

## شناسایی مودال سد بتنی قوسی با استفاده از روش ترکیبی تجزیه دامنه فرکانس و تبدیل موجک

آرمان روشن‌روان<sup>۱</sup>، رضا تارینژاد<sup>۲\*</sup>، مجید دامادی‌پور<sup>۳</sup> و حامد محبوب<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

\* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۱۲/۱۶ پذیرش ۹۵/۷/۱۷

### چکیده

شناسایی سیستم یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای بررسی رفتار سازه در دوره بهره‌برداری و نیز تشخیص مشکلات احتمالی پیش آمده در سازه می‌باشد. روش‌های متعددی در زمینه شناسایی مودال سیستم‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر کدام مزایا و معایبی را در استخراج پارامترهای مودال (فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی) دارا هستند. در این مقاله از ترکیب روش‌های تجزیه حوزه فرکانس (FDD) و تبدیل موجک (WT) به منظور استفاده از مزایای هر کدام و رفع کاستی‌های تک تک آن‌ها در جهت برآورد مشخصات دینامیکی استفاده شده است. برای استخراج فرکانس‌های طبیعی از روش تجزیه حوزه فرکانس استفاده شده است که از دقت بسیار بالایی در برآورد فرکانس‌ها برخوردار است. در این روش، با تجزیه ماتریس چگالی طیف توان خروجی، مقادیر تکین محاسبه شده و فرکانس‌های طبیعی به دست می‌آیند. روش تجزیه دامنه فرکانس هرچند دقت خیلی مناسبی در برآورد مقادیر فرکانس‌های طبیعی دارد، اما در محاسبه میرایی از دقت مناسب برخوردار نیست. در این مقاله، به منظور رفع این نارسایی از تبدیل موجک در محاسبه ضرایب میرایی استفاده شده است. با استفاده از تبدیل موجک و تجزیه سیگنال‌های ثبت شده به سیگنال‌های تک فرکانسی شامل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی با دقت بالایی محاسبه شده است. به عنوان مطالعه موردی سد کارون ۳ که یکی از بزرگ‌ترین سدهای دو قوسی کشور می‌باشد به علت اهمیت آن و دارا بودن اطلاعات شتابنگاری مناسب روی بدنه آن، انتخاب شده است.

**واژگان کلیدی:** شناسایی سیستم، تبدیل موجک، تجزیه حوزه فرکانس، ضرایب میرایی، فرکانس‌های طبیعی.

### ۱- مقدمه

مزایای اصلی روش‌های تحلیل مودال عملیاتی نسبت به روش‌های کلاسیک شناسایی سیستم، استفاده از ارتعاشات محیطی برای اندازه‌گیری پارامترهای مودال سیستم می‌باشد. به دلیل کم بودن شدت ارتعاشات محیطی، برای بالا بردن دقت و اطمینان از نتایج خروجی باید سیگنال‌های متعددی را برای شناسایی سیستم استفاده کرد [۳، ۴].

برای انجام تحلیل مودال عملیاتی، روش‌های متعددی از جمله روش تجزیه حوزه فرکانس (FDD) و روش تبدیل موجک (WT) وجود دارند [۵] که هر کدام از این روش‌ها مزایای خاص خود را دارند که در این مقاله با ترکیب این دو روش سعی شده از نقاط قوت تک تک این روش‌ها استفاده شده و نقاط ضعف را پوشش داد. در روش FDD به دلیل رزولوشن فرکانسی بالا، فرکانس‌های طبیعی سیستم و اشکال مودال سیستم با دقت

تحلیل‌های مودال عملیاتی برای استخراج پارامترهای مودال سیستم استفاده شده و بر اساس آنالیز پاسخ سازه به تحریک ورودی انجام می‌گیرند. به دلایل مختلف از جمله پیچیده بودن شرایط تکیه گاهی، امکان وقوع لرزه‌هایی تحت شرایط محیطی و ... امکان اندازه‌گیری دقیق ورودی برای تحریک سازه وجود ندارد، لذا روش‌های تحلیل مودال عملیاتی، تنها با پردازش سیگنال‌های پاسخ به شناسایی سیستم سازه می‌پردازند [۱، ۲].

در روش‌های کلاسیک شناسایی سیستم، سازه تحت ارتعاش اجباری قرار می‌گرفت که در آن صورت سازه از سرویس‌دهی خارج شده و عملاً در طول زمان آزمایش غیر قابل بهره‌برداری می‌گردد. علاوه بر این لرزاندن سازه برای ثبت پاسخ‌های آن، با خطرات احتمالی ایجاد خرابی در سازه همراه خواهد بود. از

بود. از آن پس محاسبه تابع چگالی طیفی به جای تابع خود همبستگی مرسوم شد [۶].

در سال ۱۹۶۵، Shima و Kawasumi [۷]، با تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی یک سیستم، تابع چگالی طیفی آن را که به تابع انتقال فرکانس سیستم و چگالی طیفی ورودی بستگی دارد، به دست آوردند. آن‌ها اثبات کردند که لرزه‌های خفیف زمین تصادفی محض بوده و چگالی طیفی آن‌ها را می‌توان ثابت فرض نمود. بنابر این تابع چگالی طیفی خروجی سیستم فقط به تابع انتقال فرکانس سیستم بستگی دارد. از آنجایی که تابع انتقال فرکانس سیستم در فرکانس‌های طبیعی آن ماکزیمم است، از این رو تابع چگالی طیفی خروجی نیز در همان فرکانس‌ها ماکزیمم خواهد بود. به این ترتیب با استفاده از نقاط ماکزیمم منحنی چگالی طیفی، فرکانس‌های طبیعی سیستم‌های لوله‌کشی یک ساختمان از دانشکده فنی مهندسی دانشگاه توکیو را به دست آورده و نشان دادند که این روش برای انواع سازه‌های دیگر نیز کاربرد دارد. با این حال دو خطای عمده در محاسبه تابع چگالی طیفی وجود داشت که عبارت بود از: محدود بودن طول داده‌ها (نامانا) و وجود اغتشاشات و نویز محیطی.

بعدها محققان برای جبران این دو خطا، از اعمال توابع پنجره و متوسط‌گیری توابع چگالی طیفی استفاده کردند.

در سال ۱۹۶۶ در یک پروژه تحقیقاتی جهت مشاهده اثر زلزله، یک صد ساختمان در شهر لس‌آنجلس مجهز به دستگاه Strong-Motion شدند. دستگاه‌ها در طبقات زیرزمین، سقف و وسط ساختمان‌ها نصب شده بودند و هر دستگاه سه مؤلفه شتاب را ضبط می‌کرد. در هنگام زلزله ۹ فوریه ۱۹۷۱ سن فرناندو، رکوردهای ارتعاشی حدود ۵۰ ساختمان ثبت شدند و این رکوردها مبنای تحقیقات مفصلی در زمینه عکس‌العمل ساختمان‌های مختلف در برابر زلزله شد. یکی از این تحقیقات، عکس‌العمل پیچشی ساختمان‌های بلند در برابر زلزله بود که در سال ۱۹۷۵ به وسیله Hart و همکاران [۸]، صورت گرفت. طبق این تحقیقات، آزمایشات ارتعاش محیطی، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه خصوصیات پیچشی ساختمان‌ها و رفتار آن‌ها به هنگام وقوع زلزله به دست می‌دهد.

در سال ۱۹۷۱، Hart و همکاران [۹]، بر اساس روش ارائه شده توسط Crawford و Ward، خصوصیات دینامیکی دو پل معلق نیوپورت و ویلیام پرستون در آمریکا را تعیین کردند. آن‌ها با محاسبه تابع چگالی طیفی خود توان، فرکانس‌های طبیعی و

بالایی به دست می‌آیند اما هنگام وقوع تداخل مودی، محاسبه ضرایب میرایی با استفاده از روش‌های نیم توان و کاهش لگاریتمی که در روش FDD استفاده می‌شوند، از دقت پایینی برخوردار خواهند بود. در روش WT به دلیل ماهیت چند رزولوشنه، امکان تجزیه سیگنال به سیگنال‌های تک فرکانسی و در نتیجه برطرف کردن پدیده تداخل مودی وجود دارد لذا ضرایب میرایی با دقت بالایی قابل محاسبه خواهند بود. در روش تبدیل موجک به دلیل محدود بودن رزولوشن فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی با دقت پایینی محاسبه می‌گردند.

