



کنترل سلامت یک سد بتنی قوسی با استفاده از یک روش ترکیبی مؤثر مبتنی بر تجزیه حوزه فرکانس و تبدیل موجک

مجید دامادی پور¹، رضا تارینه‌جادی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166616471، r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1396

پذیرش: 30 بهمن 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

تحلیل مودال عملیاتی

آزمایش ارتعاش محیطی

تجزیه حوزه فرکانس

تبدیل موجک

کنترل سلامت سازه‌ای

چکیده

تحلیل مودال عملیاتی به عنوان شاخه‌ای از شناسایی سیستم نقش بسیار مهم و کاربردی در تعیین مشخصات دینامیکی سازه‌ها ایفا می‌کند. در این رویکرد عملیاتی که مبتنی بر آزمایش ارتعاش محیطی تحقق می‌پذیرد، بارهای محیطی و بهره‌برداری به عنوان منشأ تحریک سازه در نظر گرفته می‌شوند. در تحقیق حاضر کنترل سلامت یک سد بتنی قوسی با استفاده از شناسایی مودال سیستم سازه‌ای مبتنی بر یک روش تلفیقی تشکیل یافته از تجزیه حوزه فرکانس و تبدیل موجک تحت عنوان FDD-WT انجام گرفته است. در این روش تلفیقی که به منظور رفع نواقص روش FDD در تعیین مقادیر میرایی پیشنهاد شده است، از طیف اولین مقدار تکیه به دست آمده از سیگنال‌های تک فرکانسی مستخرج از تبدیل موجک توابع همبستگی پاسخ‌های ارتعاشی به منظور تعیین مقادیر میرایی بهره برده می‌شود. در این مقاله سد قوسی پاکوئیا به عنوان مطالعه موردی انتخاب و از رکوردهای لرزه‌ای مربوط به زلزله‌های 1994 نورتریج، 2001 سن‌فرناندو و 2008 چینوهیلز نیز به منظور ارزیابی مشخصات دینامیکی و کنترل سلامت سازه‌ای در طول دوره زمانی 1994 تا 2008 استفاده شده است. علاوه بر این تبدیل موجک پاسخ‌های لرزه‌ای نیز به منظور صحت‌سنجی نتایج و ارزیابی موقعیت زمانی و فرکانسی مودهای سیستم در طی وقوع زلزله‌های مزبور محاسبه شده است. بررسی تغییرات فرکانس‌های طبیعی سازه نشان می‌دهد که سد یادشده در طی زلزله 1994 نورتریج (حدود ثانیه چهارم) دچار آسیب جدی شده بود، در حالی که ارتعاشات این سازه بتنی در طی 4 ثانیه اول این زلزله و نیز زلزله‌های 2001 و 2008، تقریباً به صورت خطی بوده است.

Health monitoring of a concrete arch dam using an effective hybrid method based on frequency domain decomposition and wavelet transform

Majid Damadipour, Reza Tarinejad*

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 September 2017
Accepted 19 February 2018
Available Online 17 March 2018

Keywords:

Operational modal analysis
Ambient vibration test
Frequency domain decomposition
Wavelet transform
Structural health monitoring

ABSTRACT

Operational modal analysis (OMA), as a branch of the system identification, plays a very important and practical role in determining the dynamic characteristics of the structures. In the operational approach that is implemented based on the ambient vibration test, the ambient and operation loads are considered as the excitation source of the structure. In the present research, the health monitoring of a concrete arch dam is done using the modal identification of the structural system based on an integrative method composed of frequency domain decomposition and wavelet transform, called FDD-WT method. In the integrative method that is proposed to eliminate the shortcomings of the FDD method in determining the damping values, the spectrum of the first singular value obtained from the single frequency signals extracted from the wavelet transform of the correlation functions of the vibrational responses is used to determine the damping values. In this paper, Pacoima arch dam is selected as the case study and the seismic records related to 1994 Northridge, 2001 San Fernando and 2008 Chino Hills earthquakes are also used to evaluate the dynamic characteristics and structural health monitoring during the period between 1994 to 2008. In addition, the wavelet transform of the seismic responses is also calculated in order to verify the results and to evaluate the time and frequency position of the system modes during the above-mentioned earthquakes. Investigation of changes in the natural frequencies of the structure indicates that the dam had taken serious damage during 1994 Northridge earthquake (about the fourth second), while the vibrations of the concrete structure has been almost linear during the first 4 seconds of the earthquake and also in 2001 and 2008 earthquakes.

1- مقدمه

دینامیکی سازه‌ها به کار برده می‌شوند عبارت از تحلیل مودال عملیاتی¹ و

انواع رویکردهای تحلیل مودال که به منظور بررسی و تعیین مشخصات

¹ Operational Modal Analysis (OMA)

Please cite this article using:

M. Damadipour, R. Tarinejad, Health monitoring of a concrete arch dam using an effective hybrid method based on frequency domain decomposition and wavelet transform, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 99-109, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توان محاسبه و سپس تکنیک تجزیه مقدار تکین⁸ بر آن اعمال می‌شود و به کمک آن مقادیر فرکانس‌های طبیعی شکل‌های مودی و ضرایب میرایی به دست می‌آیند [6-8]. روش یادشده با وجود تخمین دقیق فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی نامیزان در برآورد مقادیر میرایی به ویژه به هنگام وقوع تداخل مودی از یک ضعف اساسی رنج می‌برد.

در سال‌های اخیر (2007-2015) برخی روش‌های تحلیل مودال عملیاتی مبتنی بر انتقال‌پذیری در حوزه فرکانس ارائه شده است که مهم‌ترین مزیت آن‌ها مستقل بودن از ماهیت تحریکات ورودی است. این روش‌ها نیز با وجود توسعه مناسبی که داشته‌اند مانند سایر روش‌های حوزه فرکانس از برآورد دقیق مقادیر میرایی ناتوان هستند [9-13].

در سال 2014 الگوریتم کارآمدی تحت عنوان FDD-WT به منظور بهبود دقت نتایج شناسایی سیستم ارائه گردید که از قابلیت روش‌های حوزه‌های فرکانسی و زمان-فرکانسی به صورت ترکیبی استفاده می‌کند [15]. هدف از این الگوریتم اصلاح و بهبود روش FDD در برآورد دقیق مقادیر میرایی است. این روش مؤثر با بهره‌گیری از سیگنال‌های تک فرکانسی مستخرج از تبدیل موجک توابع همبستگی مشکل تداخل مودی را مرتفع کرده و منجر به کاهش نشت در طیف فوریه نیز می‌گردد [14-16].

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی و کنترل سلامت سازه‌ای سد بتنی قوسی پاکویما، پارامترهای مودال سیستم سازه‌ای با استفاده از روش ترکیبی FDD-WT [14] محاسبه و استخراج شده که یک روش حوزه زمان-فرکانس است. روش یادشده با هدف غلبه بر معایب و کاستی‌های روش FDD در برآورد مقادیر میرایی ارائه شده است. برای این منظور به جای استفاده مستقیم از پاسخ‌های سیستم که منجر به بروز نشت و پراکندگی طیفی می‌گردد، از سیگنال‌های تک فرکانسی مستخرج از تبدیل موجک توابع همبستگی پاسخ‌های سیستم مبتنی بر تکنیک متوسط‌گیری دوره‌ای از توابع همبستگی⁹ بهره برده شده است. به عبارت دیگر کاربرد مستقیم پاسخ‌های سیستم در محاسبه طیف‌های مقدار تکین منجر به ظهور پیک‌های مربوط به سایر مؤلفه‌های فرکانسی موجود در سیگنال شامل فرکانس‌های مودی و غیرمودی (عوامل محیطی) می‌گردد و همین مسأله نیز می‌تواند منجر به تشدید نشت و پراکندگی طیفی گشته و در نتیجه پهنای پیک‌های مودی را تحت‌الشعاع قرار دهد؛ بنابراین بروز خطای بایاس در تخمین مقادیر میرایی با استفاده از روش FDD غیرقابل انکار است. سیگنال‌های تک فرکانسی (ضرایب موجک) متناظر با فرکانس‌های طبیعی سیستم در روش تلفیقی FDD-WT با بهره‌گیری از قابلیت‌های تبدیل موجک WT [17, 18] در تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های فرکانسی مختلف استخراج شده و سپس با اعمال روش FDD بر سیگنال‌های یادشده طیف‌های اصلاح شده مقدار تکین حاصل می‌شوند که صرفاً دارای یک پیک غالب متناظر با مود مورد نظر است. در چنین شرایطی میزان نشت و پراکندگی طیفی کاهش یافته و دقت برآورد مقادیر میرایی نیز افزایش پیدا می‌کند. در این تحقیق کنترل سلامت و شناسایی سیستم سد قوسی پاکویما مبتنی بر پاسخ‌های لرزه‌ای مربوط به زلزله‌های 1994 نورتریج، 2001 سن‌فرناندو و 2008 چینوهیلز انجام گرفته و از تحلیل‌های زمان-فرکانس صورت گرفته مبتنی بر روش تبدیل موجک نیز به منظور صحت سنجی نتایج استفاده شده است.

