؤلفه دهم موجک	۱۶/۹۷	۰	۹/۵۳	۰

جدول (۳): مشخصات مؤلفه های موجک تجزیه شده از رکورد کوبه و فرندال.

زلزله	کوبه		فرندال	
	مدت زمان مؤثر (ثانیه) (T <sub>90%</sub> )	درصد انرژی	مدت زمان مؤثر (ثانیه) (T <sub>90%</sub> )	درصد انرژی
زلزله اصلی	۷/۰۴	۱۰۰	۱۷/۳۳۵	۱۰۰
مؤلفه اول موجک	۸/۰۹	۰/۱	۸/۵۲	۰
مؤلفه دوم موجک	۶/۵۳	۰/۵	۸/۷۰۵	۰
مؤلفه سوم موجک	۵/۵۵	۵	۸/۳۰۵	۰/۰۳
مؤلفه چهارم موجک	۸/۹۸	۱۰۰	۸/۵۲۵	۱/۹۷
مؤلفه پنجم موجک	۱۱/۰۴	۱۷	۱۰/۹۸	۵
مؤلفه ششم موجک	۴/۲۸	۴۳	۹/۱۶	۱۷/۵
مؤلفه هفتم موجک	۴/۶۴	۲۳/۴	۱۶/۴۷	۲۲/۳
مؤلفه هشتم موجک	۱۴/۵۴	۱	۱۵/۸۶	۴۷
مؤلفه نهم موجک	۱۴/۵۸	۰	۱۹/۰۴	۶
مؤلفه دهم موجک	۱۴/۵۸	۰	۲۰/۱	۱/۲

ساتی متر را در تاج سد ایجاد می‌کند؛ درحالی که مؤلفه ششم موجک این رکورد که با ۳۵ درصد انرژی کل زلزله، دارای بیشترین انرژی در میان مؤلفه‌های موجک است مدت زمان مؤثر برابر ۶/۰۹ ثانیه (۶۸ درصد مدت زمان مؤثر رکورد اصلی) بیشینه جابه‌جایی نسبی برابر با ۴/۸۶ سانتی‌متر (با دو درصد اختلاف) را ایجاد می‌کند.

همچنین برای رکوردهای مورگان هیل و کوبه که به ترتیب دارای مدت زمان مؤثر برابر ۷/۲۹ و ۷/۰۴ ثانیه می‌باشند، بیشینه جابه‌جایی نسبی برابر با ۳/۰۸ و ۴/۷۲ سانتی‌متر ایجاد شده؛ درحالی که مؤلفه مؤثر موجک این زلزله‌ها (مؤلفه پنجم موجک برای رکورد مورگان هیل و مؤلفه ششم موجک برای رکورد کوبه که دارای بیشترین درصد انرژی است) به ترتیب با مدت زمان مؤثر ۵/۳ ثانیه (۷۲ درصد مدت زمان مؤثر رکورد اصلی) و ۴/۲۸ ثانیه (۶۰ درصد مدت زمان مؤثر رکورد اصلی)، بیشینه جابه‌جایی نسبی برابر با ۲/۸۲ و ۴/۲۲ سانتی‌متر (در حدود ده درصد اختلاف) را در تاج سد ایجاد نموده‌اند.

به عنوان مثال، رکورد زلزله کوبه دارای مدت زمان مؤثر برابر ۷/۰۴ ثانیه است؛ درحالی که مؤلفه ششم موجک که دارای درصد انرژی بیشتری در میان سایر مؤلفه‌هاست، مدت زمان مؤثر آن برابر ۴/۲۸ ثانیه است (در حدود ۶۰ درصد زلزله اصلی). همچنین رکوردهای مورگان هیل، لوماپریتا و فرندال<sup>۱۵</sup> نیز به ترتیب دارای مدت زمان مؤثر برابر ۷/۲۹ و ۸/۹۲ و ۱۷/۳۳۵ ثانیه هستند؛ مؤلفه موجک اصلی (دارای بیشترین انرژی) هر کدام به ترتیب دارای مدت زمان مؤثر برابر ۵/۳ ثانیه (در حدود ۷۲ درصد رکورد اصلی)، ۶/۰۹ ثانیه (در حدود ۶۸ درصد رکورد اصلی) و ۱۵/۸۶ ثانیه (در حدود ۹۱ درصد رکورد اصلی) هستند. در ادامه میزان جابه‌جایی نسبی تاج سد تحت چهار شتاب‌نگاشت معرفی شده و پاسخ سازه تحت مؤلفه‌های مختلف موجک آنها در جدول (۴) آمده است. در روند تحلیل مدت زمان مؤثر (T90%) لحاظ شده است.

همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود، مدت زمان مؤثر رکورد لوماپریتا که برابر ۸/۹۲ ثانیه است، بیشینه جابه‌جایی نسبی ۴/۹۶

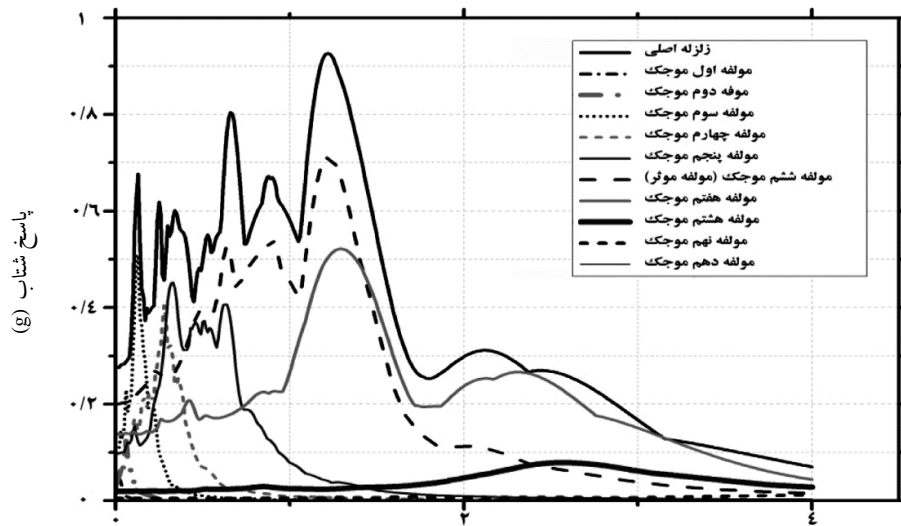
جدول (۴): بیشینه جابه‌جایی نسبی تاج سد (سانتی‌متر).

زلزله	کوبه	مورگان هیل	لوماپریتا	فرندال
زلزله اصلی	۴/۷۲	۳/۰۸	۴/۹۶	۵/۱۶
مؤلفه اول موجک	۱/۶	۱/۵۶	۱/۵۳	۱/۹۷
مؤلفه دوم موجک	۱/۶۳	۱/۶	۱/۵۳	۱/۹۷
مؤلفه سوم موجک	۱/۹۳	۱/۶۸	۱/۶	۱/۹۷
مؤلفه چهارم موجک	۳/۳۱	۱/۸۴	۲	۲
مؤلفه پنجم موجک	۲/۸۸	۲/۸۲	۲/۹	۲/۴۵
مؤلفه ششم موجک	۴/۲۲	۲/۲۵	۴/۸۶	۳/۳۶
مؤلفه هفتم موجک	۲/۷۱	۱/۹۸	۲/۰۶	۲/۶۵
مؤلفه هشتم موجک	۱/۶۸	۱/۶۵	۲/۷	۳/۸۷
مؤلفه نهم موجک	۱/۵۲	۱/۵۹	۱/۷	۲/۵۱
مؤلفه دهم موجک	۱/۵۲	۱/۵۹	۱/۵۴	۱/۹۸

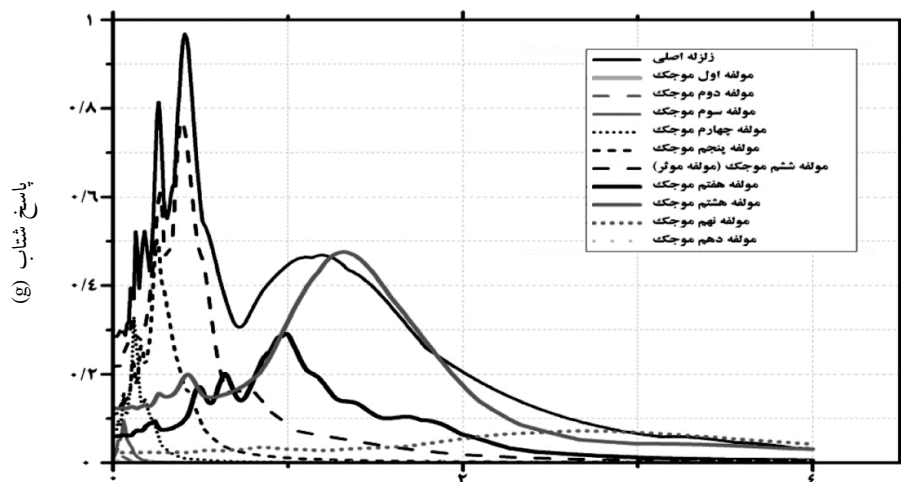
فردال، بیشینه جابه‌جایی نسبی  $5/16$  سانتی‌متر ایجاد می‌شود؛ در حالی که مؤلفه هشتم موجک این رکورد با  $47$  درصد انرژی کل که دارای بیشترین انرژی در میان مؤلفه‌های موجک است، بیشینه جابه‌جایی نسبی برابر با  $3/87$  سانتی‌متر (با اختلاف  $25$  درصد خطا) را ایجاد می‌کند.