در این مقاله به عنوان مطالعه موردی سد کارون ۳ انتخاب شده است. برای شناسایی سیستم سد و به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی از روش FDD و برای محاسبه ضرایب میرایی از روش WT استفاده شده است. هم چنین برای بالا بردن دقت و حصول اطمینان از صحت نتایج، از رکوردهای ثبت شده پاسخ‌های مربوط به ۴ زمین لرزه مختلف در بدنه سد که هر یک شامل ۳ ایستگاه (کانال) مختلف می‌باشند، برای استخراج پارامترهای مودال این سد استفاده شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

Takahashi و Hatano [۶] اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۵۷، مفهوم تکنیک خودهمبستگی را برای سازه‌های با ابعاد واقعی به کار بردند. آن‌ها با به کارگیری این روش و با استفاده از داده‌هایی که در تاج یک سد به هنگام وقوع زلزله جمع‌آوری کرده بودند، توانستند زمان تناوب اصلی و ضریب میرایی آن را به دست آورند. چنین کار مشابهی در سال ۱۹۵۹ بر روی سد دیگری نیز توسط تاکاهاشی و همکاران وی صورت گرفت.

در همین سال Brady و Cherry، ۶ مدل یک درجه آزادی و دو ساختمان واقعی را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها از طریق یک دستگاه که نیروی نامنظم با چگالی طیفی قابل کنترل ولی ثابت تولید می‌کرد به این سازه‌ها نیرو وارد کرده و عکس‌العمل آن‌ها را اندازه گرفتند. با رقمی نمودن اطلاعات و محاسبه ضرایب تابع خودهمبستگی، توانستند خصوصیات دینامیکی سازه‌ها را به دست آورند. نتایج به دست آمده بسیار نزدیک به تئوری و مؤید مناسب بودن روش بود، اما این مسئله مطرح بود که این نتایج برای نیروی کاملاً کنترل شده و سیستم یک درجه آزادی می‌باشد و اگر نیروهای غیر قابل کنترل مثل زلزله بر روی سازه چند درجه آزادی اثر کنند، نتایج این روش قابل اطمینان نخواهد

رابطه بین سیگنال ورودی  $x(t)$  و سیگنال خروجی  $y(t)$  به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (۱)$$

که در آن  $G_{xx}$  ماتریس چگالی طیف توان ورودی از مرتبه  $r$  (تعداد ورودی‌ها)،  $G_{yy}$  ماتریس چگالی طیف توان خروجی از مرتبه  $m$  (تعداد خروجی‌ها) و  $H(j\omega)$  ماتریس تابع پاسخ فرکانسی از مرتبه  $(m \times r)$  می‌باشد.

چون در این مقاله از روش خروجی-تنها برای شناسایی سیستم سد استفاده شده است، ورودی را نویز سفید در نظر گرفته لذا ماتریس چگالی طیف توان ورودی به صورت  $G_{xx}(j\omega) = C[I]$  ساده می‌شود.

برای ماتریس پاسخ فرکانسی می‌توان نوشت [۱]:

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{Q}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (۲)$$

$Q_k$ ،  $\lambda_k$  و  $n$  به ترتیب نشان‌دهنده  $k$  امین بخش مانده،  $k$  امین قطب و تعداد مودهای به کار رفته می‌باشد. با ترکیب معادلات (۲) و (۱)، رابطه بین چگالی توان ورودی و خروجی به صورت زیر خواهد شد:

$$G_{yy}(j\omega) = \left[ \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{Q}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \right] \cdot \left[ \sum_{s=1}^n \frac{Q_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\bar{Q}_s}{j\omega - \bar{\lambda}_s} \right] \quad (۳)$$

با انجام محاسبات ریاضی و ساده‌سازی، معادله زیر حاصل خواهد شد:

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{A}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{B}_k}{-j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (۴)$$

در این معادله،  $A_k$  ماتریس  $k$  امین مانده چگالی طیف توان خروجی می‌باشد که با رابطه (۵)، نمایش داده شده است.

$$A_k = Q_k C \left[ \sum_{s=1}^n \frac{Q_k^{-T}}{-\lambda_k - \lambda_s} + \frac{Q_k^T}{-\lambda_k - \bar{\lambda}_s} \right] \quad (۵)$$

با استفاده از خاصیت تعامد مودها مانده به صورت زیر در خواهد آمد:

ضرایب میرایی و با محاسبه تابع چگالی طیفی دیگر توان، اشکال مودی را برای این دو پل به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۰ Nasserzare و همکاران [۱۰]، روشی را برای شناسایی فرکانس‌ها و اشکال مودی سد قوسی با استفاده از ارتعاش اجباری، توسعه دادند. در این روش فشار هیدرودینامیک ناشی از مخزن، با روش المان مرزی محاسبه و اعمال شده است. آن‌ها در روش خود تأکید زیادی بر مسأله اندرکنش سازه و سد داشته و این روش را بر روی سازه تیر در تماس با مخزن توسعه دادند.

در سال ۲۰۰۴ Li و همکاران [۱۱]، مدل آزمایشگاهی سد بتنی گرگس در چین را با مدل سه‌بعدی المان محدود آن مقایسه نمودند. این مقایسه با استفاده از تحلیل لرزه‌ای بر روی میز لرزه و مقایسه پاسخ سد و فرکانس‌ها و اشکال مودی، صورت گرفته است. نتیجه تحقیق Li و همکاران نشان دهنده کفایت سازه سد و ارضای معیارهای موجود در آیین‌نامه مورد استفاده می‌باشد.

به هر حال تا به امروز از این روش برای تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌های مختلفی استفاده شده و نتایج بسیار خوبی هم به دست آمده است. از آن جمله می‌توان به رآکتور هسته‌ای در آلمان فدرال، پل گلدن گیت و انواع پل‌ها، سدها و ساختمان‌های بزرگ در کشورهای مختلف اشاره کرد. به طور کلی می‌توان گفت که این روش، روشی سریع، مطمئن و کم هزینه، برای تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌های واقعی است. Wu و Su [۱۲] در سال ۲۰۰۷ رفتار یک سد بتنی وزنی قوسی را با استفاده از روش WT بررسی کردند.

در این مقاله روش ترکیبی تجزیه حوزه فرکانس و تبدیل موجک برای شناسایی سدد بتنی قوسی معرفی شده است. ضمن این که شناسایی سیستم سد کارون ۳ با در نظر گرفتن رکوردهای زمین لرزه‌های متعدد ثبت شده برای اولین بار در این مقاله انجام شده است.

## ۲- تئوری‌های تحقیق

### ۲-۱- محاسبه فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی

در روش تجزیه حوزه فرکانس (FDD) که برای استخراج فرکانس‌های طبیعی سیستم استفاده شده است، ابتدا ماتریس چگالی طیف توان تشکیل شده سپس با استفاده از روش تجزیه مقادیر تکین (SVD)، مقادیر فرکانس‌های طبیعی به دست می‌آیند.

$$MAC = \frac{|\psi^T \phi|^2}{(\psi^T \psi)(\phi^T \phi)} \quad (10)$$

که در آن،  $\psi$  و  $\phi$  دو بردار شکل مودی هستند. یکی از این بردارها متعلق به نقطه پیک و دیگری متناظر با بردارهای مودی نقاط اطراف پیک می‌باشد.

برای  $MAC = 1$ ، بردارهای شکل مودی کاملاً مشابه‌اند.

برای  $MAC = 0$ ، هیچ تشابهی بین بردارهای شکل مودی وجود ندارد.

بنابر این هر چه قدر معیار  $MAC$ ، به عدد ۱ یا ۱۰۰٪ نزدیک‌تر باشد، پیک مورد نظر از درجه اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود. همچنین جهت اطمینان بیشتر از صحت فرکانس‌های طبیعی انتخاب شده، علاوه بر معیار  $MAC$ ، از معیار  $ACS$  نیز استفاده شده است. به این منظور، فرکانس‌های طبیعی، که معیار  $ACS$  برای آن‌ها کمتر از ۰/۷ باشد مورد قبول نبوده و حذف شده‌اند.