2- روش شناسایی سیستم

در این مقاله روش تلفیقی FDD-WT به منظور کنترل سلامت و شناسایی

تحلیل مودال تجربی¹ است. روش‌های تحلیل مودال عملیاتی صرفاً مبتنی بر پاسخ‌های دینامیکی سیستم (خروجی تنها) عمل می‌کنند، در حالی که روش‌های تحلیل مودال تجربی با استفاده از رکوردهای ورودی-خروجی به شناسایی سیستم می‌پردازند؛ بنابراین در روش‌های OMA از نتایج آزمایش ارتعاش محیطی² (صرفاً پاسخ‌های سیستم) و در روش‌های EMA نیز از نتایج آزمایش ارتعاش اجباری³ با تأکید بر ورودی معین استفاده می‌شود. آزمایش‌های ارتعاش اجباری به دلیل کاربرد ابزارهای خاص جهت تحریک سازه بسیار پرهزینه بوده و اجرای این آزمایش‌ها منوط به توقف بهره‌برداری از سازه است که این خود می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را پدید آورد؛ بنابراین کاربرد یک آزمایش دینامیکی که معایب و مشکلات یادشده را نداشته باشد، بسیار راه‌گشا خواهد بود. آزمایش ارتعاش محیطی برخلاف ارتعاش اجباری مبتنی بر تحریکات محیطی و بارهای بهره‌برداری انجام می‌گیرد، از این‌رو نیاز به توقف بهره‌برداری در حین آزمایش نیست و از طرف دیگر کاربرد ابزارهای لرزاننده مصنوعی نیز منتفی می‌شود. در این آزمایش پاسخ‌های سیستم سازه‌ای کاملاً مطابق با رفتار ارتعاشی واقعی سیستم در طول عمر بهره‌برداری خواهد بود [1]. تحلیل مودال عملیاتی مبتنی بر آزمایش ارتعاش محیطی می‌تواند گزینه مناسبی به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی و کنترل سلامت⁴ سازه‌های عمرانی مانند سدها، پل‌ها، ساختمان‌ها و غیره باشد.

شناسایی پارامترهای مودال براساس داده‌های اندازه‌گیری شده ورودی و خروجی که مختص آزمایش‌های ارتعاش اجباری است، از طریق توابع پاسخ فرکانسی FRFs در حوزه فرکانس یا توابع پاسخ ضربه IRFs در حوزه زمان انجام می‌شود. از آنجایی که در آزمایش‌های ارتعاش محیطی، اندازه‌گیری مقادیر تحریکات ورودی (عوامل محیطی و بارهای بهره‌برداری) در سازه‌های واقعی تحت شرایط بهره‌برداری دشوار یا غیرممکن است، فقط پاسخ‌های سیستم اندازه‌گیری می‌شوند و ورودی‌ها ناشناخته باقی می‌مانند؛ بنابراین شناسایی پارامترهای مودال صرفاً براساس خروجی‌ها انجام می‌گیرد [1, 2].

خروجی‌ها و نتایج به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی با استفاده از روش‌های تحلیل مودال عملیاتی مورد تحلیل و پردازش قرار می‌گیرند. این روش‌ها با توجه به حوزه عملکردشان در پردازش رکوردها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارت از روش‌های حوزه فرکانس، حوزه زمان و حوزه زمان-فرکانس است. از مهم‌ترین روش‌های حوزه فرکانس می‌توان به روش‌های جستار قله⁵، تجزیه حوزه فرکانس⁶، تجزیه حوزه فرکانس ارتقا یافته⁷ و... اشاره کرد.

روش جستار قله در سال 1993 به عنوان ساده‌ترین روش شناسایی سیستم مبتنی بر داده‌های ارتعاش محیطی ارائه شد [3]. در این روش فرکانس‌های طبیعی سیستم‌های سازه‌ای از قله‌های نمودار میانگین طیف‌های توانی نرمال شده به دست می‌آید.

در سال 2000 روشی به نام تجزیه حوزه فرکانس ارائه شد [4] که چندی بعد در سال 2001 با اندکی تغییر در شیوه برآورد مقادیر میرایی، تجزیه حوزه فرکانس ارتقاء یافته نامیده شد [5]. این روش به عنوان یکی از روش‌های محبوب و پر کاربرد تحلیل مودال عملیاتی در اکثر پروژه‌های تحقیقاتی به کار گرفته شده است. در این روش ابتدا ماتریس چگالی طیف

¹ Experimental Modal Analysis (EMA)

² Ambient vibration test

³ Forced vibration test

⁴ Health monitoring

⁵ Peak picking

⁶ Frequency Domain Decomposition (FDD)

⁷ Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

⁸ Singular Value Decomposition (SVD)

⁹ Cyclic Averaging of Correlation Functions (CACF)

ماتریس طیف توان خروجی $G_{yy}(j\omega)$ است. سپس ماتریس PSD خروجی به دست آمده، به وسیله تکنیک قدرتمند تجزیه مقدار تکین در فرکانسهای گسسته $\omega_i = \omega$ ، با استفاده از رابطه (6) تجزیه می گردد.

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (6)$$

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 که حاوی مقادیر تکین اسکالر s_{ij} است. اگر ماتریس چگالی طیف توان یک سیستم دینامیکی به مقادیر و بردارهای تکین متناظر با فرکانس مودی تجزیه شود، از پیکهای طیف اولین مقدار تکین (s_{i1}) فرکانسهای طبیعی سیستم و از اولین بردارهای تکین (u_{i1}) متناظر با پیکهای یادشده نیز شکل‌های مودی سیستم تقریب زده می‌شود [21,14,10].

در تحقیق حاضر از طیف ارتباط متوسط به عنوان معیاری برای انتخاب صحیح پیکهای مودی سیستم استفاده شده است. طیف ارتباط معرف کیفیت داده‌ها و ارتباط بین آن‌ها بوده و از مقادیر حقیقی بین صفر و یک تشکیل شده است. به طور کلی پیک‌هایی از طیف ارتباط که بر پیکهای طیف اولین مقدار تکین منطبق هستند، اطمینان بیشتری به فرکانس تشدید بودن آن‌ها وجود دارد. طیف ارتباط متوسط که تابعی از فرکانس (f) است به صورت رابطه (7) به دست می‌آید [15].

$$\bar{C}(f) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}(f)}{m^2} \quad (7)$$

که در آن رابطه (8) به صورت زیر است.

$$C_{ij}(f) = \frac{|P_{ij}(f)|^2}{P_{ii}(f)P_{jj}(f)} \quad i \text{ and } j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

در روابط بالا m تعداد رکوردهای پاسخ (تعداد کانال‌های خروجی) و C_{ij} نیز طیف ارتباط بین رکوردهای کانال‌های i و j که مبتنی بر طیف‌های خود توان $P_{ii}(f)$ و $P_{jj}(f)$ و دیگر توان $P_{ij}(f)$ محاسبه شده است.

2-2- روش تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته به صورت کانولوشن¹ سیگنال $x(t)$ و نمونه‌های مختلف موجک‌های اتساع و انتقال یافته موجک مادر به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود [22].

$$CWT_x^\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

در آن a و b به ترتیب پارامترهای انتقال² و مقیاس³ است و CWT ضریب تبدیل موجک نامیده می‌شود. تابع پنجره ψ نیز اصطلاحاً موجک مادر نامیده می‌شود. در این مقاله از موجک مورلت اصلاح شده⁴ به عنوان موجک مادر استفاده شده است.

با توجه به این که در پردازش داده‌های لرزه‌ای معمولاً دامنه و طیف فاز سیگنال مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ موجک مادر انتخاب شده علاوه بر برقراری شرط مقبولیت (یک تابع نوسانی با مقدار میانگین صفر) باید تحلیلی نیز باشد. موجک مورلت از چنین شرایطی برخوردار است [23]. این موجک از مدوله‌سازی یک موج تخت با تابع گاوسی به دست می‌آید. در واقع موجک مورلت از ترکیب یک تابع نمایی مختلط (حامل) در یک پنجره گاوسی حاصل می‌شود. میزان بالای تشابه این موجک به تبدیل فوریه آن را برای تحلیل‌های هارمونیک بسیار سودمند و پر کاربرد می‌کند، همچنین از آن‌جایی که

پارامترهای مودال سد قوسی پاکویما مبتنی بر پاسخهای لرزه‌ای ثبت شده در بدنه سازه به کار گرفته شده است. این پاسخ‌ها در اثر حرکات ارتعاشی ناشی از زلزله‌های متعدد به دست آمده‌اند.

در ادامه به تشریح روش‌های تجزیه حوزه فرکانس و تبدیل موجک پرداخته شده است.

2-1- روش تجزیه حوزه فرکانس FDD

روش تجزیه حوزه فرکانس FDD یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تحلیل مودال عملیاتی در حوزه فرکانس است. در این روش با اعمال تکنیک تجزیه مقادیر تکین SVD بر ماتریس‌های چگالی طیف توان پاسخ‌ها پارامترهای مودال سازه مبتنی بر مقادیر و بردارهای تکین حاصل می‌شوند.

رابطه بین ورودی‌های $x(t)$ و خروجی‌های $y(t)$ در حوزه فرکانس و در قالب طیف‌های توانی به صورت زیر رابطه (1) بیان می‌شود [19].

