



شناسایی اطلاعات مودال پل بتنی پیش‌تنیده با استفاده از تجزیه مود متغیر

پیام دیندار، میرحمید حسینی*، محمدرضا منصوری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

کلمات کلیدی:

شناسایی اطلاعات مودال
تجزیه مود متغیر
پردازش سیگنال
ارتعاش محیطی
پل بتنی پیش‌تنیده

خلاصه: در این تحقیق، الگوریتم تجزیه مود متغیر برای شناسایی مشخصات مودال سازه با استفاده از تجزیه پاسخ‌های شتاب ثبت شده توسط سنسورها به کار برده شده است. این الگوریتم برتری‌هایی نسبت به سایر روش‌های تجزیه سیگنال دارد که در برابر نویز و فرکانس نمونه‌برداری مقاوم است. همچنین، الگوریتم تجزیه مود متغیر فرکانس‌های اصلی سازه را به طور همزمان استخراج می‌کند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی سازه با برازش دادن یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط تخمین زده می‌شوند. کارایی و دقت این الگوریتم با تجزیه پاسخ‌های شتاب به دست آمده از سنسورهای نصب شده بر روی یک پل بتنی پیش‌تنیده که تحت بار خودروهای عبوری قرار دارد، بررسی شد. برای پردازش سیگنال و تخمین فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مدهای ارتعاشی پل از الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب و به منظور صحت‌سنجی نتایج از نرم‌افزار آرتیمیس استفاده شد. علاوه بر این، مدل‌سازی اجزا محدود و تحلیل مودال پل در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و فرکانس‌های اصلی و شکل مدهای ارتعاشی پل به دست آمدند. بررسی نتایج نشان داد، شکل مدهای ارتعاشی که توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر تخمین زده شدند، با مدل اجزا محدود و نرم‌افزار آرتیمیس انطباق خوبی دارند. همچنین، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط این الگوریتم نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. اختلاف بین فرکانس‌های محاسبه شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر و نرم‌افزار آرتیمیس در حدود ۱ درصد و اختلاف آن با فرکانس‌های مدل اجزا محدود نزدیک به ۵ درصد می‌باشند.

۱- مقدمه

پل‌ها در اثر عوامل مختلفی از قبیل بارهای شدید، زلزله، باد، ترافیک عبوری و عوامل محیطی دچار آسیب می‌شوند. این آسیب‌ها در طول زمان منجر به ایجاد ترک در اعضای بتنی، پوسیدگی اجزای فولادی، نشست فونداسیون و اختلال در بهره‌برداری از پل می‌شوند. با بازرسی‌های مقطعی از پل می‌توان از گسترش آسیب جلوگیری کرد و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. مشخصات دینامیکی سازه‌ها ابزارهای قدرتمندی برای پایش سلامت هستند که با پردازش اطلاعات به دست آمده از سنسورها شرایط غیرعادی اعضای سازه را برای تعمیر و مقاوم‌سازی شناسایی می‌کنند [۱-۳]. یکی از روش‌های پایش سلامت سازه استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی است که توسط آن مشخصات دینامیکی سازه تحت بار بهره‌برداری به دست می‌آیند. در این آزمایش، بار ورودی به سازه اندازه‌گیری نمی‌شود و مشخصات مودال سازه برای ارزیابی شرایط سازه‌ای

با پردازش پاسخ‌های ثبت شده توسط سنسورها به کار گرفته می‌شود [۷-۴]. همچنین، شناسایی مشخصات مودال در مدل‌سازی و طراحی [۸-۱۰]، شناسایی آسیب [۱۲ و ۱۱]، ظرفیت باربری [۱۳-۱۵]، خدمت‌پذیری ارتعاشی [۱۶] و مقاوم‌سازی [۱۷ و ۱۸] پل کاربرد دارد.

روش‌های شناسایی مشخصات مودال به دو گروه حوزه فرکانس و حوزه زمان تفکیک می‌شوند که توسط آن‌ها مقدار سختی، جرم و میرایی سازه تخمین زده می‌شوند. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه تخمین مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مدهای ارتعاشی با استفاده از روش‌های حوزه فرکانس انجام شده است [۱۹-۲۲]. روش‌های حوزه فرکانس، سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس با تبدیل فوریه انتقال می‌دهند که شامل روش‌های برداشت مقدار حداکثر [۲۳]، تجزیه دامنه فرکانس^۲ [۲۴]، تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته^۳ و دامنه فضایی فرکانس^۴

- 1 Peak Picking
- 2 Frequency Domain Decomposition
- 3 Enhanced Frequency Domain Decomposition
- 4 Frequency Spatial Domain

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir



نویز و فرکانس نمونه برداری مقاوم نمی باشد و توابع مود ذاتی استخراج شده توسط این روش تحت اثر ترکیب مودها می باشند [۴۲ و ۳۶]. برای کاهش محدودیت های این روش در پردازش سیگنال، تجزیه مود تجربی با تبدیل هیلبرت ترکیب شد [۳۹]. تبدیل هیلبرت - هوانگ نمایش یک سیگنال در حوزه زمان - فرکانس را امکان پذیر می کند که توسط آن فرکانس آنی سیگنال در هر لحظه استخراج می شود [۴۴ و ۴۳ و ۳۵]. همچنین، برای به دست آوردن مشخصات مودال سازه از تبدیل هیلبرت هر یک از توابع مود ذاتی برای انتقال پاسخ های شتاب به حوزه زمان - فرکانس استفاده می شود [۳۲]. برای جبران ضعف های روش های فوق در پردازش سیگنال، الگوریتم تجزیه مود متغیر^۹ ارائه شد. این الگوریتم مشابه تجزیه مود تجربی، سیگنال را به مجموعه توابع مود ذاتی تجزیه می کند. این الگوریتم، سیگنال را بر اساس روابط منطقی ریاضی تجزیه می کند و بر خلاف تجزیه مود تجربی در مقابل نویز پایدار است [۳۲]. همچنین، این الگوریتم شکل جدیدی از توابع مود ذاتی ارائه می دهد که به صورت سیگنال های دامنه - فرکانس می باشند. این تعریف جدید از توابع مود ذاتی منجر به ایجاد یک سیگنال با پهنای باند باریک می شود که فرض اصلی این روش در جداسازی مودها است. در این روش هر کدام از توابع مود ذاتی به صورت یک سیگنال با پهنای باند محدود حول یک فرکانس مرکزی می باشند. همچنین، هر یک از توابع مود ذاتی حول یک فرکانس مرکزی متمرکز می باشند و سیگنال اولیه از توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه مود متغیر قابل بازیابی است. علاوه بر این، توابع مود ذاتی را می توان با استفاده از این الگوریتم به صورت همزمان محاسبه نمود. به علت ارتباطی که بین تجزیه مود متغیر با فیلتر وینر^{۱۰} وجود دارد، این روش مقاومت بیشتری در برابر نویز دارد. همچنین، نسبت فرکانس ها و دامنه های بین دو مود در تجزیه سیگنال توسط این الگوریتم محدودیتی ایجاد نمی کنند [۴۵ و ۳۲].

در سال های اخیر، تحقیقاتی در زمینه شناسایی مشخصات مودال سازه با پردازش پاسخ های به دست آمده از سنسورها توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر انجام گرفته است. باقری و همکاران [۴۶] عملکرد این الگوریتم را در محاسبه مقدار فرکانس های اصلی، نسبت های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی قاب برشی سه طبقه فولادی و پل عابر پیاده مورد بررسی قرار دادند. آن ها با استفاده از این الگوریتم توانستند مشخصات مودال سازه را در مقایسه با سایر روش های پردازش سیگنال به دقت محاسبه کنند. همچنین، تحقیقاتی توسط باقری و همکاران [۱۳ و ۹ و ۸] برای به دست آوردن

[۲۵] می باشند. با توجه اینکه روش های حوزه فرکانس پیاده سازی نسبتاً راحتی دارند اما، در تجزیه سیگنال برای سیستم ها با نسبت های میرایی بالا، نویز زیاد و مودهای ارتعاشی نزدیک به هم محدودیت عملکرد دارند. روش های حوزه زمان، سیگنال را از حوزه فرکانس به حوزه زمان با تبدیل معکوس فوریه منتقل می کنند که برخی از این روش ها شامل تکنیک کاهش تصادفی^۱ [۲۶]، الگوریتم سیستم ویژه^۲ [۲۷]، میانگین حرکت خودکار^۳ [۲۸] و شناسایی زیر فضای تصادفی^۴ [۳۰ و ۲۹] می باشند. روش های حوزه زمان برای فرکانس های با وضوح پایین محدودیت عملکرد نسبت به روش های حوزه فرکانس ندارند و با تجزیه مقدار منفرد سیگنال در پهنای باند فرکانسی عملکرد بهتری از خود نشان می دهند. علاوه بر این، هر دو روش حوزه فرکانس و حوزه زمان در شناسایی ویژگی های غیرخطی و غیرایستای سیگنال دقت مناسبی ندارند [۳۱]. بنابراین، برای از بین بردن این محدودیت ها از روش های حوزه زمان - فرکانس به منظور شناسایی مشخصات مودال سازه استفاده می شود که می تواند به طور همزمان اطلاعات زمان و فرکانس یک سیگنال را استخراج کند. همچنین، این روش عملکرد مناسبی برای پردازش سیگنال های غیرخطی و غیرایستا دارد [۳۲]. از مهم ترین روش های پردازش حوزه زمان - فرکانس می توان به تبدیل موجک پیوسته^۵ [۳۳] تبدیل هیلبرت - هوانگ^۶ [۳۴ و ۳۵] و تجزیه مود تجربی^۷ [۳۶] اشاره کرد که کاربردهای بسیاری در شناسایی مشخصات مودال و تشخیص آسیب دارند [۳۸ و ۳۷]. یکی از روش های پردازش سیگنال استفاده از الگوریتم تجزیه مود تجربی است. این الگوریتم روشی برای تجزیه یک سیگنال به تعدادی متناهی از توابع نوسانی است که توابع مود ذاتی^۸ نامیده می شوند و هر کدام از آن ها دارای پهنای باند طیفی جداگانه ای می باشند [۴۱-۳۹]. به دلیل اینکه توابع مود ذاتی حاصل از تجزیه مود تجربی بر مبنای پهنای باند محدود فرکانسی نمی باشند، امکان جداسازی دو مؤلفه مجزا با پهنای باند فرکانسی نزدیک به هم در این روش وجود ندارد. همچنین، این روش برای محاسبه توابع مود ذاتی به صورت بازگشتی عمل می کند به طوری که هر کدام از توابع مود ذاتی به صورت جداگانه محاسبه می شوند که باعث کاهش کارایی تجزیه مود تجربی می شود. علاوه بر این، تجزیه مود تجربی در مقابل

- 1 Random Decrement
- 2 Eigen-system Realization
- 3 Autoregressive Moving Average
- 4 Stochastic Subspace Identification
- 5 Wavelet Transform
- 6 Hilbert-Huang Transform
- 7 Empirical Mode Decomposition
- 8 Intrinsic Mode Functions

9 Variational Mode Decomposition

10 Wiener Filter

۲- الگوریتم تجزیه مود متغیر

الگوریتم تجزیه مود متغیر برای تجزیه سیگنال شتاب $v(t)$ به یک مجموعه از زیر سیگنال‌ها (مودها) $u_k(t)$ به کار برده می‌شود. در این روش فرض می‌شود که هر مود K پهنای باند محدودی در فضای طیفی دارد و در اطراف ارتعاش مرکزی ω_k فشرده می‌شود. همچنین، هر زیر سیگنال بیانگر یک پاسخ مودال مشخص از سازه با دارا بودن ویژگی‌های خاص است. با استفاده از تبدیل هیلبرت^۴، ترکیب فرکانسی^۵ و هموار کننده گوسی^۶، مسئله متغیر مقید با کمینه کردن تابع هدف به صورت رابطه (۱) ایجاد می‌شود [۴۵ و ۳۲].

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

به طوری که:

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = v(t) \quad \text{و} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

در اینجا، $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ و $\{u_k(t)\} = \{u_1(t), \dots, u_K(t)\}$ به ترتیب بیانگر مجموعه مودها و فرکانس‌های مرکزی در تجزیه سیگنال می‌باشند. همچنین، $\sum_{k=1}^K := \sum_{k=1}^K$ مجموع همه مودها، ∂_t مشتق زمان، δ توزیع دیراک^۷، j برابر است با $\sqrt{-1}$ ، K تعداد مودها در تجزیه سیگنال، * علامت کانولوشن^۸ و $\| \cdot \|_2^2$ نرم L^2 می‌باشند. علاوه بر این، به منظور ایجاد مسئله متغیر نامقید از ضرب کننده لاگرانژی^۹ و پناستی درجه دوم^{۱۰} به ترتیب برای ایجاد قید و رسیدن به همگرایی در حضور نویز گوسی^{۱۱} به صورت رابطه (۳) استفاده می‌شود. در اینجا، α پارامتر تعادل، λ ضرب کننده لاگرانژی و $\langle \cdot \rangle$ ترکیب داخلی دو بردار می‌باشند [۴۵ و ۳۲].