به منظور بررسی علت خطای نسبتاً زیاد مؤلفه مؤثر موجک در مورد زلزله فردال، نسبت به سایر زلزله‌های مورد بررسی، در ادامه طیف‌های رکورد اصلی و مؤلفه‌های موجک چهار زلزله فوق در شکل‌های (۷) الی (۱۰) آمده است:

نتایج نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که در سه زلزله مورگان‌هیل، لوماپریتا و کوبه مؤلفه موجک با انرژی غالب، دارای بیشینه جابه‌جایی نسبی نزدیک به بیشینه جابه‌جایی نسبی ایجاد شده توسط رکورد اصلی است؛ در حالی که مدت‌زمان مؤثر این مؤلفه‌ها بسیار کمتر از رکورد اصلی است. از مقایسه نتایج می‌توان دریافت که با در نظر گرفتن مؤلفه‌های مؤثر موجک، زمان تحلیل سیستم در مدل‌های المان محدودی که همواره با حجم محاسبات بالایی روبرو هستیم، قابل کاهش است. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، در خصوص رکورد

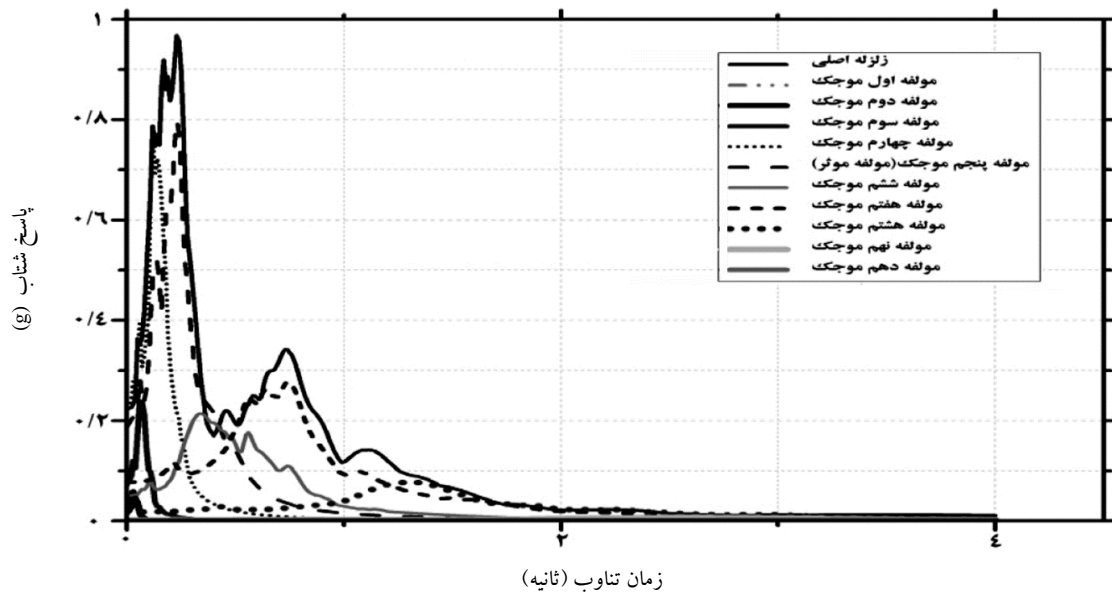


شکل (۷): طیف رکورد کوبه. زمان تناوب (ثانیه)

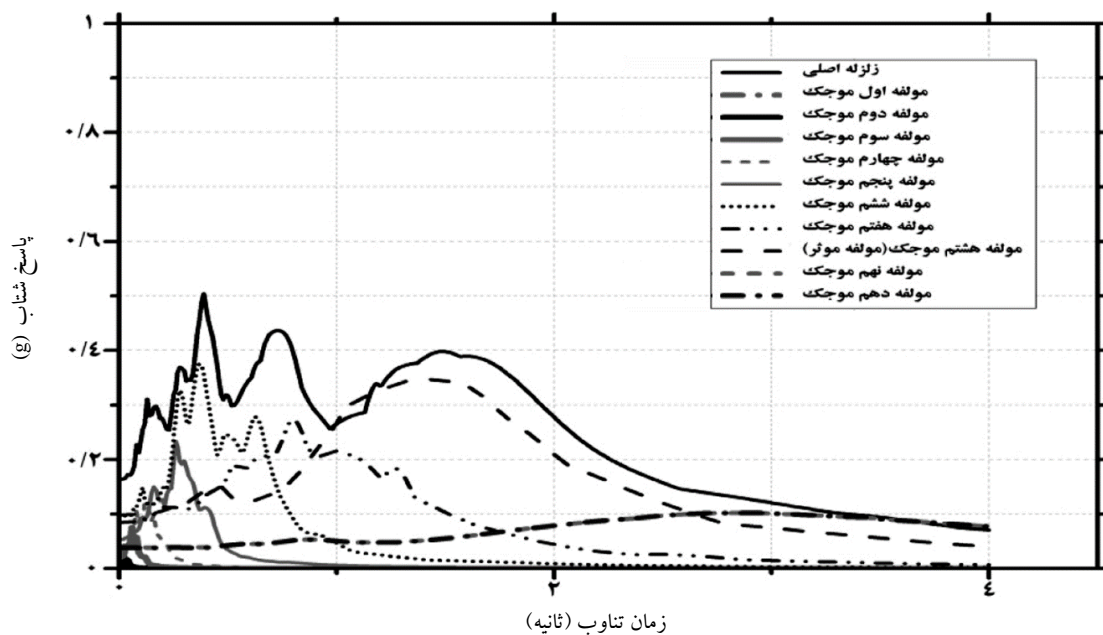


شکل (۸): طیف رکورد لوماپریتا. زمان تناوب (ثانیه)





شکل (۹): طیف رکورد مورگان هیل.



