Archive of SID

نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱، فروردین ماه ۱۳۸۹، از صفحه ۱۲۱ تا ۱۳۰

# شناسایی پارامترهای مودال بر اساس داده‌های آزمایش ارتعاش‌محیطی با نرم‌افزار جدید SIP

**جواد یادگاری[*1] و امید بهار[2]**

[1] دانشجوی دکتری مهندسی زلزله - پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[2] استادیار پژوهشکده سازه - پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت ۸۶/۳/۱۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۳۸۷/۲۶ ، تاریخ تصویب ۸۷/۱۲/۱۸)

## چکیده

یکی از انواع آزمایش‌های دینامیکی که روی سازه‌ها انجام می‌شود، آزمایش ارتعاش محیطی است که از ترافیک و باد به عنوان تحریک محیطی و یا طبیعی استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت تحریک‌های محیطی که قابل اندازه‌گیری نیستند، نیروهای وارد به سازه ناشناخته خواهد بود و در نتیجه تحلیل تجربی مودال برای به دست آوردن پارامترهای دینامیکی باید فقط بر اساس پاسخ های سازه یا به‌عبارت دیگر بر اساس داده‌های خروجی-تنها انجام شود. یکی از دشواری‌های تحلیل‌های مودال بر اساس داده‌های خروجی-تنها، نیاز آن به روش‌هایی است که شناسایی سیستم را بر اساس داده‌های ارتعاش محیطی که از لحاظ دامنه به نسبت کوچک و همراه اغتشاش هستند، انجام دهند. بدین منظور از دو روش تحلیل مودال مکمل یکدیگر که عبارتند از روش به نسبت ساده جستار قله در حوزه فرکانس و روش پیشرفته‌تر شناسایی زیر فضای تصادفی در حوزه زمان استفاده می‌شود. با استفاده از این دو روش یک نرم‌افزار گرافیکی به‌نام SIP در محیط MATLAB تهیه شده است که در شناسایی پارامترهای مودال سازه‌های بزرگ مهندسی عمران از قبیل پل‌ها و ساختمان های بزرگ قابل استفاده است. در این مقاله سعی شده است که کاربرد روش های شناسایی پارامترهای مودال در سازه‌های بزرگ مهندسی عمران بیان و قابلیت‌ها و ویژگی‌های نرم‌افزار گرافیکی نوشته شده به طور اختصار ارائه شود. پل قوسی فلزی بابلسر با استفاده از نرم‌افزار SIP و داده‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی انجام شده بر روی این پل تحلیل شده و پارامترهای مودال این پل استخراج و ارائه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل مودال، شناسایی سیستم، آزمایش ارتعاش محیطی، داده‌های خروجی تنها، روش جستارقله، روش شناسایی زیر فضای تصادفی، نرم افزار گرافیکی

## مقدمه

شناسایی سیستم با استفاده از اندازه‌گیری های دینامیکی ابتدا در مهندسی مکانیک و هوافضا استفاده شد و توسعه پیدا کرد.[۱]. در ادامه تلاش های بسیاری برای به‌کارگیری این تکنیک‌ها در مهندسی عمران انجام گرفت. اما به دلیل پیچیدگی بسیار و ابعاد به نسبت بزرگ سازه‌های مورد بررسی در مهندسی عمران باید تغییراتی در این روش‌ها، تکنیک‌های شناسایی سیستم به وجود می‌آمد.

به طور کلی، شناسایی تجربی پارامترهای مودال در سازه‌های مهندسی عمران به معنی استخراج پارامترهای مودال (فرکانس ها، نسبت های میرایی و شکل های مودی) از اندازه‌گیری های دینامیکی است. از این پارامترهای مودال می‌توان در به روز کردن مدل اجزاء محدود، شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های احتمالی در سازه‌ها، بررسی طولانی مدت سلامت سازه‌ها و ارزیابی ایمنی سازه‌ها بعد از بارگذاری‌های شدید مانند زلزله استفاده کرد.

آزمایش‌های دینامیکی سازه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) آزمایش ارتعاش اجباری ، (۲) آزمایش ارتعاش آزاد و (۳) و آزمایش ارتعاش محیطی. در روش‌های اول و دوم سازه باید به وسیله ابزارهای مصنوعی مانند وزنه‌های سقوط کننده و یا لرزاننده‌ها تحریک شود. این مستلزم آن است که استفاده از سازه برای مدت زمان نسبتاً طولانی متوقف شود. این مسئله در سازه‌های پرکاربرد مشکلات زیادی ایجاد می‌کند. در مقابل، در روش سوم یعنی آزمایش ارتعاش محیطی از نیروهای طبیعی مانند باد و بارهای بهره‌برداری خود سیستم بعنوان نیروهای تحریک کننده استفاده می‌شود. به همین دلیل نتایج به دست آمده از این آزمایش در حقیقت نشان‌دهنده شرایط واقعی عملکرد سازه است و در ضمن

www.SID.ir

* نویسنده مسئول : تلفن : ۲۲۸۳۱۱۱۶ ، فاکس : ۲۲۲۹۹۴۷۹ ، Email: omidbahar@iiees.ac.ir

Archive of SID


به دلیل نیاز نداشتن به تجهیزات خاص برای تحریک سازه بسیار کم‌هزینه‌تر است.

