Archive of SID
علوم و مهندسی زلزله
سال ششم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۰۸
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۷

ارائه‌ی روشی برای شناسایی ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سازه‌های برشی با استفاده از داده‌های خروجی

رسول خدایاری
دانشجوی دکترای سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

امید بهار (نویسنده مسئول)
استادیار پژوهشکده سازه و نویسنده مسئول، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

محسن غفوری آشتیانی
استاد پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،
omidbahar@iiees.ac.ir

چکیده

امروزه روش‌های شناسایی سیستم‌ها به سبب دامنه وسیع کاربرد در مباحث پایش سلامت و تشخیص خرابی سازه‌ها جایگاه ویژه‌ای در مهندسی عمران یافته است. از این میان، به علت محدودیت‌هایی که به لحاظ تحریک سازه‌های حقیقی بزرگ‌مقیاس وجود دارد، مهندسان سازه بیشتر به سمت روش‌های شناسایی بر اساس داده‌های خروجی سوق پیدا نموده‌اند. در این مقاله روشی بر اساس شناسایی زیرفضای تصادفی در حوزه زمان جهت شناسایی کلیه‌ی ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سازه‌های برشی شامل جرم، سختی و میرایی در شرایط کار با داده‌های آلوده به نوفه‌ی بالا پیشنهاد شده است. روش حاضر بر یافتن تحقق کمینه ماتریس سیستم به فرم کلاسیک از میان بی‌نهایت ماتریس سیستم قابل شناسایی به روش شناسایی زیر فضای تصادفی بر اساس تئوری تحقق تکیه دارد و در کنار قابلیت‌ها، محدودیت‌هایی نیز دارد که عمده این محدودیت‌ها شامل وابسته بودن دقت به دقت روش‌های اولیه و نیز لزوم داشتن وضوح دامنه‌ی پاسخ و طول مدت کافی برای رکوردگیری می‌باشد. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی از دو مدل عددی ۳ و ۵ طبقه بهره گرفته شده است. با توجه به خطای زیر سه درصد برای تمامی حالات، نتایج تحلیل‌های عددی حاکی از صحت و دقت روش شناسایی پیشنهادی حتی در هنگام استفاده از داده‌های آلوده به نوفه‌ی بالا است.

واژگان کلیدی: شناسایی سیستم، ماتریس مشخصات دینامیکی، خروجی تنها، زیر فضای تصادفی، سازه‌های برشی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر پژوهشگران سازه در تلاش بوده‌اند بتوانند مشخصات دینامیکی سازه‌های واقعی را با دقت و صحت مناسبی به دست آورند. از این جهت مسئله‌ی شناسایی سیستم‌ها که اول بار در مکانیک پیشرفته و مهندسی هوا فضا مطرح شده بود، در مهندسی عمران نیز کاربرد گسترده‌ای یافت [۱]. روش‌های شناسایی سیستم‌های سازه‌ای را می‌توان در یک توصیف کلی بیان ریاضی از ویژگی‌های سازه دانست که بتواند به‌درستی تمامی خصوصیات و رفتارهای سازه را مدل نماید. این مدل به‌دست‌آمده باید از چنان دقتی برخوردار باشد که بتواند در مباحث پایش سلامت سازه‌ای به‌خصوص در هنگام ارزیابی رفتار یا عملکرد سازه، یا در هنگام تشخیص آسیب‌های سازه‌ای و تعیین عمر باقیمانده‌ی حقیقی سازه نقش عمده‌ای ایفا نماید. روش‌های شناسایی سیستم‌های سازه‌ای را می‌توان در دو دسته‌ی کلی جای داد: (۱) ارزیابی‌های مبتنی بر آزمایش‌های مخرب، که با نمونه‌گیری یا تخریب‌های کوچک سازه‌ای همراه است، و (۲) ارزیابی‌های مبتنی بر آزمایش‌های غیر مخرب، که بر اساس اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه‌ای طراحی می‌شوند و در بسیاری از موارد تداخلی در عملکرد سیستم سازه‌ای به وجود نمی‌آورند. روش‌های شناسایی که برای ارزیابی‌های غیر مخرب سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، دو رویکرد کلی دارند [۲]. رویکرد اول، مبتنی بر شناسایی پارامترهای مدی از جمله فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل‌های مدی است یا به عبارتی، روش‌های

غیر وابسته به مدل فیزیکی هستند. این دسته از تنوع بسیار زیادی برخوردار است که می‌توان از لحاظ حوزه حل مسائل به نمونه‌هایی از آنها اشاره نمود: روش جستار قله[1] و روش تجزیه در دامنه فرکانسی[2] در حوزه فرکانس، و روش زیرفضای تصادفی[3] در حوزه زمان [۶-۳]. رویکرد دوم، مبتنی بر شناسایی ماتریس‌های مشخصه‌ی دینامیکی سازه است یا به عبارتی روش‌های مبتنی بر فیزیک مدل. شناسایی ماتریس‌های سازه‌ای به سبب دامنه کاربرد در مباحث پایش سلامت و ارزیابی رفتار سازه‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای هستند که در دو حیطه‌ی کلی جای می‌گیرند: (۱) معلوم بودن بارهای ورودی تحریک سازه، (۲) غیرقابل‌اندازه‌گیری بودن بارهای ورودی. برای نمونه، در هنگام معلوم بودن بارهای ورودی می‌توان به فعالیت‌های شاخص زیر اشاره نمود: شناسایی ماتریس‌ها به‌وسیله‌ی پارامترهای مدی توسط یوان و همکاران در سال ۱۹۹۸ [۷]، شناسایی ماتریس‌های سازه‌ای با یک سری از زلزله‌های محدود توسط تاکواکی و ناکامورا در سال ۲۰۰۰ [۸]، و شناسایی ماتریس‌های سازه‌ای تحت اثر تحریکات نقطه‌ای توسط آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۹].

از طرف دیگر، در دهه‌های اخیر روش‌های شناسایی مبتنی بر داده‌های خروجی تنها به سبب عدم نیاز به توقف سرویس‌دهی سازه، عدم نیاز به ابزارهای سنگین تحریک، و عدم وابستگی به نیروهای متخصص برای لرزاندن سازه‌های بزرگ، توجه بیشتری را به خود جلب نموده است. دو و ونگ در سال ۲۰۰۹ [۱۰]، راینیری و فابروچینو در سال ۲۰۱۰ [۱۱]، فاچینی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۴ و نی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۳] با روش‌های مختلف به شناسایی پارامترهای مدی با استفاده از داده‌های خروجی پرداختند. روش شناسایی زیرفضای تصادفی در حوزه زمان بر پایه تئوری تحقق، روش بسیار کارآمدی است که توسط ون اوورشی و دی‌مور در سال ۱۹۹۶ [۲] جهت شناسایی ماتریس‌های سیستم مرتبه اول در فضای حالت ارائه شده است. در سال ۲۰۰۰ پیترز [۱۴] در رساله دکتری خود از روش شناسایی زیرفضای تصادفی برای سازه‌های مهندسی عمران استفاده کرد.

کاتایاما [۱۵] در کتاب خود که در سال ۲۰۰۵ به چاپ رسید، روش‌های زیرفضا را برای شناسایی سیستم به‌صورت کاملاً دقیق بیان نمود. برینکر و اندرسن [۱۶] در سال ۲۰۰۶ تلاش کردند تا مفاهیم ریاضی به‌کار رفته در روش SSI را با زبانی ساده‌تر بیان کنند. در ادامه لاردیز [۱۷] در سال ۲۰۱۷ یک الگوریتم تکرار شونده برای کمینه‌سازی انرژی مدی جهت دستیابی به پارامترهای مدی پیشنهاد داد که توانست با دقت بالایی پارامترهای مدی را در فضای حالت شناسایی نماید.

در این پژوهش روشی کاربردی برای شناسایی مستقیم ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سازه‌های برشی بر مبنای داده‌های خروجی در حوزه زمان با بهره‌گیری از روش شناسایی زیرفضای تصادفی در فضای حالت ارائه شده است. در روش پیشنهادی از داده‌های پاسخ شتاب طبقات که می‌توانند آلوده به نوفه نیز باشند استفاده شده است. برای این داده‌ها، در فضای SSI، بهترین تحقق کمینه‌ی ماتریس سیستم سازه به فرم کلاسیک استخراج شده، که در آن تمامی ماتریس‌های سیستم اعم از جرم، سختی و میرایی حضور دارند. در نهایت با انجام عملیات ریاضی در فضای ماتریسی به‌طور مستقیم ماتریس‌های مورد نظر محاسبه می‌شوند. داده‌های برداشت شده در این تحقیق با فرض رفتار عملکردی سازه یا به عبارت بهتر، برداشت پاسخ ناشی از ارتعاشات محیطی سیستم سازه‌ای انجام شده است. برای ارزیابی صحت و دقت روش پیشنهادی، با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی تحت تحریک شتاب‌نگاشت زلزله طبس، رفتار و نتایج پاسخ‌های دو مدل سازه‌ی شناسایی شده و مدل سازه‌ی حقیقی آسیب‌دیده، با یکدیگر مقایسه شده است. ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از توانمندی روش پیشنهادی حتی در حضور داده‌های برداشت‌شده‌ی آلوده به نوفه‌های بالاست.