شکل (۱۰): طیف رکورد فرنادال.

طیف استاندارد به عنوان ملاک قرار گرفته را در این مورد لحاظ کرد [۲۵].

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد نتایج ارائه شده در جدول‌های فوق برای مدت زمان مؤثر  $T_{90\%}$  تاریخچه‌های زمانی ارائه شده است. به منظور بررسی بیشتر و تأثیر مدت زمان مؤثر در نظر گرفته شده در نتایج حاصله، نتایج رکورد اصلی و مؤلفه

همان‌طور که در مورد سه زلزله مورگان هیل، لوماپریتا و کوبه مشاهده می‌شود، مقدار طیف مربوط به مؤلفه مؤثر موجک، در پی‌ریود نظیر سازه (۰/۳۷ ثانیه) تقریباً با رکورد اصلی زلزله مطابقت دارد. در حالی که این موضوع در مورد زلزله فرنادال مشاهده نمی‌شود. می‌توان محدوده مورد اشاره در استاندارد ۲۸۰۰ (در محدوده  $0.2T$  الی  $1.5T$ ) که برای انطباق با

در بخش‌های پیشین در خصوص مؤلفه‌های مؤثر موجک زلزله و میزان پاسخ سازه در اثر این مؤلفه‌ها بحث شد. در این بخش با کمک یک پارامتر شناخته شده (شدت آریاس)، وضعیت انرژی رکورد اصلی زلزله و مؤلفه‌های مؤثر موجک آن در طول زمان زلزله مورد بررسی قرار گرفته و وضعیت جابه‌جایی متناظر تاج سد نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق برای رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌ها با فواصل نسبتاً نزدیک به رومرکز زلزله صادق است.

شدت آریاس یک ابزار کمی اندازه‌گیری شدت حرکت زمین بوده و معرف میزان انرژی زلزله می‌باشد [۲۶]. شدت آریاس توسط آرتور آریاس<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۷۰ ارائه و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (۷)$$

که در آن،  $I_a$  شدت آریاس،  $g$  شتاب زمین و  $a(t)$  شتاب تاریخیچه زمانی زلزله است [۲۷].

مؤثر موجک هر چهار شتاب‌نگاشت را با مدت‌زمان اصلی زلزله، مدت‌زمان مؤثر  $T_{90\%}$  و تعریف دیگری از مدت‌زمان مؤثر به نام  $T_{70\%}$  (فاصله زمانی بین ۱۵ درصد تا ۸۵ درصد شدت آریاس) به دست می‌آوریم. نتایج مربوطه در جدول (۵) آمده است.

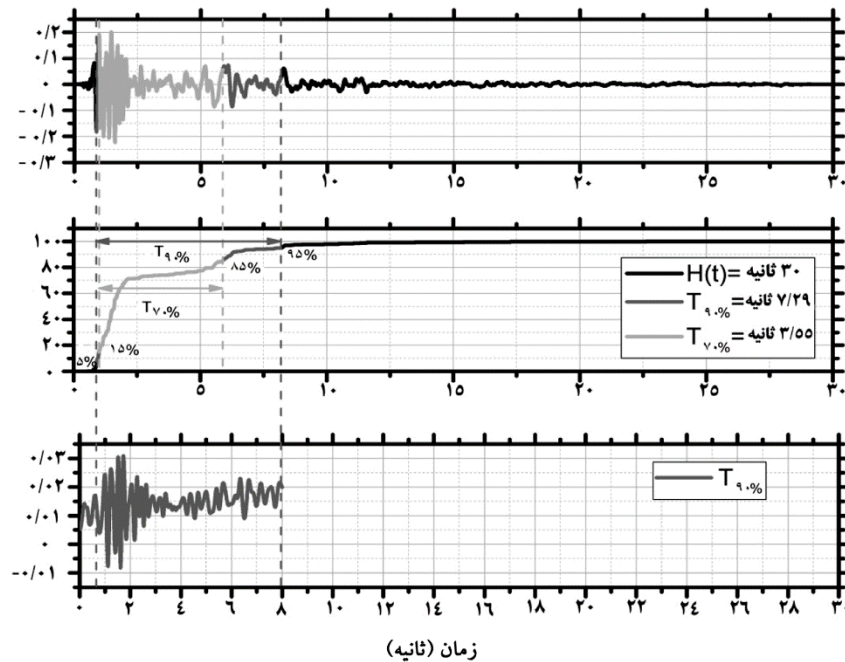
بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۵) نشان می‌دهد که نتایج حاصل از اثر تاریخیچه‌های زمانی با مدت‌زمان مؤثر  $T_{90\%}$  بر سد با مقادیر نظیر در حالت لحاظ کل مدت‌زمان تاریخیچه زمانی، نسبتاً یکسان است. این اختلاف در اثر لحاظ  $T_{70\%}$  به مؤلفه مؤثر موجک، کمی بیشتر است. البته میزان این اختلاف در مورد برخی زلزله‌ها قابل صرف‌نظر می‌باشد؛ به‌عنوان مثال در مورد زلزله فرندال، در نظر گرفتن  $T_{70\%}$  بیشینه جابه‌جایی با مقدار ۹۶ درصد مقدار واقعی (حالت لحاظ کل مدت‌زمان زلزله) را به دست می‌دهد؛ در حالی که این مقدار برای زلزله مورگان هیل به ۸۰ درصد می‌رسد که این تفاوت نتایج در زلزله‌های مختلف بستگی به میزان تمرکز انرژی در بازه‌های مختلف تاریخیچه زمانی دارد.