به طور کلی شناسایی پارامترهای مودال بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده ورودی و خروجی از راه توابع پاسخ فرکانسی(FRFs) در حوزه فرکانس یا توابع پاسخ ضربه‌ای (IRFs) درحوزه زمان انجام می‌شود. در سازه‌های مهندسی عمران، پاسخ های دینامیکی (خروجی‌ها) به طور مستقیم از رکوردهای ثبت شده توسط حسگرهای نصب شده در نقاط مختلف سازه به دست می‌آید. در حالی که به دست آوردن مقدار ورودی یا تحریک در مورد سازه‌های واقعی در شرایط بهره‌برداری تا حدودی دشوار است. اگرچه با استفاده تحریک‌های اجباری مانند لرزاننده‌های قوی و وزنه‌های سقوط کننده می‌توان رابطه‌ای بین خروجی و ورودی اعمال شده پیدا کرد، اما پیچیدگی‌های موجود در سازه‌ها و کیفیت داده‌های به دست آمده کاربرد این روش ها را بسیار محدود می‌کند.

با توجه به این که در آزمایش ارتعاش محیطی فقط پاسخ ها اندازه‌گیری می‌شود و بارگذاری سازه ناشناخته است، شناسایی پارامترهای مودال باید فقط بر اساس داده‌های خروجی انجام شود. در نتیجه به روش‌های ویژه‌ای نیاز است که شناسایی را با استفاده از داده‌هایی با دامنه بسیار کوچک و بدون داشتن اطلاعاتی از نیروی ورودی انجام دهد. در طی سال‌های گذشته، روش‌های تجربی شناسایی پارامترهای مودال در مهندسی عمران به سرعت گسترش پیدا کرده است و چندین روش شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از داده‌های خروجی- تنها برای مقاصد مختلف و توسط محققان گوناگون تهیه شده است. از جمله عبارتند از: روش جستار قله با استفاده از چگالی های طیفی توانی، روش ARMA با استفاده از داده‌های گسسته در حوزه زمان، روش تحریک طبیعی و هم چنین روش شناسایی زیر فضای تصادفی. همچنین به منظور مقایسه روش‌های مختلف شناسایی پارامترهای مودال در ارزیابی خصوصیات دینامیکی یک سازه واقعی و در شرایط بهره‌برداری با استفاده از داده‌های ارتعاش محیطی مطالعاتی توسط (De Roeck et al. 2000) انجام شده است[۲].

در واقع در اکثر مواقع پیش فرض های ریاضی به کار گرفته شده در روش‌های شناسایی سیستم، با داده‌های ارتعاش محیطی به هم شبیه است. اختلاف بین این روش‌ها در مواردی مانند چگونگی حل معادلات و ترتیب عملیات ماتریسی است. در نتیجه نیاز داریم نتایج حاصل از این روش‌ها در سازه‌های واقعی را مقایسه کنیم. در این مقاله با ارائه یک نرم‌افزار جدید شناسایی سیستم و با استفاده از روش جستار قله (PP) در حوزه فرکانس و روش شناسایی زیر فضای تصادفی (SSI) در حوزه زمان، چگونگی استخراج پارامترهای مودال از داده‌های حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی را نشان داده می‌شود و در نهایت نتایج حاصل از تحلیل مودال روی پل قوسی فلزی بابلسر ارائه می‌شود.

## شناسایی سیستم با استفاده از داده‌های ارتعاش محیطی

با توجه به غیر قابل اندازه‌گیری بودن نیروهای ورودی در آزمایش‌های ارتعاش محیطی، به دست آوردن توابع FRFs و IRFs از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌طور مستقیم غیر ممکن است. در نتیجه به روش هایی برای شناسایی سیستم بدون استفاده از داده‌های ورودی نیاز است که در این جا دو روش پرکاربرد به طور مختصر توضیح داده می‌شوند. در ابتدا روش بسیار ساده جستار قله بررسی می شود که با وجود بعضی از معایب آن روشی با کاربردهای عملی زیاد است به همین دلیل و با توجه به سادگی و سرعت کاربرد آن به طور معمول از این روش برای کنترل کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده در محل آزمایش استفاده می‌شود. روش دیگر روش شناسایی زیر فضای تصادفی است، که با توجه به ارائه نتایج دقیق‌تر در مقابل زمان بیشتری که برای تحلیل صرف می‌شود، می‌تواند به عنوان مکملی برای روش جستار قله در نظر گرفته شود.

### روش جستار قله (PP)

ساده‌ترین روش شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از داده‌های ارتعاش محیطی روش جستار قله است. در این روش نقاط حداکثر نسبی در نمودار FRF را می‌توان به عنوان تخمین قابل قبولی از فرکانس های طبیعی سازه در نظر گرفت. با توجه به اینکه در آزمایش ارتعاش محیطیFRF را نمی‌توان به طور مستقیم محاسبه کرد، از چگالی طیفی توانی به دست آمده از داده‌های محیطی استفاده می‌شود [۳]. در این روش فرکانس‌های

www.SID.ir

Archive of SID


طبیعی سازه را با استفاده از نمودار متوسط میانگین‌گیری شده چگالی‌های طیفی توانی (ANPSD) به دست می‌آید. ANPSD را می‌توان به راحتی با تبدیل کردن داده‌های اندازه‌گیری شده از حوزه زمان به حوزه فرکانس با استفاده از تبدیل گسسته فوریه به دست آورد [۴] .