## ۲-۲- محاسبه ضرایب میرایی

در این مقاله برای محاسبه ضرایب میرایی از تبدیل موجک پیوسته استفاده شده است. تبدیل موجک پیوسته به صورت کانولوشن سیگنال  $x(t)$  و نمونه‌های مختلف موجک‌های اتساع و انتقال یافته از موجک مادر، تعریف می‌شود [۱۷، ۱۸]:

$$CWT_x^\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (11)$$

که در آن  $a$  و  $b$ ، به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس می‌باشند و  $CWT$  نیز ضریب تبدیل موجک نامیده می‌شود.

برای محاسبه ضرایب میرایی می‌توان از روش‌های نیم توان و کاهش لگاریتمی استفاده کرد اما در صورت وجود مودهای نزدیک به هم در نمودار  $PSD$  امکان استفاده از این دو روش از بین می‌رود. لذا برای محاسبه ی ضریب میرایی، سیگنال را به وسیله تبدیل موجک به یک سیگنال تک فرکانسی که تنها حاوی فرکانس‌های طبیعی استخراج شده توسط روش  $FDD$  می‌باشد تجزیه کرده تا پدیده تداخل مودی از بین برود. سپس با استفاده از روش نیم‌توان و کاهش لگاریتمی می‌توان اقدام به استخراج ضرایب میرایی نمود. در این مقاله، ضرایب میرایی مود اول سازه برای رکوردهای مختلف با استفاده از این روش محاسبه شده است.

$$A_k = \frac{Q_k C \bar{Q}_k}{2\alpha_k} \quad (6)$$

که در آن  $\alpha_k$ ، بخش حقیقی  $k$  امین قطب  $\lambda_k = -\alpha_k + j\omega_k$  می‌باشد. در صورتی که میرایی سیستم کم باشد، ترم باقی‌مانده متناسب با شکل مود خواهد بود و لذا به صورت زیر در خواهد آمد. بنابر این:

$$A_k \propto Q_k C \bar{Q}_k = \phi_k \gamma_k C \gamma_k^T \phi_k^T = d_k \phi_k \phi_k^T \quad (7)$$

که در آن  $d_k$  یک اسکالر،  $\phi_k$  بردار شکل مود  $k$  ام و  $\gamma_k$  بردار اثرگذاری مود می‌باشد. در نهایت چگالی توان پاسخ‌ها بر حسب شکل مودها و قطب‌های سیستم به صورت معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{d_k \phi_k \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{d}_k \bar{\phi}_k \bar{\phi}_k^T}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (8)$$

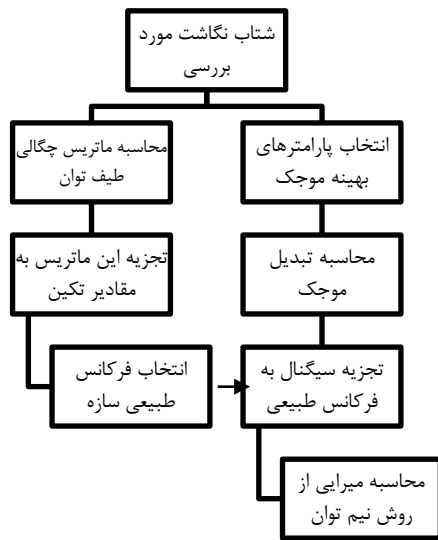
در روش شناسایی  $FDD$  اولین گام تخمین ماتریس طیف توان خروجی  $G_{yy}(j\omega)$  می‌باشد. سپس ماتریس  $PSD$  خروجی به دست آمده، به وسیله ابزار قدرتمند تجزیه مقادیر تکین ( $SVD$ )، در فرکانس‌های گسسته  $\omega = \omega_i$ ، با استفاده از رابطه زیر تجزیه می‌گردد.

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (9)$$

که در آن  $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$  یک ماتریس متعامد یک‌ای است که حاوی بردارهای تکین  $u_{ij}$  و  $S_i$  یک ماتریس قطری است که حاوی مقادیر تکین اسکالر  $s_{ij}$  می‌باشد. اگر ماتریس چگالی طیف قدرت یک سیستم دینامیکی به مقادیر و بردارهای تکین متناظر با فرکانس مورد نظر تجزیه شود؛ پیک‌های اولین مقادیر تکین معادل با فرکانس‌های طبیعی سیستم و نیز بردارهای تکین متناظر با پیک‌های اولین مقادیر تکین، بردارهای شکل مودی سیستم را تقریب می‌زنند [۵، ۱۴].

در روش  $FDD$ ، برای انتخاب صحیح و دقیق قله‌ها از معیار تضمین مودال ( $MAC$ ) و طیف ارتباط متوسط ( $ACS$ ) استفاده شده است. در معیار تضمین مودال، میزان تشابه بردار شکل مودی پیک مربوطه با بردارهای متناظر نقاط اطراف آن پیک ارزیابی شده و برای آن حد مناسبی تعریف شده است [۱۱].

برای مقایسه تشابه بردارهای شکل مودی از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۶]:



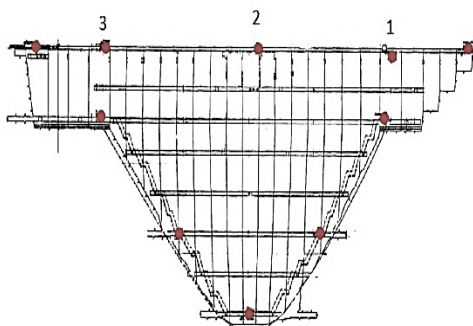
شکل ۱- الگوریتم مورد استفاده در روش FDD-WT

### ۳- مطالعه موردی

در این مقاله سد کارون ۳ به علت اهمیت و استراتژیک بودن آن و نیز به علت داده‌های در دسترس و مناسب شبکه شتاب-نگاری نصب شده در بدنه و تکیه گاه‌های آن به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. رکوردهای ثبت شده مربوط به ۴ زلزله متفاوت که هر کدام دارای ۳ کانال متفاوت در روی تاج سد می‌باشند، پردازش شده و نتایج خروجی برای شناسایی سیستم سد و استخراج پارامترهای مودال استفاده شده است.

نحوه آرایش دستگاه‌های شتاب نگار بر روی بدنه سد کارون ۳ در شکل (۲) نشان داده شده است. اطلاعات و داده‌های مربوط به سد کارون ۳ از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران دریافت شده‌اند.

حال با بررسی هر کدام از رکوردهای ثبت شده و پردازش آن‌ها، پارامترهای مودال استخراج و در نهایت مقایسه خواهند شد. همچنین مشخصات شتاب‌های پاسخ ثبت شده در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۲- محل نصب شتاب‌نگارها روی بدنه سد کارون ۳

برای محاسبه میرایی با استفاده از WT، ابتدا باید موجک بهینه تعیین شوند. برای تعیین موجک بهینه از معیار آنتروپی شانون استفاده شده است. در معیار آنتروپی شانون پارامترهای موجک که باعث مینیمم شدن آنتروپی می‌شوند، به عنوان پارامترهای بهینه انتخاب می‌شوند. آنتروپی موجک شانون به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸].

$$E = - \sum_{k=1}^M d_k \log(d_k) \quad (12)$$

که در آن:

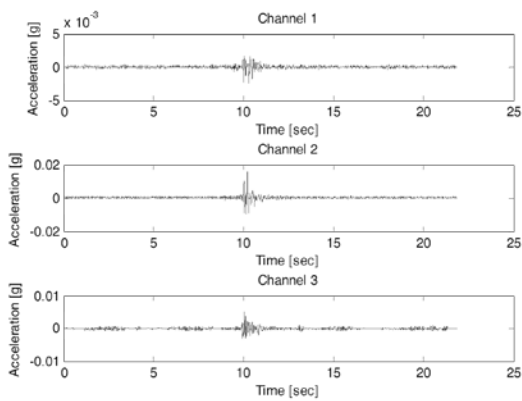
$$d_k = \frac{|W(a_k, t)|}{\sum_{l=1}^M |W(a_l, t)|} \quad (13)$$

این معیار، اطلاعات هر تبدیل موجک را اندازه‌گیری می‌کند. در واقع آنتروپی  $E(f_b, f_c)$  برای محدوده‌ای از مقادیر متنوع  $f_b$  و  $f_c$  محاسبه می‌شود؛ سپس جفت  $f_b$  و  $f_c$  که منجر به مینیمم شدن آنتروپی موجک E می‌شود، انتخاب می‌گردد. به این ترتیب پارامترهای به دست آمده، همان پارامترهای بهینه شده موجک، برای دستیابی به بهترین رزلوشن زمانی-فرکانسی می‌باشند. در تحقیق حاضر، از رابطه زیر استفاده شده است.