مشخصات مودال، سختی خمشی و ظرفیت باربری پل‌های بتنی با استفاده از پاسخ‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی و به کار بردن الگوریتم تجزیه مود متغیر انجام گرفت. نی و همکاران [۴۵] مشخصات مودال قاب برشی چهار طبقه فولادی و پل بتنی را با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر شناسایی کردند. آن‌ها ابتدا توابع مود ذاتی را با استفاده از این الگوریتم به دست آوردند. سپس، مقدار فرکانس‌های مدل‌ها را توسط تبدیل هیلبرت محاسبه نمودند. همچنین، پاسخ‌های به دست آمده توسط این روش دارای خطای کمتری نسبت به تجزیه مود تجربی بودند. تیان و ژانگ [۴۷] به بررسی پردازش پاسخ‌های ایجاد شده توسط وسیله نقلیه در حال حرکت بر روی پل با به کار بردن ترکیب الگوریتم تجزیه مود متغیر و تبدیل هیلبرت پرداختند و ماتریس نرمی و مشخصات مودال پل بتنی را به دست آوردند. ژانگ و ژو [۴۸] تحقیقی برای شناسایی مشخصات مودال سیستم‌های دارای مودهای ارتعاشی نزدیک، پارامترهای مودال با تغییر ناگهانی و پارامترهای مودال وابسته به دامنه با توجه به قابلیت الگوریتم تجزیه مود متغیر در پردازش سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که این الگوریتم از دقت بیشتری نسبت به روش تجزیه مود تجربی برخوردار است.

هدف از این تحقیق، شناسایی مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده با پردازش پاسخ‌های شتاب به دست آمده از سنسورهای نصب شده بر روی پل است. با توجه به توانایی الگوریتم تجزیه مود متغیر در پردازش سیگنال از این الگوریتم برای تجزیه پاسخ‌های شتاب در نرم‌افزار متلب^۱ استفاده شد و مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل به دست آمدند. علاوه بر این، مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده دارای آسیب تحت ارتعاش محیطی با حداقل تعداد سنسور شناسایی شدند. برای بررسی کارایی این روش، مدل اجزا محدود پل بتنی پیش‌تنیده در نرم‌افزار آباکوس^۲ ایجاد شد و از تحلیل مودال برای به دست آوردن مشخصات مودال پل استفاده شد. همچنین، برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از روش تجزیه مود متغیر، از نرم‌افزار آرتیمیس^۳ برای تجزیه پاسخ‌های شتاب و محاسبه اطلاعات مودال پل استفاده شد. در انتها، مشخصات مودال پل بتنی پیش‌تنیده دارای آسیب تحت ارتعاش محیطی با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر با دقت بالایی محاسبه شدند.

- 4 Hilbert Transform
- 5 Frequency Mixing
- 6 Gaussian Smoothness
- 7 Dirac Distribution
- 8 Convolution
- 9 Lagrangian Multipliers
- 10 Quadratic Penalty
- 11 Gaussian Noise

- 1 Matlab
- 2 Abaqus
- 3 ARTEMIS

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left(\hat{v}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right) \quad (۶)$$

برای اجرای دقیق بازسازی سیگنال تا رسیدن به معیار همگرایی، صعود دوگانه^۲ به صورت رابطه (۷) ادامه پیدا می‌کند. در اینجا، ε حالت حدی انتخاب شده برای معیار همگرایی است [۳۲ و ۴۵].

$$\sum_{k=1}^K \frac{\left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2}{\left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2} < \varepsilon \quad (۷)$$

پاسخ‌های شتاب ایجاد شده تحت آزمایش ارتعاش محیطی^۳ که برای تشخیص فرکانس‌های اصلی استفاده شده‌اند، دارای مقداری میرایی می‌باشند. بنابراین، فرکانس‌های اصلی به دست آمده از تحلیل‌ها بیانگر فرکانس‌های طبیعی میرا شده $\omega_{d,k}$ می‌باشند.

علاوه بر این، با در نظر گرفتن کاهش دامنه پاسخ مودال به علت وجود میرایی در سازه نسبت میرایی قابل محاسبه است. به همین منظور، رابطه بین لگاریتم طبیعی دامنه پاسخ $\ln[u_k(t)]$ و زمان t به صورت رابطه (۸) نمایش داده می‌شود [۴۶].

$$\ln[u_k(t)] = -\zeta_k \omega_{n,k} t + c \quad (۸)$$

در اینجا، ζ_k ، $\omega_{n,k}$ و c به ترتیب نسبت میرایی، فرکانس مودال نامیرای k امین مود و مقدار ثابت می‌باشند. همچنین، با برازش یک تابع خطی بر نمودار کاهش دامنه پاسخ مودال $\ln[u_k(t)]$ در برابر زمان t با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات خطی^۴ نسبت میرایی تخمین زده می‌شود. با محاسبه شیب این تابع خطی، m_k که بیانگر مقدار $\zeta_k \omega_{n,k}$ است و رابطه بین فرکانس مودال میرا و نامیرا نسبت میرایی به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۴۶].

$$\mathcal{L}(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \hat{\partial}_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + (۳)$$

$$\left\| v(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), v(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle$$

برای حل این مسئله از یک روش بهینه‌سازی تکرار شونده، استفاده می‌شود که در آن مودها $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ با استفاده از فیلتر وینر در دامنه فوریه با یک فیلتر تنظیم شونده به فرکانس مرکزی ω_k^n به صورت رابطه (۴) بروزرسانی می‌شوند. در اینجا، n بیانگر n امین تکرار بروزرسانی و نشان دهنده تبدیل فوریه سیگنال می‌باشند [۳۲ و ۴۵].

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{v}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (۴)$$

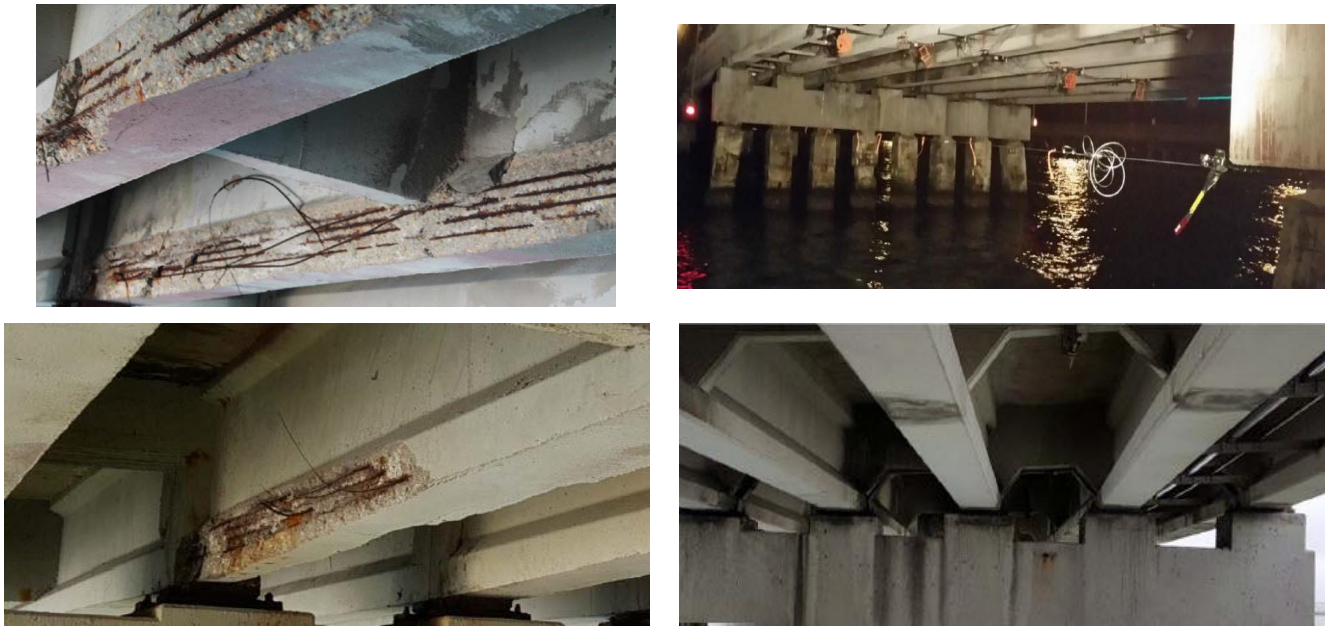
با در نظر گرفتن قسمت حقیقی تبدیل معکوس فوریه سیگنال، پاسخ‌های مودال در حوزه زمان به دست می‌آیند. همچنین، این روش تجزیه می‌تواند محتوای طیفی ناخواسته از سیگنال را با تولید زیر سیگنال‌ها در نتایج تجزیه حذف کند. سپس، فرکانس‌های مرکزی ω_k^{n+1} به عنوان مرکز ثقل طیف توان مود^۱ به صورت رابطه (۵) بروزرسانی می‌شوند [۳۲ و ۴۵].

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega \left| \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right|^2 d\omega}{\int_0^\infty \left| \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right|^2 d\omega} \quad (۵)$$

برای همه فرکانس‌ها $\omega \geq 0$ ضرب کننده لاگرانژی $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)$ بعد از هر تکرار به صورت رابطه (۶) بروزرسانی می‌شود که τ بیانگر شدت قید محدود کننده است [۳۲ و ۴۵].

2 Dual Ascent
3 Ambient Vibration
4 Linear Least Squares Regression

1 Mode's Power Spectrum



شکل ۱. نمای پل بتنی پیش تنیده [۴۹]

Fig. 1. View of the prestressed concrete bridge..

۳- آزمایش دینامیکی پل بتنی پیش تنیده

۳-۱- توصیف پل

در این تحقیق با هدف ارزیابی سلامت سازه‌ای، آزمایش دینامیکی بر روی پل بتنی پیش‌تنیده قرار گرفته در بزرگراه همپتون^۱ از نورفولک^۲ به همپتون ویرجینیا^۳ انجام شد. این پل - تونل یک سازه ترکیبی دو مسیره شرقی - غربی است که اولین مسیر آن در سال ۱۹۵۶ ساخته شده است و دومین مسیر آن در سال ۱۹۷۶ کامل شده است. این سازه دارای سه بخش اصلی است که جنوب آن از ویلوقبی اسپیت^۴ به یک جزیره مصنوعی می‌رسد. در ادامه، شمال پل از جزیره مصنوعی شمالی به همپتون می‌رسد. علاوه بر این، بین دو مسیر جنوبی و شمالی یک تونل برای ارتباط آن‌ها احداث گردیده است.