شکل‌های مودی با توجه به مقدار توابع انتقال به دست آمده در فرکانس‌های طبیعی از آزمایش ارتعاش محیطی تعیین می‌شود. در آزمایش ارتعاش اجباری مقدار تابع انتقال برابر است با نسبت پاسخ های به دست آمده به نیروی ورودی؛ اما در آزمایش ارتعاش محیطی این تابع از نسبت پاسخهای اندازه‌گیری شده در حسگر متحرک به حسگر مرجع به دست می‌آید، در نتیجه شکل‌های مودی به دست آمده در این نوع آزمایش به حسگر مرجع وابسته خواهد بود. شکل‌های مودی همچنین با این فرض به دست می‌آیند که تنها یک مود بر پاسخ‌های دینامیکی سازه در حالت تشدید حاکم است. هر چه مودهای به دست آمده بهتر از هم جدا شده باشند و هر چه میرایی آن مود کمتر باشد، درستی این فرض بیشتر خواهد بود.

روش جستار قله از جمله روش‌های حوزه فرکانس است. روش‌های حوزه فرکانس به دلیل سادگی و سرعت پردازش و هم چنین به علت دلایل تاریخی روش‌های بسیار پر کاربردی هستند. اما با وجود همه این مزایا دارای معایبی نیز هستند:

- انتخاب قله‌ها در نمودار ANPSD به سلیقه و نظر کاربر بستگی دارد و یک روش یکسان را نمی‌توان در انتخاب قله‌ها ارائه کرد؛
- شکل‌های مودی بدست آمده به اندازه پاسخ و مکان حسگر مرجع بستگی دارد؛
- مقدار میرایی به دست آمده از این روش به‌هیچ وجه قابل اطمینان نیست.

با وجود این معایب، روش جستار قله به طور معمول در شناسایی سازه‌ها در آزمایش های ارتعاش محیطی به علت سرعت و سادگی بسیار کاربرد دارد.

## روش شناسایی زیر فضای‌تصادفی (SSI)

همان طور که می‌دانیم مدل دینامیکی یک سازه را می‌توان با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل خطی درجه دوم با ضرایب ثابت بیان کرد :

$$M\ddot{U}(t)+C\dot{U}(t)+KU(t)=F(t) \qquad (۱)$$

در معادله (۱) $M$، $C$ و $K$ به ترتیب جرم، میرایی و سختی سازه هستند، بردار $U(t)$ بردار تغییر مکان در کلیه درجات آزادی سازه است و $F(t)$ بردار نیروهای ورودی سازه است. معادله (۱) را به روش‌های مختلف می‌توان به صورت یک سیستم معادلات دیفرانسیل درجه اول باز نویسی کرد. یکی از روش‌های معمول، استفاده از فضای حالت است:

$$\dot{x}(t)=A_c x(t)+B_c u(t) \qquad (۲)$$

در این معادله بردار حالت برابر است با $x(t)=\begin{bmatrix}U(t) & \dot{U}(t)\end{bmatrix}$ و ماتریس حالت $A_c$ و ماتریس ضرایب تأثیر سیستم کنترل $B_c$ به صورت زیر تعریف می‌شوند :

$$B_c=\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}B_2\end{bmatrix} \quad F(t)=B_2u(t) \qquad (۳)$$

$$A_c=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M^{-1}K & -M^{-1}C\end{bmatrix}$$

به همین ترتیب بردار خروجی مورد نظر، $y(t)$ را می‌توان به صورت ترکیب خطی از حالت های سیستم بیان کرد:

$$y(t)=Cx(t)+Du(t) \qquad (۴)$$

در معادله بالا، $C$ ماتریس ضرایب تأثیر خروجی واقعی و $D$ ماتریس ضرایب تأثیر کنترل خروجی است. از ترکیب معادلات (۲) و (۴) مدل فضای حالت پیوسته زمانی یک سیستم به دست می‌آید. پیوسته زمانی بودن این مدل بدین معنی‌است که در هر زمانی می‌توان این معادلات را به دست آورد. البته این فرض به علت اینکه داده‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاشی به صورت گسسته هستند، صحیح نخواهد بود. می‌توان مدل فضای حالت پیوسته زمانی را به صورت زیر به فرم گسسته زمانی تبدیل کرد.

$$\dot{x}_{k+1}=Ax_k+Bu_k \qquad (۵ \text{ الف})$$

$$y_k=Cx_k+Du_k \qquad (۵ \text{ ب})$$

در این معادله $x_k=x(k\Delta t)$ بردار حالت گسسته زمانی و $A=e^{(k\Delta t)}$ ماتریس سیستم در حالت گسسته زمانی است. هم چنین $B=\left[A-I\right]A_c^{-1}B_c$ ماتریس ورودی گسسته است. معادله (۵) یک مدل فضای حالت گسسته زمانی از سیستم دینامیکی را بیان می‌کند.

در عمل همواره عدم قطعیت‌هایی شامل نوفه‌های اندازه‌گیری و محاسباتی وجود دارد. نوفه محاسباتی به علت خطاهای مدل‌سازی و نوفه اندازه‌گیری به علت خطاهای حسگر و خطاهای محیطی به وجود می‌آید. با در

www.SID.ir

Archive of SID


نظر گرفتن نوفه محاسباتی $w_k$ و نوفه اندازه‌گیری $v_k$ معادله (۵) را می‌توان به صورت زیر اصلاح کرد.

$$\dot{x}_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (۶ \text{ الف})$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \quad (۶ \text{ ب})$$

از آنجا که دستیابی به خصوصیات صحیح نوفه‌های اندازه‌گیری و محاسباتی به طور صحیح دشوار است، از برخی فرضیات ساده‌کننده استفاده می‌کنیم. فرض می‌شود که هر دو نوفه اندازه‌گیری و محاسباتی نوفه سفید با میانگین صفر هستند و ماتریس‌های کوواریانس آنها به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$E[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix}] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix}\delta_{pq} \quad (۷)$$

در این معادله $E[...]$ امید ریاضی و $\delta_{pq}$ دلتای کرونکر است. همچنین فرض می‌شود که $w_k$ و $v_k$ از نظر آماری مستقل از یکدیگرند.