$$\sqrt{f_b f_c} = (2\alpha) \frac{f_{i,i+1}}{2\pi \Delta f_{i,i+1}} \quad (14)$$

در رابطه فوق،  $f_{i,i+1}$  و  $\Delta f_{i,i+1}$  با توجه به فرکانس‌های تشدید بدست آمده از روش FDD که در آن‌ها شرایط تداخل مودی برقرار است، تعیین شده و مقدار  $\alpha$  نیز برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. به این ترتیب به ازای هر جفت فرکانس مودی متداخل، مقداری برای  $\sqrt{f_b f_c}$  تعیین می‌گردد. سپس با در نظر گرفتن یک محدوده دلخواه برای  $f_c$ ، مقادیر متناظر آن برای  $f_b$  نیز حاصل می‌شود. به این ترتیب با در اختیار داشتن جفت  $f_b$  و  $f_c$  های موجود، آنتروپی موجک شانون متناظر با هر کدام، محاسبه و حداقل مقدار آن حاصل می‌شود.

الگوریتم محاسبه مشخصات دینامیکی از روی رکوردهای ثبت شده پاسخ‌های لرزه‌ای به صورت شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۶- شتاب‌های پاسخ ثبت شده در تاج سد در تاریخ ۲۰۱۲/۳/۱

جدول ۱- مشخصات شتاب‌های پاسخ ثبت شده

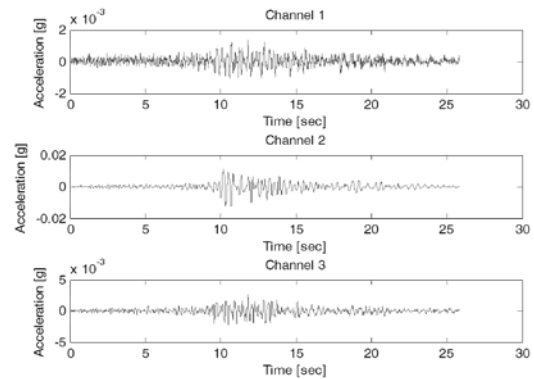
تداوم زلزله = S ۲۵/۸۳۰	Channel 1	2011/08/02
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۱۳۴۳		
تداوم زلزله = S ۲۵/۸۳۰	Channel 2	
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۱۲۲۷		
تداوم زلزله = S ۲۵/۸۳۰	Channel 3	
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۲۶۲۵		
تداوم زلزله = S ۲۲/۴۷۰	Channel 1	2011/10/05
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۱۰۹۹	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۲/۴۷۰	Channel 3	
تداوم زلزله = S ۲۲/۴۷۰	Channel 1	2011/10/28
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۰۹۱۶	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۳/۲۷۰	Channel 3	
تداوم زلزله = S ۲۳/۲۷۰	Channel 1	2012/03/01
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۱۲۸	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 3	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 1	2012/03/01
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۲۳۸	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 3	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 1	2012/03/01
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۱۵۸۱	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 3	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 1	2012/03/01
ماکزیمم شتاب = g ۰/۰۰۰۵۰۰	Channel 2	
تداوم زلزله = S ۲۱/۸۲۰	Channel 3	

با پردازش شتاب‌های ثبت شده در گام اول، نمودار طیف توان خروجی (PSD) رسم شده است. شکل‌های (۷) تا (۱۰) مقادیر تکین متناظر با شتاب‌های ثبت شده مؤلفه جریانی را نشان می‌دهد.

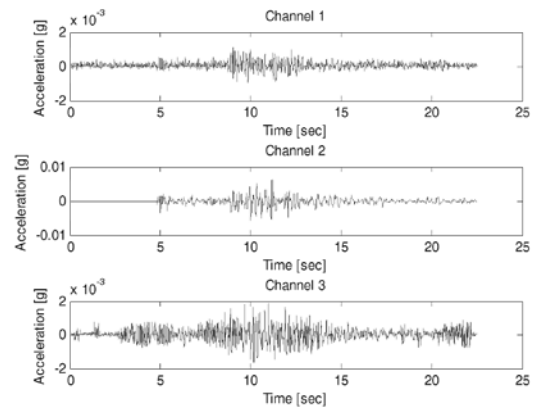
### ۳-۱- پردازش رکوردهای ثبت شده

#### ۳-۱-۱- محاسبه فرکانس‌های طبیعی

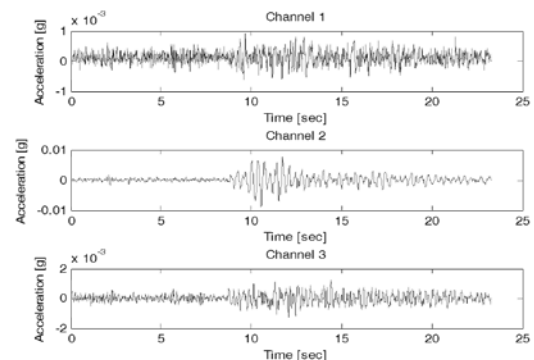
مؤلفه جریانی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در کانال‌های شماره ۱، ۲ و ۳ از رکوردهای ۴ زلزله مختلف در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان داده شده است.



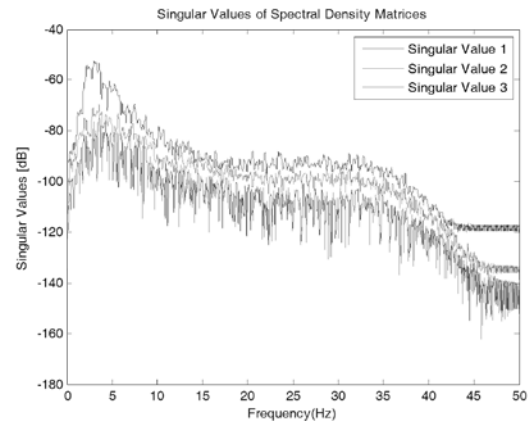
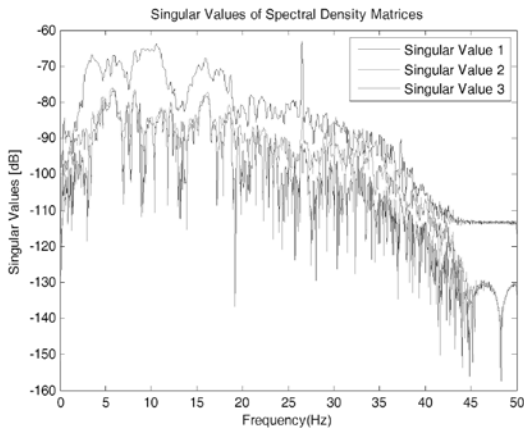
شکل ۳- شتاب‌های پاسخ ثبت شده در تاج سد در تاریخ ۲۰۱۱/۰۸/۰۲



شکل ۴- شتاب‌های پاسخ ثبت شده در تاج سد در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۰۵



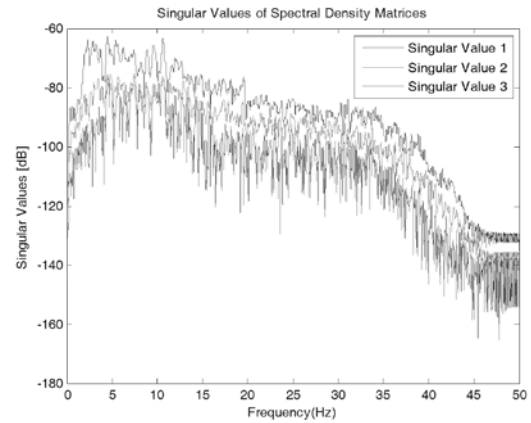
شکل ۵- شتاب‌های پاسخ ثبت شده در تاج سد در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۲۸



شکل ۱۰- نمودار چگالی طیف توان برای شتاب‌های ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۲/۳/۱

شکل ۷- نمودار چگالی طیف توان برای شتاب‌های ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۸/۲

قله‌های ثبت شده در نمودار اولین مقادیر تکین (SV1) بنابر معیارهای MAC و ACS به عنوان فرکانس‌های طبیعی انتخاب شده است. نمودار مقادیر تکین (SV1) برای رکوردهای مختلف در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) و جدول‌های (۲) تا (۵) نشان داده شده است.