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^H \quad (1)$$

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 FRF از مرتبه $(m \times r)$ و بالانویس H نیز نشان‌دهنده ترانزده مزدوج مختلط ماتریس تابع پاسخ فرکانسی است.

ماتریس پاسخ فرکانسی $H(j\omega)$ را می‌توان به فرم کسرهای جزئی (قطب و باقی‌مانده) به صورت رابطه (2) نوشت [20].

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{Q_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (2)$$

در آن Q_k ، λ_k و n به ترتیب نشان‌دهنده k -امین ماتریس باقی‌مانده، k -امین قطب یا مقدار ویژه و تعداد مدهای به کار رفته است. علامت * نیز نشان‌دهنده مزدوج مختلط است. ماتریس Q_k مطابق با تئوری تحلیل مودال می‌تواند به صورت رابطه (3) نوشته شود.

$$Q_k = \phi_k \gamma_k^T \quad (3)$$

در آن ϕ_k بردار شکل مود k -ام و γ_k بردار مشارکت مودال و بالانویس T نیز نشان دهنده ترانزده بردار مشارکت مودال است.

با جای‌گذاری رابطه (2) در رابطه (1) و با فرض این که ورودی سیستم نویز سفید باشد (ماتریس چگالی طیف توان ورودی $G_{xx}(j\omega)$ یک ماتریس ثابت باشد) و نیز با کاربرد تئوری کسرهای جزئی هویساید و انجام برخی محاسبات ریاضی، رابطه (4) حاصل خواهد شد.

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^H}{-j\omega - \lambda_k^*} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{A_k^T}{-j\omega - \lambda_k} \quad (4)$$

در آن A_k ، k -امین ماتریس باقی‌مانده چگالی طیف توان خروجی است. با توجه به روابط بالا برای سیستم‌های دینامیکی با میرایی ضعیف، ماتریس A_k می‌تواند به صورت رابطه $A_k \approx d_k \phi_k \phi_k^H$ تقریب زده شود که در آن، d_k یک ثابت اسکالر حقیقی است [4].

در نهایت ماتریس چگالی طیف توان پاسخ‌ها برحسب شکل‌های مودی و قطب‌های سیستم به صورت رابطه (5) نوشته می‌شود.

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{d_k \phi_k \phi_k^H}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \phi_k^* \phi_k^T}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (5)$$

در روش شناسایی تجزیه حوزه فرکانس FDD، اولین گام تخمین

¹ convolution

² Location parameter

³ Scaling parameter

⁴ Modified Morlet wavelet

می‌گردد. به این ترتیب پارامترهای به دست آمده همان پارامترهای بهینه شده موجک برای دستیابی به بهترین رزولوشن زمانی-فرکانسی است. در تحقیق حاضر به منظور کاهش حجم محاسبات و نیز به حداقل رساندن نواحی اثرات انتهایی از کران پایین رابطه (11) به صورت رابطه (14) 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 (14) پارامترهای $f_{i,i+1}$ و $\Delta f_{i,i+1}$ مبتنی بر فرکانس‌های تشدید به دست آمده از روش FDD که در آن‌ها شرایط تداخل مودی برقرار است، تعیین شده و مقدار α نیز برابر با 2 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 محاسبه می‌شود. در نهایت با در اختیار داشتن جفت f_b و f_c های موجود، آنتروپی موجک شانون متناظر با هر کدام محاسبه شده و حداقل مقدار آن به دست می‌آید.

2-4- تکنیک متوسط‌گیری CACF

به طور کلی رابطه (9) برای به دست آوردن مقادیر میرایی با استفاده از پاسخ‌های ارتعاش آزاد مناسب است، این در حالی است که پاسخ‌های ارتعاش محیطی همچون زلزله از وضعیت کاهش آزاد برخوردار نیستند، حتی برخی از این رکوردها مانند پاسخ‌های به دست آمده از اثرات باد، امواج صوتی و ارتعاشات بسیار خفیف زمین به صورت مانا بوده و کاملاً غیرکاهشی است. در چنین شرایطی به جای استفاده از رکوردهای اصلی باید از توابع همبستگی این رکوردها استفاده تا شرط کاهشی بودن سیگنال‌ها به صورت نسبی ارضاء شود.

در این تحقیق براساس مطالعات انجام گرفته در مرجع [29] از یک فرمول‌بندی مؤثر مبتنی بر توابع همبستگی متوسط‌گیری شده پاسخ‌های محیطی به صورت رابطه (15) استفاده شده است.

$$CWT_{R_i}^{\psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} R_i(\tau) \psi^*\left(\frac{\tau-b}{a}\right) d\tau \quad (15)$$

که در آن رابطه (16) به صورت زیر است.

$$R_i(\tau) = E[R_{av_i}(\kappa + \tau) R_{av_i}(\kappa)] \quad , i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (16)$$

تابع $R_{av_i}(\kappa)$ به کار رفته در رابطه (16) متناظر با i -امین کانال بوده و به صورت رابطه (17) محاسبه می‌شود.

$$R_{av_i}(\kappa) = \frac{\sum_{j=1}^m R_{ij}(\kappa)}{m} \quad , i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (17)$$

در آن m تعداد رکوردهای پاسخ (خروجی‌ها) و $R_{ij}(\kappa)$ تابع همبستگی متناظر با i -امین و j -امین کانال سیستم سازه‌ای است؛ بنابراین با توجه به روابط (15,16) تابع خودهمبستگی توابع همبستگی متوسط‌گیری شده به جای سیگنال‌های اصلی به کار برده می‌شود. در حقیقت متوسط‌گیری دوره‌ای توابع همبستگی منجر به کاهش خطاهای بایاس و پراکندگی در طیف فوری و در نتیجه افزایش دقت تخمین مقادیر میرایی می‌گردد.

2-5- شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از روش تلفیقی FDD-WT

در الگوریتم FDD-WT ابتدا فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی سیستم با استفاده از روش FDD تعیین می‌شوند؛ سپس سیگنال‌های تک فرکانس غالب متناظر با فرکانس‌های مودی سیستم از تحلیل زمان-فرکانس توابع

فرکانس فوری موجک مورلت به طور عکس با مقیاس متناسب است، تفسیر ساده‌ای از مقیاس به فرکانس فراهم می‌آورد. از این‌رو در تبدیل موجک پیوسته معمولاً از موجک مورلت استفاده می‌شود [24,14].

تابع موجک مورلت مرسوم¹ با تمام برتری‌ها و ویژگی‌های شاخصی که نسبت به موجک‌های دیگر دارد، به دلیل عدم دسترسی به پارامترهای قابل تنظیم همچون پارامتر پهنای باند دقت کمی در محاسبه و تجزیه سیگنال‌ها به خصوص سیگنال‌های باند پهن مانند زلزله دارد و همین امر منجر به ایجاد خطا و رزولوشن زمانی-فرکانسی پایین می‌گردد، از این‌رو باید مورد اصلاح و بازسازی قرار می‌گرفت. با توجه به این‌که دقت تبدیل موجک کاملاً متأثر از میزان رزولوشن و قدرت تفکیک‌پذیری زمانی-فرکانسی تابع موجک است، باید موجکی تعریف می‌شد که پارامترهای قابل تنظیم داشته باشد، بدین منظور تابع موجک مورلت اصلاح شده معرفی گردید [14].

همان‌طور که پیشتر اشاره شد در تحقیق حاضر موجک مورلت اصلاح شده به عنوان تابع موجک مادر انتخاب شده است. این تابع به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود.

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{i2\pi f_c t} e^{-t^2/f_b} \quad (10)$$

در آن f_b پارامتر پهنای باند و f_c پارامتر فرکانس مرکزی موجک است. پارامتر پهنای باند f_b شکل موجک اصلی را کنترل می‌کند. این قابلیت در موجک مورلت مرسوم یا رایج وجود ندارد [26,25].

با بررسی جداسازی مودال در حوزه فرکانس و اثر انتهایی در حوزه زمان [27] به صورت رابطه (11) معیاری برای تعیین و انتخاب هدفمند پارامترهای f_b و f_c به دست می‌آید.

$$(2\alpha) \frac{f_{i,i+1}}{2\pi \Delta f_{i,i+1}} \leq \sqrt{f_b f_c} \leq \left(\frac{2\gamma}{\beta}\right) T f_i \quad (11)$$

این رابطه نشان می‌دهد که مقدار عددی عبارت $\sqrt{f_b f_c}$ باید به گونه‌ای انتخاب گردد که یک مصالحه تنظیم‌پذیری بین رزولوشن‌های زمانی و فرکانسی برقرار باشد. طبق مطالب ارائه شده در مرجع [27] زمانی که $\alpha = 2$ ، $\beta = 4$ و $\gamma = 0.4$ انتخاب شود، مودهای نزدیک به هم به طور کامل تفکیک و جدا می‌شوند، همچنین در اغلب موارد نواحی اثر انتهایی نیز به طور مؤثر و به قدر کفایت حذف می‌شوند. براساس رابطه (11) مسأله مهم دیگری همچنان پابرجاست و آن وجود جفت f_b و f_c های متعدد برای انتخاب است. در این تحقیق برای این‌که انتخاب پارامترها به صورت بهینه و هدفمند انجام گیرد از معیار آنتروپی حداقل شانون² استفاده شده است.