این پل از چند تیر بتنی پیش‌تنیده با تکیه‌گاه‌های ساده و یک عرشه بتنی تشکیل شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. بررسی‌های چشمی

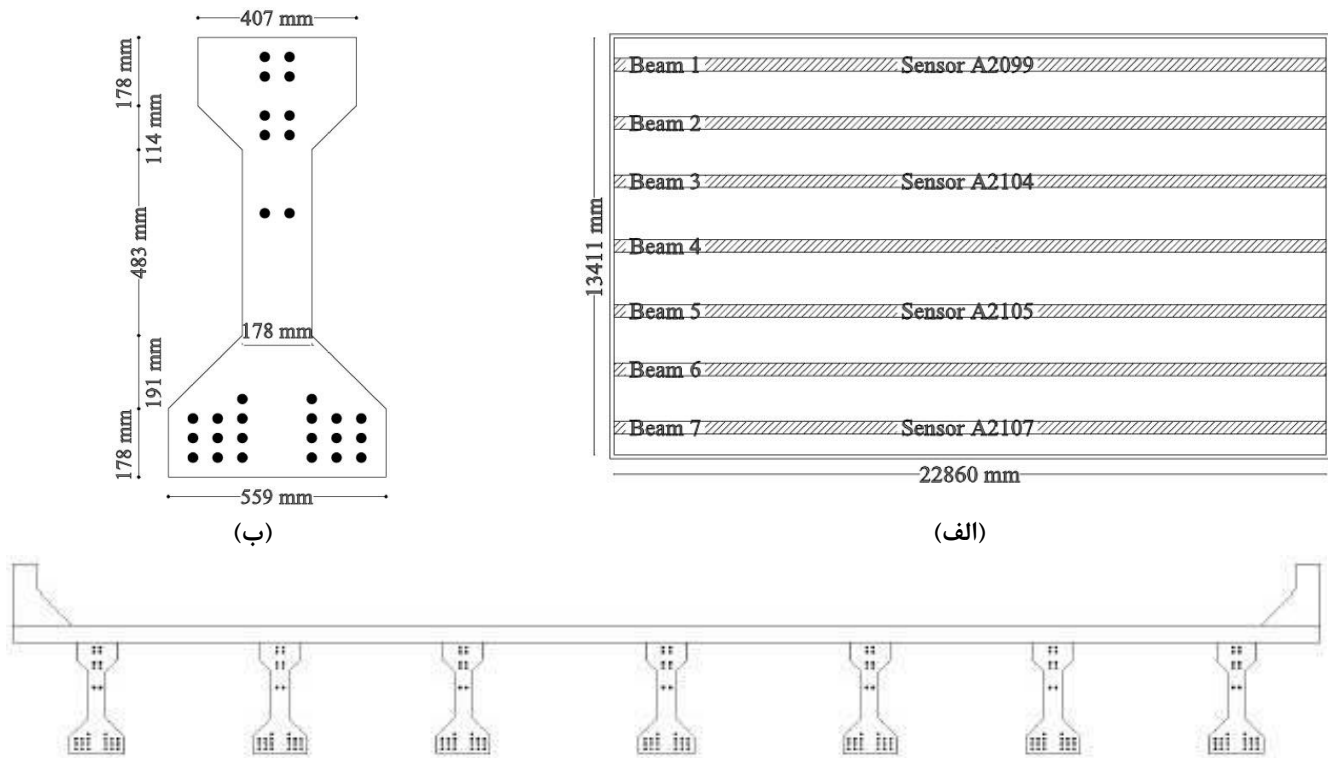
$$\zeta_k = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{d,k}}{m_k}\right)^2}} \quad (9)$$

علاوه بر این، با در نظر گرفتن پاسخ‌های مودال سازه در یک نقطه مینیمم یا ماکزیمم محلی در محل همه سنسورها، شناسایی شکل مودهای ارتعاشی انجام می‌شود. بنابراین، بردار شکل مودی برای k امین مود از سازه به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۴۶].

$$\Phi_k = \left\{ u_{k,1}(t_m) \ u_{k,2}(t_m) \ \dots \ u_{k,j}(t_m) \ \dots \ u_{k,N}(t_m) \right\}^T \quad (10)$$

در اینجا $u_{k,j}$ بیانگر پاسخ مودال k ام در j امین محل سنجش، t_m زمانی است که مینیمم یا ماکزیمم پاسخ مودال اتفاق افتاده است و N تعداد سنسورهای نصب شده در سازه است.

- 1 Hampton
- 2 Norfolk
- 3 Virginia
- 4 Willoughby Spit



شکل ۲. هندسه پل بتنی پیش تنیده، (الف) پلان، (ب) برش مقطع تیر، (ج) برش عرضی

Fig. 2. Geometry of the prestressed concrete bridge, (a) plan, (b) cross section of beam, (c) cross section

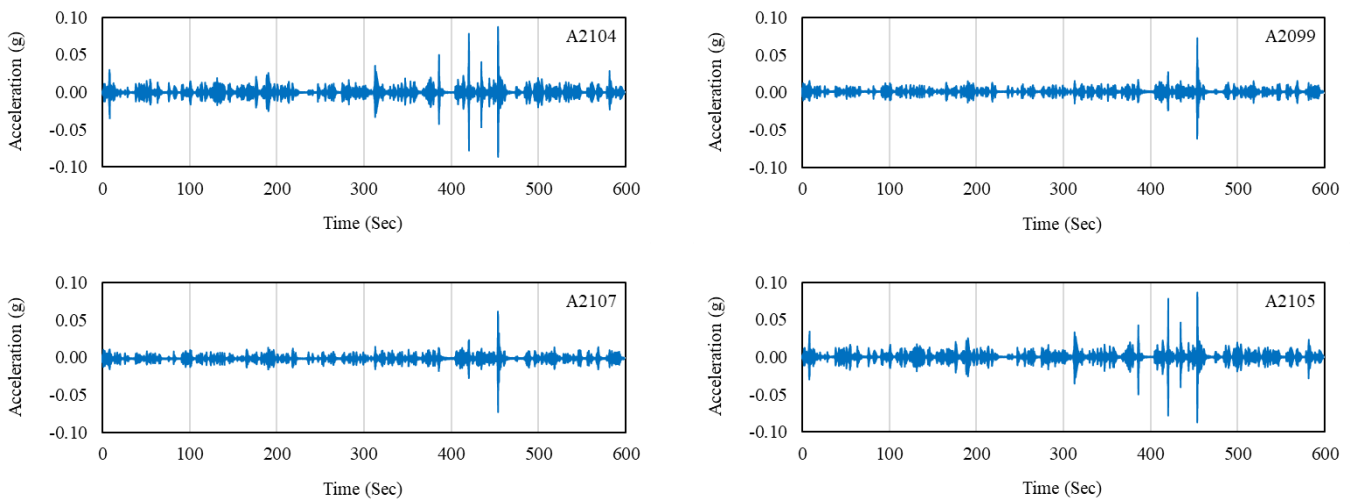
بر این، پاسخ‌های شتاب به مدت ۶۰۰ ثانیه با فرکانس نمونه برداری ۲۰۰ هرتز ثبت شد. در این آزمایش، شتاب وسط دهانه ۴ تیر از ۷ تیر پل برای یک دهانه در مسیر شرقی - غربی ثبت شد که مکان قرارگیری سنسورها، پلان و مقطع عرضی پل در شکل ۲ نشان داده شده است [۴۹].

در آزمایش ارتعاش محیطی ارتعاش پل که توسط سنسورهای شتاب ثبت شده است، دارای دو مقدار ماکزیمم در حدود زمان‌های ۴۲۰ و ۴۵۰ ثانیه است. با مشاهده پاسخ‌های شتاب دریافت می‌شود که تیرهای میانی نسبت به تیرهای کناری پل مقدار ماکزیمم شتاب بیشتری را به علت عبور وسایل نقلیه ثبت کرده‌اند و تحت تحریک دینامیکی بیشتری قرار گرفته‌اند. در این آزمایش سنسورهای شتاب با نام‌های A2099، A2104، A2105 و A2107 به ترتیب بر روی تیرهای شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ نصب شده‌اند که پاسخ‌های ثبت شده توسط آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

نشان داد، آسیب‌های زیادی در تیرهای بتنی پیش تنیده وجود دارد که این آسیب‌ها شامل ترک خوردگی و شکستن موضعی بتن، قطع و کاهش سطح مقطع کابل‌های پیش تنیده است [۴۹].

۳-۲- توصیف آزمایش

برای ارزیابی ظرفیت باربری تیرهای آسیب دیده، دهانه‌هایی از پل تحت انجام آزمایش بار زنده وسایل نقلیه عبوری قرار گرفتند. در هنگام اجرای آزمایش هیچ باری به غیر از بارهای محیطی باد، حرارت و ترافیک معمولی به پل وارد نشد و از نتایج ارتعاش آزاد پل استفاده گردید. برای انجام آزمایش از سیستم جمع‌آوری اطلاعات بیسیم استفاده شد که از طریق این سیستم اطلاعات سنسورها به شرکت تشخیص آسیب پل^۱ و ایستگاه مرکزی منتقل گردید. همچنین، شتاب‌سنج‌های مدل AI521 شرکت تشخیص پل مورد استفاده قرار گرفت که شتاب‌های در محدوده $\pm 5g$ را ثبت می‌کند. علاوه



شکل ۳. پاسخ‌های ارتعاشی پل ثبت شده توسط سنسورهای شتاب

Fig.3. Vibration responses of the bridge recorded by acceleration sensors.

پل پاسخ‌های شتاب چهار سنسور نشان داده شده در شکل ۴ با استفاده از الگوریتم تجزیه مود متغیر پردازش و تجزیه شدند. سپس، بعد از حذف نویز از آن‌ها پاسخ‌های مودال اصلی پل به دست آمدند که در شکل ۵ نشان داده شده است. به همین منظور از تبدیل سریع فوری^۱ و تبدیل هیلبرت به همراه الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با مشاهده نتایج دریافت می‌شود، هر پاسخ مودال دارای یک فرکانس مرکزی مشخص است که مقدار آن با افزایش شماره مود افزایش می‌یابد. همچنین، دامنه پاسخ مودال به علت تاثیر میرایی با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند.

برای محاسبه فرکانس‌های اصلی چهار مود اول ارتعاشی پل، ابتدا مقدار فرکانس‌ها برای هر یک از چهار سنسور به دست آمدند. سپس، با میانگین گرفتن از آن‌ها در هر مود مقدار فرکانس اصلی آن مود محاسبه شد که برای مودهای اول تا چهارم به ترتیب برابر $۵/۸۹۶$ ، $۶/۷۷۳$ ، $۱۰/۶۳۶$ و $۲۰/۲۰۸$ هرتز می‌باشند که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. مطابق نتایج، فرکانس‌های محاسبه شده برای هر سنسور در هر مود اختلاف بسیار کمی با هم دارند.

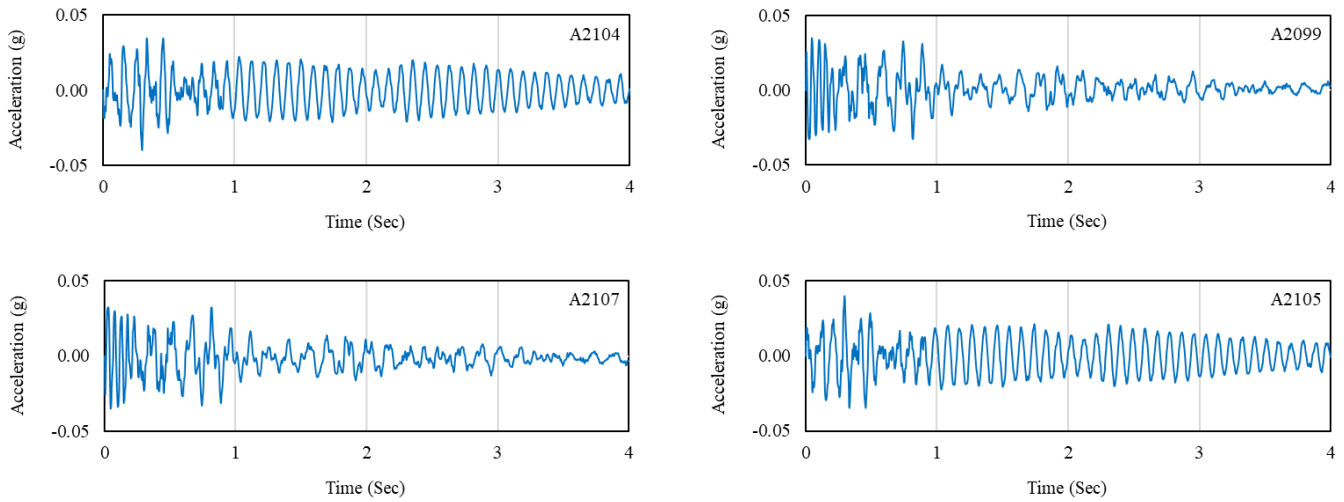
۴- شناسایی مشخصات مودال پل توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر

به منظور پردازش پاسخ‌های شتاب حاصل از آزمایش دینامیکی و تشخیص مشخصات مودال پل از الگوریتم تجزیه مود متغیر در نرم‌افزار متلب استفاده شد. سپس، با میانگین‌گیری از فرکانس‌های به دست آمده از همه سنسورها در هر مود، فرکانس‌های اصلی پل محاسبه شدند. همچنین، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط، نسبت‌های میرایی پل تخمین زده شدند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن مقدار مینیمم یا ماکزیمم پاسخ مودال به صورت همزمان در همه سنسورها برای هر مود، شکل مودهای ارتعاشی پل شناسایی شدند.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شد، در این آزمایش پاسخ‌های شتاب ایجاد شده توسط ارتعاش محیطی پل به مدت ۶۰۰ ثانیه به وسیله چهار سنسور ثبت شده است. در این تحقیق، به منظور کاهش حجم محاسبات پردازش سیگنال از اطلاعات ارتعاش آزاد پل بعد از نقطه ماکزیمم شتاب که حدود ثانیه ۴۵۰ است، استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