در آزمایش ارتعاش محیطی ورودی ناشناخته است در نتیجه با حذف $u_k$ در معادله (۶) به معادله زیر می‌رسیم:

$$\dot{x}_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (۸ \text{ الف})$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (۸ \text{ ب})$$

با توجه به این معادله ورودی را به وسیله جملات نوفه $w_k$ و $v_k$ مدل کردیم ولی نمی‌توان از فرض نوفه سفید بودن این جملات صرف‌نظر کرد که اگر این فرض در عمل صحیح نباشد، برای مثال ورودی شامل اجزای دیگری غیر از نوفه سفید باشد و یا چند فرکانس غالب داشته، آنگاه این فرکانس‌ها را نمی‌توان از فرکانس‌های ویژه سیستم جدا کرد و به صورت قطب های ماتریس سیستم $A$ خود را نشان می‌دهند.

شناسایی سیستم از راه آزمایش‌های ارتعاش محیطی در حوزه زمان بر اساس معادله (۸) انجام می‌گیرد. چندین روش برای اجرای شناسایی سیستم با توجه به معادله (۸) وجود دارد. روش شناسایی زیر فضای تصادفی در حال حاضر پیشرفته‌ترین روش شناخته شده شناسایی سیستم از راه آزمایش‌های ارتعاش محیطی است. روش شناسایی زیر فضای تصادفی، ماتریس های فضای حالت را با استفاده از ابزارهای قدرتمند ریاضی از قبیل تجزیه مقادیر تکین یا روش حداقل مربع‌ها به دست می‌آورد. بعد از محاسبه ماتریس‌های حالت پارامترهای مودال با استفاده از تجزیه مقادیر ویژه این ماتریس‌ها به دست می‌آیند.

در کلیه روش‌های شناسایی سیستم از طریق آزمایش‌های ارتعاش محیطی، به علت ناشناخته بودن ورودی، یک مقیاس نرمال کننده برای شکل‌های مودی شناخته شده وجود ندارد. به عبارت دیگر نرمال کردن اشکال مودی نسبت به جرم امکان‌پذیر نیست.

## نرم‌افزار شناسایی پارامترهای مودال سیستم

در نرم‌افزار گرافیکی تهیه شده برای شناسایی سیستم، همه مراحل تحلیل مودال خروجی- تنها شامل وارد کردن داده‌های به دست آمده از آزمایش، فیلتر کردن آنها، شناسایی سیستم و در نهایت استخراج پارامترهای مودال از مدل شناخته شده در یک محیط مجتمع به سادگی امکان پذیر است. به برخی از ویژگی‌ها و قابلیت‌های برنامه اشاره می‌شود.

۱- پنجره اصلی به‌گونه‌ای طراحی شده است که دسترسی به همه قسمت های برنامه را ممکن می‌کند و همچنین فایل های باز شده برای تحلیل نیز نشان داده می‌شود (شکل۱).

۲- در قسمت Preprocess داده‌های برداشت شده از آزمایش را می‌توان در حوزه زمان و فرکانس(PSD) مشاهده کرد. همچنین امکان پردازش داده‌ها شامل: (Butterworth filters , Decimate /Resample Detrend), در برنامه وجود دارد (شکل۲).

۳- برای شناسایی سیستم و استخراج پارامترهای مودال از دو روش جستار قله و شناسایی زیر فضای تصادفی استفاده می‌شود. در شکل(۳) پنجره تحلیل جستار قله را مشاهده می‌کنید. در این پنجره می‌توان ANPSD را رسم و فرکانس‌های سیستم را از روی شکل انتخاب کرد.

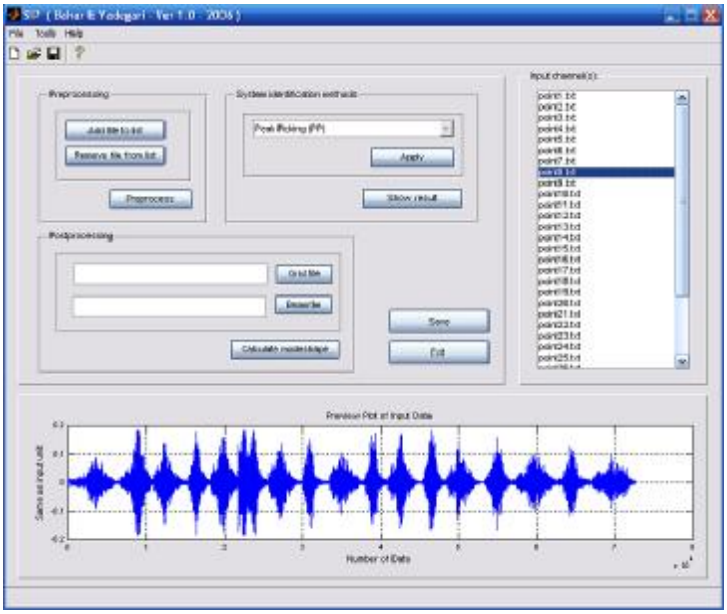
در شکل(۴) دیاگرام پایداری رسم شده با روش شناسایی زیر فضای تصادفی را مشاهده می‌کنید. در این پنجره همزمان با دیاگرام پایداری نمودار ANPSD نیز در پس زمینه رسم می‌شود تا بتوان نتایج دو روش را با هم مقایسه کرد.