2-3- معیار آنتروپی حداقل شانون

با فرض این‌که $W(a_k, t)$ ، $k = 1, 2, \dots, M$ مجموعه‌ای از ضرایب موجک باشد، آنتروپی موجک شانون به وسیله رابطه (12) محاسبه می‌شود [28].

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

که در آن رابطه (13) به صورت زیر است.

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

این معیار اطلاعات 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 و انتخاب

¹ Traditional Morlet wavelet

² Shannon entropy criterion

این زلزله آسیب‌های جدی در تکیه‌گاه چپ و بازشدگی درز انقباض در

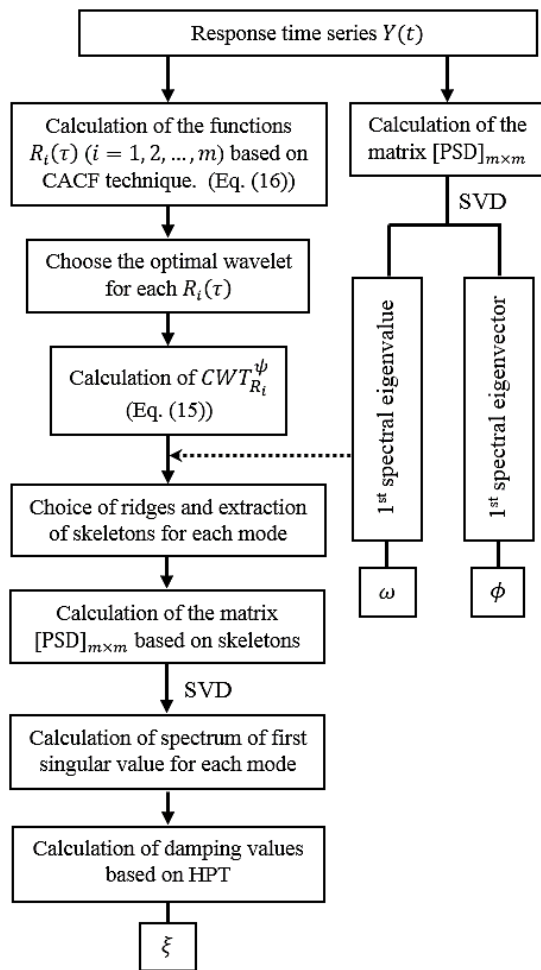


Fig. 1 The algorithm of the FDD-WT method

شکل 1 الگوریتم روش FDD-WT

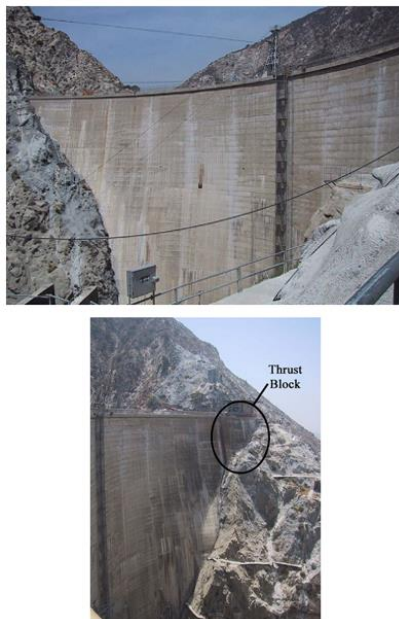


Fig. 2 Pacoima dam: a- View of right abutment, b- View of left abutment [31].

شکل 2 سد پاکویما: الف- نمایی از تکیه‌گاه راست، ب- نمایی از تکیه‌گاه چپ [31]

همبستگی به دست آمده از تکنیک متوسط‌گیری CACF استخراج می‌گردند [14]. این سیگنال‌ها برای تخمین مقادیر میرایی با استفاده از تکنیک کاهش لگاریتمی¹ یا نیم توان² به کار گرفته می‌شوند. الگوریتم روش FDD-WT مبتنی بر تکنیک نیم توان به صورت شکل 1 است.

کاربرد تکنیک CACF در این الگوریتم منجر به اجتناب از پردازش رکوردها و داده‌های خام محیطی با استفاده از تکنیک مرسوم کاهش تصادفی³ می‌گردد که در واقع مهم‌ترین مزیت آن است. تکنیک RDT یک روش تقریبی پر خطا بوده و با حذف بخشی از داده‌ها و پاسخ‌های محیطی ثبت شده، سعی در ایجاد و بازسازی یک سیگنال کاهش یافته دارد که منجر به بروز خطا در برآورد مقادیر میرایی به ویژه در سیگنال‌های با طول کوتاه می‌گردد. در الگوریتم یادشده با تک‌فرکانسی کردن سیگنال‌ها طیف اولین مقدار تکیه به دست آمده از آن‌ها فقط دارای یک پیک شاخص خواهد بود، پس عملاً نداخل مودی (در صورت وجود) به طور کامل از بین رفته و میزان نشت طیفی نیز تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند. در این الگوریتم موجک مادر (موجک مورلت اصلاح شده) پیش از محاسبه تبدیل موجک سیگنال با استفاده از معیار آنتروپی حداقل شانون به منظور دستیابی به بهترین رزولوشن زمانی و فرکانسی بهینه‌سازی و محاسبه می‌گردد [15,14].

در تحقیق حاضر الگوریتم FDD-WT مبتنی بر تکنیک نیم توان (شکل 1) برای تخمین مقادیر میرایی به کار گرفته شده است. برای این منظور سیگنال‌های تک فرکانسی متناظر با هر مود ارتعاشی که برابر با تعداد خروجی‌های سیستم است، از تبدیل موجک توابع همبستگی به دست آمده از تکنیک CACF استخراج شده و سپس طیف اولین مقدار تکیه به دست آمده از سیگنال‌های یادشده برای هر مود سیستم با استفاده از روش FDD محاسبه می‌شود. طیف حاصله صرفاً دارای یک پیک غالب خواهد بود که با اعمال تکنیک نیم توان به آن مقدار میرایی متناظر با مود مورد نظر با دقت مطلوب استخراج می‌گردد.

3- مطالعه موردی

در این تحقیق سد بتنی قوسی پاکویما به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این سد بتنی دارای ارتفاع 113 متر و طول تاج 180 متر است که در 5 مایلی شمال سن فرناندو در نزدیکی لس‌آنجلس در جنوب کالیفرنیا واقع شده است. نمایی از این سد در شکل 2 نشان داده شده است.

در سد قوسی پاکویما 17 شتاب‌نگار بر بدنه و ساختگاه آن در موقعیت‌های مختلف نصب شده‌اند. شبکه شتاب‌نگارهای سد در شکل 3 نشان داده شده است.

کانال‌های 9-17 در نزدیکی تکیه‌گاه و در رویه پایین دست سد قرار دارند. کانال‌های 9-11 در ارتفاع 3 متر از پای سد در رویه پایین دست نصب شده‌اند. کانال‌های 2-4 در مرکز تاج قرار دارند. کانال‌های 1 و 5 در محل یک سوم راست و یک چهارم چپ در تراز تاج و کانال‌های 6-8 متناظر با کانال‌های 1، 2 و 5 در تراز 80% ارتفاع سد، مؤلفه‌های شعاعی پاسخ‌های شتاب را ثبت می‌کنند.

تکیه‌گاه سد در جناح چپ، یک تراست بلوک⁴ بتنی است که در محل درز انقباض قرار دارد. این سد که ساخت آن در سال 1928 به اتمام رسیده و فقط برای بارهای استاتیکی بدون در نظر گرفتن نیروهای زلزله طراحی شده است. سد پاکویما در سال 1994 زلزله بزرگ نورتریج را تجربه کرده است.

