

مقایسه‌ی روش‌های مختلف شناسایی سیستم با به‌کارگیری نگاشت‌های حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی مدل $\frac{1}{p}$ یک ساختمان فولادی ۴ طبقه با اتصالات خورجینی

محمد داودی (استادیار)

مسعود محمودآبادی (استادیار)

مسعود حسان (کارشناس ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

در این نوشتار برای ارزیابی دقت روش‌های مختلف شناسایی سیستم، آزمایش ارتعاش محیطی بر روی مدل $\frac{1}{p}$ یک ساختمان فولادی ۴ طبقه با اتصالات خورجینی با استفاده از ۱۰ عدد دستگاه لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ی انجام شد. مشخصات دینامیکی مدل شامل بسامدها، اشکال مدی و میرایی‌های مدی با استفاده از روش‌های چهار طیفی، مک‌وری، جستار قله و زیرفضای تصادفی به‌دست آمد و با نتایج مدل عددی مقایسه شد. در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با وجود عدم اختلاف قابل‌توجه در مقادیر بسامدهای مدی به‌دست‌آمده از چهار روش، مقادیر میرایی مدی با روش‌های زیرفضای تصادفی و چهارطیفی دقیق‌تر برآورد می‌شوند و با استفاده از روش چهار طیفی و مک‌وری، اشکال مدی چهار مد اول ارتعاشی با دقت بالاتری به‌دست می‌آید. بدیهی است تعمیم نتایج فوق به دیگر سازه‌ها نیازمند مطالعات بیشتر است.

واژگان کلیدی: آزمایش ارتعاش محیطی، شناسایی سیستم، روش چهار طیفی، روش مک‌وری، روش جستار قله، روش زیرفضای تصادفی، اتصال خورجینی.

مقدمه

سطح زمین در شهر کوشیرو به‌دست آمد و نشان داده شد که این روش در موارد فوق و برای انواع سازه‌های دیگر کاربرد دارد. همچنین با استفاده از همین روش خصوصیات دینامیکی دو پل معلق نیوپرت و ویلیام پرستون در امریکا به‌دست آمد و با محاسبه‌ی تابع چگالی طیفی متقاطع^۱ اشکال مدی برای این دو پل به‌دست آمد.^[۲]

همچنین در سال ۱۹۸۰ روشی برای شناسایی پارامترهای مدی ساختمان‌ها ارائه شد که بر پایه‌ی کمینه‌سازی اختلاف بین پاسخ مدل و رکورد ثبت‌شده در سازه در حوزه‌ی زمان استوار بود.^[۳] سپس در همان سال از روشی مشابه در حوزه‌ی بسامد برای شناسایی پارامترهای مدی استفاده شد.^[۴] روش جستار قله PP^۲ نیز در سال ۱۹۹۳ به‌منزله‌ی ساده‌ترین روش در به‌دست آوردن پارامترهای مودال یک سازه با استفاده از داده‌های ارتعاش محیطی ارائه شد.^[۵]

در سال ۱۳۸۲ با استفاده از روش چهار طیفی، بسامدها و اشکال مدی سدهای مارون و مسجد سلیمان با استفاده از آزمایش‌های ارتعاش اجباری، محیطی و انفجارهای مختلف سایتی به‌دست آمد و نشان داده شد که روش چهار طیفی به دلیل برخورداری از تکنیک‌های جدید ایجادشده در علم پردازش سیگنال، می‌تواند

آزمایش ارتعاشی درجا روشی مناسب و عملی برای تعیین دقیق خصوصیات دینامیکی سازه‌هاست. مشکلات موجود در آزمایش سازه‌های با مقیاس واقعی سبب انجام تلاش‌های زیاد برای دسترسی به روشی ساده و اقتصادی برای تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها شده‌اند که در نهایت روش آزمایش‌های محیطی به‌منزله‌ی روشی مناسب و کارآمد در این زمینه شناخته شده است. در این روش، ارتعاشات ناشی از عوامل طبیعی همچون لرزه‌های بسیارخفیف زمین، باد و ترافیک سبب ارتعاش سازه در مدهای مختلف آن می‌شود. با اندازه‌گیری پاسخ سازه در برابر این ارتعاش‌ها و تحلیل آن‌ها می‌توان خصوصیات دینامیکی سازه را بدون نیاز به وقوع زمین‌لرزه و یا نصب لرزاننده‌های بزرگ و قوی روی سازه به‌دست آورد.

در سال ۱۹۶۵ در پژوهشی با تبدیل فوریه‌ی تابع خودهمبستگی خروجی سیستم، تابع چگالی طیفی که به تابع انتقال سیستم و به چگالی طیفی ورودی آن بستگی دارد به‌دست آمد.^[۱] آن‌گاه با استفاده از نقاط بیشینه‌ی منحنی چگالی طیفی، بسامدهای طبیعی چند ساختمان صنعتی در شهر توکیو و نقاط مختلف

در حکم روشی مناسب در استخراج مشخصات دینامیکی سدهای خاکی استفاده شود.^[۶] در ادامه‌ی مطالعه‌های انجام‌شده در زمینه‌ی روش چهار طیفی، ارتعاشات محیطی یک ساختمان ۵ طبقه با روش مذکور مطالعه شد و توانایی بالای این روش در شناسایی مشخصات دینامیکی سازه‌ها با مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های پیشرفته‌ی پردازش سیگنال نشان داده شده است.^[۷]

همچنین روش زیرفضای تصادفی SSI^۲ که در حوزه‌ی زمان، مشخصات دینامیکی سازه‌ها را با دقت مناسبی استخراج می‌کند، در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان ۱۵ طبقه‌ی لویس استفاده شده است.^[۸]

در این پژوهش برای مقایسه‌ی دقت روش‌های مختلف شناسایی سیستم به‌کاررفته در آزمایش ارتعاش محیطی سازه‌ها، مدل ۱/۲ یک ساختمان فولادی ۴ طبقه با اتصالات خورجینی، با نصب تعداد مناسبی دستگاه‌های لرزه‌نگار در طبقات مختلف آن، تحت آزمایش ارتعاش محیطی قرار گرفت و رکوردهای ثبت‌شده با استفاده از چهار روش مختلف پردازش سیگنال که در مرور ادبیات فنی به آن‌ها اشاره شد، تحلیل شد. همچنین مدل عددی سازه‌ی مذکور تهیه شد تا ضمن مقایسه‌ی پارامترهای دینامیکی به‌دست آمده از تمامی روش‌های مورد استفاده در تحقیق، دقت روش‌های مختلف پردازش سیگنال ارزیابی شود و قابلیت‌ها و نقاط ضعف و قوت آن‌ها مشخص شود.