### ۳-۱-۲- محاسبه میرایی برای رکوردهای مختلف

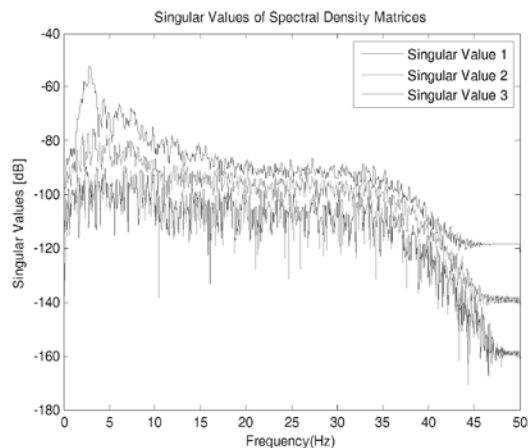
برای هر یک از مودهای ارتعاشی سد، می‌توان ضرایب میرایی را به طور جداگانه محاسبه و بررسی نمود. اما به دلیل اهمیت بالای مقدار میرایی در مود ارتعاشی اول، در این مقاله فقط ضرایب میرایی مربوط به مود اول در رکوردهای مختلف محاسبه و ارائه شده است.

شکل ۸- نمودار چگالی طیف توان برای شتاب‌های ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۵

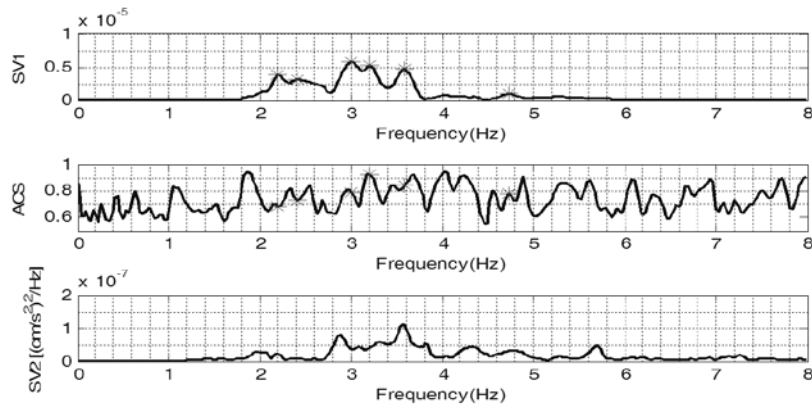
برای محاسبه میرایی با استفاده از WT، ابتدا باید موجک بهینه تعیین شوند. برای تعیین موجک بهینه از معیار آنتروپی شانون استفاده شده است

شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) مربوط به معیار آنتروپی و انتخاب پارامترهای بهینه می‌باشند.

در شکل‌های (۱۹) تا (۲۲)، Scalogram برای تبدیل موجک سیگنال نمایش داده شده، رسم شده و فرکانس مود اول سازه بر روی آن مشخص شده است.



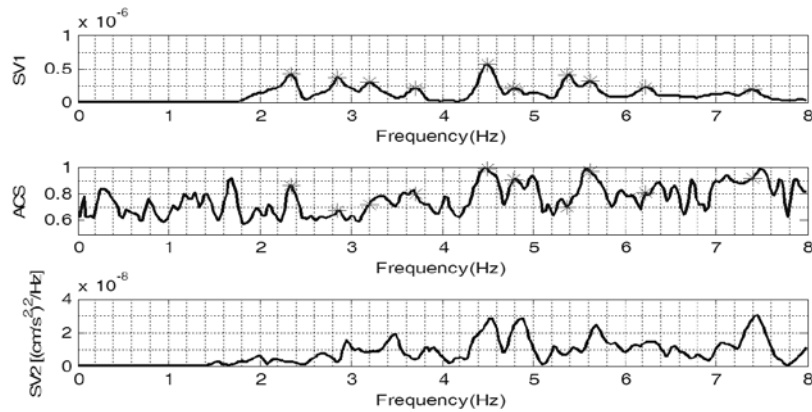
شکل ۹- نمودار چگالی طیف توان برای شتاب‌های ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۲۸



شکل ۱۱- نمودار مقادیر تکین مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۸/۲

جدول ۲- فرکانس‌های طبیعی پاسخ مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۸/۲

ارزیابی	معیار ACS	معیار MAC (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	
×	۰/۶۸۵۹۳	۰/۹۹۶۶۶	۲/۱۹۷۳	مود اول
✓	۰/۷۲۸۱۹	۰/۹۹۸۶۸	۲/۴۱۷	مود دوم
✓	۰/۷۹۲۲	۰/۹۹۱۷۶	۳/۰۰۲۹	مود سوم
✓	۰/۹۲۶۴۲	۰/۹۹۶۱۷	۳/۱۹۸۲	مود چهارم
✓	۰/۸۴۲۸۷	۰/۹۹۰۰۱	۳/۵۸۸۹	مود پنجم
✓	۰/۷۸۲۷۳	۰/۹۸۴۶۸	۴/۷۳۶۳	مود ششم

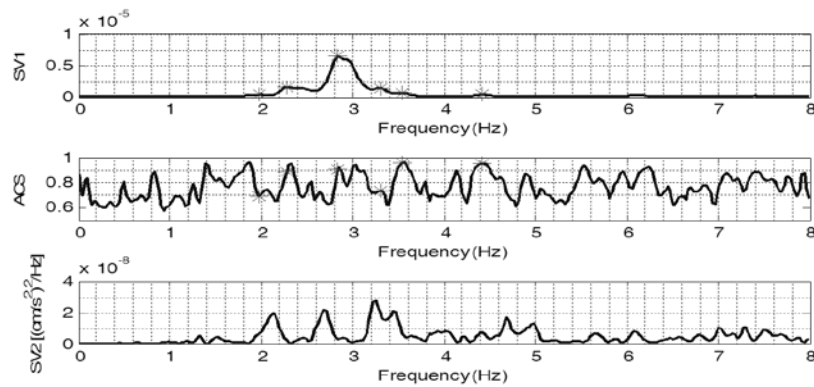


شکل ۱۲- نمودار مقادیر تکین مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

جدول ۳- فرکانس‌های طبیعی پاسخ مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

ارزیابی	معیار ACS	معیار MAC (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	
✓	۰/۸۵۹۲۷	۰/۹۹۶۱	۲/۳۴۳۸	مود اول
×	۰/۶۷۰۰۹	۰/۹۷۱۰۸	۲/۸۵۶۴	مود دوم
✓	۰/۷۲۰۲۲	۰/۹۹۴۰۶	۳/۱۹۸۲	مود سوم
✓	۰/۸۰۰۰۹	۰/۹۴۷۵۷	۳/۷۱۰۹	مود چهارم
✓	۰/۹۸۲۴۱	۰/۹۸۸۰۱	۴/۴۹۲۲	مود پنجم
✓	۰/۹۰۵۶۸	۰/۹۶۴۵۵	۴/۷۸۵۲	مود ششم

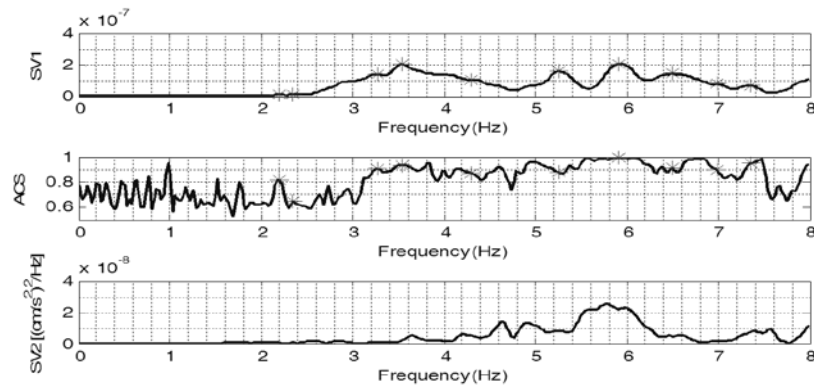




شکل ۱۳- نمودار مقادیر تکین مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

جدول ۴- فرکانس‌های طبیعی پاسخ مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