¹ Logarithmic Decrement Technique (LDT)

² Half Power Technique (HPT)

³ Random decrement technique (RDT)

⁴ Thrust block

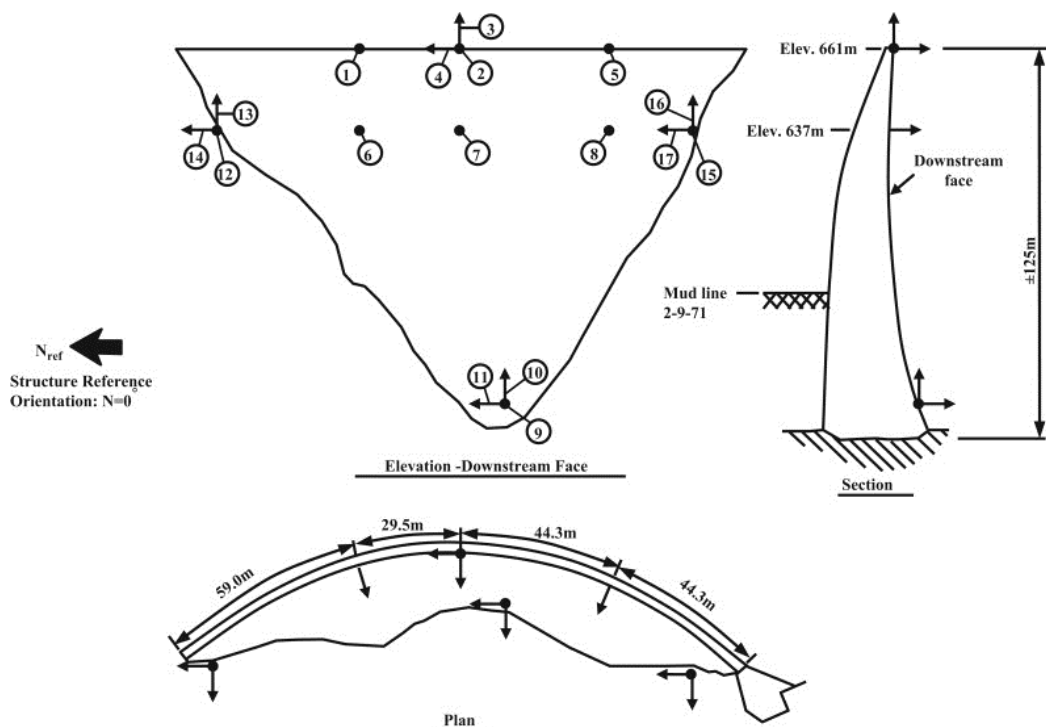


Fig. 3 Locations of 17 accelerometers on the Pacoima Dam [32]

شکل 3 موقعیت 17 شتاب‌نگار بر سد پاکویما [32]

سازه‌ای مبتنی بر روش FDD-WT و تبدیل موجک نمایش داده شده است. هدف از کاربرد تحلیل زمان-فرکانس مبتنی بر تبدیل موجک، صحت‌سنجی و ارزیابی فرکانس‌های به دست آمده از روش FDD-WT و نیز آگاهی از موقعیت زمانی-فرکانسی مودهای سیستم در وقوع زلزله‌های مختلف است. به منظور نمایش توزیع زمان-فرکانس پاسخ‌های لرزه‌ای سازه از معیار درصد

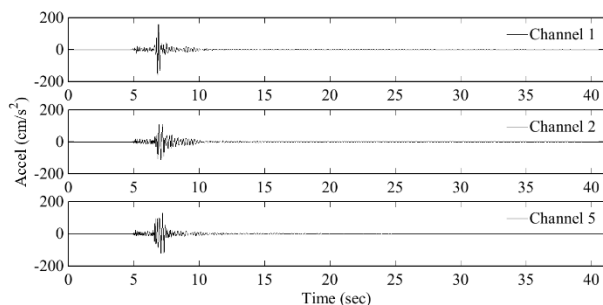


Fig. 5 Acceleration recorded at the radial output channels of the crest level, during the 2001 earthquake

شکل 5 شتاب‌های ثبت شده در کانال‌های شعاعی خروجی تراز تاج سد در زلزله 2001

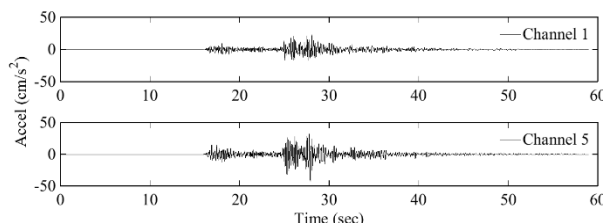


Fig. 6 Acceleration recorded at the radial output channels of the crest level, during the 2008 earthquake

شکل 6 شتاب‌های ثبت شده در کانال‌های شعاعی خروجی تراز تاج سد در زلزله 2008

نزدیکی تاج به وجود آمد. این سد علاوه بر زلزله مخرب یادشده دو زلزله 2001 سن‌فرناندو ($4.3 M_w$) و 2008 چینوهیلز ($5.4 M_w$) را نیز تجربه کرده است. در این دو زلزله ارتعاشات سد پاکویما تقریباً در ناحیه خطی بوده و آسیبی متوجه سد نشده است [31,30].

در این تحقیق از پاسخ‌های شتاب مربوط به کانال‌های خروجی شعاعی سد بتنی پاکویما (کانال‌های 1، 2، 5-8) که از ارتعاشات ناشی از زلزله‌های 1994 نورتریج، 2001 سن‌فرناندو و 2008 چینوهیلز به دست آمده و استفاده شده است. توجه به این نکته ضروری است که در زلزله 1994 نورتریج فقط رکوردهای مربوط به کانال‌های 11-8 به طور کامل ثبت شده و در دسترس است که از بین این رکوردها، شتاب‌نگاشت کانال 8 مربوط به خروجی سیستم و در شناسایی سیستم به کار گرفته شده است (شکل 4).

همچنین در طی زلزله 2008 چینوهیلز نیز رکورد کانال 2 ثبت نشده است. در شکل‌های 5 و 6 رکوردهای تراز تاج مربوط به زلزله‌های 2001 و 2008 نشان داده شده است.

پاسخ‌های شتاب سازه در زلزله 1994 نورتریج با فرکانس نمونه‌گیری 50 هرتز و در زلزله‌های 2001 و 2008 با فرکانس نمونه‌گیری 200 هرتز رکورد برداری شده‌اند.

4- نتایج و بحث

در این بخش نمودارهای به دست آمده از تحلیل و پردازش پاسخ‌های سیستم

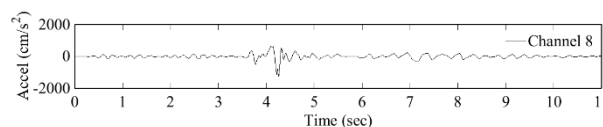


Fig. 4 Acceleration recorded at channel 8 during the 1994 earthquake

شکل 4 شتاب ثبت شده در کانال 8 طی زلزله 1994

با توجه به رکوردها (شکل 5) و تحلیل‌های زمان-فرکانسی ارائه شده در شکل‌های 8 و 10 می‌توان به این نتیجه رسید که در زلزله 2001 سن‌فرناندو، ماکزیم انرژی پاسخ‌های سیستم در محدوده زمانی 5-10 ثانیه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از رکوردهای زلزله 2008 چینوهیلز در شکل‌های 11-14 ارائه شده است. بررسی و مقایسه آن‌ها با نتایج زلزله سن‌فرناندو (شکل‌های 7-10) نشان‌دهنده صحت عملیات شناسایی سیستم است، زیرا تطابق مناسبی بین نتایج به دست آمده از هر دو زلزله برقرار است. با توجه به تحلیل‌های زمان-فرکانسی ارائه شده در شکل‌های 12 و 14 می‌توان به این نتیجه رسید که در زلزله 2008 چینوهیلز، ماکزیم انرژی پاسخ‌های سیستم در محدوده زمانی 23 تا 34 ثانیه قرار گرفته است. به منظور انتخاب صحیح پیک‌های طیفی (مودهای سیستم) علاوه بر بررسی و ارزیابی طیف‌های ارتباط متوسط از تحلیل‌های زمان-فرکانسی به دست آمده از تبدیل موجک نیز استفاده شده است.

در شکل‌های 12 و 14 موقعیت زمانی-فرکانسی مودهای سیستم به صورت خط چین نشان داده شده است که تطابق خوبی با پیک‌های طیف اولین مقدار تکین (شکل‌های 11 و 13) دارند.

نتایج فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از رکوردهای زلزله‌های 2001 سن‌فرناندو و 2008 چینوهیلز (شکل‌های 7-14) به صورت جدول 1 آورده شده است.

4-2- شناسایی ضرایب میرایی

مطابق با الگوریتم ارائه شده در شکل 1 سیگنال‌های تک فرکانسی به دست آمده از تبدیل موجک توابع همبستگی می‌توانند برای استخراج مقادیر میرایی

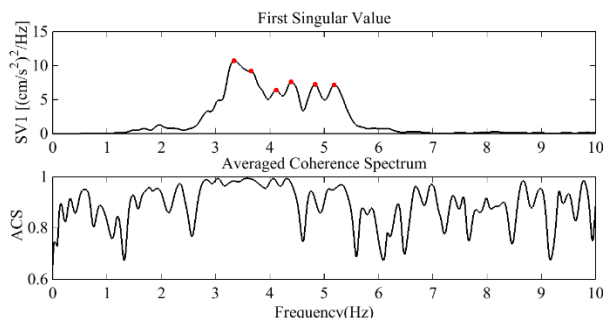


Fig. 9 The spectra from acceleration records of channels 6, 7 and 8 during 2001 earthquake: (up) first singular value; (down) averaged coherence spectrum

شکل 9 طیف‌های به دست آمده از رکوردهای کانال‌های 6-8 طی زلزله 2001: الف- اولین مقدار تکین؛ ب- طیف ارتباط متوسط

انرژی (PE) برای هر ضریب موجک به صورت رابطه (18) استفاده شده است.

$$PE = \frac{[|W(a, t)|]_{M \times L}^2}{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^L W(a_k, t_l)} \times 100 \quad (18)$$

در آن $W = [W(a, t)]_{M \times L}$ ماتریس ضرایب موجک به دست آمده از تبدیل موجک سیگنال مورد نظر است. ماتریس یادشده از L ستون، معادل با تعداد نمونه‌های سیگنال (طول سیگنال) و M سطر، معادل با تعداد مقیاس‌های تابع موجک مادر تشکیل یافته است؛ بنابراین ماتریس ضرایب W در مجموع از $M \times L$ تعداد درایه یا ضریب موجک تشکیل شده است که درصد انرژی هر یک از آن‌ها با استفاده از رابطه فوق محاسبه می‌گردد.