مبانی نظری روش‌های شناسایی مورد بررسی

در یک نگاه کلی به چهار روش شناسایی سیستم استفاده‌شده در نوشتار حاضر می‌توان گفت که دو روش چهار طیفی و جستار قله براساس استفاده از خواص طیف‌های مختلف سیگنال‌های ثبت‌شده، مشخصات دینامیکی سیستم را استخراج می‌کند، درحالی‌که دو روش مکوری و SSI بر مبنای یک الگوریتم ریاضی پایه‌گذاری شده‌اند. در ادامه، مبانی نظری چهار روش مذکور به اجمال شرح داده می‌شود.

روش شناسایی مکوری

روش مکوری، روش شناسایی در حوزه‌ی بسامد، با فرض ورودی مشخص است که از آن برای شناسایی پارامترهای دینامیکی ساختمان‌ها به کمک رکوردهای ثبت‌شده از زمین لرزه‌های طبیعی استفاده شده است.^[۹] فرض اولیه‌ی استفاده از این روش در شناسایی پارامترهای دینامیکی ساختمان‌ها با استفاده از رکوردهای ارتعاشات محیطی، مشخص‌بودن ورودی سیستم (تحریکات ثبت‌شده در پای مدل) است. مکوری با تعریف تابع ۱ و با عنوان معیار عدم انطباق هم‌پایه‌شده^۴ از آن نام برد و با کمیته‌سازی این تابع، پارامترهای مدی چند ساختمان که شتاب آن‌ها در زمان زلزله‌ی ۱۹۷۱ سان فرناندو اندازه‌گیری شده بود را شناسایی کرد.

$$E = \frac{\sum_{\ell_{\min}}^{\ell_{\max}} |A(\ell\Delta\omega, T) - \bar{A}_P(\ell\Delta\omega, T)|}{\sum_{\ell_{\min}}^{\ell_{\max}} |A(\ell\Delta\omega, T)|^2} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، A تبدیل فوریه‌ی محدود گسسته‌ی شتاب اندازه‌گیری‌شده در نقطه‌ی p از سازه؛ \bar{A}_P تبدیل فوریه‌ی شتاب مدل در همان نقطه، با فرض رفتار خطی و میرایی متناسب است که با رابطه‌ی ۲ نشان داده شده است؛ و $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$ است و

در آن T مدت زمان شتاب‌نگاشت است.

$$\bar{A}_P(\omega, T) = \left[1 + \sum_{r=1}^N \frac{\omega^2 (b_r - \omega^2) - i\omega^2 a_r}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} c_{pr} \right] X(\omega, T) + \sum_{r=1}^N \frac{b_r (b_r - \omega^2) + \omega^2 a_r^2 - i\omega^2 a_r}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} v_{pr} + \sum_{r=1}^N \frac{a_r b_r \omega^2 + i\omega b_r (b_r - \omega^2)}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} d_{pr} \quad (2)$$

$$c_{pr} = \phi_{pr}^T \frac{\phi_r^T M r}{\phi_r^T M \phi_r} \quad (3)$$

$$a_r = 2\xi_r \omega_r$$

$$b_r = \omega_r^2 \quad (4)$$

که در آن، $X(\omega, T)$ تبدیل فوریه‌ی شتاب اندازه‌گیری‌شده در پایه‌ی سازه است. ϕ_r شکل مود r ام سازه است که مقدار آن در نقطه‌ی p از سازه‌ی p است. پارامترهای $v_{pr} = \dot{x}_{pr}(T) - \dot{x}_{pr}(0)$ و $d_{pr} = x_{pr}(T) - x_{pr}(0)$ نیز شرایط اولیه و انتهایی غیرصفر سرعت و تغییرمکان را در پاسخ شتاب سازه لحاظ می‌کند. شناسایی پارامترهای مدی a_r, b_r, c_{pr}, v_{pr} و d_{pr} به‌نحوی انجام می‌شود که معیار عدم‌انطباق همپایه‌شده، تابع تعریف‌شده توسط رابطه‌ی ۱، کمینه‌ی مقدار خود را داشته باشد. ذکر این نکته ضروری است که هرگاه مقدار معیار عدم‌انطباق همپایه‌شده کمتر از ۰/۱ باشد نتایج شناسایی عالی تلقی می‌شود، هرگاه این مقدار بین ۰/۱ تا ۰/۵ باشد نتایج شناسایی قابل قبول است و هرگاه معیار عدم‌انطباق همپایه‌شده بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد نتایج شناسایی مردود تلقی می‌شود.^[۹] الگوریتم شناسایی و جزئیات کار در منابع آمده است.^[۴]

روش شناسایی چهار طیفی

قدرت روش چهار طیفی در استفاده‌ی هم‌زمان از خاصیت چهار طیف است: ۱) توان‌نگاشت ثبت‌شده در نقاط مختلف سازه؛ ۲) چگالی توان متقاطع هر نقطه به نقطه‌ی مرجع؛ ۳) ارتباط؛ ۴) فاز متقاطع آن‌ها در حالتی که محرک ورودی در دسترس نیست.^[۶] با استفاده از این روش و الگوریتم ارائه‌شده در مطالب ذیل، بسامدهای طبیعی سیستم به‌راحتی از سایر قله‌های موجود در طیف چگالی توان که می‌تواند به محرک‌های ورودی سیستم ارتباط داشته باشد، متمایز می‌شوند.

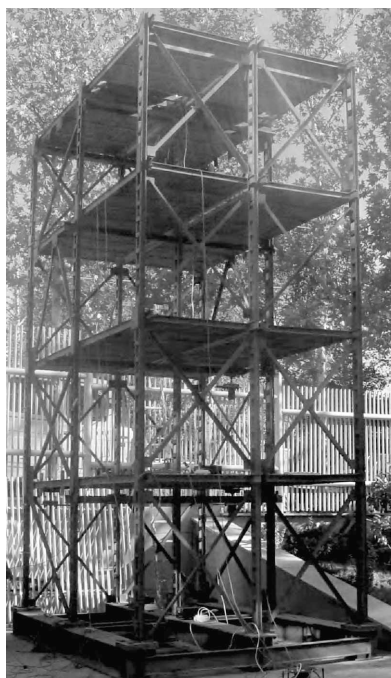
محاسبه‌ی بسامدهای طبیعی

برای استفاده از روش میانگین‌گیری طیفی، نگاشت زمانی تصحیح‌شده به بلوک‌های کوچک تجزیه شد. بدین منظور برای کاهش هم‌زمان خطاهای پیشا و انحراف، بهترین تعداد متوسط‌گیری و تعداد نقاط هم‌پوشانی برای پنجره‌ی استفاده‌شده همانند پنجره‌ی هینگ^۵ به‌دست آمد. دامنه‌ی طیف PSD (رابطه‌ی ۵) کلیه‌ی بلوک‌ها به‌دست آمد و با استفاده از روش ولج^۶، طیف هموارشده محاسبه شد. با روش متوسط‌گیری ولج و براساس بهترین مقادیر به‌دست آمده برای تعداد نقاط متوسط‌گیری و تعداد نقاط هم‌پوشانی (براساس پنجره‌ی انتخابی)، دامنه و فاز چگالی طیفی متقاطع^۷ (رابطه‌ی ۶) و همچنین دامنه‌ی طیف ارتباط^۸ (رابطه‌ی ۹) کلیه‌ی نقاط نسبت به نقطه‌ی مرجع به‌دست آمد. قله‌هایی از طیف PSD به منزله‌ی کاندید بسامدهای مدی انتخاب شدند که در بسامدهای مذکور اولاً طیف دامنه‌ی CPS نیز دارای قله بود، ثانیاً دامنه‌ی طیف ارتباط، مقادیری بزرگ (نزدیک واحد) داشتند و ثالثاً طیف فاز متقاطع آن‌ها (رابطه‌ی ۸) دارای مقادیر نزدیک صفر یا ۱۸۰ درجه بود. از این