جدول (۵): بیشینه جابه‌جایی نسبی تاج سد (سانتی‌متر) در اثر زلزله‌های مختلف با لحاظ محدوده‌های زمانی متفاوت.

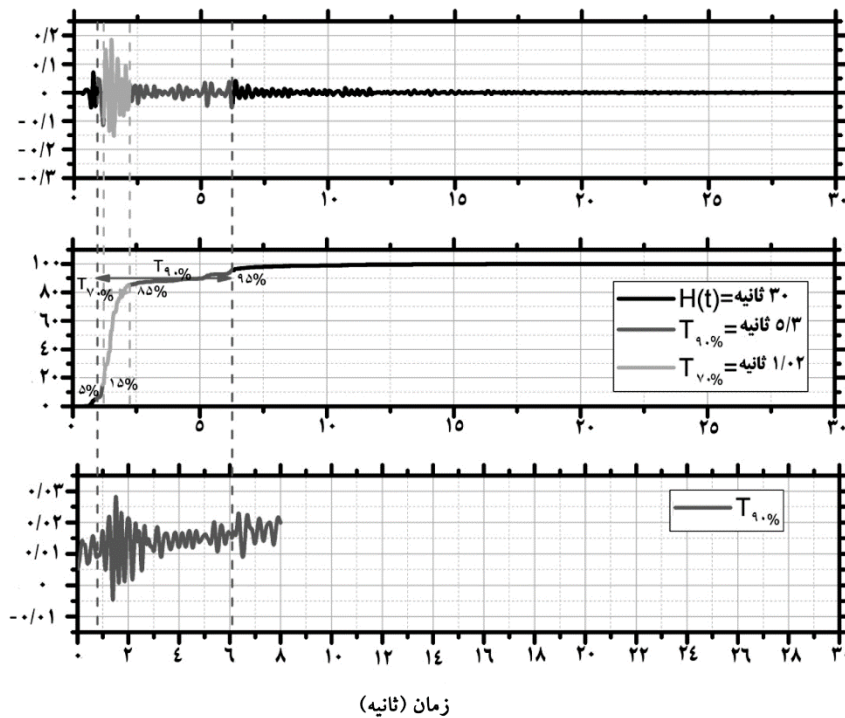
فرندال		لوماپریتا		مورگان هیل		کوبه		زلزله	مشخصات
مؤلفه مؤثر موجک	رکورد اصلی	مؤلفه مؤثر موجک	رکورد اصلی	مؤلفه مؤثر موجک	رکورد اصلی	مؤلفه مؤثر موجک	رکورد اصلی		
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۳۰	۳۲	۳۲	مدت‌زمان (ثانیه)	زمان کل زلزله
۳/۹۶	۵/۲۸	۴/۹۲	۵/۰۵	۲/۹۱	۳/۱۳	۴/۳۳	۴/۷۸	بیشینه جابه‌جایی نسبی (سانتی‌متر)	
۱۵/۸۶	۱۷/۳۳۵	۶/۰۹	۸/۹۲	۵/۳	۷/۲۹	۴/۲۸	۷/۰۴	مدت‌زمان (ثانیه)	مدت‌زمان مؤثر ( $T_{90\%}$ )
۳/۸۷	۵/۱۶	۴/۸۶	۴/۹۶	۲/۸۲	۳/۰۸	۴/۲۲	۴/۷۲	بیشینه جابه‌جایی نسبی (سانتی‌متر)	
۱۰/۳۵	۹/۷۳	۲/۱۱۵	۴/۶۵	۱/۰۲	۴/۸۷۵	۳/۲۹	۳/۵۵	مدت‌زمان (ثانیه)	مدت‌زمان مؤثر ( $T_{70\%}$ )
۳/۷۸	۵	۳/۹۶	۴/۶۷	۲/۴	۳	۳/۷۸	۴/۳۵	بیشینه جابه‌جایی نسبی (سانتی‌متر)	

نمودار که شیب نمودار آریاس به صورت آنی و در فاصله زمانی محدودی به صورت صعودی افزایش می‌یابد، بیشینه جابه‌جایی در تاج سد اتفاق می‌افتد. این موضوع در شکل (۱۲) و برای مؤلفه مؤثر همین زلزله و جابه‌جایی نظیر در تاج سد قابل مشاهده است.