## شناسایی خصوصیات دینامیکی پل بابلسر

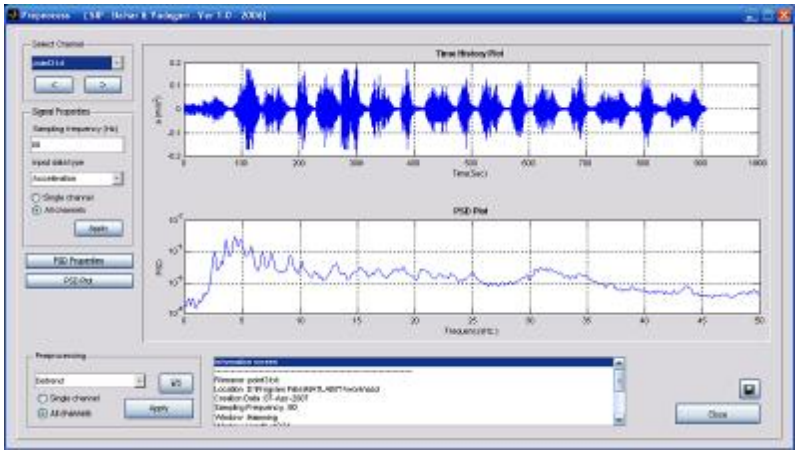
پل قوسی فلزی بابلسر به طول ۹۰ متر روی رودخانه بابلرود در شهرستان بابلسر ، استان مازندران قرار دارد. تصویری از این پل را در شکل (۵) مشاهده می‌کنید.

www.SID.ir

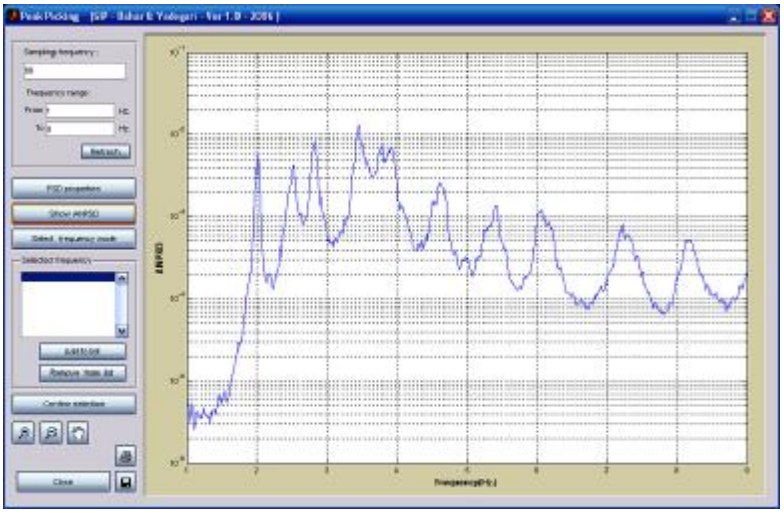
Archive of SID

**شکل۱: پنجره اصلی برنامه.**



**شکل۲: پنجره Preprocess برای فیلتر کردن داده‌ها.**



**شکل۳: پنجره شناسایی سیستم با روش جستار قله.**

www.SID.ir

Archive of SID


این پل با داشتن قدمتی حدود ۷۰ سال یکی از پل‌های اصلی ارتباط میان شرق و غرب ساحل رودخانه بابلرود است. متاسفانه اطلاع دقیقی از مشخصات و نقشه‌های اولیه زمان ساخت این پل در دسترس نیست. ساختمان اصلی پل، تشکیل شده از یک عرشه به طول ۹۰ متر و عرض ۹/۷ متر که ۵/۵ متر آن سواره رو و بقیه آن پیاده رو پل را تشکیل می‌دهد. سطح عرشه با یک دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر که روی تیرهای اصلی طولی و فرعی عرضی قرار گرفته است، پوشیده شده است. دو قوس فلزی در دو جانب عرشه قرار دارد که توسط ۱۴ عضو کششی قائم به فاصله ۶ متر از یکدیگر به عرشه متصل می‌شوند.

## آزمایش ارتعاش محیطی و شناسایی پارامترهای مودال پل

همان طور که بیان شد با استفاده از آزمایش های مودال یک پل در محل می‌توان مشخصات دینامیکی پل را با دقت و اطمینان بیشتری به دست آورد. به طورکلی دو گونه از آزمایش‌های مودال که روی پل ها انجام می‌شود، عبارتند از: آزمایش‌های ارتعاش اجباری و آزمایش های ارتعاش محیطی. در پل‌های بزرگ انجام آزمایش ارتعاش اجباری دشوار است و ایجاد کردن سطح کافی از تحریک به طور معمول بسیار پرهزینه خواهد بود. همچنین جریان عبور و مرور روی پل باید برای مدت زمان طولانی متوقف شود که در پل‌های پر رفت و آمد این موضوع یک مشکل بسیار جدی خواهد بود. اما در مقابل آزمایش ارتعاش محیطی تأثیری بر ترافیک ندارد و نیاز به تجهیزات خاصی برای انجام آن نیست.