شرح آزمایش

مدل مورد آزمایش در مقیاس ۱/۵ و با مساحت کل ۳۵/۵۲ مترمربع در چهار طبقه به ارتفاع ۶ متر و با پلان مستطیلی به ابعاد ۲/۴ × ۳/۷ متر است. پلان ساختمان در جهت عرضی دارای دو دهانه ۱/۲۰ متری و در جهت طولی دارای دو دهانه ۱/۸۵ متری است. همچنین هر طبقه از مدل دارای ارتفاع ۱/۵ متر است. تیرهای خورجینی در جهت طول پلان قرار داده شده‌اند و تیرچه‌ها موازی با عرض پلان هستند. این مدل بدون دیوار و سقف آن از نوع طاق ضربی است. تیرهای اصلی که به صورت خورجینی از کنار ستون‌ها عبور می‌کنند، از پروفیل IPE ۸۰ است و برای ستون‌ها از دو عدد ناودانی (۲ UNP ۵۰ × ۲۵) که با تنمه به یکدیگر متصل شده‌اند، استفاده شده است. در جهت عرضی مدل مذکور دارای بادبندهای ضرب‌دری از نوع پروفیل نبشی ۴ × ۴ × L۴۰ در چهار دهانه است که با جوش به سازه وصل شده‌اند. در جهت طولی نیز کلاً در دو دهانه، بادبند از نوع نبشی ۴ × ۴ × L۴۰ وجود دارد که با پیچ به سازه متصل شده‌اند. پوشش کف به صورت طاق ضربی با آجرهای سفالی و ملات گچ و خاک اجرا شده است. برای ایجاد دیاگرام صلب طبقات، آرماتورهای با قطر ۱۲ میلی‌متر به صورت ضرب‌دری بر روی کف طبقات نصب شدند. در شکل ۱ نمای کلی از سازه‌ی مذکور نشان داده شده است و در شکل ۲ نحوه‌ی اتصال تیرهای خورجینی به ستون‌ها رسم شده است.

برای ثبت رکوردهای ارتعاش محیطی سازه در این آزمایش از ده عدد سنسور سه مؤلفه‌ی استفاده شد که در هر طبقه از سازه دو سنسور، در دو انتهای طول پلان و دو سنسور نیز در دو انتهای طول شاسی (دو طرف پلان) برای ثبت ارتعاشات ورودی به‌کار گرفته شد. آرایش و محل قرارگیری سنسورها در شکل‌های ۳ تا ۵ ملاحظه می‌شود. سنسورهای مذکور به مدت ۲۴ ساعت با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه ارتعاشات مدل را ثبت کردند و در مدت رکوردگیری به دستگاه GPS برای هم‌زمانی رکوردها متصل بودند. این تذکر لازم است که با مقیاسه‌ی طیف فوریه،



شکل ۱. نمای مدل مورد آزمایش.

زمانی یک سیستم به دست می‌آید. پیوسته‌ی زمانی بودن این مدل بدین معنی است 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 پیوسته‌ی زمانی را به صورت معادله‌ی ۱۵، به فرم گسسته‌ی زمانی تبدیل کرد:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \quad (15)$$

در معادله‌ی ۱۵، $x_k = x(k\Delta t)$ بردار حالت گسسته‌ی زمانی و $A = e^{(A_C \Delta t)}$ ماتریس سیستم در حالت گسسته‌ی زمانی است. همچنین $B = [A - I] A_C^{-1} B_C$ ماتریس ورودی گسسته است. معادله‌ی ۱۵، یک مدل فضای حالت گسسته‌ی زمانی از سیستم دینامیکی را بیان می‌کند.

در عمل همواره عدم قطعیت‌هایی شامل نوفه‌های اندازه‌گیری و محاسباتی وجود دارد. نوفه‌ی محاسباتی به علت خطاهای مدل‌سازی و نوفه‌ی اندازه‌گیری به علت خطاهای حس‌گر و خطاهای محیطی به وجود می‌آید. با در نظر گرفتن نوفه‌ی محاسباتی w_k و نوفه‌ی اندازه‌گیری v_k ، معادله‌ی ۱۵ را می‌توان به صورت معادله‌ی ۱۶ اصلاح کرد:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v_k \end{aligned} \quad (16)$$

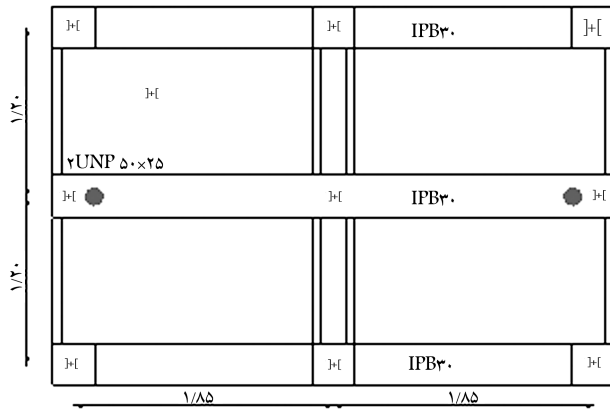
از آنجا که دستیابی به خصوصیات صحیح نوفه‌های اندازه‌گیری و محاسباتی به طور صحیح دشوار است، از برخی فرضیات ساده‌کننده استفاده می‌کنیم. فرض می‌شود که هر دو نوفه‌ی اندازه‌گیری و محاسباتی، نوفه‌ی سفید با میانگین صفر هستند و ماتریس‌های کواریانس آن‌ها به صورت رابطه‌ی ۱۷ تعریف می‌شود:

$$E \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T + v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (17)$$

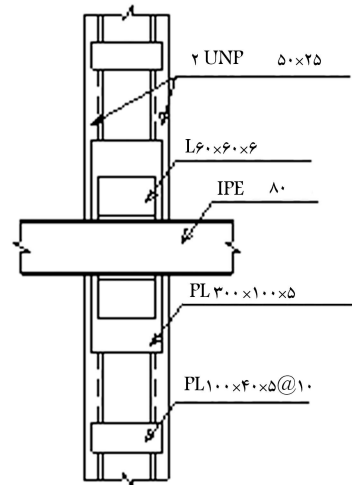
در معادله‌ی ۱۷، $E[\dots]$ امید ریاضی و δ_{pq} دلتای کرونکر است و فرض می‌شود که w_k و v_k از لحاظ آماری مستقل از یکدیگر هستند. در آزمایش ارتعاش محیطی ورودی ناشناخته است در نتیجه با حذف u_k در معادله‌ی ۱۶ معادله‌ی ۱۸ استخراج می‌شود: [۱۱]