شکل (۱۱) میزان شدت آریاس برای رکورد اصلی زلزله مورگان هیل و جابه‌جایی تاج سد مورد بررسی را در اثر همین زلزله در طول زمان زلزله نشان می‌دهد. مقایسه نمودار شدت آریاس و نمودار پاسخ جابه‌جایی تاج سد نشان می‌دهد که در بازه زمانی از



شکل (۱۱): نمودار شدت آریاس و بیشینه جابه‌جایی تاج سد در اثر رکورد اصلی زلزله مورگان هیل.



شکل (۱۲): نمودار شدت آریاس و بیشینه جابه‌جایی تاج سد در اثر مؤلفه مؤثر زلزله مورگان هیل.

## ۵- تأثیر تمرکز انرژی در زمان

با رکوردهای قبلی، فاصله بیشتر ایستگاه ثبت رکورد در مورد زلزله فرندال نسبت به رومرکز این زلزله می‌باشد.

در این بخش، برای در نظر گرفتن اثر تمرکز انرژی، مؤلفه مؤثر موجک را در طول زمان تاریخچه زمانی شتاب جابه‌جا می‌نماییم و اثر آن را در پاسخ سد مورد بررسی قرار می‌دهیم. بدین منظور، مؤلفه ششم موجک رکورد لوماپریتا و کوبه، مؤلفه پنجم رکورد مورگان هیل و نیز مؤلفه هشتم رکورد فرندال که دارای انرژی قابل ملاحظه‌ای بوده و تأثیر بیشتری روی بیشینه جابه‌جایی نسبی تاج سد از بین مؤلفه‌های موجک تجزیه شده دارند، از نظر زمانی به مکان دورتری نسبت به شروع تاریخچه زمانی زلزله مربوطه منتقل می‌شوند. برای بهتر دیده شدن اثرات این تغییر در زلزله‌های مختلف، مقایسه نتایج و بررسی تأثیر آنها بر پاسخ سازه، ابتدا PGA رکورد اصلی چهار شتاب نگاشت به  $0.4g$  مقیاس شده است. نتایج بیشینه جابه‌جایی تاج سد در جدول (۶) آمده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به ارزیابی تأثیر انرژی زلزله در پاسخ سدهای بتنی قوسی پرداخته شده است. بدین منظور، سد بتنی قوسی ماروپوینت به عنوان مطالعه موردی مد نظر قرار گرفته است. مدل المان محدود این سد در نرم‌افزار سالیید ورک مدل‌سازی و در نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است. در مدل‌سازی انجام شده، اثرات اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون و نیز رفتار غیرخطی بتن لحاظ شده است. در روند تحلیل، با کمک کدنویسی در نرم‌افزار متلب و با استفاده از تبدیل موجک، زلزله‌های مورد استفاده به مؤلفه‌های مختلف تجزیه شده و از آنها در تحلیل دینامیکی غیرخطی سد استفاده شده است.

جدول (۶): بیشینه جابه‌جایی نسبی تاج سد (سانتی‌متر) در اثر زلزله‌های مختلف پس از تغییرات اعمالی.

زلزله	زلزله اصلی	مؤلفه مؤثر موجک
کوبه	۵/۱۴	۴/۵
لوماپریتا	۶/۴۶	۵/۳۶
مورگان هیل	۴/۳۶	۴/۰۱
فرندال	۹/۴	۱۲/۶

از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نتایج نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که مؤلفه موجک با انرژی غالب (مؤلفه مؤثر موجک) که مقدار طیف بازتاب شتاب آن در محدوده نظیر پی‌ریود سازه تقریباً با رکورد اصلی زلزله مطابقت دارد، دارای بیشینه جابه‌جایی نسبی نزدیک به بیشینه جابه‌جایی نسبی ایجاد شده توسط رکورد اصلی زلزله است؛ درحالی‌که مدت‌زمان مؤثر این مؤلفه‌ها بسیار کمتر از رکورد اصلی است. با بررسی‌های انجام شده، مؤلفه مؤثر موجک دارای خصوصیت فوق، دارای زمان مؤثری در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد رکورد اصلی زلزله است که منجر به کاهش زمان تحلیل در نرم‌افزار می‌شود؛ درحالی‌که میزان جابه‌جایی تاج سد تحت اثر این رکوردها در اکثر موارد دارای اختلافی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

همان‌طور که در جدول فوق ملاحظه می‌شود، بیشینه جابه‌جایی نسبی تاج سد تحت رکوردهای کوبه، مورگان هیل و لوماپریتا در اثر تغییرات اعمالی نسبت به رکورد اصلی کاهش یافته است.