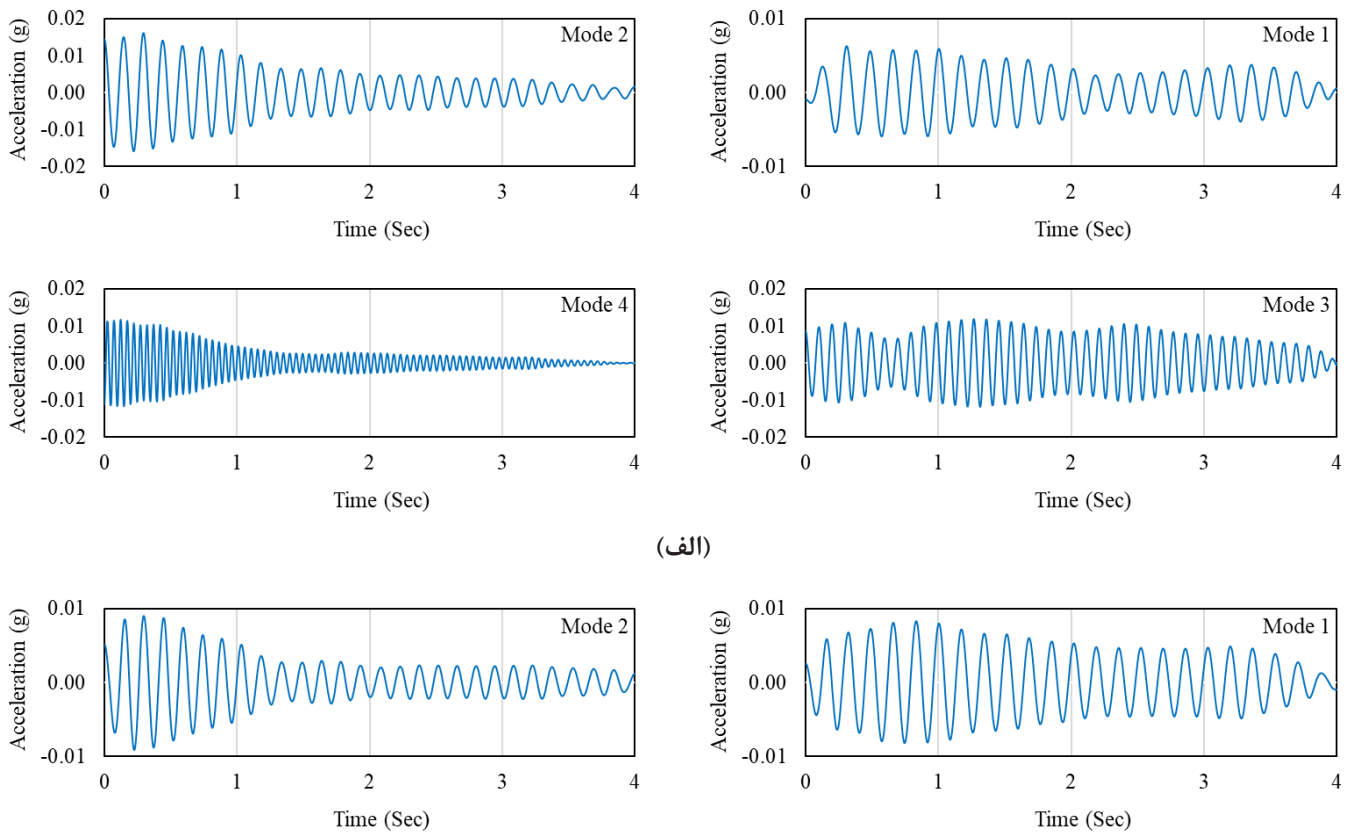
برای به دست آوردن مقدار فرکانس‌های اصلی چهار مود اول ارتعاشی

1 Fast Fourier transform

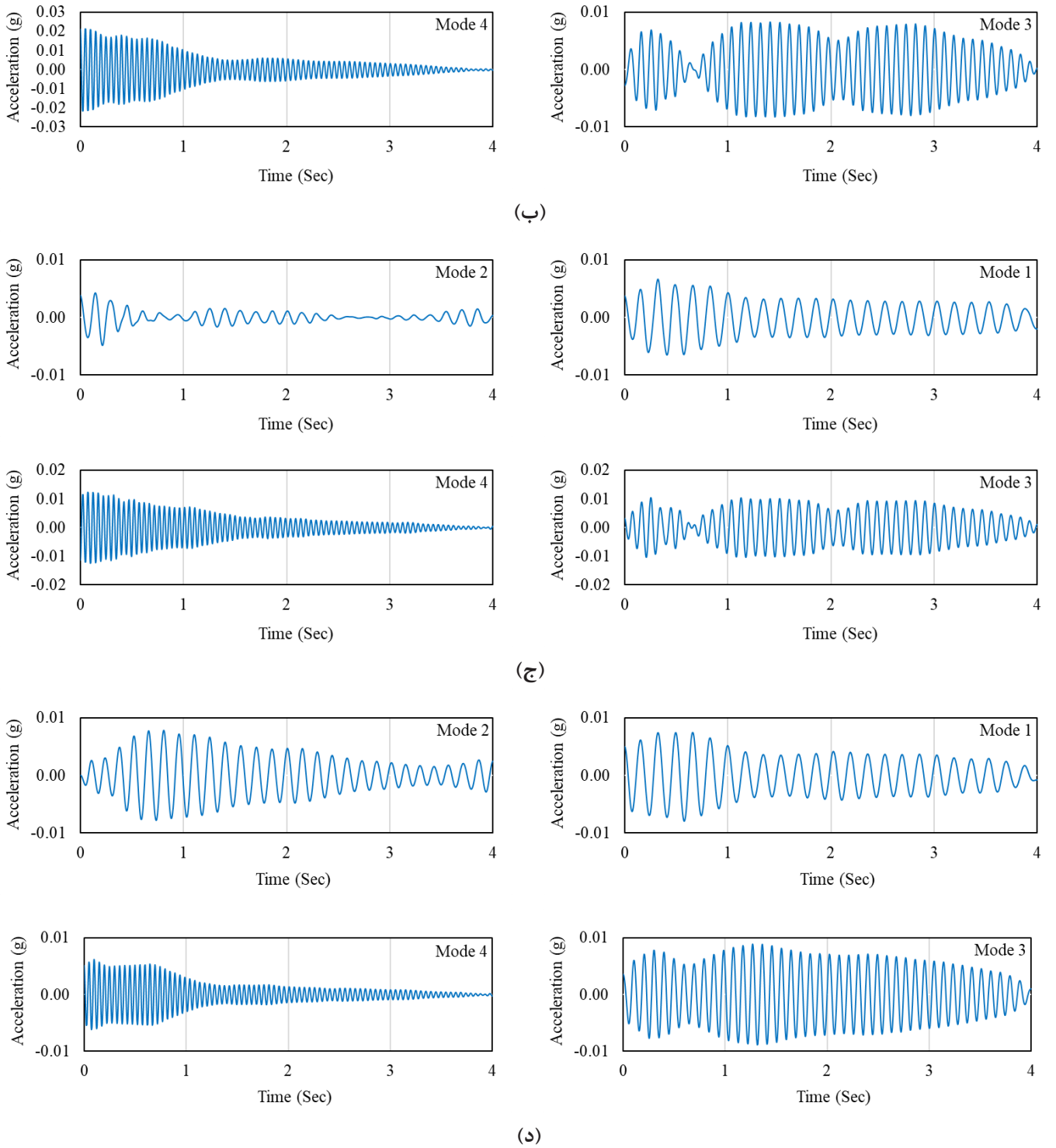


شکل ۴. پاسخ های شتاب پل استفاده شده در الگوریتم تجزیه مود متغیر

Fig. 4. Acceleration responses of the bridge used in the variational mode decomposition.



(الف)



شکل ۵. پاسخ های مودال پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) سنسور A2099، (ب) سنسور A2104، (ج) سنسور A2105، (د) سنسور A2107

Fig.5. Modal responses of the bridge extracted from variational mode decomposition, (a) sensor A2099, (b) sensor A2104, (c) sensor A2105, (d) sensor A2107.

جدول ۲. نسبت‌های میرایی پل به روش تجزیه مود متغیر (درصد)

Table 2. Damping ratios of the bridge by variational mode decomposition (percentage).

شماره مود ارتعاشی	سنسور شتاب			
	A2107	A2105	A2104	A2099
مود اول	۵/۸۹۶	۵/۹۳۷	۵/۹۰۴	۵/۸۳۹
مود دوم	۶/۷۷۳	۶/۸۲۸	۶/۷۲۷	۶/۷۷۲
مود سوم	۱۰/۶۳۶	۱۰/۵۴۹	۱۰/۷۶۵	۱۰/۵۴۴
مود چهارم	۲۰/۲۰۸	۲۰/۲۲۷	۲۰/۲۲۱	۲۰/۲۱

جدول ۲. نسبت‌های میرایی پل به روش تجزیه مود متغیر (درصد)

Table 2. Damping ratios of the bridge by variational mode decomposition (percentage).

شماره مود ارتعاشی	سنسور شتاب			
	A2107	A2105	A2104	A2099
مود اول	۱/۸۸	۲/۷۸	۱/۹۴	۱/۶۹
مود دوم	۲/۱۱	۲/۰	۲/۴۸	۱/۹
مود سوم	۲/۱۸	۱/۸۶	۲/۳۴	۲/۴۳
مود چهارم	۱/۲۵	۱/۵۲	۰/۹۹	۱/۱۴

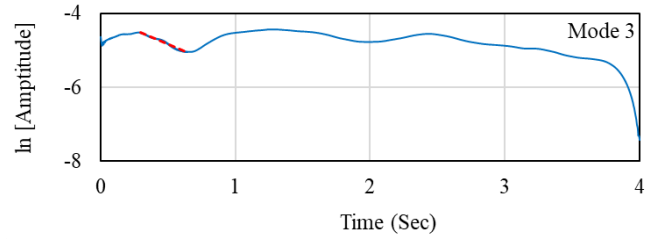
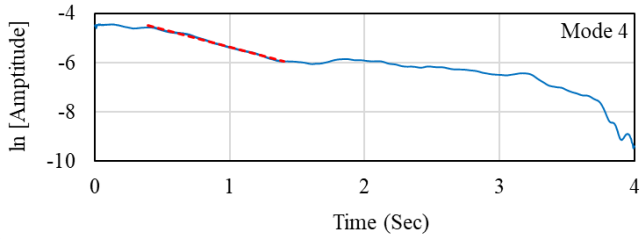
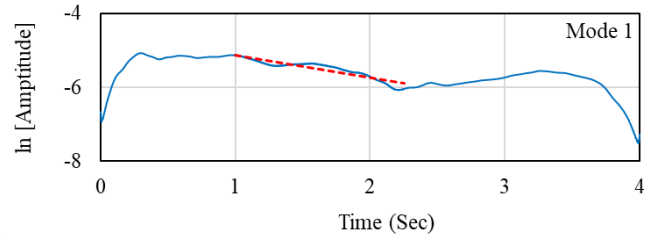
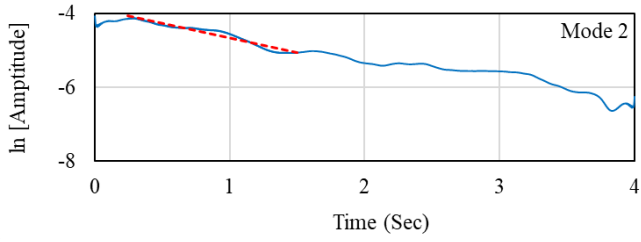
برای تخمین میرایی پل در هر مود ابتدا نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال در برابر زمان ترسیم شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال که به صورت خط چین قرمز رنگ ترسیم شده است، شیب خط کاهش دامنه مطابق رابطه (۹) محاسبه شد که بیانگر نسبت میرایی پل است. محدوده مناسب نمودار برای برازش خط و محاسبه شیب کاهش دامنه پاسخ لگاریتمی در قسمت نزولی تدریجی نمودار انتخاب شده است، به صورتی که در قبل و بعد از این محدوده کاهش تدریجی دیگری در دامنه پاسخ لگاریتمی مشاهده نشود. به همین دلیل تمامی محدوده‌های محتمل بررسی شد و قسمت مناسب نمودار برای محاسبه شیب کاهش لگاریتمی دامنه پاسخ انتخاب گردیده است.

نسبت‌های میرایی چهار مود اول پل با میانگین گرفتن از مقدار به دست آمده برای همه چهار سنسور در هر مود تخمین زده شدند که به ترتیب برابر ۱/۸۸، ۲/۱۱، ۲/۱۸ و ۱/۲۵ درصد و نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده می‌باشند که در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، از نتایج دریافت می‌شود نسبت‌های میرایی به دست آمده توسط هر سنسور در هر مود اختلاف کمی با هم دارند.