در پل قوسی فلزی بابلسر، روش آزمایش ارتعاش محیطی برای به دست آوردن مشخصات دینامکی پل مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش ۸ سرعت سنج سه‌جهته از نوع CMG_6TD به کارگرفته شد. این حسگرها با استفاده از GPS و شبکه ماهواره‌ای زمان و موقعیت مکانی قرارگیری خود را با دیگر حسگرها تعیین می‌کنند و بدین ترتیب همزمانی آنها نیز تأمین می‌شود. سرعت‌سنج ها روی عرشه پل و در ۱۶ نقطه از پیش تعیین شده قرار داده شدند. بدین منظور از سه چیدمان مختلف استفاده شد که در هر چیدمان چهار سرعت‌سنج ثابت و چهار سرعت‌سنج متحرک در نظر گرفته شده بود. در شکل (۶) تصویری از سنسورهای به کار گرفته شده و همچنین نحوه استقرار آنها روی عرشه پل نشان داده شده است.

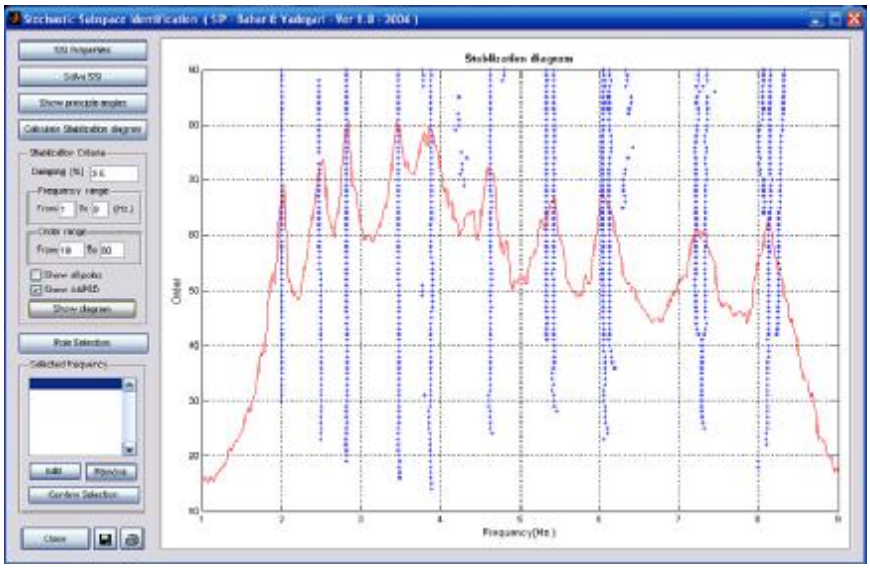
برای ثبت تمام ارتعاشات کوچک پل، فرکانس نمونه‌گیری در محل ۱۰۰ هرتز انتخاب شد و پس از ثبت داده‌ها در یک ایستگاه حسگرها به ایستگاه بعدی منتقل شدند. این کار در سه مرحله تکرار شد تا اندازه گیری در همه نقاط مورد نظر انجام شود. برای نمونه، داده‌های خام اندازه‌گیری شده در جهت قائم چیدمان دوم برای نقطه ۳ در حوزه زمان و فرکانس در شکل(۸) نشان داده شده است.

## به دست آوردن فرکانس های طبیعی پل

پردازش داده‌های برداشت شده و به دست آوردن پارامترهای مودال با استفاده از نرم افزار تهیه شده (SIP) انجام گرفت. در ابتدا تصحیح خط مبنا (Detrend) روی داده‌ها انجام گرفت. با توجه به اینکه ۱۰ فرکانس طبیعی اول پل به طور معمول در محدوده‌ای بین صفر تا ۱۰ هرتز قرار دارد، با باز نمونه‌گیری داده‌ها، فرکانس نمونه‌گیری از ۱۰۰ هرتز به ۲۵ هرتز کاهش پیدا کرد تا در محدوده‌ای بین صفر تا ۱۲/۵ هرتز نتایج دقیق‌تری در شناسایی پل به دست آید. نگاشت‌های ثبت شده در هر چیدمان از چند بخش مشخص تشکیل شده است که به تناسب هر یک به چند زیر نگاشت با طول کوتاه تر قابل تبدیل است. در هر چیدمان پس از نصب کلیه حسگرها و اطمینان از برقراری ارتباط ماهواره‌ای و ایجاد یکنواختی زمانی آنها، مراحل مختلف به شرح ذیل قابل تشخیص است. (۱) مرحله ارتعاش محیطی: در این مرحله کلیه عبور و مرورها چه پیاده و چه وسایل نقلیه قطع شده و فقط ارتعاشات ناشی از وزش باد و لرزش‌های خفیف انتقال یافته از پایه‌ها ثبت می‌شود. (۲) مرحله بارگذاری ترافیک سبک : در این مرحله عبور و مرور عادی پل چه پیاده و چه وسایل نقلیه سبک معمول در جریان بوده است. (۳) مرحله بارگذاری ترافیک سنگین: در این مرحله عبور و مرور عادی پل (پیاده و وسایل نقلیه سبک) قطع بوده و فقط یک وسیله نقلیه سنگین (کامیون) از روی پل عبور داده شده است. در هیچ یک از این سه مرحله نیروی‌های ورودی اعمال شده به پل، نیروهای ورودی قابل اندازه گیری نبوده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID


**شکل۴: دیاگرام پایداری رسم شده با روش شناسایی زیر فضای تصادفی.**

**شکل۵: پل قوسی فلزی بابلسر روی رود خانه بابلرود.**

**شکل٦: سرعت سنج CMG_6TD و چگونگی نصب آن روی عرشه پل.**

www.SID.ir

Archive of SID


البته در هر چیدمان برای کاهش زمان قطع عبور و مرور فقط دو مرحله از سه مرحله بیان شده انجام گرفته است.