- با مقایسه طیف شتاب و نتایج ناشی از بیشینه جابه‌جایی تاج سد و انرژی مؤلفه‌های موجک می‌توان فهمید که در نظر گرفتن مؤلفه موجکی که دارای بیشترین انرژی در بین

اما این موضوع در مورد زلزله فرندال، صدق نمی‌کند و میزان جابه‌جایی حاصله در تاج سد پس از تغییر بیشتر است. نتایج فوق، تأثیر زمان اثر مؤلفه مؤثر و به عبارتی زمان تمرکز انرژی را در بازتاب سازه مورد بررسی نشان می‌دهد. تفاوت رکورد مزبور

- and *Earthquake Engineering*, **79**, 223-236.
2. Tekie, P. and Ellingwood, B. (2003) Seismic Fragility Assessment of Concrete Gravity Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**, 2221-2240.
  3. Zhang, S., Wang, G., Pang, B., and Du, C. (2013) The effects of strong motion duration on the dynamic response and accumulated damage of concrete gravity dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **45**, 112-124.
  4. Rajasekaran, S., Latha, V., and Lee, S.C. (2006) Generation of artificial earthquake motion records using wavelets and principal component analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, **10**(05), 665-691.
  5. Miao, X.Y., Wang, S.L., and Fan, Y.J. (2011) Study on Damage Identification for Reinforced Concrete Structures Based on Wavelet Transform. *Applied Mechanics and Materials*, **94**, 1505-1510.
  6. Sun, D. and Ren, Q. (2016) Seismic damage analysis of concrete gravity dam based on wavelet transform. *Shock and Vibration*, 1-8.
  7. Mollaioli, F. and Bosi, A. (2012) Wavelet analysis for the characterization of forward-directivity pulse-like ground motions on energy basis. *Meccanica*, **47**(1), 203-219.
  8. Montejo, L.A. and Kowalsky, M.J. (2008) Estimation of frequency dependent strong motion duration via wavelets and its influence on nonlinear seismic response. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **23**(4), 253-264.
  9. Cao, H. and Friswell, M.I. (2009) The effect of energy concentration of earthquake ground motions on the nonlinear response of RC structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(2), 292-299.
  10. Naseralavi, S.S., Balaghi, S., and Khojastehfar, E. (2016) Effects of Various Wavelet Transforms in Dynamic Analysis of Structures. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **10**(7),

مؤلفه‌های تجزیه شده است و نیز طیف شتابی آن در محدوده پریود سازه با طیف شتاب رکورد اصلی تطابق نزدیکی داشته باشد، نقش اصلی را در تحلیل سازه و رسیدن به هدف مورد نظر در این پژوهش را دارد.

۳. بررسی نمودارهای شدت آریاس و نمودار پاسخ جابه‌جایی تاج سد نشان می‌دهد که در بازه زمانی از نمودار که شیب نمودار شدت آریاس به صورت آنی و در فاصله زمانی محدودی به صورت صعودی افزایش می‌یابد، بیشینه جابه‌جایی در تاج سد اتفاق می‌افتد. از آنجا که این پارامتر به نحوی بیانگر توزیع انرژی زلزله در طول زمان آن است، می‌توان دریافت که میزان انرژی زلزله و شدت آن در واحد زمان در چگونگی بازتاب سازه مؤثر خواهد بود.

۴. اعمال تغییرات در محل زمانی اثر مؤلفه مؤثر زلزله و بررسی آن در نتایج پاسخ سازه، نشانگر تأثیر زمان اثر مؤلفه مؤثر و به عبارتی زمان تمرکز انرژی در بازتاب سازه مورد بررسی می‌باشد. تفاوت مشاهده شده در چگونگی نتیجه این تغییرات در مورد رکوردهای مختلف، می‌تواند وابسته به فاصله ایستگاه ثبت رکورد هر یک از زلزله‌ها نسبت به رومرکز زلزله باشد. به عبارت دیگر، زمان تمرکز انرژی زلزله در میزان بازتاب زلزله اثرگذار خواهد بود.

۵. نتایج حاصل از این تحقیق برای رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌ها با فواصل نسبتاً نزدیک به رومرکز زلزله صادق است. بدیهی است جهت بررسی تأثیر افزایش فاصله، مطالعات بیشتری باید مد نظر قرار گیرد. یکی از دلایل تفاوت نتایج زلزله فرندال با سایر رکوردهای مورد بررسی، فاصله بیشتر ایستگاه ثبت رکورد در مورد این زلزله نسبت به رومرکز آن می‌باشد.

## مراجع

1. Wang, G., Wang, Y., Io, W., Zhou, W., and Zhou, C. (2015) Integrated duration effects on seismic performance of concrete gravity dams using linear and nonlinear evaluation methods. *Soil Dynamics*