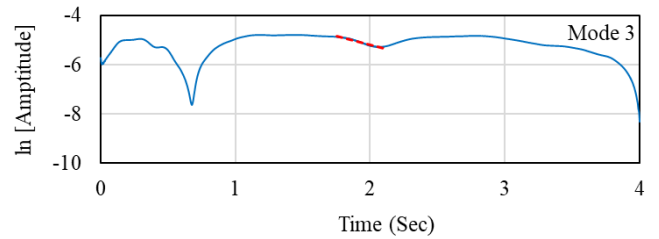
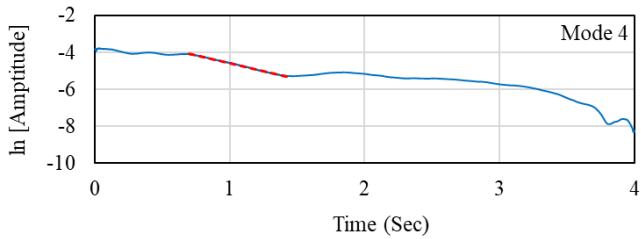
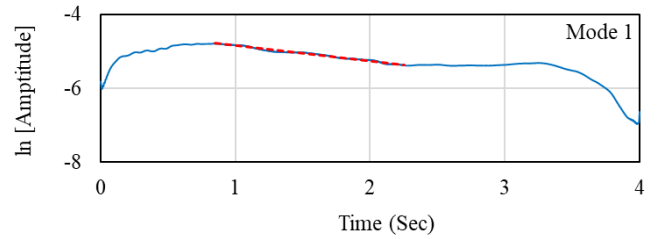
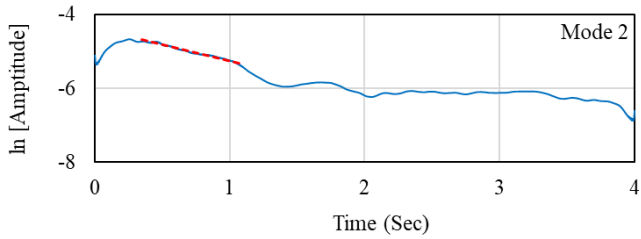
برای شناسایی و ترسیم شکل مودهای ارتعاشی پل، مقدار پاسخ مودال در یک نقطه محلی مینیمم یا ماکزیمم پاسخ در هر مود و برای همه سنسورها به صورت همزمان در نظر گرفته شدند که شکل چهار مود اول ارتعاشی پل در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، همانطور که انتظار می‌رود پل در مود اول ارتعاشی بیشترین تغییر شکل در بزرگ‌ترین دهانه را به صورت خمشی داشته است. علاوه بر این، با به کار بردن این الگوریتم شکل مودهای ترکیبی خمشی، پیچشی و دورانی پل شناسایی شدند که در شکل مودهای ارتعاشی دوم تا چهارم قابل مشاهده می‌باشند.

برای تخمین میرایی پل در هر مود ابتدا نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال در برابر زمان ترسیم شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس، با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتم دامنه پاسخ مودال که به صورت خط چین قرمز رنگ ترسیم شده است، شیب خط کاهش دامنه مطابق رابطه (۹) محاسبه شد که بیانگر نسبت میرایی پل است. محدوده مناسب نمودار برای برازش خط و محاسبه شیب کاهش دامنه پاسخ لگاریتمی در قسمت نزولی تدریجی نمودار انتخاب شده است، به صورتی که در قبل و بعد از این محدوده کاهش تدریجی دیگری در دامنه پاسخ لگاریتمی مشاهده نشود. به همین دلیل تمامی محدوده‌های محتمل بررسی شد و قسمت مناسب نمودار برای محاسبه شیب کاهش لگاریتمی دامنه پاسخ انتخاب گردیده است.

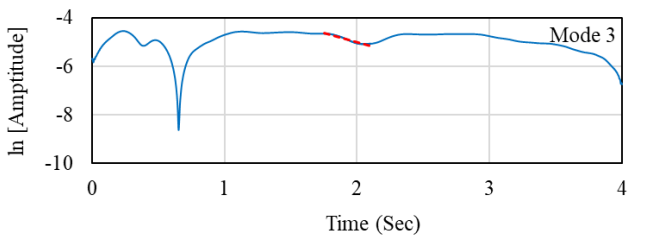
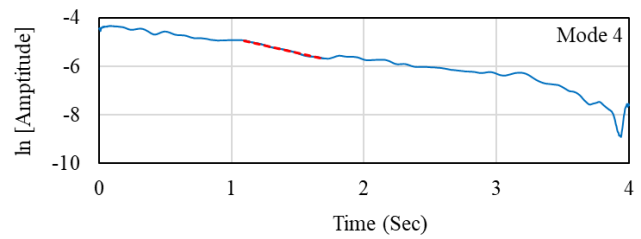
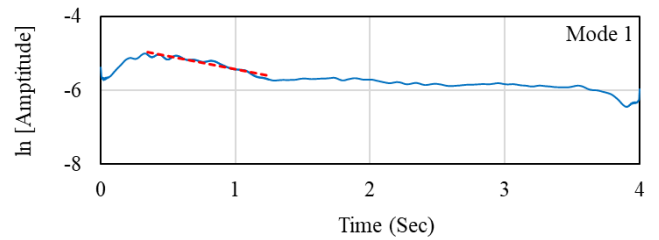
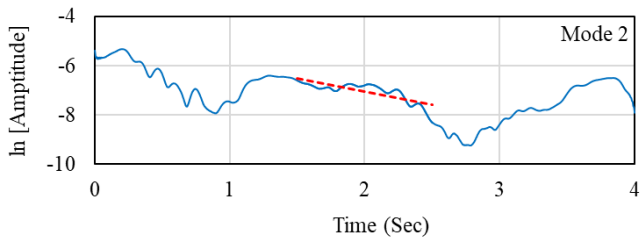
نسبت‌های میرایی چهار مود اول پل با میانگین گرفتن از مقدار به دست آمده برای همه چهار سنسور در هر مود تخمین زده شدند که به ترتیب برابر



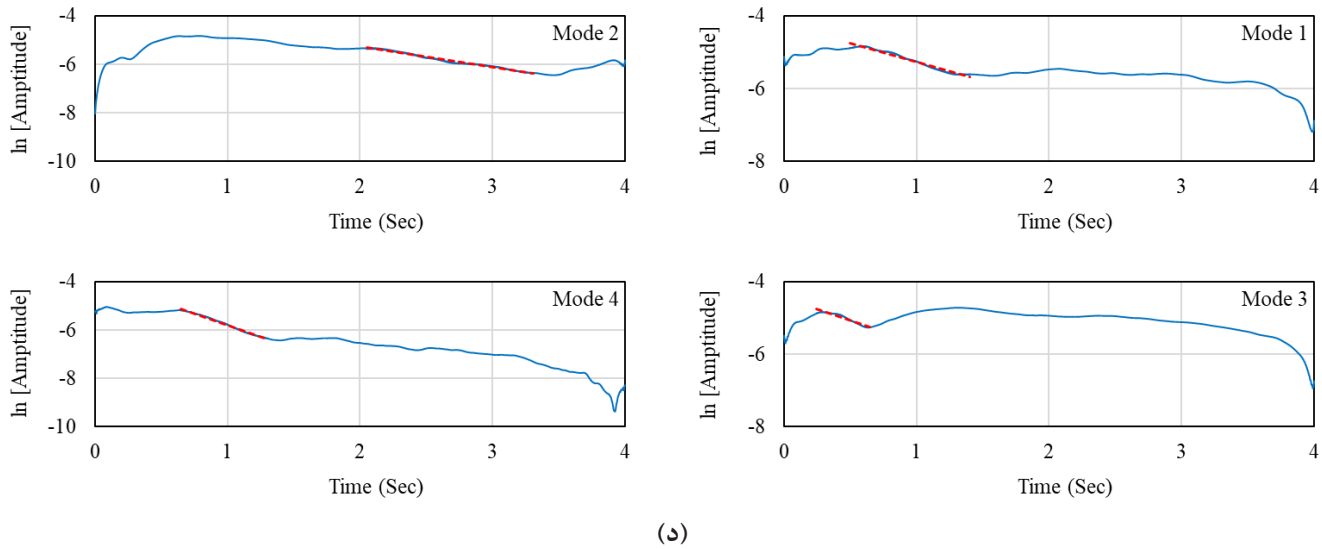
(الف)



(ب)

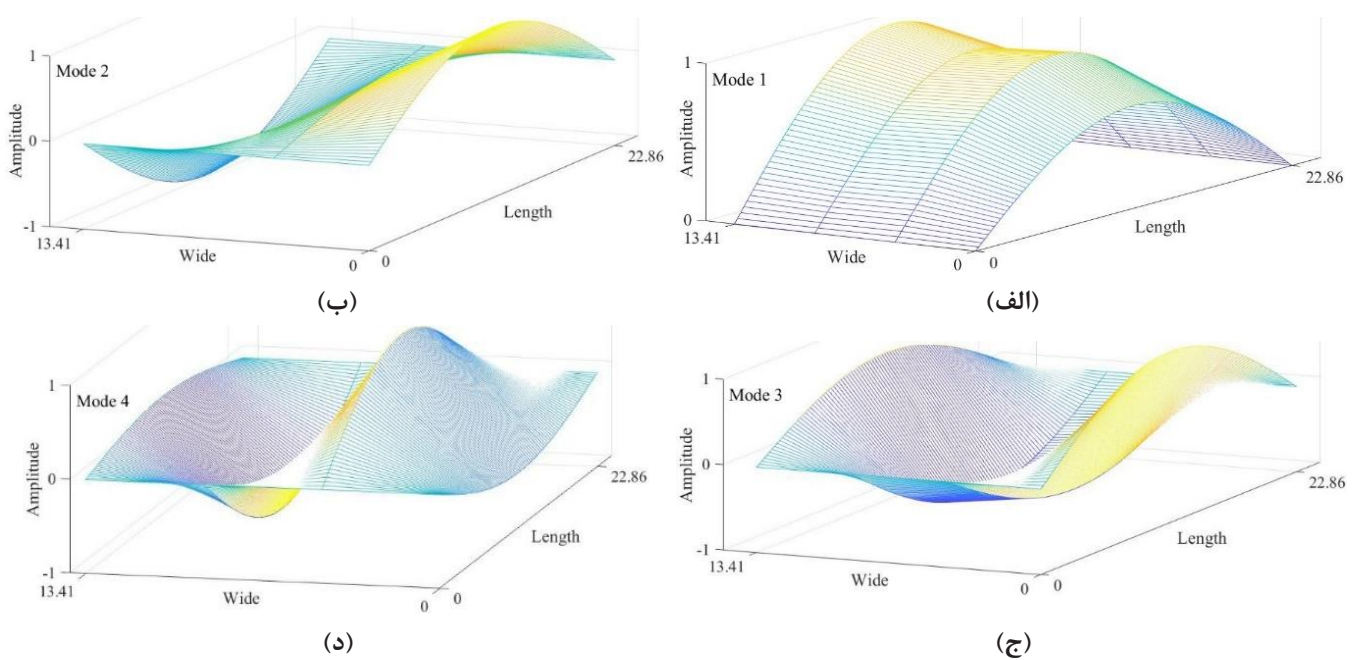


(ج)