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (18)$$

محرک ورودی در معادله‌ی ۱۸، با جملات نوفه w_k و v_k مدل می‌شود. در صورتی که محرک ورودی نوفه سفید نباشد بسامدهای غالب آن می‌تواند دقت محاسبات را کاهش دهد و به صورت قطب‌های ماتریس سیستم A ظاهر شوند. شناسایی سیستم از طریق آزمایش‌های ارتعاش محیطی در حوزه‌ی زمان براساس معادله‌ی ۱۸ انجام می‌گیرد. چندین روش برای اجرای شناسایی سیستم با توجه به معادله‌ی ۱۸ وجود دارد. روش شناسایی زیرفضای تصادفی، ماتریس‌های فضای حالت را با استفاده از ابزار قدرتمند ریاضی از طریق تجزیه‌ی مقادیر تکین یا روش حداقل مربعات به دست می‌آورد. بعد از محاسبه‌ی ماتریس‌های حالت پارامترهای مودال با استفاده از تجزیه‌ی مقادیر ویژه این ماتریس‌ها به دست می‌آیند. در همه‌ی روش‌ها از طریق آزمایش‌های ارتعاش محیطی به علت ناشناخته بودن ورودی یک مقیاس نرمال‌کننده برای شکل‌های مودی شناخته شده وجود ندارد؛ به عبارت دیگر نرمال کردن اشکال مودی نسبت به جرم ممکن نیست.

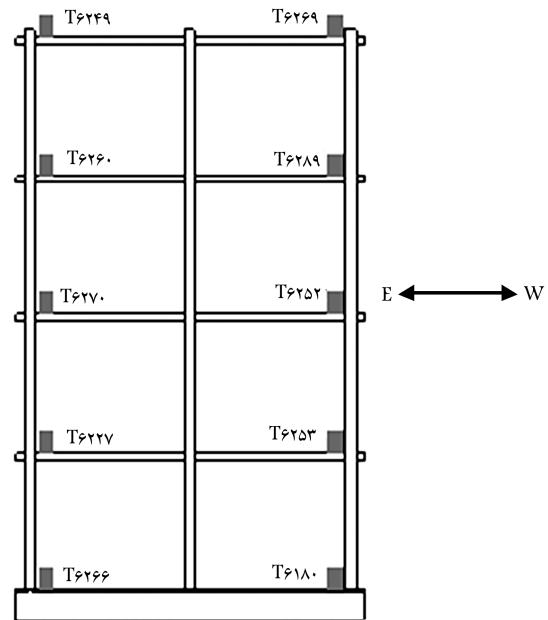


شکل ۵. محل استقرار حس گرها بر روی شاسی.



شکل ۶. اتصال تیرهای خورجینی به ستون.

رکورد مجموع و رکورد تفاضل مؤلفه‌های شمالی - جنوبی دو سنسور واقع در هر طبقه، می‌توان مدهای ارتعاشی جانبی جهت شمالی - جنوبی را از مدهای ارتعاشی پیچشی سازه تفکیک کرد. در زمان رکوردگیری، پیچ‌های یکی از دو انتهای بادبندهای راستای شرقی - غربی باز شد تا سختی آن‌ها وارد کار نشود. حذف بادبند برای یکسان‌سازی سختی سازه با شرایط آزمایش ارتعاش اجباری بود که پیش از این بر روی مدل مذکور انجام شده بود.



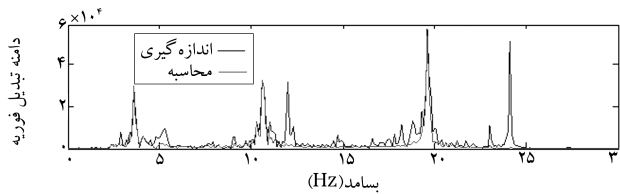
شکل ۷. آرایش حس گرها در طبقات.

نتایج روش‌های شناسایی مورد بررسی در آزمایش

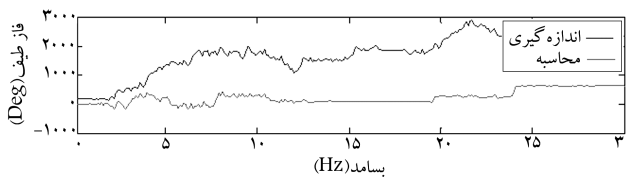
انجام شده

نتایج روش شناسایی مک وری

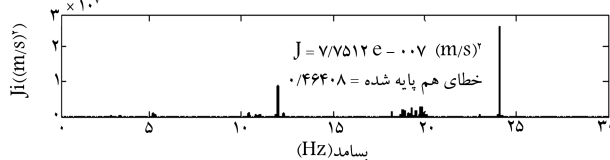
در شکل ۶ برای نمونه، وضعیت انطباق مدل با رکورد واقعی ثبت شده در حوزه بسامد در طبقه‌ی چهارم برای راستای شرقی - غربی ملاحظه می‌شود. این تذکر لازم



الف) مقایسه‌ی دامنه تبدیل فوریه‌ی شتاب مطلق مدل محاسباتی با اندازه‌گیری؛

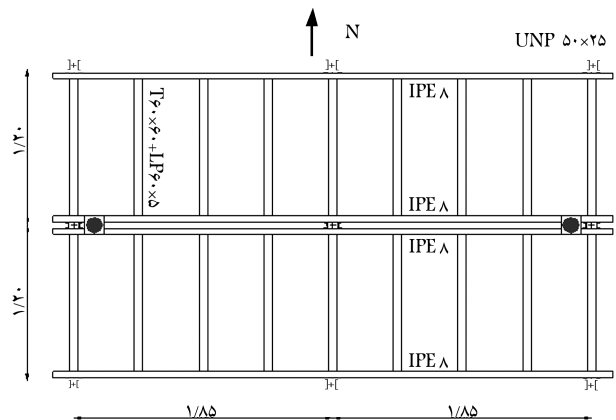


ب) مقایسه‌ی فاز میانگین شتاب مدل محاسباتی با اندازه‌گیری.



ج) نمودار معیار عدم انطباق حاصل از محاسبات و آزمایش.

شکل ۶. وضعیت انطباق مدل عددی با رکورد واقعی اندازه‌گیری شده در تراز طبقه‌ی چهارم در جهت شرقی - غربی.