4-1- شناسایی فرکانس‌های طبیعی

طیف‌های اولین مقدار تکین و نمایش‌های زمان-فرکانس مربوط به رکوردهای زلزله‌های 2001 و 2008 که بر اساس روش‌های FDD-WT و تبدیل موجک به دست آمده‌اند، در شکل‌های 7 الی 14 نشان داده شده است. شکل‌های 7 الی 10 مربوط به نتایج به دست آمده از رکوردهای زلزله 2001 سن‌فرناندو می‌باشند.

شکل‌های 7 و 9 پیک‌های طیفی مربوط به شش مود اول سیستم را که از رکوردهای شعاعی خروجی متعلق به ترازهای تاج و 80% ارتفاع سد به دست آمده‌اند، همراه با طیف ارتباط متوسط آن‌ها نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های مذکور، صحت انتخاب مودهای سیستم را تأیید می‌کند. در شکل‌های 8 و 10 نیز موقعیت مودهای مذکور به صورت خط چین نشان داده شده است که دلیل دیگری بر صحت نتایج شناسایی سیستم است.

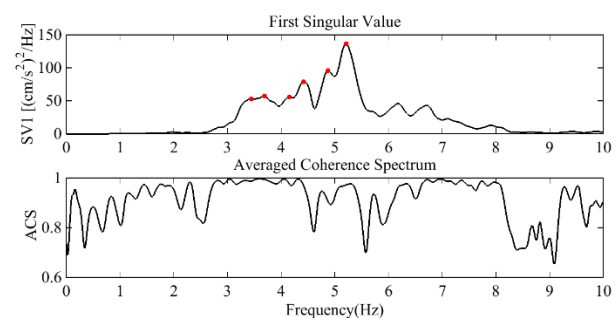


Fig. 7 The spectra from acceleration records of channels 1, 2 and 5 during 2001 earthquake: a- first singular value; b- averaged coherence spectrum

شکل 7 طیف‌های به دست آمده از رکوردهای کانال‌های 1، 2 و 5 طی زلزله 2001:

الف- اولین مقدار تکین؛ ب- طیف ارتباط متوسط

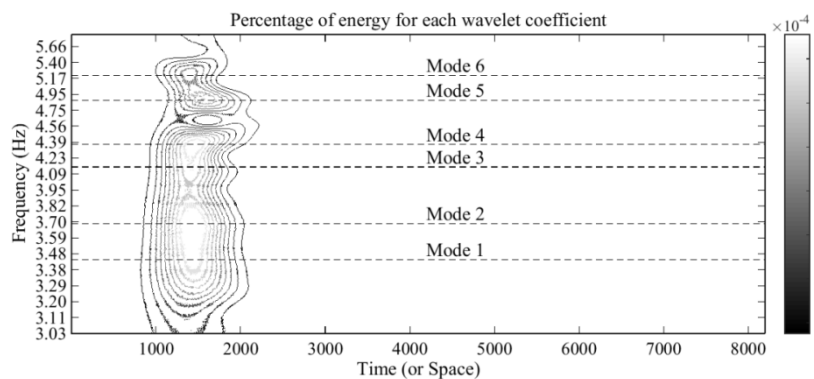


Fig. 8 The time-frequency presentation obtained from the radial output records at the crest level during 2001 earthquake

شکل 8 نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از رکوردهای شعاعی خروجی در تراز تاج طی زلزله 2001

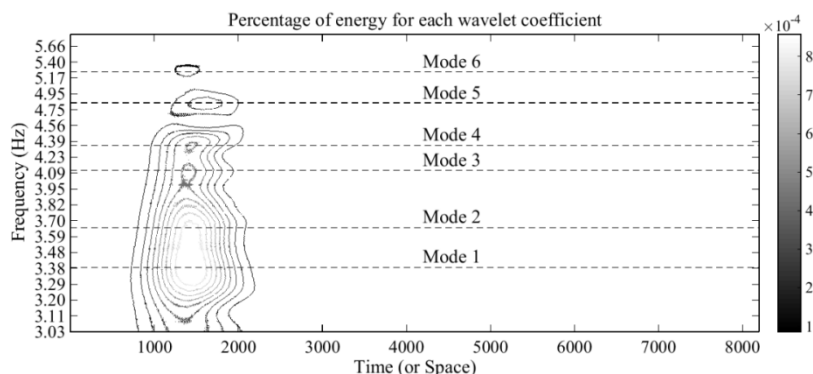


Fig. 10 The time-frequency presentation obtained from the radial output records at 80% height of the dam during 2001 earthquake

شکل 10 نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از رکوردهای شعاعی خروجی در تراز 80% ارتفاع سد طی زلزله 2001

صورت $f_c = 6.7$ و $f_b = 2.1$ به دست آمده‌اند. به همین ترتیب موجک‌های بهینه مربوط به سایر کانال‌ها نیز می‌تواند محاسبه و تعیین گردد. در ادامه با در اختیار داشتن موجک‌های مادر بهینه تبدیل موجک توابع خود همبستگی (رابطه 15) متناظر با کانال‌های مختلف محاسبه شده و سپس سیگنال‌های تک فرکانسی مربوط به فرکانس 3.748 هرتز استخراج می‌گردد. برای مثال نحوه به دست آوردن مقدار میرایی مود دوم سیستم مبتنی بر تکنیک نیم‌توان در شکل 16 نشان داده شده است. طیف مقدار تکین ارائه شده در آن از سیگنال‌های تک فرکانسی ($F=3.748$ Hz) مربوط به رکوردهای کانال‌های 1 و 5 ثبت شده در زلزله 2008 چینه‌ویز حاصل شده‌اند. این سیگنال‌های تک فرکانسی متناظر با مود دوم سیستم که برای استخراج آن‌ها از تحلیل زمان-فرکانس پاسخ‌های سیستم مبتنی بر تبدیل موجک استفاده شده است.

مقادیر میرایی سایر مودهای ارتعاشی نیز که از طریق تکنیک نیم‌توان مبتنی بر سیگنال‌های تک فرکانسی به دست آمده‌اند، در جدول 2 ارائه شده

جدول 1 فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از رکوردهای زلزله‌های 2001 و 2008

(Hz) فرکانس‌های طبیعی				شماره مود
2001 زلزله		2008 زلزله		
تاج	ارتفاع 80%	تاج	ارتفاع 80%	
3.442	3.345	3.235	3.235	1
3.687	3.650	3.748	3.735	2
4.150	4.114	3.992	3.992	3
4.419	4.395	4.285	4.285	4
4.871	4.834	5.066	5.054	5
5.212	5.188	5.383	5.383	6

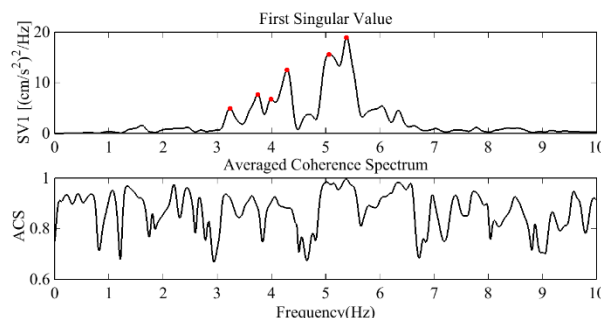


Fig. 11 The spectra from acceleration records of channels 1 and 5 during 2008 earthquake: a- first singular value; b- averaged coherence spectrum

شکل 11 طیف‌های به دست آمده از رکوردهای کانال‌های 1 و 5 طی زلزله 2008:

الف- اولین مقدار تکین، ب- طیف ارتباط متوسط

سیستم مبتنی بر تکنیک مرسوم نیم‌توان به کار گرفته شوند.