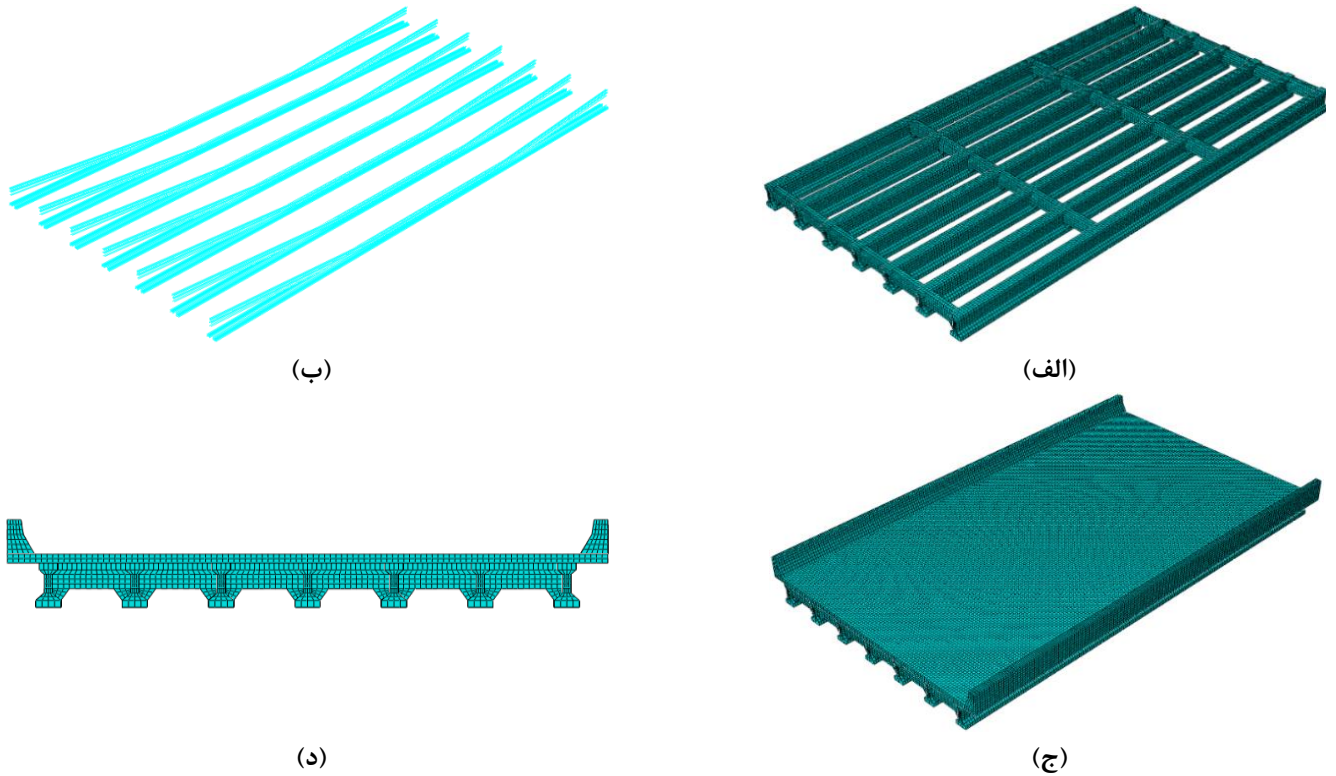
شکل ۶. کاهش دامنه پاسخ های مودال پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) سنسور A2099، (ب) سنسور A2104، (ج) سنسور A2105، (د) سنسور A2107

Fig. 6. Decaying amplitude of the modal responses of the bridge by variational mode decomposition, (a) sensor A2099, (b) sensor A2104, (c) sensor A2105, (d) sensor A2107.



شکل ۷. مدهای ارتعاشی پل به روش تجزیه مود متغیر، (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

Fig.7. Mode shapes of the bridge by variational mode decomposition, (a) first mode, (b) second mode, (c) third mode, (d) fourth mode.



شکل ۸. مدل سازی پل بتنی پیش تنیده در نرم افزار آباکوس، (الف) تیرها، (ب) کابل‌ها، (ج) عرشه، (د) برش عرضی

Fig.8. Modeling of the prestressed concrete bridges in Abaqus, (a) beams, (b) cables, (c) decks, (d) cross section.

۵- صحت‌سنجی نتایج

مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌های کناری ۲۷/۵۸ مگاپاسکال می‌باشند. بنابراین، مدول الاستیسیته و چگالی تیرهای پیش‌تنیده به ترتیب برابر ۲۷/۷۹ گیگاپاسکال و ۲۴۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب در مدل‌سازی فرض شدند. همچنین، مدول الاستیسیته و چگالی بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌های کناری به ترتیب برابر ۲۴/۸۶ گیگاپاسکال و ۲۴۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شدند که مشخصات مصالح پل در جدول ۳ آورده شده است. علاوه بر این، تعداد ۳۰ عدد کابل پیش‌تنیده با قطر ۰/۱۱۲ متر در مقطع عرضی تیرها قرار گرفته است که دارای تنش تسلیم ۱۶۸۹/۹۱ مگاپاسکال، تنش نهایی ۱۸۶۱/۵۸ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۱۹۶/۵۰ گیگاپاسکال و چگالی ۷۸۴۹/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند.

سپس، با انجام تحلیل مودال فرکانس‌های اصلی و شکل موده‌های ارتعاشی پل بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. مقدار فرکانس‌های چهار مود اول پل به ترتیب برابر ۶/۰۴۳، ۷/۷۷۳، ۱۱/۱۵۸ و ۲۰/۰۲۳ هرتز می‌باشند که در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که

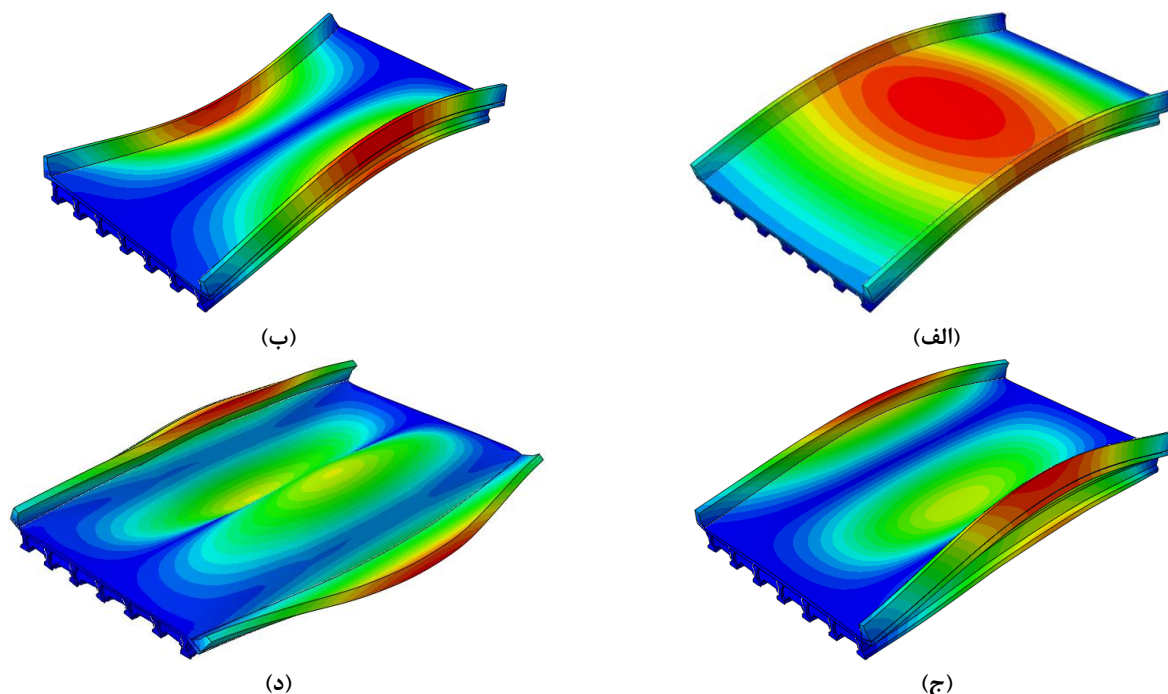
۱- ۵- مدل‌سازی اجزا محدود پل بتنی پیش‌تنیده توسط نرم‌افزار آباکوس برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی پل پیش‌تنیده به روش اجزا محدود مدل این سازه در آباکوس ایجاد شد. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی تیرها، عرشه بتنی، دیافراگم‌ها، جان‌پناه‌ها و تکیه‌گاه‌ها از المان سالید^۱ سه بعدی C3D8R با اندازه مش ۰/۲۵۴ متر و برای مدل‌سازی کابل‌ها از المان تراس^۲ T3D2 با اندازه مش ۰/۲۵۴ متر استفاده شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. این پل از ۷ تیر بتنی پیش‌تنیده با تکیه‌گاه‌های ساده، دال بتنی مسلح به ضخامت ۰/۱۹ متر و دو عدد دیواره بتنی که بر روی لبه‌های کناری دال قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. همچنین، طول دهانه پل ۲۲/۸۶ متر و عرض آن ۱۳/۴۱ متر است. برای کنترل تغییر مکان جانبی تیرهای پل دیافراگم‌های بتنی در بین تیرها قرار گرفته است. بر اساس نقشه‌های موجود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن تیرهای پیش‌تنیده ۳۴/۴۷

- | | |
|---|-------|
| 1 | Solid |
| 2 | Truss |

جدول ۳. مشخصات مصالح تشکیل دهنده پل

Table 3. Material properties of the bridge components.

چگالی کابل‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته کابل‌ها (گیگاپاسکال)	چگالی تیرها، دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (گیگاپاسکال)	مدول الاستیسیته تیرها (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری بتن دال، دیافراگم‌ها و دیواره‌ها (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری بتن تیرها (مگاپاسکال)
۷۸۴۹/۰۵	۱۹۶/۵۰	۲۴۰۳	۲۴/۸۶	۲۷/۷۹	۲۷/۵۸	۳۴/۴۷

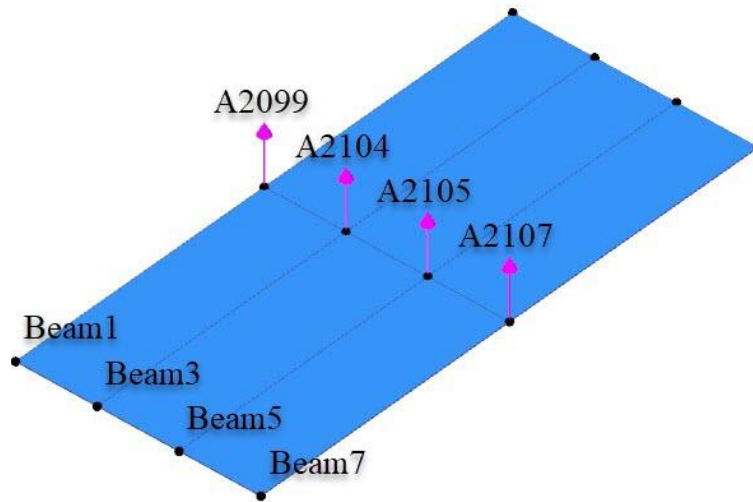


شکل ۹. فرکانس‌ها و شکل مدهای ارتعاشی پل در نرم‌افزار آباکوس، (الف) فرکانس مود اول ۶/۴۳ هرتز، (ب) فرکانس مود دوم ۷/۷۷۳ هرتز، (ج) فرکانس مود سوم ۱۱/۱۵۸ هرتز، (د) فرکانس مود چهارم ۲۰/۰۲۳ هرتز

Fig. 9. Frequencies and mode shapes of the bridge in Abaqus, (a) frequency of the first mode 6.443 Hz, (b) frequency of the second mode 7.773 Hz, (c) frequency of the third mode 11.158 Hz, (d) frequency of the fourth mode 20.023 Hz.

الگوریتم تجزیه مود متغیر مشخص گردید، چهار مود اول ارتعاشی پل در این دو روش به ترتیب ۳، ۱۵، ۵ و ۱ درصد با هم اختلاف دارند که این اختلاف به دلیل در نظر گرفتن برخی فرضیات در مدل‌سازی اجزا محدود و تقریبی بودن مشخصات مقاومتی مصالح پل است.

پل در مود اول به صورت خمش حول محور عرضی و در مود دوم به صورت ترکیب حالات خمشی و پیچشی ارتعاش کرده است. همچنین، پل در مود سوم به صورت خمش حول محور طولی ارتعاش کرده است. با بررسی مقدار فرکانس‌های به دست آمده در مدل اجزا محدود و



شکل ۱۰. مکان نصب چهار سنسور بر روی پل در نرم‌افزار آرتیمیس

Fig. 10. Location of four sensors on the bridge in Artemis.

اصلی^۵ SSI-PC، مولفه اصلی بی‌وزن^۶ SSI-UPC، مولفه اصلی بی‌وزن^۷ SSI-UPCX و تحلیل متغیر استاندارد^۸ SSI-CVA که همه آن‌ها بر اساس شناسایی زیر فضای تصادفی^۹ SSI حاصل می‌شوند. این روش‌ها پارامترهای مودال را به طور مستقیم از سری‌های زمانی اندازه‌گیری شده و با خطای بسیار کم محاسبه می‌کنند. روش زیر فضای تصادفی از راه حل‌های موثری برای مقابله با نویز و خطاهای تصادفی استفاده می‌کند و توانایی تخمین مقدار کم یا زیاد میرایی را دارد. همچنین، این روش مودهای ارتعاشی را به صورت خودکار استخراج می‌کند و پارامترهای مودال سازه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ارتعاشی به دست می‌آورد.