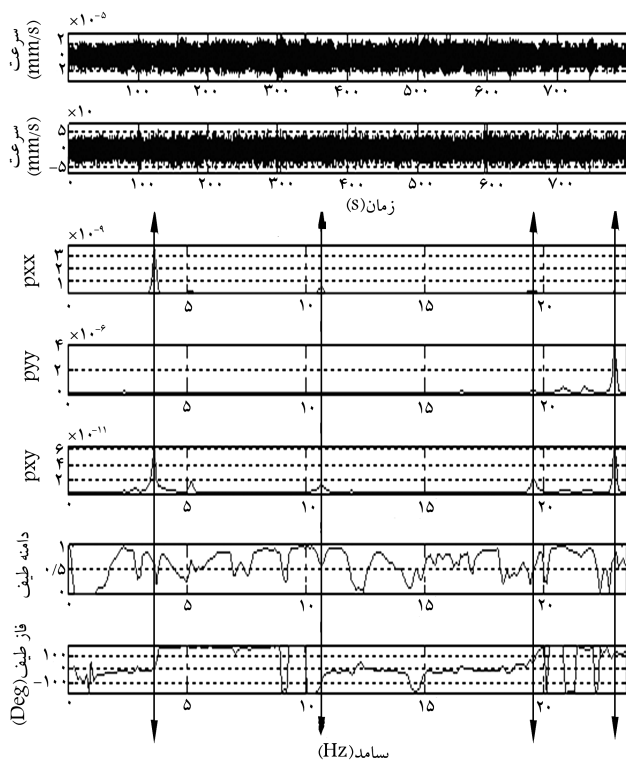
شکل ۹. محل استقرار حس گرها در هر طبقه.

جدول ۱. نتایج شناسایی سه مود اول ارتعاشی جهت شرقی - غربی در تمامی نقاط برداشت (پشت بام و طبقات) با استفاده از روش مک وری.

محل ثبت رکورد	شماره‌ی مد ارتعاشی	بسامد (Hz)	میرایی (%)	ضریب مشارکت مدی	معیار عدم انطباق همپایه شده (N.e)
طبقه‌ی چهارم	۱	۳٫۶۷۵	۲٫۲۱۰	۱٫۵۵۱	۰٫۴۶
	۲	۱۰٫۶۲۹	۰٫۳۴۳	-۰٫۳۲۸	۰٫۴۶
	۳	۱۹٫۶۳۳	۰٫۰۳۸	۰٫۰۵۳	۰٫۴۶
طبقه‌ی سوم	۱	۳٫۶۹۳	۱٫۳۴۳	۰٫۹۱۴	۰٫۴۸
	۲	۱۰٫۶۳۶	۰٫۱۳۶	۰٫۱۱۰	۰٫۴۸
	۳	۱۹٫۶۴۳	-۰٫۰۲۲	-۰٫۰۵۱	۰٫۴۸
طبقه‌ی دوم	۱	۳٫۶۶۴	۳٫۴۴۳	۰٫۶۲۴	۰٫۳۲
	۲	۱۰٫۶۲۳	۰٫۳۲۵	۰٫۳۹۷	۰٫۳۲
	۳	۱۹٫۴۵۹	۰٫۰۱۸	-۰٫۰۰۲	۰٫۳۲
طبقه‌ی اول	۱	۳٫۶۰۰	۰٫۲۰۱	۰٫۲۲۸	۰٫۴۰
	۲	۱۰٫۶۱۹	۰٫۳۵۸	۰٫۴۷۸	۰٫۴۰
	۳	۱۹٫۶۳۰	۰٫۱۰۷	۰٫۱۴۰	۰٫۴۰

جدول ۲. مقایسه‌ی بسامدهای شناسایی شده در آزمایش ارتعاش محیطی با استفاده از چهار روش پردازش سیگنال، مدل عددی و آزمایش ارتعاش اجباری.

جهت	شماره‌ی مود	روش مک وری	روش چهار طیفی	روش PP	روش SSI	مدل عددی	تست ارتعاش اجباری
شرقی - غربی	۱	۳٫۶۶۰	۳٫۶۱۷	۳٫۶۳۸	۳٫۶۳۵	۳٫۶۱۵	۲٫۲۴
	۲	۱۰٫۶۳۰	۱۰٫۶۴۰	۱۰٫۶۲۰	۱۰٫۶۳۳	۱۱٫۱۸۶	۷٫۹۴
	۳	۱۹٫۵۹۰	۱۹٫۶۳۰	۱۹٫۵۸۰	۱۹٫۵۶۸	۱۹٫۰۹۸	۱۶٫۱۰
	۴	-	۲۲٫۹۵۰	۲۲٫۹۹۸	۲۴٫۰۶۹	۲۶٫۳۰۸	-



شکل ۷. شرح تصویری روش چهار طیفی، برای ارتعاشات جهت شرقی - غربی تراز طبقه‌ی چهارم مدل. از بالا به پایین به ترتیب: تاریخچه‌ی زمانی سرعت x و y ، دامنه‌ی طیف توان x و y ، دامنه‌ی طیف توان متقاطع، دامنه‌ی طیف ارتباط و فاز طیف متقاطع.

است که در این مرحله از شناسایی رکورد مؤلفه‌ی شرقی - غربی حسگر 618° مستقر بر روی شاسی به منزله‌ی ورودی و میانگین رکورد مؤلفه‌های شرقی - غربی حسگرهای مستقر در طبقه‌ی چهارم به منزله‌ی خروجی سیستم فرض شده است. در این شکل:

منحنی اول: مقایسه‌ی دامنه‌ی تبدیل فوریه‌ی شتاب مطلق اندازه‌گیری شده در سازه و شتاب مدل فرضی؛

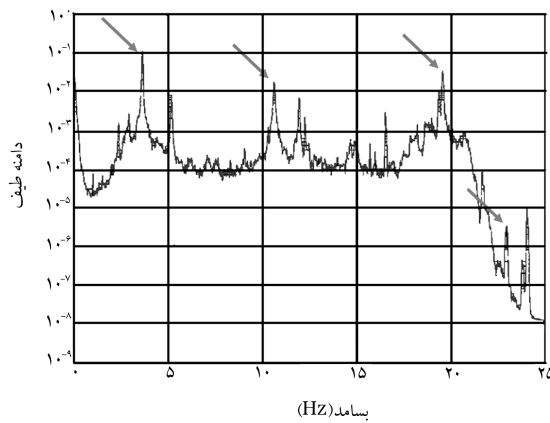
منحنی دوم: مقایسه‌ی فاز تجمعی تبدیل فوریه‌ی شتاب مطلق اندازه‌گیری شده در سازه و شتاب مدل فرضی؛

منحنی سوم: عناصر معیار عدم انطباق در بسامدهای گسسته‌ی مختلف به همراه معیار عدم انطباق کل، z و معیار عدم انطباق همپایه شده هستند. این نمودارها مربوط به تحلیل 1000 نقطه از رکوردها، معادل 10 ثانیه از نگاشت ثبت شده هستند که به طور هم‌زمان در طبقات مختلف و شاسی مدل ثبت شده‌اند. با توجه به شکل ۷، میزان هم‌گرایی دامنه‌ی تبدیل فوریه‌ی شتاب مطلق اندازه‌گیری شده در سازه و شتاب مدل فرضی در طبقه‌ی چهارم برای بسامدهای 3.66 ، 10.63 و 19.59 ملاحظه می‌شود. شایان ذکر است قله‌هایی که در آن‌ها هم‌گرایی حاصل نشده است مربوط به بسامدهای ارتعاشی در جهت مخالف و یا نویزهای موجود در محرک ورودی سیستم هستند.