در کنار توانمندی‌ها، این‌روش محدودیت‌هایی نیز دارد که می‌توان آنها را در دو گروه کلی جای داد. گروه اول: محدودیت‌های ناشی از دقت روش‌های اولیه از جمله روش شناسایی زیرفضای تصادفی و روش مقیاس‌سازی شکل‌های مدی

برای دستیابی به ماتریس جرم سازه، و گروه دوم: لزوم داشتن وضوح دامنه‌ی پاسخ و طول مدت کافی برای رکوردگیری. در عمل برای دستیابی به مشخصات صحیح از سیستم سازه‌ای، رکوردگیری در سازه می‌بایست دارای دامنه و مدت‌زمان کافی باشد. در غیر این صورت با خطاهای عددی مواجه خواهیم شد. در این تحقیق مدت‌زمان رکوردگیری در مثال‌های تحلیلی ۱۵ دقیقه انتخاب شده است.

۲- شناسایی زیرفضای تصادفی

این روش شناسایی در حوزه زمان با تشکیل ماتریس‌های مختلف هانکل از پاسخ‌های برداشت شده از سازه، که تعدادی از سطر و ستون‌های آن حذف یا جابه‌جا گردیده‌اند، به شناسایی ماتریس‌های حالت در تحقق‌های مختلف می‌پردازد. شناسایی تحقق کمینه طبق تئوری بنیادین تحقق و بر اساس کمینه مرتبه سیستم می‌باشد [۲]. با توجه به اینکه این روش بر مبنای معادلات مرتبه اول دیفرانسیلی در فضای حالت بنا شده است، روابط فضای حالت به‌صورت مختصر در ادامه توضیح داده می‌شود.

چنانچه معادله جنبش دینامیکی یک سیستم چند درجه آزاد با ضرایب نامتغیر با زمان، به فرم (۱)، را در وارون ماتریس جرم ضرب نماییم و ترم بدیهی $\dot z(t) = \dot z(t)$ را به‌عنوان معادله دوم در کنار آن قرار دهیم، به شکل ماتریسی مطابق رابطه (۲) دست می‌یابیم که در آن $x(t) = \begin{Bmatrix} z(t) \\ \dot z(t) \end{Bmatrix}$ بردار حالت از مرتبه n است:

$$M\ddot z(t) + D\dot z(t) + Kz(t) = f(z,t) \qquad (۱)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot z(t) \\ \ddot z(t) \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}k & -M^{-1}D \end{bmatrix}}_{A_c} \underbrace{\begin{Bmatrix} z(t) \\ \dot z(t) \end{Bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{Bmatrix}}_{B_c} u(t) \qquad (۲)$$

در رابطه (۱) عبارت $f(z,t) = B_2u(t)$ جایگزین شده است.
از طرف دیگر ماتریس خروجی سیستم که به‌صورت یک ترکیب خطی از شتاب، سرعت و جابه‌جایی است را با جاگذاری $\ddot z(t)$ از معادله مرتبه دوم دیفرانسیلی حرکت به فرم رابطه (۳) و ساده‌سازی می‌توان به شکل رابطه (۴) نوشت [۲].

$$y(t) = C_a\ddot z(t) + C_v\dot z(t) + C_d z(t) \qquad (۳)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gu(t) \qquad (۴)$$

که در آن $C = [C_d - C_aM^{-1}K \quad C_v - C_aM^{-1}D]$ و $G = C_aM^{-1}B_2u(t)$ است. بنابراین زوج معادله فضای حالت با m ورودی و l خروجی در فضای حالت به شکل روابط زیر ساده می‌گردد:

$$\dot x(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \qquad (۵)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gu(t) \qquad (۶)$$

$\dot x(t)$ چهارتایی A_c از مرتبه‌ی n×n، B_c از مرتبه‌ی n×m، C از مرتبه l×n و G از مرتبه l×n را ماتریس‌های مشخصه در فضای حالت پیوسته زمانی گویند.

با توجه به اینکه ابزارهای اندازه‌گیری به‌صورت گسسته زمانی داده‌برداری می‌نمایند، ضرورت دارد معادلات فضای حالت نیز به فرم گسسته زمانی بازنویسی شوند. از آنجا که در آزمایش‌های محیطی و آزمایش‌های مدی بر اساس داده‌های خروجی تنها، ورودی سیستم ناشناخته یا غیرقابل اندازه‌گیری است، جملات ورودی مشخص از معادلات حذف شده و عبارت‌های تصادفی جایگزین آنها می‌گردند. این عبارت‌های تصادفی نشانگر نوفه محاسباتی و نوفه اندازه‌گیری هستند. نوفه محاسباتی که با عبارت w_k در رابطه (۷) مشخص شده، اغتشاشات محاسباتی مانند تغییر شرایط محیطی از جمله تغییرات دما در حین داده‌برداری، را در بر می‌گیرد. نوفه اندازه‌گیری که با عبارت v_k در رابطه (۸) مشخص شده نیز به‌منظور در نظر گرفتن خطاهای وارد شده در روند اندازه‌گیری مانند اندازه‌گیری‌های محدود یا خطای حسگرها در ثبت مقادیر حقیقی پاسخ به معادلات اضافه می‌گردد. بنابراین زوج معادله فضای حالت تصادفی گسسته زمانی را در شرایط کلی این‌گونه می‌توان تعریف کرد:

$$x_{k+1} = A_d x_k + w_k \qquad (۷)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \qquad (۸)$$

که A_d ماتریس سیستم در فضای گسسته زمانی می‌باشد. هر دو جمله w_k و v_k تقریباً ایستا و مستقل با توزیع یکنواخت با میانگین صفر مطابق رابطه (۹) فرض می‌شوند که در آن δ تابع دلتای دیراک می‌باشد [۲].

$$E\begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = 0\,,\ E\left[\begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} w^T(j) & v^T(t) \end{bmatrix}\right] = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix}\delta(t-j) \qquad (۹)$$

۲-۱- روش حل زیرفضای تصادفی

برای حل زوج معادله فضای حالت در فضای گسسته زمانی تصادفی و به دست آوردن A_d و C مراحل زیر انجام می‌پذیرد:

گام اول- به دست آوردن ماتریس بلوک هنکل از داده‌های خروجی و تقسیم این ماتریس به دو بلوک گذشته و آینده: اگر بردار سطری شده پاسخ به شکل $Y = [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_s]$ باشد که در آن s تعداد پاسخ‌های برداشت شده و هر یک از پاسخ‌های y از مرتبه $l \times 1$ باشند، آنگاه ماتریس بلوک هنکل به شکل زیر خواهد بود:

$$Y_h = \left(\begin{array}{cccc} y_1 & y_2 & \cdots & y_{s-2i+1} \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{s-2i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{s-i} \\ \hline y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{s-i+1} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{s-i+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_s \end{array}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن 2i تعداد سطرهای ماتریس بلوک هنکل است و باید با دقت انتخاب شود. بنابراین ماتریس هنکل دارای s-2i+1 ستون و 2il سطر خواهد بود که در آن تعداد ستون‌ها نیز بایستی به تعداد کافی بزرگ باشد. این امر به معنی ثبت پاسخ تعداد بیشتر درجات آزادی مستقل سازه‌ای است. در مثال‌های حل‌شده در خصوص این موضوع بحث شده و یک پیشنهاد مناسب نیز مطرح گردیده است.