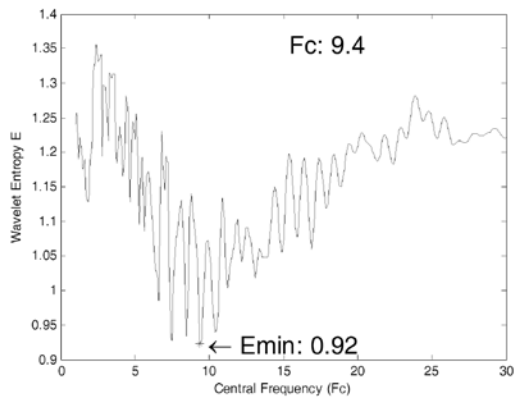
ارزیابی	معیار ACS	معیار MAC (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	مود
×	۰/۶۹۳۷۳	۰/۹۹۱۳	۱/۹۷۷۵	مود اول
✓	۰/۸۸۶۱۸	۰/۹۹۸۱۷	۲/۲۷۰۵	مود دوم
✓	۰/۹۰۳۶۹	۰/۹۹۹۵۴	۲/۸۳۲	مود سوم
✓	۰/۷۳۲۷۳	۰/۹۹۶۱	۳/۲۹۵۹	مود چهارم
✓	۰/۹۶۰۱۸	۰/۹۸۹۷۷	۳/۵۴	مود پنجم
✓	۰/۹۵۴۳۴	۰/۹۸۹۴۶	۴/۴۱۸۹	مود ششم



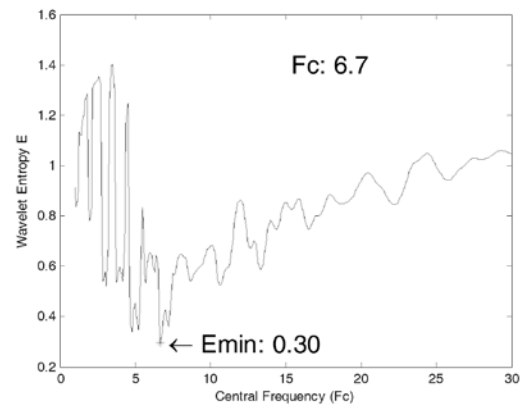
شکل ۱۴- نمودار مقادیر تکین مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

جدول ۵- فرکانس‌های طبیعی پاسخ مربوط به رکوردهای ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵

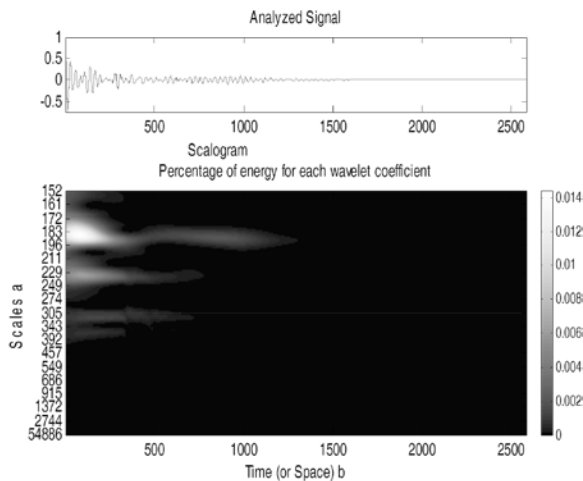
ارزیابی	معیار ACS	معیار MAC (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	مود
✓	۰/۸۱۶۶۵	۰/۹۶۵۸۱	۲/۱۹۷۳	مود اول
×	۰/۶۴۶۶۲	۰/۹۸۱۲۸	۲/۳۴۳۸	مود دوم
✓	۰/۹۰۴۱۳	۰/۹۹۷۹۳	۳/۲۷۱۵	مود سوم
✓	۰/۹۲۹۱۸	۰/۹۹۶۳۴	۳/۵۴	مود چهارم
✓	۰/۸۷۳۳۶	۰/۹۹۲۶۶	۴/۲۹۶۹	مود پنجم
✓	۰/۸۷۶۸۲	۰/۹۹۰۲۵	۵/۲۴۹	مود ششم



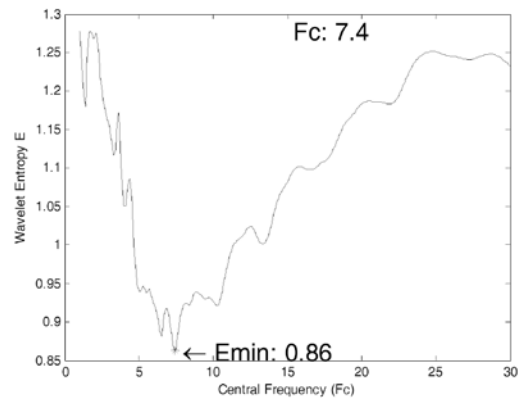
شکل ۱۸- نمودار آنتروپی شانون برای رکورد ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۲/۰۳/۰۱



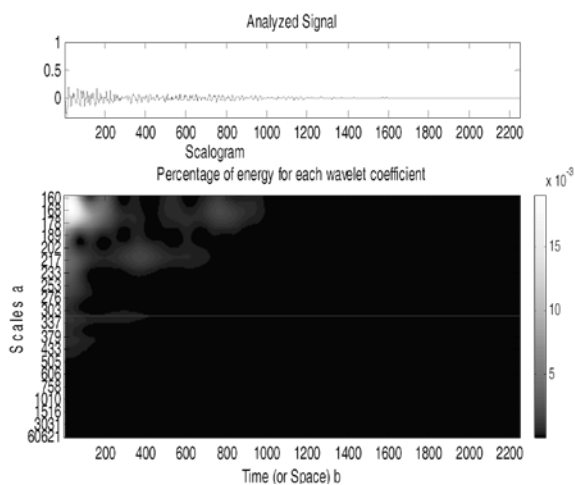
شکل ۱۵- نمودار آنتروپی شانون برای رکورد ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۸/۲



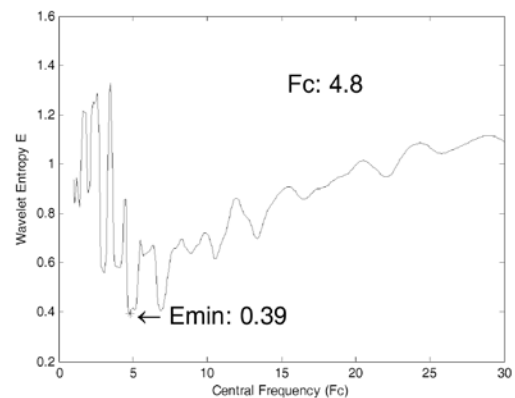
شکل ۱۹- مقیاس نگار رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۸/۲ (مود اول روی شکل مشخص شده است)



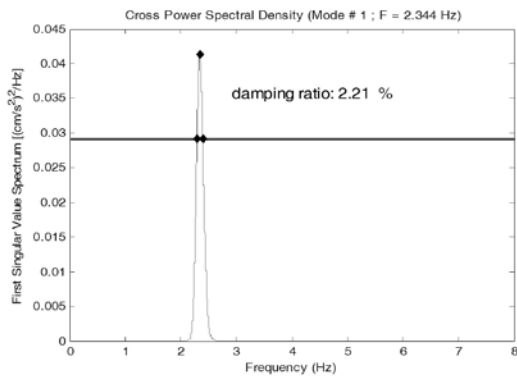
شکل ۱۶- نمودار آنتروپی شانون برای رکورد ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۵



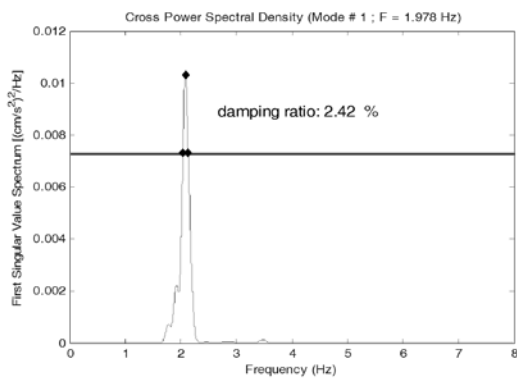
شکل ۲۰- مقیاس نگار رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۵ (مود اول روی شکل مشخص شده است)