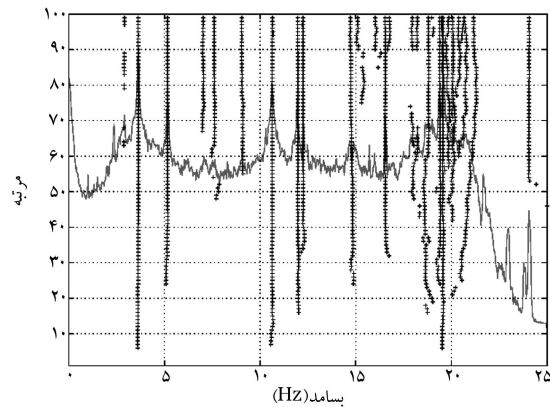
در جدول ۱، نتایج شناسایی پارامترهای مدی برای سه مد اول انتقالی جهت شرقی - غربی (راستای اتصالات خورجینی) در طبقات مختلف آورده شده است. شایان ذکر است در این روش همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای هر نقطه‌ی برداشت در سازه، مقادیری برای بسامدهای ارتعاشی و میرایی ساختمان به دست می‌آید که میانگین تمام این مقادیر، مقدار نهایی پارامترهای دینامیکی سازه هستند که در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود. همچنین از مقادیر به دست آمده ضرایب مشارکت

جدول ۳. درصد میرایی‌های شناسایی شده از روش‌های مک وری، چهار طیفی، SSI و آزمایش ارتعاش اجباری در مدل.

جهت	شماره‌ی مود	روش مک وری	روش چهار طیفی	روش SSI	تست ارتعاش اجباری
شرقی- غربی	۱	۱٫۸۰	۰٫۳۵۹	۰٫۵۵۱	۰٫۶۲
	۲	۰٫۲۹	۰٫۴۹۴	۰٫۴۸۰	۰٫۸۴
	۳	۰٫۰۴	۰٫۱۳۴	۰٫۲۴۴	۰٫۵۱
	۴	-	۰٫۱۰۴	۰٫۱۳۹	-



شکل ۸. طیف ANPSD حاصل از روش جستار قله برای ارتعاشات راستای شرقی- غربی مدل.



شکل ۹. دیاگرام پایداری حاصل از روش SSI برای ارتعاشات راستای شرقی- غربی مدل.

علامت + مشخص شده است، قطب‌های پایدار سیستم هستند که برای مرتبه‌های مختلف ترسیم شده‌اند. همچنین نمودار ANPSD در پس‌زمینه برای نشان‌دادن هماهنگی بین قطب‌های پایدار روش SSI و قله‌های طیف به‌دست‌آمده برای ارتعاشات جهت شرقی- غربی آورده شده است. نتایج روش SSI برای شناسایی مدل $\frac{1}{2}$ در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود. جزئیات روش SSI در مرجع ۱۱ آمده است.

نتایج حاصل از مدل رایانه‌یی

در ادامه‌ی کار، مدل رایانه‌یی از سازه‌ی مذکور تهیه و اتصالات خورجینی به‌صورت فنرهای پیچشی در این مدل رایانه‌یی در نظر گرفته شدند. سپس با تغییر سختی پیچشی فنرها مدل کالیبره شد، به‌طوری‌که بسامد اصلی مدل رایانه‌یی بر بسامد اصلی اندازه‌گیری‌شده‌ی سازه منطبق شد (با در نظر گرفتن سختی پیچشی برابر با ۳۵ تن‌متر بر رادیان برای اتصالات خورجینی، بسامد اصلی مدل رایانه‌یی بر بسامد اصلی اندازه‌گیری‌شده‌ی سازه منطبق شد). همچنین شکل مدهای ارتعاشی مدل رایانه‌یی و شکل مدهای اندازه‌گیری‌شده‌ی سازه با یکدیگر مقایسه شدند. لازم به ذکر است که برای مدل‌کردن سازه‌ی مذکور از نرم‌افزار SAP2000 Ver. 11 استفاده شده است. در شکل ۱۰، مقدار سختی در نظر گرفته‌شده برای اتصالات خورجینی مشاهده می‌شود.

مدی در طبقات مختلف، برای به‌دست آوردن اشکال مدی استفاده شده است. در جدول ۱، مقدار میرایی منفی مد سوم، در طبقه‌ی سوم می‌تواند به علت فرضیات اولیه‌ی روش مک وری باشد که ورودی را معلوم در نظر می‌گیرد و اثر سایر محرک‌ها، همچون باد در نظر گرفته نمی‌شود.

نتایج روش شناسایی چهار طیفی

در شکل ۷، نمونه‌یی از نتایج استفاده از روش چهار طیفی بین نگاشت طبقه‌ی چهارم و تراز شاسی برای راستای شرقی- غربی ملاحظه می‌شود. این تذکر لازم است که برای شناسایی از ۱۵ دقیقه‌ی مشترک از نگاشت‌های ثبت‌شده در نقطه‌ی مینا (شاسی مدل) و طبقات آن، استفاده شده است. در شکل ۷، منحنی اول میانگین مؤلفه‌ی شرقی- غربی نگاشت سرعت- زمان دو حس‌گر واقع بر روی طبقه‌ی چهارم (T6249, T6269) است که معرف نوسانات شرقی- غربی طبقه‌ی مذکور است. منحنی دوم مؤلفه‌ی شرقی- غربی نگاشت سرعت- زمان حس‌گر واقع بر روی شاسی (T6180) است که معرف نوسانات شرقی- غربی نقطه‌ی مینا است. با توجه به شکل مذکور و نتایج محاسبات چهار طیفی در مابقی نقاط، بسامدهای ۳٫۶۲، ۱۰٫۶۴، ۱۹٫۶۳ و ۲۲٫۹۵ هرتز به‌منزله‌ی بسامدهای مدی کاندید شدند تا در نهایت با رسم اشکال مدی، مقادیر کاندیدشده قطعی شوند.