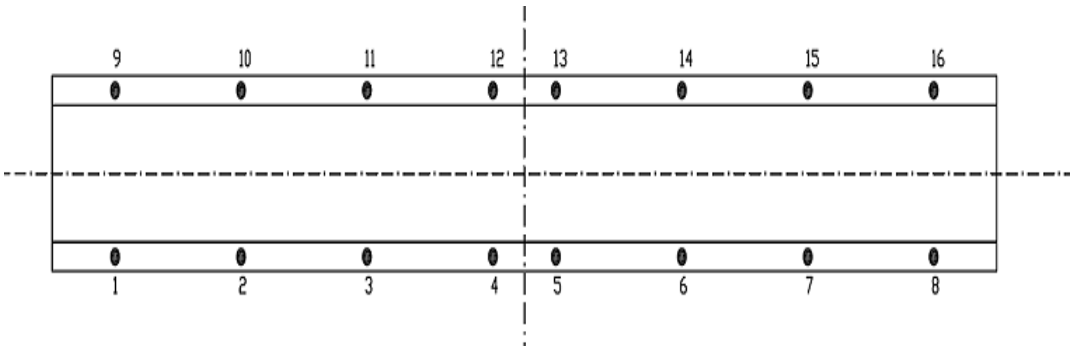
از آنجا که هر نگاشت از چند مرحله مشخص اعمال نیرو و ورودی متفاوت تشکیل شده است، به طوری که از نظر ظاهری نیز از هم قابل تشخیص هستند، در مرحله پردازش، این بخش‌ها به‌گونه‌ای از هم تفکیک شده‌اند که در هر چیدمان شرط یکنواختی زمانی آنها رعایت شده باشد. بر این اساس برای هر چیدمان، نگاشت‌ها به دو و یا سه بخش کوچک‌تر به این شرح تقسیم شده‌اند: مرحله ارتعاش محیطی، مرحله ترافیک سبک، مرحله ترافیک سنگین. یک بار نیز پردازش نگاشت‌ها به طور کامل و بدون تجزیه کردن آنها انجام شده است.

در کلیه چیدمان‌ها همواره ۲ حسگر به صورت قرینه (نسبت به محور طولی پل) در دو طرف پل قرار داده شد. برای تشخیص بهتر فرکانس‌های ارتعاش قائم و پیچشی از یکدیگر در مرحله پردازش، نگاشت های ثبت شدهٔ قرینه (نسبت به محور پل) یک بار با هم جمع شده و یک بار نیز از هم کسر شده‌اند. این عملیات برای همه دسته‌های تفکیک شده نگاشت ها انجام گرفته است. در رکوردهای به دست آمده از حاصل جمع دو رکورد، فرکانس‌های طبیعی خمشی پل برجسته تر می‌شوند و اثر فرکانس‌های پیچشی کمتر خواهد شد. در حالی که در رکوردهای به دست آمده از حاصل تفاضل دو رکورد فرکانس‌های پیچشی تقویت شده و اثر فرکانس های خمشی کاهش پیدا خواهد کرد.

پس از انجام تحلیل ذکر شده، فرکانس های طبیعی و نسبت های میرایی پل استخراج شد که نتایج آن در جدول(۲) ارائه شده است.

## نتیجه گیری

در این مقاله دو روش جستار قله و شناسایی زیر فضای تصادفی بررسی شدند. در ادامه مشخصات و ویژگی‌های نرم افزار گرافیکی نوشته شده در محیط MATLAB که با استفاده از دو روش فوق و بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیطی پارامترهای مودال سازه‌ها را ارائه می‌کند، بیان شد. با استفاده از این نرم افزار می‌توان تمام مراحل شناسایی سیستم از وارد کردن داده‌ها، فیلتر کردن آنها، شناسایی سیستم و در نهایت نشان دادن پارامترهای مودال به دست آمده را در یک محیط گرافیکی و به راحتی انجام داد. در نهایت با کمک این نرم افزار و استفاده از داده‌های ارتعاش محیطی به دست آمده از آزمایش دینامیکی انجام شده روی پل قوسی فلزی بابلسر، پارامترهای مودال این پل شناسایی و استخراج شدند. بر این اساس ۸ فرکانس طبیعی پل و میرایی‌های متناظر آن که با استفاده از دو روش جستار قله و شناسایی زیرفضای تصادفی به دست آمدند، ارائه شدند.



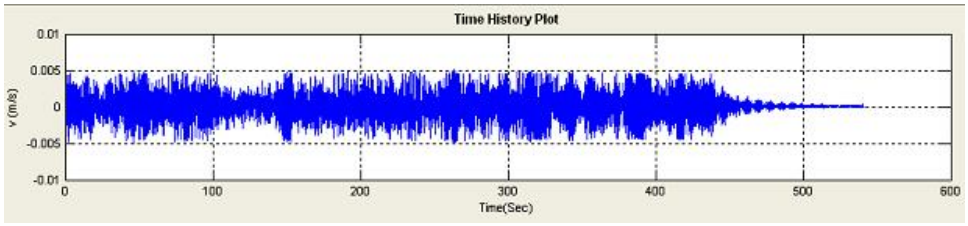

**شکل۷: محل نقاط اندازه گیری بر روی عرشه پل.**

**جدول۱: ایستگاه‌های اندازه‌گیری در هر چیدمان.**

| چیدمان | ایستگاه‌های ثابت | ایستگاه‌های متحرک |
|---|---|---|
| **1** | 2 , 10, 7, 15 | 1 , 9 , 8 , 16 |
| **2** | 2 , 10, 7, 15 | 3 , 11 , 6 , 14 |
| **3** | 2 , 10 , 7 , 15 | 4 , 12 , 5 , 13 |