گام دوم- به دست آوردن ماتریس تصویرسازی: طبق تعریف، ماتریس تصویرسازی یک میانگین شرطی از ماتریس بلوک هنکل گذشته و آینده است که به‌طورکلی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$O = E\left(Y_{hf} \middle| Y_{hp}\right) \qquad (۱۱)$$

رابطه فوق را برای فرآیندهای گاوسی مطابق پیشنهاد ون اوورشی [۲] می‌توان به شکل رابطه زیر نیز در نظر گرفت:

$$O = Y_{hf}{Y_{hp}}^T(Y_{hp}{Y_{hp}}^T)^{-1}Y_{hp} \qquad (۱۲)$$

گام سوم- بدست آوردن ماتریس مشاهده‌پذیری از ماتریس تصویرسازی: ماتریس مشاهده‌پذیری به شکل زیر در نظر گرفته شود:

$$\Gamma_s = \begin{bmatrix} C \\ CA_d \\ CA_d^2 \\ \vdots \\ CA_d^{i-1} \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

ماتریس مشاهده‌پذیری به همراه حالت‌های دنباله کالمن، ستون‌های ماتریس تصویرسازی O را تشکیل می‌دهند. بنابراین هر ستون ماتریس مشاهده‌پذیری را می‌توان مطابق رابطه (۱۴) فرض نمود:

$$O_{col} = \Gamma_s x_0 \qquad (۱۴)$$

بنابراین ماتریس کلی تصویرسازی به‌صورت ضرب ماتریس مشاهده‌پذیری در دنباله‌های حالت به‌صورت رابطه (۱۵) می‌باشد.

$$O = \Gamma_s X_0 \qquad (۱۵)$$

که X_0 حالت‌های کالمن در گام زمانی صفر است. اگر ماتریس مشاهده‌پذیری معلوم باشد، تمامی حالت‌ها به‌سادگی از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است، اما در واقع ماتریس مشاهده‌پذیری در دسترس نیست. برای به دست آوردن ماتریس مشاهده‌پذیری از روش تجزیه مقادیر تکین از روابط (۱۶) تا (۱۸) استفاده می‌شود.

$$O = USV^T \qquad (۱۶)$$

$$\hat{\Gamma}_s = US^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۷)$$

$$\hat{X}_0 = S^{1/2}V^T \qquad (۱۸)$$

که ماتریس‌های $\hat{\Gamma}_s$ و $\hat{X}_0$ فقط یک برآورد طی مسئله تجزیه مقادیر تکین بوده و منحصربه‌فرد نیز نمی‌باشند. به‌عبارت‌دیگر تحقق‌های متفاوتی از A_d و C وجود دارند که بر اساس تئوری بنیادین تحقق و قضیه تحقق کمینه، دارای مرتبه سیستم کمینه بوده و یک ماتریس مشاهده‌پذیری تولید می‌نمایند که در رابطه (۱۵) نیز صدق می‌کند.

گام چهارم- محاسبه A_d و C: ماتریس C به‌طور مستقیم و ماتریس A_d با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\underline{\hat{\Gamma}} A_d = \overline{\hat{\Gamma}} \tag{۱۹}$$

که در آن $\underline{\hat{\Gamma}}$ ماتریسی ستونی است که یک بلوک از پایین آن حذف شده، و $\overline{\hat{\Gamma}}$ ماتریسی است که یک بلوک از بالای آن حذف شده باشد.

۲-۲- شناسایی پارامترهای مدی سیستم

با استفاده از روش شناسایی زیر فضای تصادفی و بر اساس تئوری بنیادین تحقق، تحقق‌های متفاوت با توجه به ذات روش‌های حل معکوس به دست می‌آیند که همگی آنها نیز در واقعیت پاسخی برای حل مسئله معکوس محسوب می‌شوند. بردارها و مقادیر ویژه سیستم مرتبه دوم پیوسته زمانی در حالت با میرایی، به‌ترتیب از روابط (۲۰) و (۲۱)، به‌صورت موهومی به دست خواهند آمد.

$$\tilde{\Phi} = C\Psi \tag{۲۰}$$

$$\lambda_j = \frac{\ln(\mu)}{\Delta T} \tag{۲۱}$$

که شکل‌های مدی سیستم بدون میرایی از محاسبه‌ی نرم ماتریس $\tilde{\Phi}$ به دست می‌آیند. مقادیر فرکانس طبیعی و نسبت میرایی زیربحرانی مد jام سیستم، نیز با فرض اینکه λ_j به شکل یک عدد موهومی $\lambda_j = -\zeta_j\omega_j \pm i\omega_j\sqrt{1-\zeta_j^2}$ نمایش داده شود، از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\omega_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \tag{۲۲}$$

$$\zeta_j = \frac{-a_j}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}} \tag{۲۳}$$

۲-۳- انتخاب مرتبه فضای حالت سیستم

برای انتخاب مرتبه فضای حالت، معیار متعارف یافتن پرش قابل‌توجه در نمودارهای ستونی زوایای اصلی در مقایسه با مرتبه‌های مختلف انتخابی سیستم است که توسط ون اوورشی و همکاران پیشنهاد گردیده است [۲]. این معیار تشخیص کاملاً بصری بوده، و گاه اتفاق می‌افتد که پرش‌های مقادیر زوایای اصلی به دفعات تکرار شده یا در برخی موارد محسوس نباشند. این مسئله تشخیص مرتبه حقیقی سیستم را دشوار می‌نماید. لذا در این مقاله برای اطمینان بیشتر، در کنار استفاده از نمودار مقادیر زوایای اصلی، از نمودار ثبات فرکانس در مرتبه‌های مختلف سیستم نیز بهره گرفته شده است. در این حالت، تعداد فرکانس های مدی که در تمام مرتبه‌های سیستم تکرار شده باشند به‌عنوان فرکانس‌های اصلی سازه مشخص شده و به‌تبع آن مرتبه سیستم دو برابر این تعداد درجه آزادی، شناسایی می‌گردد.

۳- روش مستقیم برای شناسایی ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سازه

روش مستقیم پیشنهادی برای شناسایی مستقیم ماتریس‌های سازه‌ای بر روش شناسایی زیرفضای تصادفی استوار است. به‌عبارت‌دیگر دقت آن به‌دقت روش شناسایی زیر فضای تصادفی وابسته است. ایده اصلی در این مقاله، به دست آوردن ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سیستم مرتبه دوم دیفرانسیلی از ماتریس کلاسیک سیستم، ماتریس A_c در رابطه (۲) است. این ماتریس در فرم پیوسته‌ی خود دربرگیرنده‌ی ماتریس‌های مشخصه‌ی سازه‌ای است. در روند تحقق کمینه در روش شناسایی زیرفضای تصادفی، بی‌شمار ماتریس سیستم به فرم گسسته قابل شناسایی است که دارای کمترین مرتبه سیستم بوده و همه A_dها قابل تبدیل به A_c هستند، اما تمامی این تبدیل‌ها فرم کلاسیک سیستم را به دست نمی‌دهند.

برای یافتن فرم مناسب ماتریس گسسته سیستم، A_d، ماتریس‌های μ و Ψ را به‌ترتیب ماتریس قطری مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس A_d مناسب، و مقادیر μ_1 و Ψ_1 مقادیر و بردارهای ویژه‌ی هر ماتریس سیستم شناسایی شده مانند A_{d1} باشند، که همگی این ماتریس‌ها از مرتبه $n\times n$ هستند. با توجه به برابری ماتریس‌های مقادیر ویژه هر دو تحقق و جاگذاری تعریف مقادیر ویژه برای آنها خواهیم داشت:

$$\Psi^{-1}A_d\Psi = {\Psi_1}^{-1}A_{d1}\Psi_1 \tag{۲۴}$$

$$A_d = \Psi{\Psi_1}^{-1}A_{d1}\Psi_1\Psi^{-1} \tag{۲۵}$$

که در آن Ψ مجهول است اما می‌دانیم در هر تحقق، بردارهای ویژه ماتریس سیستم گسسته زمانی با بردارهای ویژه ماتریس سیستم پیوسته زمانی متناظر برابر است، آنگاه رابطه فوق را می‌توان به شکل رابطه (۲۶) بازنویسی نمود.

$$A_d = \widehat{\Phi}{\Psi_1}^{-1}A_{d1}\Psi_1\widehat{\Phi}^{-1} \tag{۲۶}$$

در رابطه فوق تنها $\widehat{\Phi}$ مجهول است که از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس سیستم گسسته زمانی و ماتریس C با استفاده از مرجع [۱۸] از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\widehat{\Phi} = \begin{Bmatrix} C\Psi \\ C\Psi\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_1\Psi_1 \\ C_1\Psi_1\lambda_1 \end{Bmatrix} \tag{۲۷}$$

که در آن λ_1 مقدار ویژه هر ماتریس سیستم پیوسته زمانی شناسایی شده می‌باشد که با مقدار ویژه ماتریس گسسته زمانی متناظر برابر است. با این تبدیل ماتریس سیستم گسسته‌ی مناسب و به‌تبع آن ماتریس سیستم پیوسته‌ی کلاسیک به دست آمده است.