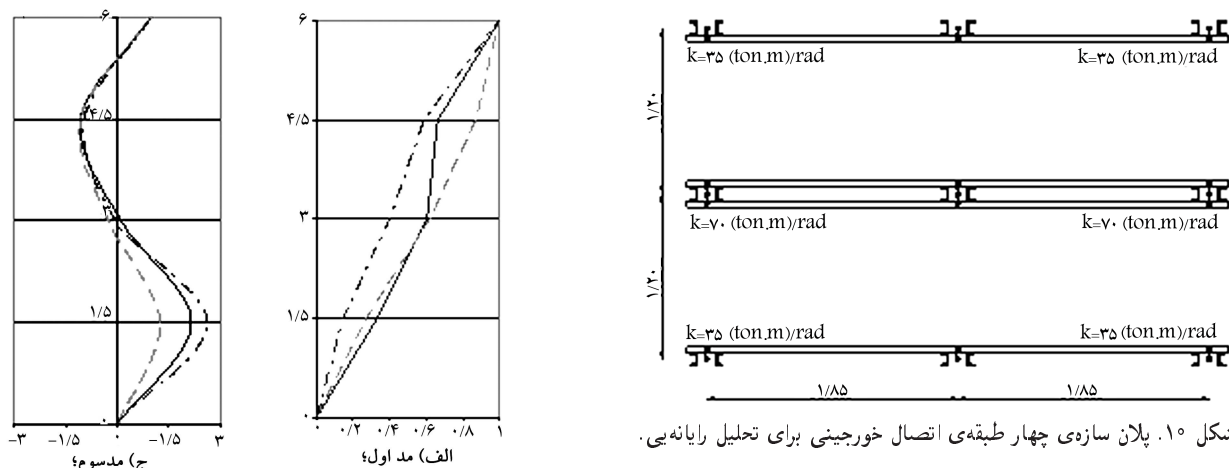
بعد از قطعی‌کردن بسامدها و اشکال مدی، مقادیر میرایی‌های مدی با استفاده از روش نیم‌توان محاسبه شد که نتایج حاصله برای بسامدهای ارتعاشی و میرایی مدی در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

نتایج روش شناسایی جستار قله

در شکل ۸، نمودار میانگین نرمال‌شده‌ی چگالی‌های طیفی توان حاصل از روش جستار قله برای ارتعاشات جهت شرقی- غربی (راستای اتصالات خورجینی) نشان داده شده است که بسامدهای شناسایی‌شده‌ی حاصل از آن در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، بسامدهای ۳٫۶۳۸، ۱۰٫۶۲۰، ۱۹٫۵۸۰ و ۲۲٫۹۹۸ هرتز به‌منزله‌ی بسامدهای طبیعی ارتعاشی سیستم کاندید شدند و سپس با استفاده از فرضیات به‌کار رفته در روش چهار طیفی، تخمین در نظر گرفته‌شده قطعی شد.

نتایج روش شناسایی زیر فضای تصادفی

در شکل ۹، دیاگرام پایداری که با استفاده از روش SSI برای ارتعاشات راستای شرقی- غربی مدل به‌دست‌آمده، رسم شده است. در این دیاگرام نقاطی که با



شکل ۱۰. پلان سازی چهار طبقه‌ی اتصال خورجینی برای تحلیل رایانه‌ی.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های به کاررفته برای

شناسایی پارامترهای دینامیکی مدل ۱

جدول‌های ۲ و ۳ حاوی نتایج به دست آمده برای بسامدهای ارتعاشی و میرایی ۴ مود اول ارتعاشی راستای شرقی-غربی (اتصالات خورجینی) سازی مدل ۱ هستند که با استفاده از رکوردهای ارتعاش محیطی و تحلیل رایانه‌ی به کمک روش‌های شناسایی به کاررفته در این تحقیق به دست آمده‌اند و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول‌ها، همچنین بسامدها و میرایی مدی شناسایی شده از آزمایش ارتعاش اجباری برای مقایسه آورده شده است.^[۱۲] این تذکر لازم است که وضعیت سختی سازه در دو آزمایش ارتعاش محیطی و اجباری یکسان و فقط تفاوت در جرم شیکر افزوده شده به سیستم بوده است. در شکل ۱۱، همچنین چهار مد اول ارتعاشی سازه که از آزمایش ارتعاش محیطی و تحلیل رایانه‌ی به دست آمده‌اند با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

با توجه به جدول ۲، ملاحظه می‌شود که مقادیر بسامدهای حاصله از روش‌های مختلف شناسایی به کاررفته در تحقیق دارای مقادیر نزدیک به هم هستند و می‌توان قابلیت آن‌ها را در تعیین بسامدهای ارتعاشی تقریباً یکسان دانست. همچنین با توجه به نتایج مدل عددی حاصله برای چهار مد اول ارتعاشی سیستم، تطابق خوبی ملاحظه می‌شود. شایان ذکر است کاهش بسامدهای حاصل از آزمایش ارتعاش اجباری نسبت به روش ارتعاش محیطی در جدول ۲، به استقرار دو دستگاه لرزاننده به وزن ۲ تن در تراز طبقه‌ی چهارم مربوط می‌شود.

همچنین با توجه به جدول ۳، ملاحظه می‌شود که اولاً مقادیر میرایی حاصل از روش‌های مختلف، عمدتاً با افزایش بسامد ارتعاشی دارای سیر نزولی هستند. ثانیاً: میرایی حاصل از روش مک‌وری نسبت به سایر روش‌ها دارای مقادیر بسیار متفاوتی است که این تفاوت احتمالاً به علت فرض اولیه‌ی مورد استفاده در این روش است که ورودی سیستم را فقط ارتعاشات موجود در پای سازه در نظر می‌گیرد و نقش عوامل ورودی دیگری همچون باد، در این روش در نظر گرفته نمی‌شود.

لازم به ذکر است که پس از استخراج لیست بسامدهای مدی کاندید برای اطمینان از درستی بسامدهای ارتعاشی کاندید شده می‌بایست شکل مد مربوطه رسم شود تا انطباق آن با اشکال مدی شناخته شده، مشاهده شود. لذا در شکل ۱۱، اشکال مدی چهار مد اول ارتعاشی سیستم به دست آمده از روش‌های مورد بررسی رسم شده است که نتایج حاصل با اشکال مدی شناخته شده‌ی سازی چهار طبقه منطبق بوده‌اند.

شکل ۱۱. مقایسه‌ی اشکال مودی چهار مود اول ارتعاشی راستای شرقی-غربی مدل ۱ (خط مستقیم حاصل از روش چهار طیفی، خط چین حاصل از مدل عددی و خط -نقطه نتایج حاصل از روش مک وری هستند).