برای به دست آوردن مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل پیش‌تنیده، پاسخ‌های شتاب ثبت شده به وسیله سنسورها با استفاده از نرم‌افزار آرتیمیس و روش‌های مختلف در حوزه فرکانس و حوزه زمان پردازش شدند. به همین منظور هندسه پل و مکان نصب سنسورها در وسط تیرهای پل در نرم‌افزار آرتیمیس ایجاد شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۵-۲- صحت‌سنجی مشخصات مودال پل توسط نرم‌افزار آرتیمیس

روش‌های بسیاری برای تشخیص خروجی سیستم سازه‌ای وجود دارد که مبنای کار آن‌ها بررسی ارتباط بین ورودی‌های مجهول و خروجی‌های حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی است. نرم‌افزار آرتیمیس اطلاعات مودال سازه را از طریق روش‌های مختلف پردازش سیگنال در حوزه فرکانس و حوزه زمان محاسبه می‌کند. در این نرم‌افزار، تجزیه سیگنال در حوزه فرکانس شامل سه روش است که در آن‌ها توابع پاسخ فرکانسی با ماتریس چگالی طیفی توان^۱ که از پردازش خروجی تخمین زده می‌شوند، مرتبط می‌شوند. این روش‌ها شامل تجزیه دامنه فرکانس^۲ FDD، تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته^۳ CFDD و تجزیه دامنه فرکانس برازش منحنی^۴ EFDD می‌باشند. در همه این روش‌ها، مشخصات مودال سازه با برداشت نقاط حداکثر در دامنه فرکانس تخمین زده می‌شوند. این روش‌ها به شکلی طراحی شده‌اند که سیگنال‌های هارمونیک را در حالت دوران بخش‌های مختلف سازه‌ای و سایر تحریک‌های سینوسی در نظر می‌گیرند. علاوه بر این، در نرم‌افزار آرتیمیس تجزیه سیگنال در حوزه زمان شامل چهار روش است که عبارتند از: مولفه

5 Principal Component
6 Unweighted Principal Component
7 Extended Unweighted Principal Component
8 Canonical Variate Analysis
9 Stochastic Subspace Identification

1 Power Spectral Densities Matrix
2 Frequency Domain Decomposition
3 Enhanced Frequency Domain Decomposition
4 Curve-fit Frequency Domain Decomposition

جدول ۴. فرکانس‌های پل در نرم‌افزار آرتیمیس (هرتز)

Table 4. Frequencies of the bridge in Artemis (Hz).

روش پردازش سیگنال						شماره مود ارتعاشی
SSI-CVA	SSI-UPC	SSI-PC	CFDD	EFDD	FDD	
۵/۸۹	۵/۸۵۳	۵/۸۵۲	۵/۸۸۵	۵/۸۸۲	۵/۸۹۱	مود اول
۶/۹۴۸	۷/۰۳۲	۷/۰۱۳	۷/۴۱۲	۷/۴۱۲	۷/۴۰۸	مود دوم
۱۰/۷۵۷	۱۰/۷۳۸	۱۰/۷۴۶	۱۰/۷۷۲	۱۰/۷۸۶	۱۰/۷۹۹	مود سوم
۲۰/۴۲۱	۲۰/۵۲۳	۲۰/۴۴۸	۲۰/۴۶۴	۲۰/۴۷۶	۲۰/۵۱۵	مود چهارم

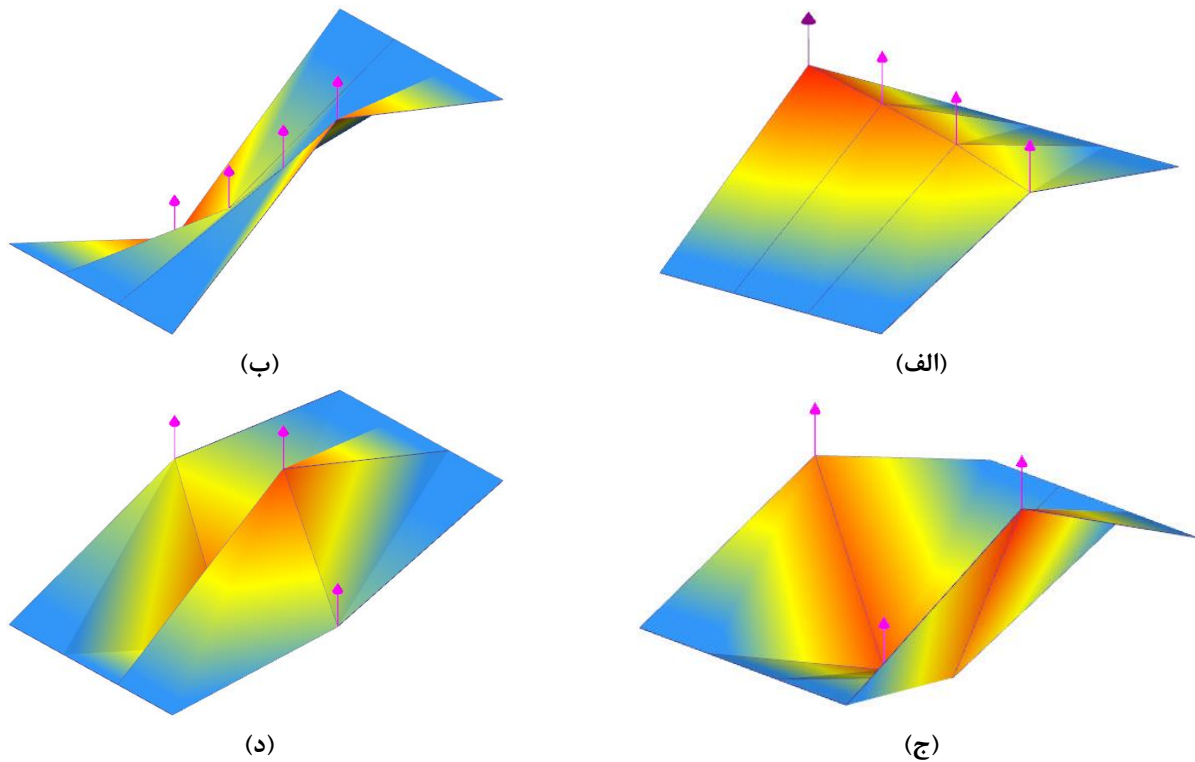
جدول ۵. نسبت‌های میرایی پل در نرم‌افزار آرتیمیس (درصد)

Table 5. Damping ratios of the bridge in Artemis (percentage).

روش پردازش سیگنال						شماره مود ارتعاشی
SSI-CVA	SSI-UPC	SSI-PC	CFDD	EFDD	FDD	
۴/۱۸۴	۴/۹۱۸	۳/۶۵	۰/۳۵۸	۰/۸۸۳	-	مود اول
۴/۰۵۴	۴/۵۱	۴/۴۳۷	۰/۰۵۴	۰/۱۱۱	-	مود دوم
۱/۳۸۵	۱/۴۷۹	۱/۵۴۸	۰/۷۳۳	۱/۴۶۲	-	مود سوم
۱/۹۱۳	۱/۹۶۹	۲/۰۶۴	۰/۵۴۸	۱/۳۹۳	-	مود چهارم

با بررسی مقدار فرکانس‌های به دست آمده توسط دو روش پردازش سیگنال با نرم‌افزار آرتیمیس و الگوریتم تجزیه مود متغیر مشخص شد، فرکانس‌های مودهای اول، سوم و چهارم ارتعاشی پل در حدود ۱ درصد و فرکانس‌های مود دوم ارتعاشی در روش حوزه فرکانس ۹ درصد و در روش حوزه زمان ۳ درصد با هم اختلاف دارند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر نسبت به روش‌های حوزه زمان که در نرم‌افزار آرتیمیس استفاده شد، دارای خطای کمتری می‌باشند. در ادامه، با استفاده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال و اطلاعات به دست آمده از سنسورهای شتاب، شکل مودهای ارتعاشی چهارم مود اول پل شناسایی شدند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی شکل مودهای ارتعاشی دریافت می‌شود ارتعاش پل در مود اول به صورت خمشی است و تیرها به صورت نامتقارن تغییر شکل داده‌اند. ارتعاش پل در مود دوم به صورت دوران حول محور طولی پل و با چرخش به سمت جانبی رخ داده است. همچنین، پل در مود سوم به صورت خمشی حول محور طولی و در

با بررسی فرکانس‌های به دست آمده از پردازش پاسخ‌های شتاب با استفاده از روش‌های حوزه فرکانس و حوزه زمان مشخص شد که اختلاف بین مقدار فرکانس‌های مودهای اول، سوم و چهارم در همه روش‌ها در حدود ۱ درصد به دست آمده است. علاوه بر این، مقدار فرکانس‌های محاسبه شده برای مود دوم در حوزه فرکانس حدود ۶ درصد بیشتر از مقدار مشابه در حوزه زمان است. علاوه بر این، اختلاف بین مقدار فرکانس‌های چهارم مود اول پل در مدل اجزا محدود و مدل آرتیمیس به ترتیب در روش‌های حوزه فرکانس برابر ۳، ۴، ۵، ۲ درصد و در روش‌های حوزه زمان برابر ۳، ۱۱، ۴ و ۲ درصد می‌باشند. نسبت‌های میرایی که با روش‌های حوزه زمان تخمین زده شد نزدیک به مقدار میرایی موجود در پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمده است. همچنین، روش‌های حوزه فرکانس در مقایسه با روش‌های حوزه زمان قادر به تخمین میرایی پل با دقت کافی نبوده‌اند. مقدار فرکانس‌های اصلی و نسبت‌های میرایی چهارم مود اول پل در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۱۱. شکل مودهای ارتعاشی پل در نرم افزار آرتمیس، (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم

Fig. 11. Mode shapes of the bridge in Artemis, (a) first mode, (b) second mode, (c) third mode, (d) fourth mode.

جدول ۶. مقایسه فرکانس‌های پل (هرتز)

Table 6. Comparison of the bridge frequencies (Hz).

آباکوس	آرتمیس (SSI-) (CVA)	تجزیه مود متغیر	شماره مود ارتعاشی
۶/۰۴۳	۵/۸۹	۵/۸۹۶	مود اول
۷/۷۷۳	۶/۹۴۸	۶/۷۷۳	مود دوم
۱۱/۱۵۸	۱۰/۷۵۷	۱۰/۶۳۶	مود سوم
۲۰/۰۲۳	۲۰/۴۲۱	۲۰/۲۰۸	مود چهارم

تحقیق، مقایسه‌ای بین سه روش مورد استفاده برای تعیین فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی پل در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای چهار مود اول ارتعاشی پل توسط سه روش مورد بحث با دقت مناسبی دارای مقادیر نزدیک به هم می‌باشند.

مود چهارم به صورت خمش ناحیه‌ای ارتعاش کرده است. با مقایسه شکل مودهای ارتعاشی به دست آمده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر با روش‌های مدل اجزا محدود و نرم‌افزار آرتمیس مشخص شد که شکل مودهای ارتعاشی شناسایی شده توسط این الگوریتم مطابقت خوبی با دو روش دیگر دارند. به منظور بررسی عملکرد روش پردازش سیگنال ارائه شده در این

جدول ۷. مقایسه مقادیر شکل مودهای ارتعاشی پل

Table 7. Comparison of the mode shapes of the bridge.