۳-۱- شناسایی مستقیم ماتریس‌های سیستم سازه‌ای

پس از به دست آوردن ماتریس سیستم اصلی در فضای پیوسته زمانی، ماتریس $-M^{-1}k$ در ربع سوم و ماتریس $-M^{-1}D$ در ربع چهارم این ماتریس معلوم خواهد بود. برای تفکیک ماتریس‌های مشخصه دینامیکی کافی است ماتریس جرم سیستم سازه‌ای در اختیار باشد.

ماتریس جرم را می‌توان به دو روش به دست آورد: (۱) با تخمین مناسبی از طریق مدل‌سازی یا روش اجزای محدود، (۲) استفاده از داده‌های آزمایشی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محیطی. با توجه به اینکه در روش‌های بر پایه خروجی تنها به علت مجهول بودن ورودی، شکل‌های مدی به طریقه‌های مختلف نرمال‌سازی می‌شوند، اگر بتوان شکل‌های مدی مستخرج از روش شناسایی زیر فضای تصادفی را به‌وسیله یک ضریب مقیاس به شکل‌های مدی مقیاس شده به جرم تبدیل نمود، ماتریس جرم سیستم نیز قابل محاسبه خواهد بود. در تحلیل‌های عددی بخش ۴ نشان داده شده است که استفاده از ماتریس جرم شناسایی شده به‌جای ماتریس جرم تحلیلی منجر به شناسایی ماتریس‌های دقیق‌تر سازه می‌گردد. هرچند که اختلاف به‌دست‌آمده برای مدل‌های سازه‌ای تحلیل شده در این مقاله خیلی زیاد نیست، اما این امکان وجود دارد که در سازه‌های بزرگ و پیچیده این اختلاف قابل‌توجه گردد. در ادامه به‌صورت مختصر به روش‌های مقیاس‌سازی شکل‌های مدی نسبت به جرم برای دست‌یابی به ماتریس جرم پرداخته شده و در ارزیابی‌های عددی این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۳-۲- شناسایی ماتریس جرم سازه

برای شناسایی ماتریس جرم سازه می‌توان از روش‌های متنوع محاسبه‌ی ضریب مقیاس شکل‌های مدی شناسایی شده‌ی سازه استفاده نمود. در واقع، این‌روش‌ها برای دستیابی به بردارهای شکل مد مقیاس شده به جرم ارائه شده‌اند. در این مقاله، از این ایده که مبتنی بر انجام یک سری آزمایش بر روی سازه‌ی مورد نظر و محاسبه‌ی تغییر در مشخصه‌های دینامیکی آن است، بهره گرفته می‌شود. ایجاد تغییر در مشخصه‌های دینامیکی سازه با ایجاد تغییر در جرم یا سختی به‌صورت مجزا یا هم‌زمان قابل انجام است. پارلو و همکاران در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ [۲۰-۱۹]، آنل و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۵ و ملک جعفریان و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۶ روش‌هایی برای محاسبه‌ی ضریب مقیاس با ایجاد تغییر در مقادیر جرم یا سختی به‌طور مستقل از هم، ارائه نمودند. برای ایجاد تغییر هم‌زمان در هر دو مشخصه‌ی جرم و سختی می‌توان به روش ارائه

شده توسط خطیبی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۲ اشاره نمود.

از میان روش‌های متنوع ارائه شده در این زمینه، روش تغییر جرم به سبب راحتی کاربرد بسیار مورد علاقه پژوهشگران بوده است که روش‌های متعددی برای انجام آن پیشنهاد شده است. در جدول (۱) به مهم‌ترین این روش‌ها اشاره شده است. در تمامی این روش‌ها با استفاده از همان ایده‌ی اولیه پارلو، تلاش شده دقت محاسبات افزایش یابد. موفقیت در محاسبه‌ی ضریب مقیاس مناسب، به میزان دقت در شناسایی تغییرات ایجاد شده در رفتار سازه و محاسبه‌ی پارامترهای مدی آن و نیز دقت روابط محاسباتی روش مورد استفاده، بستگی پیدا می‌کند. برای سادگی محاسبات، مقادیر جرمی به‌صورت متمرکز منظور می‌گردد. مشخص نمودن تعداد، اندازه و محل قرارگیری جرم‌های افزوده در مدل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که در تحلیل‌های عددی نشان داده خواهد شد، خطا در محاسبه ضریب مقیاس در تمامی روش‌ها به‌جز روش پارلو در حد قابل قبول است. لذا در این مقاله از روش برینکر و اندرسن [۲۴] برای محاسبه‌ی ضریب مقیاس استفاده شده است که در ادامه به‌طور مختصر توضیح داده شده است. اگر اندیس صفر بیانگر سازه‌ی اولیه و اندیس یک بیانگر همان سازه باشد که تغییر جرم در آن ایجاد شده، معادله مقادیر ویژه برای این دو حالت به فرم زیر است:

$$M\Phi_{0j}{\omega_{0j}}^2 = K\Phi_{0j} \qquad (۲۸)$$

$$(M + \Delta M)\Phi_{1j}{\omega_{1j}}^2 = K\Phi_{1j} \qquad (۲۹)$$

اگر رابطه شکل مد زام مقیاس شده به جرم برای حالت اولیه به فرم $\overline{\Phi}_{0j} = \alpha_{0j}\Phi_{0j}$ باشد، با ترکیب دو رابطه فوق، رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$M\left(\Phi_{0j}{\omega_{0j}}^2 - \Phi_{1j}{\omega_{1j}}^2\right) - \Delta M\Phi_{1j}{\omega_{1j}}^2 = K\left(\Phi_{0j} - \Phi_{1j}\right) \qquad (۳۰)$$

اگر مقادیر جرم افزوده‌ی طبقات در ماتریس ΔM خیلی بزرگ نباشند می‌توان شکل‌های مدی حالت اولیه و ثانویه را با یکدیگر برابر فرض نمود، یعنی ($\Phi_{0j} = \Phi_{1j} = \Phi_j$). این رابطه، درصورتی‌که توزیع جرم افزوده با نسبت جرم موجود طبقات سازه اعمال گردد، به‌طور کامل برقرار است [۱۹]. با ضرب طرفین در ${\Phi_j}^T$ و با توجه به رابطه حاکم بر شکل‌های مدی مقیاس شده به جرم (${\overline{\Phi}_{0j}}^T M\overline{\Phi}_{0j} = 1$) و رابطه بین شکل‌های مدی مقیاس شده و نشده به جرم برای حالت اولیه ($\overline{\Phi}_{0j} = \alpha_{0j}\Phi_{0j}$) که در آن $\overline{\Phi}_{0j}$ شکل مد زام مقیاس شده به جرم است، می‌توان نوشت:

$$\left({\omega_{0j}}^2 - {\omega_{1j}}^2\right) = {\alpha_{0j}}^2{\Phi_j}^T\Delta M\Phi_j{\omega_{1j}}^2 \qquad (۳۱)$$

از رابطه فوق ضریب α برای هر مد و برای حالت بدون تغییر جرم به دست خواهد آمد.

$$\alpha_{0j} = \sqrt{\frac{({\omega_{0j}}^2-{\omega_{1j}}^2)}{{\omega_{1j}}^2{\Phi_j}^T\Delta M\Phi_j}} \qquad (۳۲)$$

جدول (۱): مقایسه روابط پیشنهادی برای به دست آوردن ضریب مقیاس.

Equation	Author
$\alpha_{0j} = \sqrt{2\frac{(\omega_{0j} - \omega_{1j})}{\omega_{0j}\Phi_{0j}{}^T\Delta M\Phi_{0j}}}$	Parloo [19]
$\alpha_{0j} = \sqrt{\frac{({\omega_{0j}}^2 - {\omega_{1j}}^2)}{{\omega_{1j}}^2\Phi_{0j}{}^T\Delta M\Phi_{0j}}}$	Brincker and Anderson [24]
$\alpha_{0j} = \sqrt{\frac{({\omega_{0j}}^2 - {\omega_{1j}}^2)}{{\omega_{1j}}^2\Phi_{0j}{}^T\Delta M\Phi_{1j}}}$	Aenelle et al. [21]
$\alpha_{0j} = \sqrt{\frac{({\omega_{0j}}^2 - {\omega_{1j}}^2)B_{jj}}{{\omega_{1j}}^2\Phi_{0j}{}^T\Delta M\Phi_{1j}}}$ $B = {\Phi_0}^{-1}\Phi_1$	Bernal [25]

برای به دست آوردن ماتریس جرم از روی شکل‌های مدی مقیاس شده به جرم از رابطه‌ی زیر استفاده می‌گردد:

$$M = (\overline{\Phi}\,\overline{\Phi}^T)^{-1} \qquad (۳۳)$$

۴- ارزیابی تحلیلی روش پیشنهادی

برای نشان دادن کارایی روش مستقیم پیشنهادی، مدل دو سازه ۳ و ۵ طبقه برشی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با فرض ارزیابی ارتعاش محیطی سازه‌ها، نخست پاسخ هر دو سازه تحت لرزش خفیف محیطی، که با ارتعاش نوفه سفید با توزیع نرمال (گاوسی) با میانگین