21. Grassl, P., Xenos, D., Nyström, U., Rempling, R., and Gylltoft, K. (2013) CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*, **50**(24), 3805-3816.
22. Omid, O. and Lotfi, V. (2010) Finite Element Analysis of Concrete Structures Using Plastic Damage Model in 3-D Implementation. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(3), 187-203.
23. Hall J.F. (2006) Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**, 525-545.
24. PEER Strong Motion Database. Available: <http://peer.Berkeley.edu/NGA> [2016, July 26].
25. Code, I.S. (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings* (Standard No. 2800), Iran (in Persian).
26. Kayen, R.E. and Mitchell, J.K. (1997) Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias intensity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(12), 1162-1174.
27. Travararou, T., Bray, J.D., and Abrahamson, N.A. (2003) Empirical attenuation relationship for Arias intensity. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(7), 1133-1155.
- 839-843.
11. Chen, X.J. and Gao, Z.F. (2011) Data processing based on wavelet analysis in structure health monitoring system. *Journal of Computers*, **6**(12), 2686-2691.
12. Sua`rez, L.E. and Montejo, L.A. (2005) Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform. *Int. j. Solids and Structures*, **42**, 5905-5919.
13. Lee, D.T. and Yamamoto, A. (1994) Wavelet analysis: theory and applications. *Hewlett Packard Journal*, **45**, 44-44.
14. Rezaei, M. and Ventura, C.E. (2002) Analysis of strong and weak ground motions recorded at two sites during Loma Prieta earthquake by wavelet transform. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **29**(1), 157-170.
15. Li, P., Kong, F., He, Q., and Liu, Y. (2013) Multiscale slope feature extraction for rotating machinery fault diagnosis using wavelet analysis. *Measurement*, **46**(1), 497-505.
16. Peng, Z.K. and Chu, F.L. (2004) Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**(2), 199-221.
17. Alembagheri, M. and Ghaemian, M. (2013) Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**, 127-137.
18. Akköse, M. and Şimşek, E. (2010) Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. *Applied Mathematical Modelling*, **34**(11), 3685-3700.
19. ABAQUS Theory Manual. Available: <http://abqdoc.byv.kth.se:2080/v6.12/books/stm/default.htm> [2016, September 17].
20. Lee, J. and Fenves, G.L. (1998) A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**(9), 937-956.

### واژه نامه

Bluestone	۱- بلو استون
Peak Ground Acceleration	۲- بیشینه شتاب زمین
Wavelet Analysis	۳- تحلیل موجک
Koyna	۴- کوینا
Daubechies Wavelet	۵- موجک دایچی
Solid Work	۶- سالید ورک
Morrow Point Dam	۷- سد مارو پوینت
Mother Wavelet	۸- موجک مادر
Detail	۹- جزئیات

Approximation	۱۰- تقریب
Concrete Damaged Plasticity (CDP)	۱۱- خرابی پلاستیک بتن
Rayleigh Damping	۱۲- روش میرایی رایلی
Arias Intensity	۱۳- شدت آریاس
Morgan Hill	۱۴- مورگان هیل
Ferndale	۱۵- فرندال
Arturo Arias	۱۶- آرتور آریاس

## Studying the Effect of Earthquake Energy on the Seismic Behavior of the Concrete Arch Dam Using Wavelet Transform

Sepide Firouzi<sup>1</sup>, Mohsen Bozorgnasab<sup>2\*</sup>, Reza Taghipour<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

\*Corresponding Author, e-mail: m.bozorgnasab@umz.ac.ir

Dams are infrastructures that have an important role in energy and water supply. Any damage or failure of these superstructures can lead to irreparable losses; therefore, the seismic behavior evaluation of dams under strong ground motions is important. This study aims at studying the effects of earthquakes parameters changes in the performance of concrete arch dams, considering different seismic conditions. The well-known analysis approaches such as nonlinear dynamic analysis is used. Various recorded time histories with different characteristics are considered for the analysis process. Besides, different duration definitions are applied on the selected time histories. Another goal of this paper is to find signals with similar energy characteristics as the main recorded time-histories, in order to reduce the computational volume and analysis time. By considering the special energy distribution of the near-fault records, the approach is properly acts on these types of records. The Morrow point concrete arch dam is considered as the case study, which is modeled in the Solid Work software. The Nonlinear dynamic analysis of this dam, considering the dam-reservoir-foundation interaction is conducted in Abaqus finite element software. The concrete damage plasticity is applied to model the nonlinear behavior of the concrete material of the dam body. To survey the effect of earthquake energy distribution on the seismic behavior of the dam, the selected earthquake records have been decomposed to several components with different energy levels, using discrete wavelet transform. The wavelet transform can decompose the earthquake records into components with specific frequency band. Each of these components has an energy value that is a percentage of the whole energy value of the original record. The seismic behavior of the dam under the main selected earthquake records and their components has been investigated. The results indicate that a wavelet component can be extracted from a near-fault record with a lower effective duration (about 60 to 70 percent of the main record) and similar response in comparison to the original record. Moreover, study of the arias intensity and displacement time history of the dam crest shows that the peak displacement in the dam crest occurs simultaneously with the sudden increase in the arias intensity. As this parameter can be a representative of the time history energy value and its intensity per time unit, the above-mentioned results show the effects of time history energy value and its intensity on the response of the dam body. In addition, it is shown that any changes in the time at which the effective component of the earthquake time history acts can affect the response of the dam. This effect depends on the epicentral distance of the station of the recorded time histories. The results of this study can be used for the recorded time histories at the stations near the epicenter. It is obvious that more studies should be conducted to investigate the effects of increasing the epicentral distance on the dam behavior.

**Keywords:** Concrete Arch Dam, Energy Earthquake, Nonlinear Response, Wavelet Transform