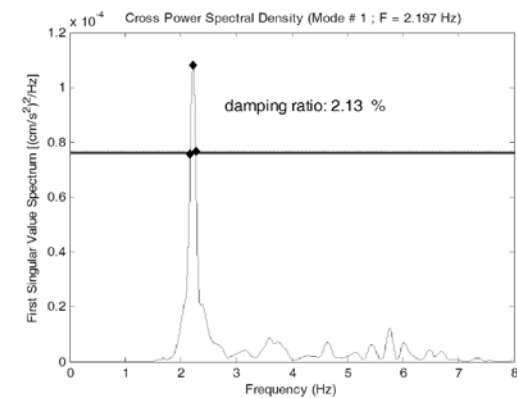
شکل ۱۷- نمودار آنتروپی شانون برای رکورد ثبت شده در تاریخ ۲۰۱۱/۱۰/۲۸



شکل ۲۴- ضریب میرایی به دست آمده از طیف اولین مقدار تکین رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۰۵

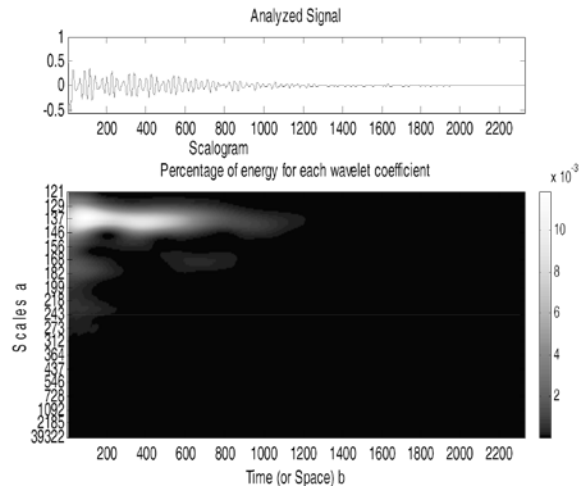


شکل ۲۵- ضریب میرایی به دست آمده از طیف اولین مقدار تکین رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۲۸

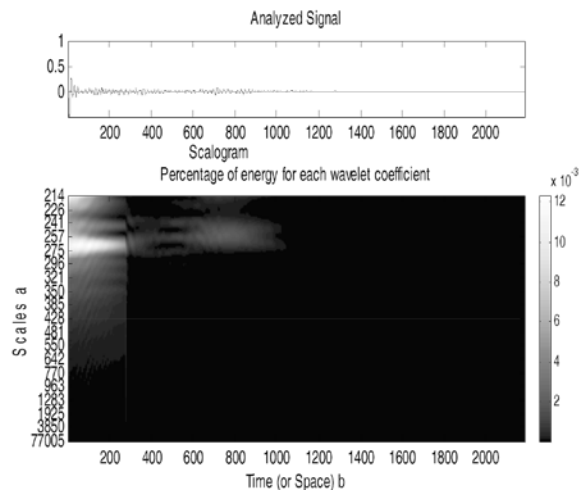


شکل ۲۶- ضریب میرایی به دست آمده از طیف اولین مقدار تکین رکورد ثبت شده در ۲۰۱۲/۳/۱

مقایسه فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی به دست آمده از پاسخ‌های ثبت شده تحت اثر ۴ زمین لرزه در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از چهار حالت مختلف انطباق مناسبی دارند. درصد تفاوت های به دست آمده در برآورد فرکانس‌های طبیعی نشان از شرایط متفاوت محیطی حاکم در حین وقوع زمین لرزه می‌باشد.

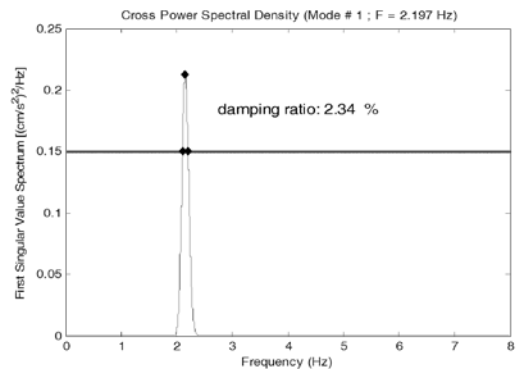


شکل ۲۱- مقیاس نگار رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۱۰/۲۸ (مود اول روی شکل مشخص شده است)



شکل ۲۲- مقیاس نگار رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۳/۱ (مود اول روی شکل مشخص شده است)

حال با توجه به عدم وجود پدیده تداخل مودی، با استفاده از روش نیم توان، بصورت نشان داده شده در شکل‌های (۲۳) تا (۲۶)، مقدار ضرایب میرایی محاسبه شده است.



شکل ۲۳- ضریب میرایی به دست آمده از طیف اولین مقدار تکین رکورد ثبت شده در ۲۰۱۱/۸/۲

جدول ۶- فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی برای رکوردهای بررسی شده و مقادیر میانگین آن‌ها

تاریخ رکورد	مود اول (Hz)	مود دوم (Hz)	مود سوم (Hz)	مود چهارم (Hz)	مود پنجم (Hz)	میرایی (%)
۲۰۱۱/۸/۲	۲/۴۱۷	۳/۰۰۲۹	۳/۱۹۸۲	۳/۵۸۸۹	۴/۷۳۶۳	۲/۳۴
۲۰۱۱/۱۰/۵	۲/۳۴۳۸	۳/۱۹۸۲	۳/۷۱۰۹	۴/۴۹۲۲	۴/۷۸۵۲	۲/۲۱
۲۰۱۱/۱۰/۲۸	۲/۲۷۰۵	۲/۸۳۲	۳/۲۹۵۹	۳/۵۴	۴/۴۱۸۹	۲/۴۲
۲۰۱۱/۳/۱	۲/۱۹۷۳	۳/۲۷۱۵	۳/۵۴	۴/۲۹۶۹	۵/۲۴۹	۲/۱۳
تفاوت (%)	۹/۰۸۹	۱۳/۴۳۴	۱۳/۸۱۶	۲۱/۱۹۶	۱۵/۸۱۴	۱۱/۹۸۳
میانگین	۲/۳۰۷۱۵	۲/۸۴۴۲۲۵	۳/۳۶۹۱۲۵	۳/۷۹۰۲۷۵	۴/۵۵۹۳۲۵	۲/۲۷۵

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور برآورد دقیق پارامترهای مودال از ترکیب روش تجزیه حوزه فرکانس و تبدیل موجک استفاده گردید. ترکیب دو روش در جهت بهره‌گیری از مزایای هر کدام از روش‌ها منجر به بهبود نتایج می‌گردد.

فرکانس‌های مودی و ضرایب میرایی سد کارون ۳ از پاسخ‌های ثبت شده برای ۴ زلزله متفاوت در روی بدنه سد با روش مذکور محاسبه شدند.

انطباق مناسبی بین فرکانس‌های مودی به دست آمده برای مودهای مختلف از رکوردهای زمین لرزه‌های مختلف به دست آمد که نشان می‌دهد این فرکانس‌ها قابل اعتماد هستند.

ماکزیمم تفاوت در فرکانس‌های مودی به دست آمده ۱۵ درصد می‌باشد که این اختلاف‌ها را می‌توان به متفاوت بودن شرایط محیطی حاکم بر سد در حین وقوع زلزله‌های مختلف نسبت داد.

مقادیر میرایی به دست آمده از رکوردهای زمین لرزه‌های مختلف انطباق مناسب با هم دارند که به نوعی نشان دهنده دقت مناسب روش تبدیل موجک در برآورد میرایی می‌باشد.