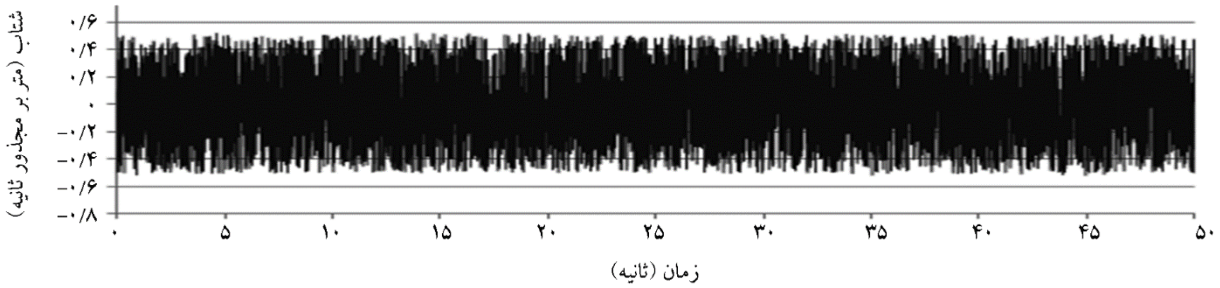
صـفر و انحراف معیار یک مدل شـده اسـت، به مدت ۱۵ دقیقه با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه ثبت شدند. در شکل (۱)، ۵۰ ثانیه اول تحریک محیطی رسـم شـده اسـت. تحلیل‌ها دینامیکی خطی تاریخچه زمانی بوده و در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees انجام پذیرفته اسـت. سـپس نتایج حاصـل از تحلیل به‌عنوان ورودی اندازه‌گیری شـده به نرم‌افزار نوشـته شـده در محیط Matlab داده می‌شـود. مراحل اجرایی این نرم‌افزار به شـرح زیر اسـت: (۱) مشـخصـه‌های مدی سازه توسط روش شناسایی زیرفضـای تصـادفی شـناسـایی می‌شود، (۲) توسط الگوریتم پیشنهادی ماتریس شـناسـایی شـده‌ی سـیستم به فرم کلاسـیک درمی‌آید، (۳) با ماتریس جرم شـناسـایی شده که طی آزمایشی مستقل محاسبه می‌شود، ماتریس‌های مشـخصـه‌ی دینامیکی سـازه اعم از سـختی و میرایی به دسـت می‌آینـد. در انتها نیز رفتار دینامیکی مدل تحلیلی سـازه‌های شـناسـایی شـده تحت زلزله طبس مورد بررسی قرار گرفته و پاسخ‌های آن با پاسخ‌های مدل حقیقی سازه مقایسه شده است.

۴-۱- سازه سه طبقه برشی

سازه‌ی سه طبقه‌ی برشی دارای سه درجه‌ی آزادی انتقالی، با جرم ۲۰، ۱۸ و ۱۶ تن، و سختی ۲۴۰۰۰، ۹۷۵۰ و ۷۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر با اسـتفاده از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees مدل‌سازی شده است. میرایی سازه به‌صورت کلاسیک فرض شـده و از روابط رایلی با نسبت میرایی ۵ درصد برای مدهای اول و سـوم محاسـبه شـده است. پاسخ‌های ثبت شده، شتاب مطلق طبقات سـازه ناشـی از ارتعاشات محیطی زمین، اعمالی در پـای ســازه اســت. از آنجـا کـه در عمـل ثبت داده‌ها با نوفه‌های محیطی و دسـتگاهی همراه است، نتایج ثبت شده به نوفه‌هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصـد دامنه‌ی بیشــینه‌ی شــتاب ثبت شده نیز آلوده شدند.

۴-۱-۱- شناسایی پارامترهای مدی

پارامترهای مدی از طریق روش شـناسایی زیرفضای تصادفی بر اسـاس روابط (۲۰) تا (۲۳) برای داده‌های برداشـت شده برای چهار حالت بدون نوفه و آلوده به نوفه‌های ۲، ۵ و ۱۰ درصـد، به دسـت آمده‌اند که با مقادیر حقیقی سـازه مقایسـه شـده‌اند. نتایج ارزیابی در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل (۱): بخشی از تحریک ورودی نوفه‌ی سفید.

جدول (۲): مقایسه فرکانس و نسبت میرایی مدی سازه شناسایی شده و سازه اجزای محدود.

		اجزای محدود	شناسایی شده بدون نوفه	شناسایی شده با نوفه ۲ درصد	شناسایی شده با نوفه ۵ درصد	شناسایی شده با نوفه ۱۰ درصد
فرکانس rad/sec	مد ۱	1.2559E+01	1.2486E+01	1.2543E+01	1.2543E+01	1.2505E+01
	مد ۲	3.1215E+01	3.1197E+01	3.1303E+01	3.1303E+01	3.1222E+01
	مد ۳	4.4525E+01	4.4402E+01	4.4740E+01	4.4740E+01	4.4450E+01
نسبت میرایی	مد ۱	5.00E-02	5.25E-02	5.24E-02	5.22E-02	5.20E-02
	مد ۲	4.30E-02	4.22E-02	4.22E-02	4.20E-02	4.19E-02
	مد ۳	5.00E-02	4.74E-02	4.74E-02	4.74E-02	4.74E-02

مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد، روش شناسایی زیرفضای تصادفی حتی در بالاترین نسبت نوفه نیز توانسته مقادیر فرکانس‌های مدی را به‌درستی استخراج نماید. البته این دقت در شناسایی، در خصوص مقادیر نسبت میرایی چندان صادق نیست. اما اختلاف مقادیر نسبت میرایی از مقادیر حقیقی آن‌قدر زیاد نیست که در ارزیابی رفتار سازه که بعدتر خواهیم دید، مشکلی وارد نماید. در ادامه، شکل‌های مدی شناسایی شده در حالت‌های مختلف، با شکل‌های مدی به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی سازه‌ی ۳ طبقه مقایسه شده‌اند (شکل ۲). نتایج با دقت بسیار بالایی بر روی یکدیگر منطبق هستند که باز هم نشان از توانمندی روش مورد نظر در تفکیک داده‌های درست از سیگنال‌های حتی با آلودگی بالاست.

به‌منظور مقایسه کمّی شکل‌های مدی نیز می‌توان از معیار اطمینان مدی MAC، تعریف شده در رابطه‌ی (۳۴) استفاده نمود.

$$MAC_{i,j} = \frac{(\Phi_i{}^T\Phi_j)^2}{(\Phi_i{}^T\Phi_i)(\Phi_j{}^T\Phi_j)} \qquad (۳۴)$$

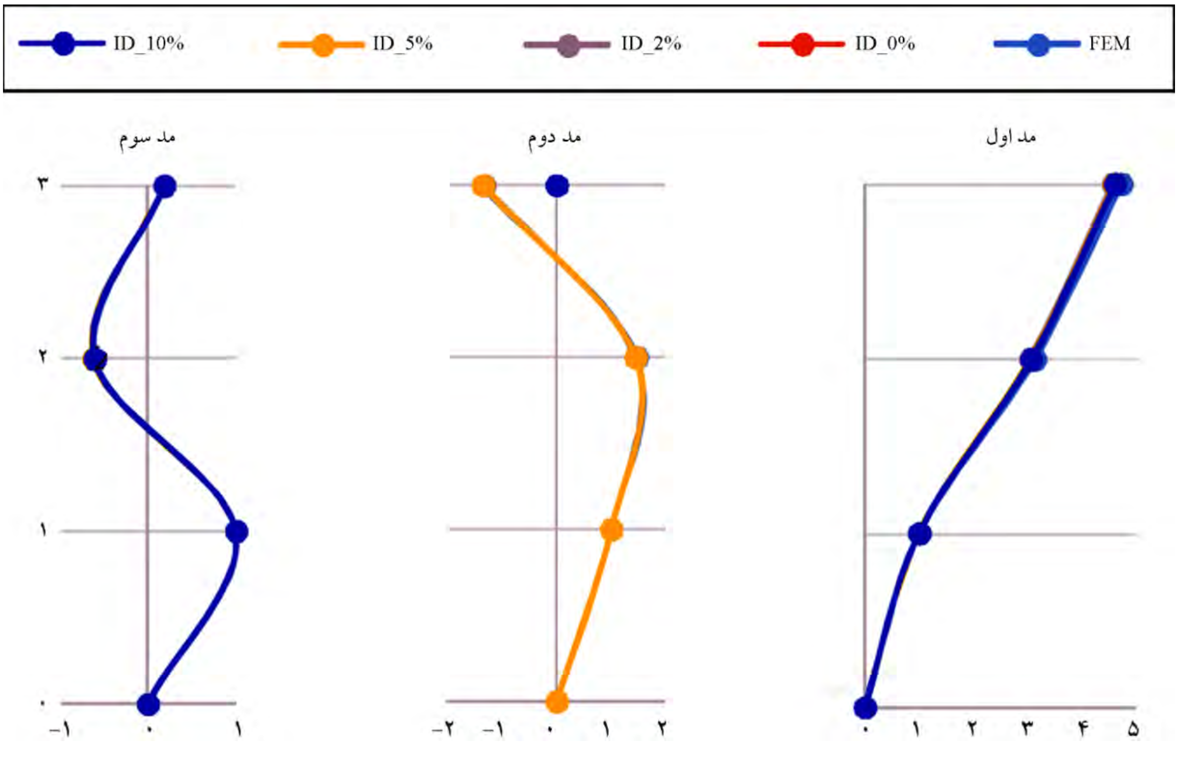
نتایج ارزیابی کمّی مقایسه‌ی شکل‌های مدی در جدول (۳) نشان می‌دهد حتی در بالاترین درصد آلودگی سیگنال پاسخ سازه به نوفه نیز بیشترین خطا در برآورد شکل مد سوم اتفاق افتاده که بسیار اندک است.