شماره مود ارتعاشی	شماره تیر پل	تجزیه مود متغیر	آرتمیس (-SSI) (CVA)	آباکوس
مود اول	۱	۱	۱	۰/۸۹۴۸
	۳	۰/۹۱۶۳	۰/۸۵۰۷	۰/۹۸۴۹
	۵	۰/۸۸۶۱	۰/۶۸۵۹	۰/۹۸۴۹
	۷	۰/۶۵۱۹	۰/۴۷۲۸	۰/۸۹۴۸
مود دوم	۱	-۰/۹۸۱۳	-۰/۶۰۱۶	-۱
	۳	-۰/۲۵۴۹	-۰/۰۶۹	-۰/۳۴۱۹
	۵	۰/۴۰۶۴	۰/۵۷۲۹	۰/۳۴۱۹
	۷	۱	۱	۱
مود سوم	۱	۱	۱	۱
	۳	-۰/۶۸۷۲	-۰/۷۲۴۹	-۰/۵۴۲۸
	۵	-۰/۸۴۳۲	-۰/۸۷۰۹	-۰/۵۴۲۸
	۷	۰/۷۳۱۱	۰/۷۷۴۲	۱
مود چهارم	۱	۰/۲۵۵۲	-۰/۲۶۶۴	۰/۳۶۱۷
	۳	-۰/۹۰۲۲	-۰/۹۰۶۸	-۱
	۵	۱	۱	۱
	۷	-۰/۴۱۶۱	-۰/۴۷۵۹	-۰/۳۶۱۷

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، روشی برای پردازش سیگنال پاسخهای شتاب پل بتنی پیش‌تنیده آسیب دیده با هدف شناسایی مشخصات مودال مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از الگوریتم تجزیه مود متغیر برای تجزیه پاسخهای شتاب در نرم‌افزار متلب استفاده شد. سپس، این الگوریتم پاسخهای شتاب را به مودهای ذاتی تجزیه کرد و مقدار فرکانس‌های اصلی، نسبت‌های میرایی و شکل مودهای ارتعاشی پل به دست آمدند. همچنین، برای ثبت پاسخهای شتاب ایجاد شده توسط آزمایش ارتعاش محیطی از کمترین تعداد سنسور در وسط دهانه پل استفاده شد. برای بررسی عملکرد این الگوریتم، پاسخهای شتاب ثبت شده توسط سنسورها در نرم‌افزار آرتمیس با استفاده از روشهای مختلف پردازش سیگنال تجزیه شدند و مشخصات مودال پل به دست آمدند. علاوه بر این، مدل اجزا محدود پل در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد و با انجام تحلیل مودال مقدار فرکانس‌های اصلی و شکل مودهای ارتعاشی محاسبه شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مودهای ذاتی پل با دقت و سرعت بالا و با یک بار اجرای الگوریتم تجزیه مود متغیر شناسایی و استخراج شدند.
- ۲- نویز و موارد ناخواسته از سیگنال آزمایش ارتعاش محیطی با به کار بردن این الگوریتم شناسایی و حذف شدند.
- ۳- با در نظر گرفتن بخش محدودی از پاسخ ارتعاش آزاد پل بعد از ماکزیمم پاسخ شتاب، مشخصات مودال پل توسط این الگوریتم به دست آمدند به طوری که حجم محاسبات پردازش سیگنال به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرد.
- ۴- مقدار فرکانس‌های چهار مود اول ارتعاشی پل در مدل اجزا محدود و الگوریتم تجزیه مود متغیر به ترتیب ۳، ۱۵، ۵ و ۱ درصد با هم اختلاف دارند. همچنین، اختلاف بین مقدار فرکانس‌های چهار مود اول پل در مدل اجزا محدود و مدل آرتمیس به ترتیب در روش‌های حوزه فرکانس برابر ۳، ۵، ۴ و ۲ درصد و در روش‌های حوزه زمان برابر ۳، ۱۱، ۴ و ۲ درصد می‌باشند. علاوه بر این، مقدار فرکانس‌های به دست آمده توسط دو روش پردازش

bient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge, *Engineering Structures*, 32(8) (2010) 2003-2018.

[8] A. Bagheri, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Identification of Flexural Rigidity in Bridges with Limited Structural Information, *Journal of Structural Engineering*, 144(8) (2018) 04018126.

[9] A. Bagheri, M. Alipour, S. Usmani, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Structural stiffness identification of skewed slab bridges with limited information for load rating purpose, *Dynamics of Civil Structures*, Volume 2, (2017) 243-249.

[10] Y. Tian, J. Zhang, Q. Xia, P. Li, Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data, *Engineering Structures*, 146 (2017) 158-169.

[11] K.-C. Chang, C.-W. Kim, Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge, *Engineering Structures*, 122 (2016) 156-173.

[12] L.S. Hogan, L. Wotherspoon, S. Beskhyroun, J. Ingham, Dynamic field testing of a three-span precast-concrete bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 21(12) (2016) 06016007.

[13] A. Bagheri, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, M. Alipour, A. Zare Hosseinzadeh, A hybrid experimental-numerical approach for load rating of reinforced concrete bridges with insufficient structural properties, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(6) (2019) 754-770.

[14] A.K. Ndong, M.S. Dizaji, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Load Rating of a Reinforced Concrete T-beam Bridge through Ambient Vibration Testing and Finite Element Model Updating, *Dynamics of Civil Structures*, Volume 2, (2019) 337-343.

[15] A. Bagheri, M. Alipour, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, A nondestructive method for load rating of bridges without structural properties and plans, *Engineering Structures*, 171 (2018) 545-556.

[16] W.-H. Hu, C. Moutinho, E. Caetano, F. Magalhães, A. Cunha, Continuous dynamic monitoring of a lively foot-bridge for serviceability assessment and damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 33 (2012) 38-55.

[17] B.J. Costa, F. Magalhães, Á. Cunha, J. Figueiras, Rehabilitation assessment of a centenary steel bridge based on modal analysis, *Engineering structures*, 56 (2013) 260-272.

[18] B.J.A. Costa, F. Magalhães, Á. Cunha, J. Figueiras, Modal analysis for the rehabilitation assessment of the Luiz I Bridge, *Journal of bridge engineering*, 19(12) (2014) 05014006.

[19] Y. Lee, A.F. Vakakis, D. McFarland, L. Bergman, A global-local approach to nonlinear system identification: a review, *Structural Control and Health Monitoring*, 17(7)

سیگنال با نرم‌افزار آرتمیس و الگوریتم تجزیه مود متغیر برای مودهای اول، سوم و چهارم ارتعاشی پل در حدود ۱ درصد و برای فرکانس‌های مود دوم ارتعاشی در روش حوزه فرکانس ۹ درصد و در روش حوزه زمان ۳ درصد با هم اختلاف دارند.

۵- نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط این الگوریتم با برازش یک تابع خطی بر نمودار لگاریتمی پاسخ مودال در لحظه افت دامنه و محاسبه شیب این خط نزدیک به مقدار میرایی پل‌های بتنی پیش‌تنیده به دست آمدند. همچنین، روش‌های حوزه فرکانس در نرم‌افزار آرتمیس میرایی پل را با دقت کافی محاسبه نکردند. علاوه بر این، نسبت‌های میرایی تخمین زده شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر نسبت به روش‌های حوزه زمان که در نرم‌افزار آرتمیس استفاده شد، دارای خطای کمتری است.

۶- شکل مودهای ارتعاشی شناسایی شده توسط الگوریتم تجزیه مود متغیر انطباق بسیار خوبی با شکل مودهای ارتعاشی به دست آمده از مدل‌های نرم‌افزارهای آباکوس و آرتمیس دارند به طوری که این الگوریتم شکل مودهای ارتعاشی خمشی، پیچشی و ترکیبی از آن‌ها را با دقت مناسبی شناسایی کرد.

منابع

- [1] H. Li, S. Li, J. Ou, H. Li, Modal identification of bridges under varying environmental conditions: temperature and wind effects, *Structural Control and Health Monitoring*, 17(5) (2010) 495-512.
- [2] S.N. Pakzad, Development and deployment of large scale wireless sensor network on a long-span bridge, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6) (2010) 525-543.
- [3] Y. Ding, A. Li, D. Du, T. Liu, Multi-scale damage analysis for a steel box girder of a long-span cable-stayed bridge, *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(6) (2010) 725-739.
- [4] A. Gheitasi, O.E. Ozbulut, S. Usmani, M. Alipour, D.K. Harris, Experimental and analytical vibration serviceability assessment of an in-service footbridge, *Case Studies in Non-destructive Testing and Evaluation*, 6 (2016) 79-88.
- [5] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, A summary review of vibration-based damage identification methods, *Shock and vibration digest*, 30(2) (1998) 91-105.
- [6] F. Amini, Y. Hedayati, Underdetermined blind modal identification of structures by earthquake and ambient vibration measurements via sparse component analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 366 (2016) 117-132.
- [7] J. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, A. Cunha, Am-

- [33] Z. Hou, M. Noori, R.S. Amand, Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering mechanics*, 126(7) (2000) 677-683.
- [34] J.N. Yang, Y. Lei, S. Pan, N. Huang, System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 1: normal modes, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(9) (2003) 1443-1467.
- [35] N.E. Huang, M.L. Wu, W. Qu, S.R. Long, S.S. Shen, Applications of Hilbert–Huang transform to non-stationary financial time series analysis, *Applied stochastic models in business and industry*, 19(3) (2003) 245-268.
- [36] S. Nagarajaiah, Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform, *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 16(7-8) (2009) 800-841.
- [37] T. Kijewski-Correa, A. Kareem, Efficacy of Hilbert and wavelet transforms for time-frequency analysis, *Journal of engineering mechanics*, 132(10) (2006) 1037-1049.
- [38] H. Li, X. Deng, H. Dai, Structural damage detection using the combination method of EMD and wavelet analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1) (2007) 298-306.
- [39] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971) (1998) 903-995.
- [40] X. Zhang, Z. Liu, Q. Miao, L. Wang, An optimized time varying filtering based empirical mode decomposition method with grey wolf optimizer for machinery fault diagnosis, *Journal of Sound and Vibration*, 418 (2018) 55-78.
- [41] M. Lazhari, A. Sadhu, Decentralized modal identification of structures using an adaptive empirical mode decomposition method, *Journal of Sound and Vibration*, 447 (2019) 20-41.
- [42] C.A. Perez-Ramirez, J.P. Amezcua-Sanchez, H. Adeli, M. Valtierra-Rodriguez, R.d.J. Romero-Troncoso, A. Dominguez-Gonzalez, R.A. Osornio-Rios, Time-frequency techniques for modal parameters identification of civil structures from acquired dynamic signals, *Journal of Vibroengineering*, 18(5) (2016) 3164-3185.
- [43] S. Mahato, M.V. Teja, A. Chakraborty, Adaptive HHT (AHHT) based modal parameter estimation from limited measurements of an RC-framed building under multi-component earthquake excitations, *Structural Control and Health Monitoring*, 22(7) (2015) 984-1001.
- (2010) 742-760.
- [20] J.M. Caicedo, J. Marulanda, Fast mode identification technique for online monitoring, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(4) (2011) 416-429.
- [21] F. Abazarsa, S. Ghahari, F. Nateghi, E. Taciroglu, Response-only modal identification of structures using limited sensors, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6) (2013) 987-1006.
- [22] A. Bayraktar, T. Türker, J. Tadla, A. Kurşun, A. Erdiş, Static and dynamic field load testing of the long span Nissibi cable-stayed bridge, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94 (2017) 136-157.
- [23] N. Maia, J. Silva, Modal analysis identification techniques, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778) (2001) 29-40.
- [24] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart materials and structures*, 10(3) (2001) 441.
- [25] L. Zhang, T. Wang, Y. Tamura, A frequency–spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis, *Mechanical systems and signal processing*, 24(5) (2010) 1227-1239.
- [26] S. Ibrahim, Random decrement technique for modal identification of structures, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 14(11) (1977) 696-700.
- [27] J.-N. Juang, R.S. Pappa, An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 8(5) (1985) 620-627.
- [28] P.-E. Gautier, C. Gontier, M. Smail, Robustness of an ARMA identification method for modal analysis of mechanical systems in the presence of noise, *Journal of Sound and Vibration*, 179(2) (1995) 227-242.
- [29] M. Döhler, X.-B. Lam, L. Mevel, Uncertainty quantification for modal parameters from stochastic subspace identification on multi-setup measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(2) (2013) 562-581.
- [30] L. Faravelli, F. Ubertini, C. Fuggini, System identification of a super high-rise building via a stochastic subspace approach, *Smart Structures and Systems*, 7(2) (2011) 133-152.
- [31] P.F. Pai, L. Huang, J. Hu, D.R. Langewisch, Time-frequency method for nonlinear system identification and damage detection, *Structural Health Monitoring*, 7(2) (2008) 103-127.
- [32] K. Dragomiretskiy, D. Zosso, Variational mode decomposition, *IEEE transactions on signal processing*, 62(3) (2013) 531-544.

- [47] Y. Tian, J. Zhang, Structural flexibility identification via moving-vehicle-induced time-varying modal parameters, *Journal of Sound and Vibration*, (2020) 115264.
- [48] M. Zhang, F. Xu, Variational mode decomposition based modal parameter identification in civil engineering, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(5) (2019) 1082-1094.
- [49] J.J. Reilly, *Load Testing Deteriorated Spans of the Hampton Roads Bridge-Tunnel for Load Rating Recommendations*, Virginia Tech, 2017.
- [44] M. Barbosh, A. Sadhu, M. Vogrig, Multisensor-based hybrid empirical mode decomposition method towards system identification of structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5) (2018) e2147.
- [45] P. Ni, J. Li, H. Hao, Y. Xia, X. Wang, J.M. Lee, K.H. Jung, Time-varying system identification using variational mode decomposition, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(6) (2018) e2175.
- [46] A. Bagheri, O.E. Ozbulut, D.K. Harris, Structural system identification based on variational mode decomposition, *Journal of Sound and Vibration*, 417 (2018) 182-197.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Dindar, M. H. Hosseini, M. R. Mansoori, Modal Data Identification of the Prestressed Concrete Bridge Using Variational Mode Decomposition, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 715-736.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19075.7055