www.SID.ir

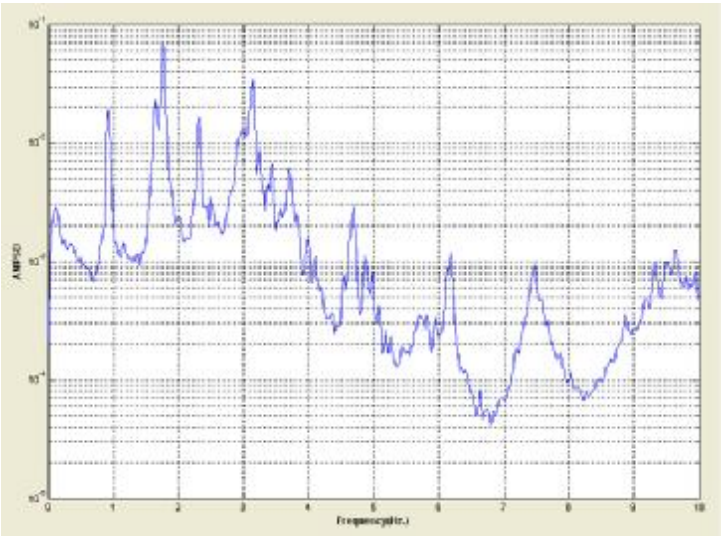
Archive of SID


**شکل۸: داده‌های اندازه گیری شده برای نقطه ۳ در حوزه زمان و فرکانس – در چیدمان دوم و در جهت قائم.**

**جدول ۲: فرکانس‌های شناسایی شده پل قوسی فلزی بابلسر.**

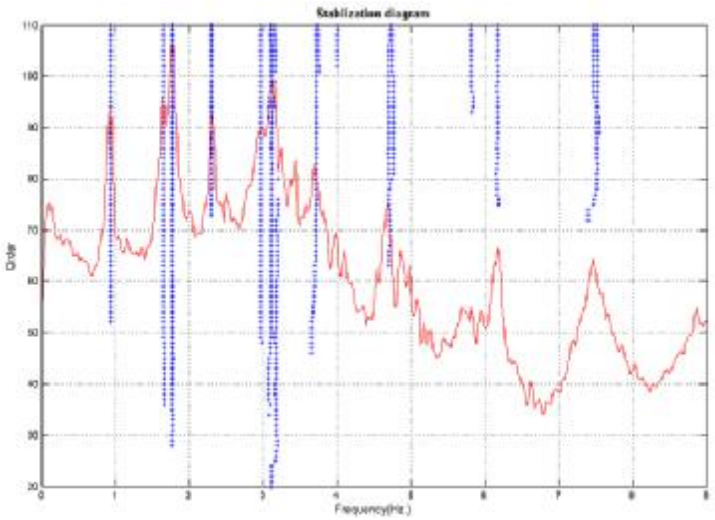
| | | شناسایی زیر فضای تصادفی | |
|---|---|---|---|
| مود | جستار قله | فرکانس (هرتز) | میرایی(٪) |
| مود اول خمشی | 0.928 | 0.928 | 0.63 |
| مود اول پیچشی | 1.636 | 1.652 | 0.75 |
| مود دوم خمشی | 1.758 | 1.763 | 0.60 |
| مود دوم پیچشی | 2.319 | 2.303 | 1.71 |
| مود سوم خمشی | 2.979 | 2.964 | 1.26 |
| مود چهارم خمشی | 3.125 | 3.114 | 1.00 |
| مود سوم پیچشی | 3.687 | 3.715 | 0.73 |
| مود چهارم پیچشی | 4.058 | 4.021 | 0.87 |



**شکل۹: نمودار ANPSD برای داده‌های جهت قائم در پل قوسی فلزی بابلسر.**

www.SID.ir

Archive of SID


**شکل۱۰: دیاگرام پایداری به دست آمده با استفاده از روش SSI برای داده‌های جهت قائم پل قوسی فلزی بابلسر.**

## مراجع


1 - Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the User,* Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

2 - Peeters, B., De Roeck, G. L., Hermans and Watures, T. (1998). "Comparison of system identification method using operational data of bridge test." *In Proceeding of ISMA 23, the International Confrence on Noise and Vibration Engineering,* K.U.Leuvan , Bleguim.

3 - Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (1993). *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. 2nd edition*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

4 - Felber A. J. (1993). *Development of hybrid bridge evaluation system*, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

5 - Yadegari, J. and Bahar, O. (2007). MS.c Thesis, *IIEES.*

6 - Yadegari, J. and Bahar, O. (2007). "Development a GUI for matlab." *In Proceedings of the SEE5.*

7 - Peeters, B., Ren, Wei-Xin. and De Roeck, G: (2000). "Benchmark study on system identification through ambient vibration measurements." *Proceedings of IMAC 18, the International Modal Analysis Conference*, PP. 1106-1112, San Antonio , Texas, USA, February.

8 - Peeters, B. and De Roeck, G. (1999). "Reference based stochastic subspace identification in civil engineering." *In Proceedings of the 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems,* PP. 639-648, Swansea, UK.

9 - Van Overshcee, P. and Bart De Moor. (1996). *Subspace Identification for Linear Systems*, Kluwer Academic Publishers.

10 - Wei-Xin, R. and Zhou-Hong, Z. (2003). *Output-only Modal Parameter Identification of Civil Engineering Structures*, Department of Civil Engineering, Fuzhou University, China.


www.SID.ir