جدول (۳): مقایسه کمّی شکل‌های مدی با معیار MAC برای داده‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد.

شماره مد	۱	۲	۳
معیار اطمینان مدی	0.99999	0.99999	0.99995

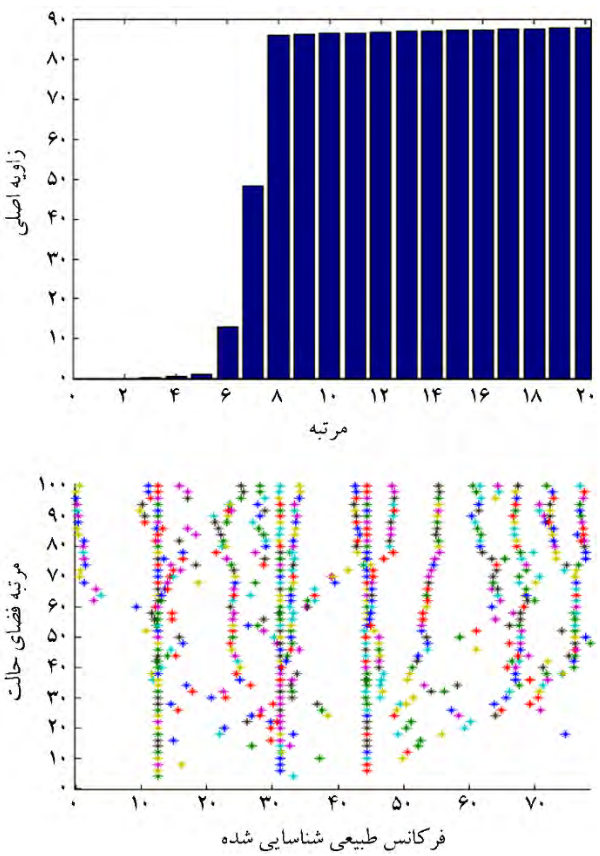
۴-۱-۲- تعیین مرتبه سیستم

همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، برای اطمینان از نتیجه تشخیص مرتبه سیستم، در کنار روش موجود که بر پایه تشخیص مرتبه‌ی سیستم از روی پرش در نمودارهای زوایای اصلی می‌باشد، شکل (۳) بالا، از نمودارهای ثبات، مطابق شکل (۳) پایین، نیز استفاده شده است؛ بدین ترتیب که تغییر فرکانس طبیعی شناسایی شده با روش شناسایی زیرفضای تصادفی در مرتبه سیستم‌های متفاوت



شکل (۲): مقایسه شکل‌های مدی سازه‌ی شناسایی شده و سازه‌ی مدل‌سازی شده.

برای سازه مد نظر رسم شده است و بر اساس اینکه یک تعداد از فرکانس‌ها در تمامی مرتبه‌ها تکرار می‌شوند، درجه آزادی سیستم تشخیص داده می‌شود. با توجه به شکل (۳)، مرتبه‌ی ۶ که دو برابر فرکانس‌های شناسایی شده‌اند مورد تائید قرار می‌گیرد.



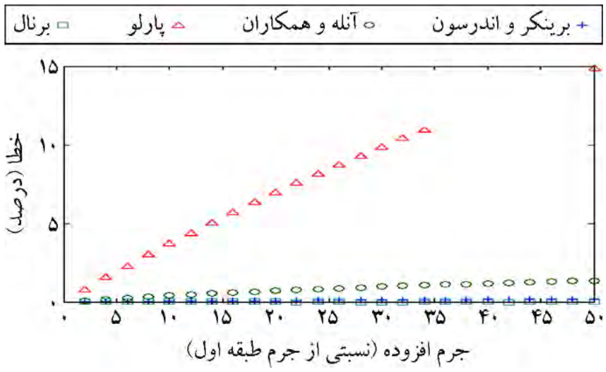
شکل (۳): نمودار زوایای اصلی برای تشخیص مرتبه سیستم، تشکیل ستون‌های پایدار برای فرکانس‌های اصلی شناسایی شده و تشخیص درجه آزادی.

۴-۱-۳- شناسایی مستقیم ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سیستم مرتبه دوم

پس از شناسایی ماتریس سیستم در فضای گسسته زمانی و تبدیل آن به ماتریس سیستم کلاسیک در فضای پیوسته زمانی توسط روش پیشنهادی، می‌توان با پیش‌ضرب وارون ماتریس جرم در نیمه پایین ماتریس سیستم کلاسیک، ماتریس‌های سختی و میرایی را به دست آورد. لذا لازم است ابتدا ماتریس جرم سازه تعیین گردد.

۴-۱-۳-۱- شناسایی ماتریس جرم

برای انجام این کار باید آزمایش ارتعاش محیطی دومی با افزودن جرم طبقات انجام پذیرد. پیش‌تر توضیح داده شد که اگر تغییر جرم متناسب با جرم طبقات باشد ضریب مقیاس حاصل از رابطه (۳۲) کاملاً درست خواهد بود؛ اما از آنجا که جرم طبقات نامعلوم است، این کار امکان‌پذیر نیست. لذا از توزیع جرم یکنواخت استفاده شده است که می‌تواند تقریبی در محاسبه‌ی ماتریس جرم وارد نماید. در شکل (۴) مقدار جرم افزوده‌ی یکنواخت طبقات به‌صورت درصدی از جرم مد اول در مقابل درصد خطای روش‌های مختلف ترسیم شده است.



شکل (۴): مقایسه روش‌های مختلف محاسبه ضریب مقیاس در جرم‌های افزوده متفاوت.

بر اساس شکل (۴)، به‌جز روش پارلو که قدیمی‌ترین روش است، بقیه‌ی روش‌های مورد بحث حتی در کمترین مقدار جرم افزوده که ۴۰۰ کیلوگرم است نیز بسیار خوب عمل کرده‌اند. پس از محاسبه ضریب مقیاس، شکل‌های مدی مقیاس شده به جرم از شکل‌های مدی شناسایی شده در آزمایش اول استخراج می‌گردند. اکنون ماتریس جرم از رابطه‌ی (۳۳) قابل محاسبه می‌باشد که در جدول (۴) ارائه شده است.