## ۵- مراجع

- Journal of Sound and Vibration, 2014, 333 (3), 1024-1045.
- [4] Tarinejad, R., Damadipour, M., "Extended FDD-WT Method Based on Correcting the Errors due to Non-synchronous Sensing of Sensors", Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72-73, 547-566.
- [5] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition", The 18<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, US, 2000.
- [6] Cherry, S., Brady, A. G., "Determination of Structural Dynamic Properties by Statistical Analysis of Random Vibrations" The 3<sup>rd</sup> World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 1965, Vol. II, pp 50-67.
- [7] Kawasumi, H., Shima, E., "Some Applications of a Correlator to Engineering Problems", The 3<sup>rd</sup> World Conference on Earthquake, 1965.
- [8] Hart, G. C., Dijulio, R. M., Lew, M., "Torsional Response of High-Rise Buildings", ASCE Transactions, 1975, 397-416.
- [9] McLamore, V., Hart G., "Ambient Vibration of Two Suspension Bridges", Journal of the Structural Division, 1971, 2567-2582.
- [10] Nasserzare, J., Lei, Y., "Computation of Natural Frequencies and Mode Shapes of Arch Dams as an Inverse Problem", Advances in Engineering Software, 2000, 827-836.
- [11] Li, Q. S., Li, Z. N., "Experimental and Numerical Seismic Investigations of the Three Gorges Dam", Engineering Structures, 2005, 27 (4), 501-513.
- [12] Su, H. Z., Wu, Z. R., "Identification Model for Dam Behavior Based on Wavelet Network",
- [1] Ewins, D. J., "Modal Testing: Theory, Practice and Application", Research Studies Press Ltd., UK, 2000.
- [2] Kohler, M., Davis, P., Safak, E., "Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-frame UCLA Factor Building", Earthquake Spectra, 2005, 715-736.
- [3] Tarinejad, R., Damadipour, M., "Modal Identification of Structures by a Novel Approach Based on FDD-wavelet Method",

Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007, 22 (6), 438-448.

- [13] Bendat, A., Pirsol, A., "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, New York, US, 1993.
- [14] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., "Modal Identification of Output Only Systems Using Frequency Domain Decomposition", Journal of Smart Materials and Structures, 2001, 10, 441-445.
- [15] Zhang, L., Brincker, R., Andersen, P., "An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues", The 1<sup>st</sup> International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [16] Gade, S., "Frequency Domain Techniques for Operational Modal Analysis", The JSAE Annual Congress, Japan, 2002.
- [17] Polikar, R., "Theory and Applications of Wavelets", Taught for IEEE Philadelphia Section, 2002.
- [18] Polikar, R., "The Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis: The Wavelet Tutorial", The Issue of Science Magazine, 2003.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Modal Identification of an Arch Dam Using Combined Frequency Domain Decomposition and Wavelet Transform Method**

Arman Roshanravan<sup>a</sup>, Reza Tarinejad<sup>b,\*</sup>, Majid Damadipour<sup>b</sup>, Hamed Mahjoob<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

**Received:** 06 March 2016; **Accepted:** 08 October 2016

---

### **Keywords:**

System identification, Frequency domain, Wavelet transform, Karun 3 dam, Damping ratio, Natural frequency

---

### **1. Introduction**

Operational modal analysis is used to extract the modal parameters of the system based on the responses of the system. Due to the complexity of dam-foundation-reservoir system, accurate measurement of the input excitation to the dam body is not possible. Therefore, in the operational modal analysis methods, the dynamic properties of the system are identified only based on the responses of the system [1]. In classical system identification methods, the structure vibrates due to an external force which may cause it to be out of operation during tests. In addition, the forced vibration tests put the structure in danger of possible damage [2]. Utilizing of ambient vibrations to obtain modal parameters of the system is one of the most important advantages of the operational modal analysis in comparison with classical methods. Low amplitude and low signal to noise ratio of ambient vibration can cause inaccuracy and uncertainty in the identified modal characteristics therefore several signal processing methods should be used to increase the accuracy of the results.

### **2. Methodology**

There are several methods for operational modal analysis such as frequency domain decomposition (FDD) and wavelet transform (WT). In this paper, combination of these two methods is used to save the advantages and eliminate the disadvantages of both methods. Good accuracy of natural frequencies and mode shapes can be obtained using frequency domain decomposition method due to high resolution of frequency but it is not possible to estimate the damping ratios in conditions of modal interferences. On the other hand, in the wavelet transform method because of multi resolution capability, there is possibility of decomposing signal to the identified natural frequencies to distinguish the modal interference therefore damping ratios could be calculated with high accuracy [2]. The flowchart of the methodology used for the processing of the records of seismic responses of the dam is illustrated in Fig. 1.

In this paper, the Karun 3 double curvature concrete arch dam is selected as case study. The frequency domain decomposition method used to calculate the natural frequencies of the system and wavelet transform is used to estimate the damping ratios. The seismic responses of the dam to four different ground motions are used to identify the modal parameters of the dam in accurate and reliable manner.

Half power method and logarithmic decrement technique could be used in order to obtain the damping ratios. These two methods are not applicable in condition of existing two or more adjacent modes in power spectral density spectrum. The wavelet transform could be used to decompose the signal to the single frequency signal which contains only the natural frequency of the system. By decomposing the signal, modal interference is eliminated and therefore the half power method and logarithmic decrement technique could be used to calculate damping ratios. To estimate the damping ratios of different modes of vibration, the responses should be decomposed to the corresponding natural frequency then the half power method should be applied [2, 3]. In this paper, the damping ratio of the first mode is calculated and discussed. To calculate the damping ratios using wavelet transform,

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: arman.roshanravan@hotmail.com (Arman Roshanravan), r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir (Reza Tarinejad), m\_damadi@yahoo.com (Majid Damadipour), mahjoob.hamed@gmail.com (Hamed Mahjoob).

optimum wavelet parameters should be defined. To determine these parameters, Shannon entropy criterion has been used. In this criterion, the wavelet parameters which cause minimum entropy, selected as the optimum parameters.

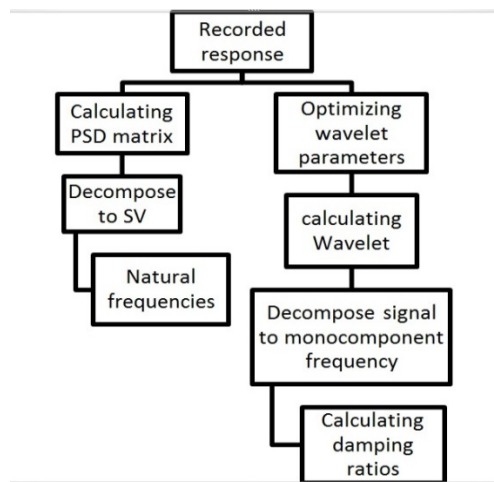


Fig. 1. The flowchart of the methodology used for signal processing of seismic responses

### 3. Results and discussion

Comparison of the results obtained for four different ground motions are presented in Table 1. The results indicate good agreement between the natural frequencies obtained from different recorded responses. Also good consistency is obtained for the estimated damping ratio corresponding to the first mode as presented in Table 1.

Table 1. Identified natural frequencies and damping ratios

Record date	1 <sup>st</sup> mode (Hz)	2 <sup>nd</sup> mode (Hz)	3 <sup>rd</sup> mode (Hz)	4 <sup>th</sup> mode (Hz)	5 <sup>th</sup> mode (Hz)	Damping (%)
2011/08/02	2.417	3.0029	3.1982	3.5889	4.7363	2.34
2011/10/05	2.3438	3.1982	3.7109	4.4922	4.7852	2.21
2011/10/28	2.2705	2.832	3.2959	3.54	4.4189	2.42
2011/03/01	2.1973	3.2715	3.54	4.2969	5.249	2.13
Difference (%)	9.089	13.434	13.816	21.196	15.814	11.983
Average	2.30715	2.844225	3.369125	3.790275	4.559325	2.275

### 4. Conclusions

In this paper, combination of two methods, frequency domain decomposition and wavelet transform, is used to estimate the modal parameters of the arch dam. Natural frequencies and damping ratios of Karun 3 dam are calculated using seismic responses recorded during 4 different ground motions. Good agreement of the results for different ground motions are achieved that shows reliable and accurate identification. A maximum 15% discrepancy is obtained for identified natural frequencies which possibly induced by different conditions ambient vibrations. Good agreement also achieved for the calculated damping ratios which shows efficiency of the wavelet transform method for this purpose.

### 5. References

- [1] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., "Modal Identification of Output Only Systems Using Frequency Domain Decomposition", *Journal of Smart Materials and Structures*, 2001, 10, 441-445.
- [2] Tarinejad, R., Damadipour, M., "Modal Identification of Structures by a Novel Approach Based on FDD-wavelet Method", *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333 (3), 1024-1045.
- [3] Tarinejad, R., Damadipour, M., "Extended FDD-WT Method Based on Correcting the Errors due to Non-synchronous Sensing of Sensors", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 72-73, 547-566.