هدف از درج مقادیر پارامترهای دینامیکی حاصل از ارتعاش اجباری فقط مقایسه‌ی محدوده‌ی بسامدهای به دست آمده با بسامدهای حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی انجام شده است، با علم به اینکه در اثر افزایش جرم سیستم در اثر وزن شیکرها، مقادیر بسامدهای ارتعاشی سیستم کاهش خواهند یافت که این مطلب در نتیجه‌گیری آن مدنظر قرار گرفته است. همچنین با توجه به اینکه محرک ورودی در آزمایش ارتعاش محیطی، تابع محیط است و به علت ناچیز بودن انرژی ورودی در برخی از بسامدها، قادر به تحریک برخی از مودهای سیستم نیست و از طرف دیگر در آزمایش ارتعاش اجباری در کلیه‌ی بسامدهای مورد علاقه، محرک لازم به سیستم وارد می‌شود و در نتیجه، همه‌ی مودهای ارتعاشی سیستم شناسایی می‌شوند لذا مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی و اجباری، اطمینان به درستی نتایج آزمایش ارتعاش محیطی و شناسایی مودهای مخفی را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی دقت روش‌های مختلف شناسایی سیستم، مشخصات دینامیکی (شامل بسامدها، اشکال مدی و میرایی‌های مدی) مدل ۱ ساختمان چهار طبقه

اسکلت فلزی با استفاده از چهار روش مختلف پردازش شد و نتایج زیر استخراج شد:

- نتایج حاصله نشان می‌دهد بسامدهای ارتعاشی به‌دست آمده از تمامی روش‌های مورد بررسی دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر است؛
 - در روش مک‌وری به علت فرض خطی بودن پاسخ سازه، بسامدهای ارتعاشی و میرایی مودال سیستم باید از محل برداشت پاسخ مستقل باشند. حال آن‌که برای هر نقطه‌ای برداشت یک گروه از پارامترهای متفاوت حاصل می‌شود. این تفاوت در مورد بسامد، بسیار جزئی و قابل اغماض است، در صورتی‌که مقادیر حاصله برای میرایی با پراکندگی بسیار ملاحظه می‌شود؛
 - تئوری و الگوریتم دو روش چهار طیفی و جستار قله برای تعیین درصد میرایی و اشکال مودی، مانند یکدیگر است و تفاوت آن‌ها فقط در تعیین بسامدهای ارتعاشی است به طوری که در روش جستار قله از میانگین نرمال‌شده‌ی تابع چگالی طیفی تمامی حس‌گرها برای تعیین بسامدهای ارتعاشی استفاده می‌شود ولی در روش چهار طیفی برای تعیین بسامدهای ارتعاشی از خاصیت چهار طیف: (۱) توان نگاشت ثبت‌شده در نقاط مختلف سازه، (۲) چگالی توان متقاطع هر نقطه به نقطه‌ی مرجع، (۳) ارتباط و (۴) فاز متقاطع آن‌ها به صورت هم‌زمان استفاده می‌شود و نهایتاً با رسم اشکال مدی متناظر با بسامدهای ارتعاشی در مورد آن‌ها به قطعیت می‌رسیم؛
 - بسامدهای شناسایی‌شده در آزمایش ارتعاش محیطی تفاوت قابل‌توجهی با بسامدهای شناسایی‌شده از آزمایش ارتعاش اجباری دارد. علت این تفاوت می‌تواند وجود لرزاننده‌ی سنگین روی طبقه‌ی چهارم مدل در آزمایش ارتعاش
- اجباری باشد که باعث کمتر شدن بسامدها در حالت آزمایش ارتعاش اجباری به حالت آزمایش ارتعاش محیطی شده است.
- همچنین محاسبات میرایی انجام‌شده با روش‌های مختلف پردازش نشان می‌دهد که:
- مقادیر میرایی حاصل از روش‌های مختلف، عمدتاً با افزایش بسامد ارتعاشی دارای سیر نزولی هستند؛
 - میرایی حاصل از روش مک‌وری به سایر روش‌ها مقادیر بسیار متفاوتی دارد که این تفاوت احتمالاً به علت فرض اولیه‌ی تحلیل با استفاده از این روش باشد که ورودی سیستم را فقط ارتعاشات موجود در پای سازه در نظر می‌گیرد و نقش عوامل ورودی دیگری همچون باد، در این روش در نظر گرفته نمی‌شود؛
 - علت اختلاف نسبتاً زیاد میرایی‌های به‌دست آمده از روش‌های چهار طیفی، SSI و تست ارتعاش اجباری می‌تواند ناشی از تغییر در ماهیت روش‌ها و مدل مورد آزمایش و یا ناشی از مکانیزم پیچیده‌ی میرایی باشد که علی‌رغم پیچیدگی زیاد آن، در دینامیک سازه‌ها برای سادگی کار، میرایی از نوع چسبندگی و متناسب با سرعت در نظر گرفته می‌شود.
- در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با وجود عدم اختلاف قابل‌توجه در مقادیر بسامدهای مودی به‌دست آمده از چهار روش، روش‌های زیرفضای تصادفی و چهار طیفی قادر به برآورد دقیق‌تر مقادیر میرایی مدی هستند. همچنین با استفاده از روش چهار طیفی و مک وری، اشکال مدی چهار مد اول ارتعاشی با دقت بالاتری برآورد می‌شود. این تذکر لازم است که تعمیم نتایج فوق به دیگر سازه‌ها نیازمند انجام آزمایش‌های مختلف بر روی سازه‌های متنوع و پردازش نگاشت‌های ثبت‌شده با استفاده از روش‌های مذکور است.

پانویس

1. cross spectral density
2. peak picking
3. stochastic subspace identification
4. normalized error
5. Hanning
6. welch method
7. cross power spectra
8. coherence spectra

منابع

1. Kawasumi, H. and Shima, F. "Some application of a correlator to engineering problem", *Proc. of the 3rd World Conf. on EQ. Eng.*, New Zealand (1965).
2. Hart, G.C.; Mclamore, V.R. and Stubbs, I.R. "Ambient vibration of two suspension bridge", *J. Str. Div., ASCE.*, **97**(10), pp. 2567-2582 (1971).
3. Beck, J. and Jennings, P.C. "Structural identification using linear models and earthquake records", *Earthquake engineering and structural dynamics*, **8**, pp. 145-160 (1980).
4. Mcverry, G.H. "Structural identification in frequency domain from earthquake records", *Earthquake engineering and structural dynamics.*, **8**, pp 161-180 (1980).
5. Felber, A.J. "Development of hybrid bridge evaluation system", *PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada* (1993).
6. Davoodi, M. "Dynamic characteristic evaluation of embankment dams by forced and ambient vibration tests", *Ph.D. thesis, International Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, I.R. Iran (2003).
7. Davoodi, M.; Amel sakhi, M. and Khandan Bakavoli, M. "Using advanced signal processing techniques on ambient vibration records of a structure", *International Symposium on Advances in Earthquake & structural Engineering*, Isparta-Antalya, Turkey, (2007).
8. Skolnik, D.; Lei, Y.; Yu, E. and Wallace., W. "Identification, model updating, and response prediction of an instrumented 15-story steel-frame building", *Earthquake Spectra*, **22**(3), pp. 781-802 (2006).

9. Arici, Y. and Mosalam, K.M. "System identification of instrumented bridge system", *Earthquake Engineering and structural dynamics*, **32**, pp. 999-1020 (2003).
10. Bendat, A.S. and Pirsol, A.G. "Engineering application of correlation and spectral analysis", *Wiley: New York* (1984).
11. Yadgari, J. "Modal identification of systems with output alone; Babolsar bridge case study", *Ms. Thesis (in Persian)*, *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, I.R. Iran* (2007).
12. Ghafoori Ashtiani, M.; Kazem, H. and Tive M. "Dynamic test on a 1/2 scaled 4 story steel structure with Khorjini connections", *Research Report, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, I.R. Iran* (1998).