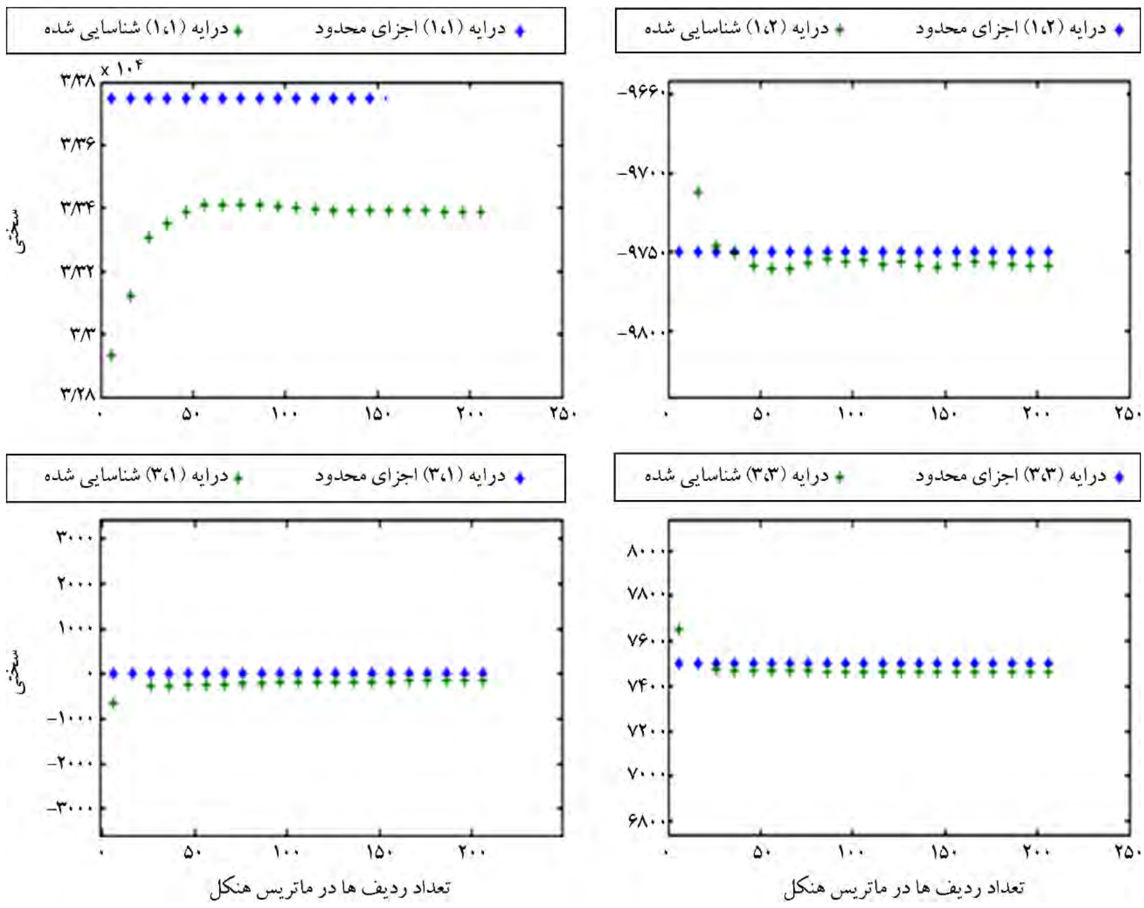
جدول (۴): ماتریس‌های جرم شناسایی شده و ماتریس جرم مدل سازه.

مدل اجزای محدود	$\begin{bmatrix} 2.00E+01 & 0.00E+00 & 0.00E+00 \\ 0.00E+00 & 1.80E+01 & 0.00E+00 \\ 0.00E+00 & 0.00E+00 & 1.60E+01 \end{bmatrix}$
شناسایی شده بدون نوفه	$\begin{bmatrix} 2.00E+01 & 1.91E-02 & -2.00E-02 \\ 1.91E-02 & 1.80E+01 & -3.45E-02 \\ -2.00E-02 & -3.45E-02 & 1.60E+01 \end{bmatrix}$
شناسایی شده با نوفه ۱۰ درصد	$\begin{bmatrix} 2.00E+01 & 1.58E-02 & -1.93E-02 \\ 1.58E-02 & 1.80E+01 & -3.68E-02 \\ -1.93E-02 & -3.68E-02 & 1.60E+01 \end{bmatrix}$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر قطر اصلی ماتریس جرم شناسایی شده که تأثیر زیادی روی پاسخ‌های سازه دارند، با درایه‌های قطر اصلی ماتریس جرم مدل اجزای محدود برابری می‌کنند و اختلاف‌ها تنها در مقادیر غیر قطری ماتریس جرم ظاهر شده است. اعضای غیر قطر اصلی در ماتریس‌های شناسایی شده در مقایسه با اعضای قطر اصلی بسیار کوچک‌ترند و لذا از تأثیرگذاری بسیار پایین‌تری نیز برخوردارند. از این‌رو اختلاف ماتریس‌های شناسایی شده با ماتریس حقیقی سازه حتی برای داده‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد نیز بسیار ناچیز است.

۴-۱-۳-۲- مسائلی پیرامون شناسایی ماتریس سختی

روش شناسایی مستقیم ماتریس‌های سازه‌ای بر روش شناسایی زیرفضای تصادفی استوار است. به عبارت بهتر، دقت روش پیشنهادی، متأثر از دقت در شناسایی ماتریس سیستم از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی است. یکی از پارامترهای مؤثر در دقت مقادیر شناسایی در روش شناسایی زیرفضای تصادفی، ابعاد ماتریس بلوک هنکل است. ون اوورشی [۲] تعداد ردیف‌های ماتریس هنکل، i، را بر اساس حداکثر مرتبه سیستم و تعداد نقاط داده‌برداری پیشنهاد می‌دهد. اما ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که برای محاسبه‌ی مستقیم ماتریس‌های سیستم به‌خصوص برای سیستم‌های با میرایی بالا و داده‌های آلوده به درصد بالایی از نوفه نیاز به i بزرگ‌تری داریم. از طرفی، با تعریف i بزرگ‌تر، زمان تحلیل با مرتبه‌ی دوم i افزایش می‌یابد، که لزوماً هم این افزایش به بهتر شدن مقادیر شناسایی شده نمی‌انجامد. برای نمونه، در نمودار سمت چپ شکل (۵) در ردیف بالا تغییرات اولین درایه ماتریس سختی، k(1,1)، نشان داده شده که افزایش مقدار i باعث بهبود مقدار شناسایی نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد برای دستیابی به ماتریس‌های با اعضای قابل اعتماد، این مقدار بیش از مقدار پیشنهادی و به حدود مثلاً بیست برابر مرتبه سیستم افزایش داده شود.



شکل (۵): تغییرات درایه‌های ماتریس سختی شناسایی شده در تعداد مختلف سطرهای بلوک هنکل.

برای یافتن ماتریس جرم سازه، می‌توان به‌جای انجام آزمایش دوم ارتعاش محیطی با جرم افزوده، از ماتریس جرم تحلیلی حاصل از مشاهدات ظاهری، به کمک روش‌هایی مانند شبیه‌سازی و مدل‌سازی اجزای محدود نیز استفاده نمود. در جدول (۵) نتایج تحلیلی ماتریس سختی شناسایی شده با رویکرد اول مبتنی بر استفاده از ماتریس جرم معلوم و رویکرد دوم با استفاده از ماتریس جرم شناسایی شده از آزمایش مستقل ارتعاش محیطی در وضعیت بدون نوفه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ماتریس سختی شناسایی شده از رویکرد دوم هم متقارن است و هم مقادیر غیر قطری کوچک‌تری دارد که با تعاریف کلاسیک دینامیک سازه سازگارتر است. به‌عبارت‌دیگر نتایج استفاده از آزمایش مستقل جهت شناسایی ماتریس جرم نسبت به استفاده از ماتریس جرم از طریق شبیه‌سازی و مشاهدات ظاهری، به واقعیت نزدیک‌تر است.

۴-۱-۳-۳- شناسایی ماتریس‌های سختی و میرایی

پس از شناسایی ماتریس جرم و تعیین ابعاد مناسب ماتریس هنکل، می‌توان از روش مستقیم برای شناسایی ماتریس‌های سختی و میرایی اقدام نمود. نتایج شناسایی ماتریس‌های سختی و میرایی در جدول (۶) نشان می‌دهد ماتریس‌های شناسایی شده تطابق خوبی با ماتریس حقیقی سازه دارند. می‌توان گفت که وجود نوفه بالا حتی تا مقدار ۱۰ درصد در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی سازه نیز عملاً نتوانست تأثیر چندانی در دقت شناسایی این ماتریس‌ها داشته باشد.

جدول (۵): ماتریس سختی شناسایی شده با دو رویکرد جرم معلوم و جرم شناسایی شده (kN/m).

	رویکرد اول (ماتریس جرم معلوم)	رویکرد دوم (ماتریس جرم شناسایی شده)
ماتریس سختی	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.73E+03 & -1.23E+02 \\ -9.94E+03 & 1.74E+04 & -7.57E+03 \\ -2.47E+02 & -7.34E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.72E+03 & -1.53E+01 \\ -9.72E+03 & 1.73E+04 & -7.52E+03 \\ -1.53E+01 & -7.52E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$

جدول (۶):ماتریس‌های سختی و میرایی شناسایی شده.