در الگوریتم تلفیقی FDD-WT اولین گام به منظور برآورد مقادیر میرایی سیستم‌های سازه‌ای انتخاب یک موجک بهینه است. این موجک مادر بهینه می‌تواند به وسیله معیار آنتروپی حداقل شانون تعیین و انتخاب گردد. سپس CWT تابع همبستگی محاسبه و سیگنال‌های تک فرکانس غالب متناظر با هر مود سیستم استخراج می‌گردند. در شکل 15 نمودار آنتروپی حداقل شانون تابع خود همبستگی به دست آمده از رابطه (16) مبتنی بر رکوردهای شتاب تراز تاج سد پاکویما در زلزله 2008 چینه‌ویز ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، پارامترهای بهینه موجک مورلت اصلاح شده برای تابع خود همبستگی متناظر با رکورد کانال 1 به

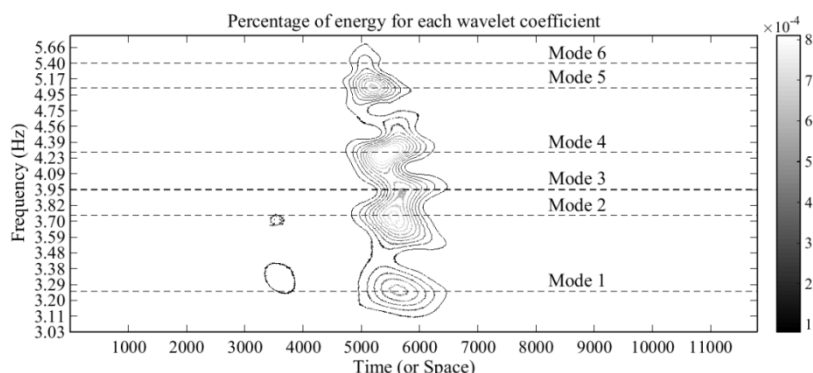


Fig. 12 The time-frequency presentation obtained from the radial output records at the crest level during 2008 earthquake

شکل 12 نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از رکوردهای شعاعی خروجی در تراز تاج طی زلزله 2008

0.5 سانتی متر می‌رسید، همچنین از درزه باز شده و از میان تراست بلوک، ترکی به صورت مورب در داخل تکیه‌گاه توسعه پیدا کرده بود [31]. با بررسی نمایش زمان-فرکانس مربوط به پاسخ شتاب زلزله نورتریج که در کانال 8 سد پاکویما (در تراز 80% ارتفاع) به ثبت رسیده است (شکل 17)، می‌توان به این نتیجه رسید که تمامی مودهای شناسایی شده سیستم افت قابل توجهی داشته‌اند. طول پاسخ شتاب یادشده در حدود 11 ثانیه با فرکانس نمونه‌گیری 50 هرتز است. با توجه به شکل‌های 4 و 17 می‌توان به این نکته پی برد که سد بتنی قوسی پاکویما در حدود ثانیه چهارم دچار آسیب شده است.

فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از رکوردهای زلزله‌های مختلف به منظور پایش سلامت سازه مورد بررسی قرار گرفته و روند تغییرات فرکانس‌های طبیعی سیستم سازه‌ای سد یادشده نسبت به بازه زمانی 1994-2008 ارزیابی و نتیجه به صورت نمودار در شکل 18 ارائه شد. براساس شکل 18 فرکانس‌های طبیعی مربوط به (A) 1994 (پس از وقوع آسیب در زلزله 1994 نورتریج) افت قابل توجهی نسبت به سایر زلزله‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در شکل 18 از نمادهای A و B به ترتیب برای بیان حالات پس و پیش از وقوع زلزله 1994 استفاده شده است.

5- نتیجه گیری

در این مطالعه به منظور شناسایی سیستم یک سد بتنی قوسی از رکوردهای لرزه‌ای ثبت شده در بدنه سازه استفاده شد که مربوط به بازه زمانی سال‌های 1994-2008 بود. این رکوردهای لرزه‌ای مبتنی بر روش پیشنهادی

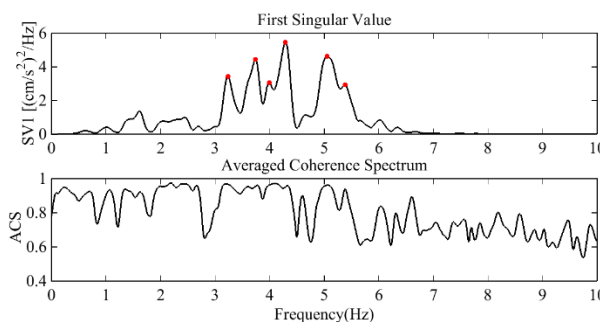


Fig. 13 The spectra from acceleration records of channels 6, 7 and 8 during 2008 earthquake: a- first singular value; b- averaged coherence spectrum

شکل 13 طیف‌های به دست آمده از رکوردهای کانال‌های 6-8 طی زلزله 2008: الف- اولین مقدار تکیه، ب- طیف ارتباط متوسط

است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر میرایی به دست آمده از هر دو زلزله تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

3-4- بررسی و کنترل سلامت سازه در طی زلزله‌های مختلف

طی زلزله 1994 نورتریج توده سنگی پایین دست تراست بلوک سد، حدود 50 سانتی متر لغزید؛ اما کابل‌های فولادی از لغزش بیشتر توده سنگی مجاور تراست بلوک جلوگیری کردند. قسمت فوقانی تکیه‌گاه چپ نیز فقط در حدود 3 سانتی متر لغزید، اما این حرکت منجر به باز شدن 5 سانتی متری درزه بین سد و تراست بلوک در تراز تاج شد. این بازشدگی در قسمت تحتانی درزه به

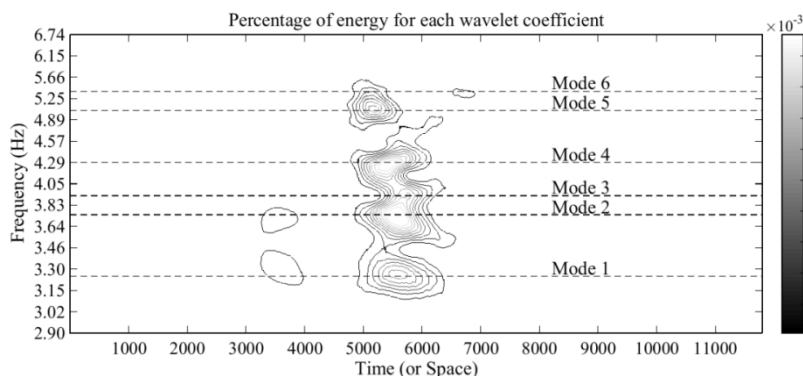


Fig. 14 The time-frequency presentation obtained from the radial output records at 80% height of the dam during 2008 earthquake

شکل 14 نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از رکوردهای شعاعی خروجی در تراز 80% ارتفاع سد طی زلزله 2008

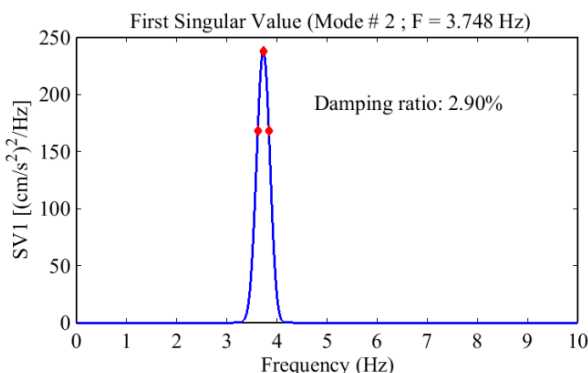


Fig. 16 The damping value obtained from the records of channels 1 and 5 during 2008 Chino Hills earthquake using HPT

شکل 16 مقدار میرایی به دست آمده از رکوردهای کانال‌های 1 و 5 طی زلزله 2008 چینه‌هیلز با استفاده از HPT

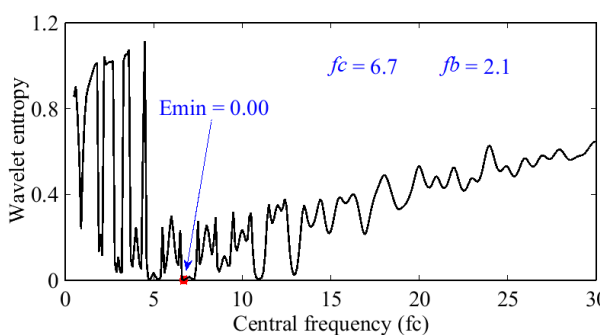


Fig. 15 The Minimal Shannon entropy diagram of auto correlation function corresponding to the record of channel 1 (2008 earthquake)

شکل 15 نمودار آنتروپی حداقل شانون تابع خود همبستگی متناظر با رکورد کانال 1 (زلزله 2008)

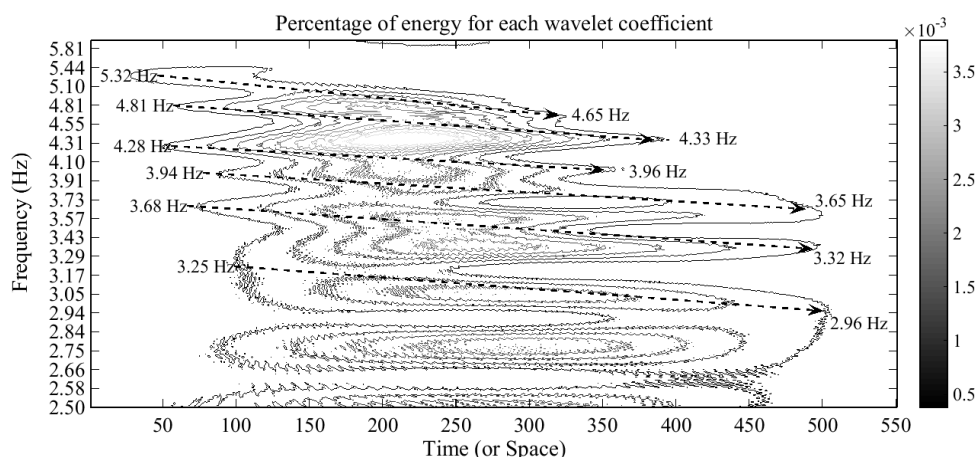


Fig. 17 Loss of natural frequencies in the time-frequency presentation obtained from the record of channel 8 during Northridge earthquake

شکل 17 افت فرکانس‌های طبیعی در نمایش زمان-فرکانس به دست آمده از رکورد کانال 8 طی زلزله نورتریج

مختلف بوده است که برخی از آن‌ها منجر به بروز آسیب‌های سازه‌ای شده‌اند که از آن جمله می‌توان به زلزله 1994 نورتریج اشاره کرد. در این زلزله فرکانس‌های طبیعی سیستم با افت قابل توجهی مواجه شدند (شکل 18) که نشان‌دهنده نیاز اساسی سازه به انجام برخی عملیات ترمیمی بود. نتایج مربوط به سال‌های پس از زلزله 1994 نورتریج نشان می‌دهد که با انجام اقدامات ترمیمی مناسب رفتار دینامیکی سازه بهبود پیدا کرده و تقریباً به شرایط پیش از آسیب برگشته است. توجه به این نکته ضروری است که ارزیابی رفتار دینامیکی سازه‌ها در برابر بارهای محیطی وارد می‌تواند نقش مهمی را در حفظ و نگهداری از آن‌ها ایفا کند.

به طور کلی با توجه به نمایش زمان-فرکانس و نمودار کنترل سلامت ارائه شده در شکل‌های 17 و 18 می‌توان به این نتیجه رسید که سد بتنی قوسی پاکویما در طی زلزله 1994 نورتریج و از حدود ثانیه چهارم به بعد دچار آسیب شده بود. این در حالی است که در طی زلزله‌های 2001 و 2008 ارتعاشات این سازه بتنی تقریباً در ناحیه خطی بوده و آسیبی متوجه آن نشده بود. بررسی این موضوع اهمیت و ضرورت کنترل سلامت سازه را به روشنی نشان می‌دهد.

6- مراجع

- [1] W. X. Ren, Z. H. Zong, Output-only modal parameter identification of civil engineering structures, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 429-444, 2004.
- [2] J. Yadegari, O. Bahar, Modal parameter identification using ambient vibration testing with introducing a new software, *Civil Engineering Infrastructures*, Vol. 44, No. 1, pp. 121-130, 2010. (in Persian (فارسی))
- [3] A. J. Felber, *Development of Hybrid Bridge Evaluation System*, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.
- [4] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, February 7-10, 2000.
- [5] R. Brincker, C. E. Ventura, P. Andersen, Damping estimation by frequency domain decomposition, *Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Kissimmee, Florida, February 5-8, 2001.
- [6] L. Zhang, R. Brincker, P. Andersen, An overview of operational modal analysis: Major development and issues, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Copenhagen, Denmark, April 26-27, 2005.
- [7] C. E. Ventura, B. Laverick, R. Brincker, P. Andersen, Comparison of dynamic characteristics of two instrumented tall buildings, *Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Kissimmee, Florida, February 3-6, 2003.
- [8] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification of output only systems using frequency domain decomposition, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 441-445, 2001.

جدول 2 نسبت‌های میرایی به دست آمده از رکوردهای زلزله‌های 2001 و 2008

مبتنی بر HPT

Table 2 The damping ratios obtained from the records of 2001 and 2008 earthquakes based on HPT

شماره مود	ضرایب میرایی (%)			
	زلزله 2001		زلزله 2008	
	تاج	80% ارتفاع	تاج	80% ارتفاع
1	3.31	3.37	3.23	3.28
2	3.13	3.19	2.90	2.96
3	2.86	2.88	2.73	2.74
4	2.63	2.64	2.48	2.49
5	2.52	2.57	2.34	2.32
6	2.41	2.42	2.16	2.13

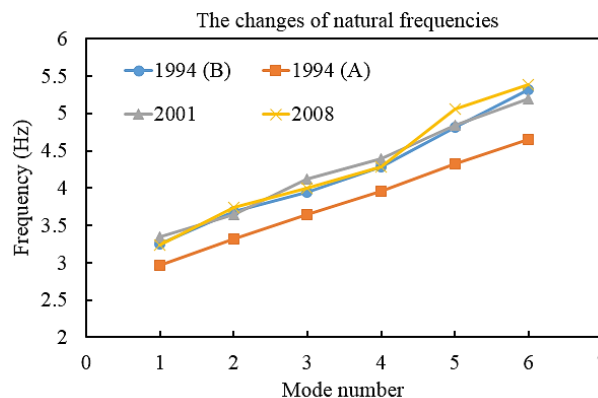


Fig. 18 The changes of natural frequencies during the period 1994 to 2008

شکل 18 تغییرات فرکانس‌های طبیعی در دوره 1994-2008

FDD-WT و با بهره‌گیری از تکنیک‌های مؤثری همچون آنتروپی حداقل شانون و CACF مورد بررسی و پردازش قرار گرفته و پارامترهای مودال سازه از قبیل فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی استخراج گردیدند.

هدف از این تحقیق شناسایی مودال و پایش سلامت یک سد بتنی قوسی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی FDD-WT به منظور آگاهی از وضعیت دینامیکی سازه در بخشی از طول عمر بهره‌برداری آن است. در حقیقت شناسایی سیستم و کنترل سلامت سازه با استفاده از پاسخ‌های لرزه‌ای آن می‌تواند روند تغییرات دینامیکی سیستم را در یک دوره زمانی معین نشان دهد. سازه یادشده در طول عمر بهره‌برداری خود شاهد چندین زمین‌لرزه

- [21] M. M. Khatibi, M. R. Ashory, A. R. Albooyeh, Numerical and experimental consideration of frequency domain decomposition method for modal parameters identification of structure, *Modeling in Engineering*, Vol. 8, No. 21, pp. 83-94, 2010. (in Persian فارسی)
- [22] R. Polikar, The story of wavelets, *Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering*, pp. 192-197, Wisconsin: World Scientific and Engineering Society Press, 1999.
- [23] J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Glard, Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media, *Geophysics*, Vol. 47, No. 2, pp. 203-221, 1982.
- [24] T. Kijewski, A. Kareem, Wavelet transforms for system identification in civil engineering, *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 339-355, 2003.
- [25] G. Jinghuai, L. Youming, C. Wenchao, On the instantaneous attributes analysis of seismic data via wavelet transform, *68th Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists*, New Orleans, USA, September 13-18, 1998.
- [26] J. Lardies, S. Gouttebroze, Identification of modal parameters using the wavelet transform, *Mechanical Science*, Vol. 44, No. 11, pp. 2263-2283, 2002.
- [27] B. Yan, A. Miyamoto, A comparative study of modal parameter identification based on wavelet and Hilbert-Huang transforms, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 9-23, 2006.
- [28] J. Lin, L. S. Qu, Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis, *Sound and Vibration*, Vol. 234, No. 1, pp. 135-148, 2000.
- [29] T. P. Le, P. Paultre, Modal identification based on continuous wavelet transform and ambient excitation tests, *Sound and Vibration*, Vol. 331, No. 9, pp. 2023-2037, 2012.
- [30] R. Tarinejad, R. Fatehi, R. S. Harichandran, Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 52, No. 1, pp. 40-54, 2013.
- [31] S. W. Alves, *Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Nonuniform Ground Motion*, PhD thesis, California Institute of Technology, 2005.
- [32] J. T. Wang, D. D. Lv, F. Jin, C. H. Zhang, Earthquake damage analysis of arch dams considering dam-water-foundation interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 64-74, 2013.
- [9] C. Devriendt, P. Guillaume, The use of transmissibility measurements in output-only modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 7, pp. 2689-2696, 2007.
- [10] C. Devriendt, P. Guillaume, Identification of modal parameters from transmissibility measurements, *Sound and Vibration*, Vol. 314, No. 1, pp. 343-356, 2008.
- [11] W. J. Yan, W. X. Ren, Operational modal parameter identification from power spectrum density transmissibility, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 202-217, 2012.
- [12] I. G. Araújo, J. E. Laier, Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 46, No. 1, pp. 129-145, 2014.
- [13] W. J. Yan, W. X. Ren, An Enhanced Power Spectral Density Transmissibility (EPSDT) approach for operational modal analysis: theoretical and experimental investigation, *Engineering Structures*, Vol. 102, No. 1, pp. 108-119, 2015.
- [14] M. Damadipour, *System Identification of a Concrete Arch Dam and Calibration of its Finite Element Model with Emphasis on Nonuniform Ground Motion*, Master of Science Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 2012. (in Persian فارسی)
- [15] R. Tarinejad, M. Damadipour, Modal identification of structures by a novel approach based on FDD-wavelet method, *Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 3, pp. 1024-1045, 2014.
- [16] R. Tarinejad, M. Damadipour, Operational modal analysis of structures using a new time-frequency domain approach, *Proceedings of the 6th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Gijón, Spain, May 12-14, 2015.
- [17] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, pp. 1-52, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1992.
- [18] W. J. Staszewski, Identification of damping in MDOF systems using time-scale decomposition, *Sound and Vibration*, Vol. 203, No. 2, pp. 283-305, 1997.
- [19] J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Fourth Edition, pp. 237-243, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [20] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd Edition, pp. 49-80, Hertfordshire: Research Studies Press, 2000.