	ماتریس سختی (kN/m)	ماتریس میرایی (kNs/m)
مدل اجزا محدود	$\begin{bmatrix} 3.38E+04 & -9.75E+03 & 0.00E+00 \\ -9.75E+03 & 1.73E+04 & -7.50E+03 \\ 0.00E+00 & -7.50E+03 & 7.50E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.87E+01 & -1.71E+01 & -5.33E-15 \\ -1.71E+01 & 4.79E+01 & -1.31E+01 \\ 1.78E-15 & -1.31E+01 & 2.88E+01 \end{bmatrix}$
شناسایی شده بدون نوفه	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.72E+03 & -1.53E+01 \\ -9.72E+03 & 1.73E+04 & -7.52E+03 \\ -1.53E+01 & -7.52E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.89E+01 & -3.24E+01 & -9.34E+00 \\ -1.05E+01 & 4.70E+01 & -1.52E+01 \\ 2.42E+01 & -1.36E+01 & 2.71E+01 \end{bmatrix}$
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.72E+03 & -1.27E+01 \\ -9.72E+03 & 1.73E+04 & -7.52E+03 \\ -1.27E+01 & -7.52E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.97E+01 & -1.91E+01 & 3.96E-01 \\ -1.93E+01 & 4.78E+01 & -1.34E+01 \\ 3.15E-01 & -1.34E+01 & 2.78E+01 \end{bmatrix}$

۴-۱-۴- ارزیابی رفتار لرزه‌ای

در مرحله آخر برای بررسی دقت روش شناسایی پیشنهادی، رفتار لرزه‌ای مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده‌ی سازه را تحت زلزله طبس مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج جذر میانگین مربعات پاسخ‌های شتاب و جابه‌جایی طبقات سازه، و بیشینه جابه‌جایی پاسخ تحلیل تاریخچه زمانی طبقات سازه در جداول (۷) تا (۹) ارائه شده است. نتایج نشانگر توانمندی بالای روش پیشنهادی در شناسایی مدل حقیقی سازه برشی است.

۴-۲- سازه پنج طبقه برشی

سازه‌ی پنج طبقه‌ی برشی با پنج درجه‌ی آزادی انتقالی، با جرم طبقات ۲۰، ۱۸، ۱۶، ۱۵ و ۱۴ تن و سختی طبقات ۲۴۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر، با مشخصات مشابه مثال قبل در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees مدل‌سازی شده است. تحلیل تاریخچه زمانی خطی این مدل تحت ارتعاش محیطی در پایه سازه قرار گرفته و پاسخ‌های شتاب مطلق طبقات آن ثبت شده است. با توجه به آلوده بودن پاسخ‌ها به نوفه در سازه‌های حقیقی، پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده به نوفه‌هایی با درصدهای ۲، ۵ و ۱۰ (بر اساس حداکثر دامنه) آلوده شده‌اند.

۴-۲-۱- شناسایی پارامترهای مدی

مشابه مثال قبل، پارامترهای مدی سازه‌ی مورد بررسی بر اساس روابط (۲۰) تا (۲۳) از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی برای چهار حالت بدون نوفه و نوفه با درصدهای مختلف به دست آمده‌اند که در جدول (۱۰) آورده شده است.

نتایج ارائه شده در جدول (۱۰) نشان می‌دهند برای تمامی حالات مقادیر فرکانسی با دقت بسیار بالایی شناسایی شده‌اند

جدول (۷): مقایسه‌ی جذر میانگین مربعات پاسخ شتاب طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده‌ی سازه (متر بر مجذور ثانیه).

مدل	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	6.90E+00	7.91E+00	9.01E+00
شناسایی شده بدون نوفه	6.86E+00	7.85E+00	8.95E+00
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	6.86E+00	7.85E+00	8.95E+00

جدول (۸): مقایسه‌ی جذر میانگین مربعات پاسخ جابه‌جایی طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده‌ی سازه (متر).

مدل	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	2.91E-02	1.99E-02	8.22E-03
شناسایی شده بدون نوفه	2.91E-02	1.99E-02	8.19E-03
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	2.91E-02	1.99E-02	8.18E-03

جدول (۹): مقایسه‌ی بیشینه جابه‌جایی طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده‌ی سازه (متر).

مدل	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	7.46E-02	4.77E-02	2.51E-02
شناسایی شده بدون نوفه	7.46E-02	4.77E-02	2.51E-02
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	7.46E-02	4.77E-02	2.51E-02

جدول (۱۰): مقایسه فرکانس و نسبت میرایی مدی مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده‌ی سازه.

		اجزای محدود	شناسایی شده بدون نوفه	شناسایی شده با نوفه ۲درصد	شناسایی شده با نوفه ۵ درصد	شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد
فرکانس (rad/sec)	مد ۱	9.5817E+00	9.5934E+00	9.5930E+00	9.5938E+00	9.5943E+00
	مد ۲	2.3265E+01	2.3295E+01	2.3297E+01	2.3296E+01	2.3297E+01
	مد ۳	3.6348E+01	3.6196E+01	3.6191E+01	3.6190E+01	3.6191E+01
	مد ۴	4.6359E+01	4.6090E+01	4.6086E+01	4.6085E+01	4.6087E+01
	مد ۵	5.8095E+01	5.7938E+01	5.7928E+01	5.7928E+01	5.7927E+01
نسبت میرایی	مد ۱	5.00E-02	5.29E-02	5.27E-02	5.29E-02	5.31E-02
	مد ۲	4.16E-02	3.97E-02	4.00E-02	3.99E-02	3.99E-02
	مد ۳	5.00E-02	5.08E-02	5.03E-02	5.05E-02	5.05E-02
	مد ۴	5.86E-02	5.42E-02	5.41E-02	5.41E-02	5.41E-02
	مد ۵	6.98E-02	6.20E-02	6.18E-02	6.15E-02	6.16E-02

درحالی‌که مقادیر شناسایی شده‌ی نسبت فرکانسی از دقت کمتری برخوردارند. البته با اندکی دقت معلوم می‌شود که این مسئله به خود روش شناسایی زیرفضای تصادفی مربوط می‌شود و اثرات ناشی از آلودگی داده‌های اندازه‌گیری شده به نوفه در میزان خطای برآورد نسبت میرایی، نقش عمده‌ای ایفا نمی‌کند. در گام بعد شکل‌های مدی مدل‌های شناسایی شده با شکل‌های مدی مدل اجزای محدود سازه در شکل (۶) مقایسه شده است.

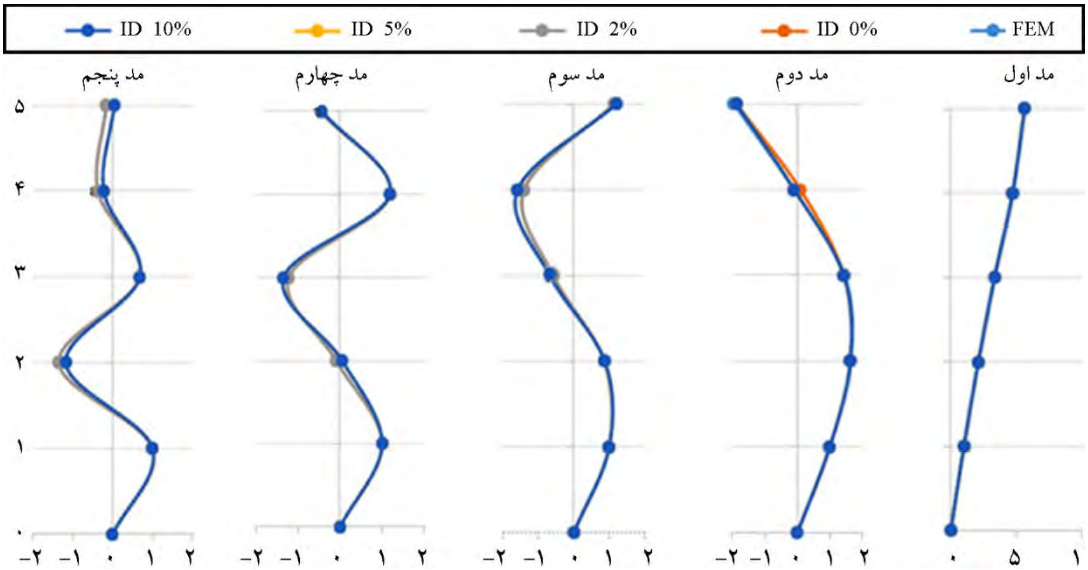
برای نشان دادن میزان مشابهت مدهای شناسایی شده با مدهای متناظر مدل اجزای محدود از معیار MAC در رابطه (۳۴) استفاده شده است. در جدول (۱۱) فقط مقادیر محاسبه شده برای مقایسه‌ی حالت مدل اجزای محدود و مدل شناسایی شده با پاسخ‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد نشان داده شده است. نتایج حاکی از مشابهت بسیار زیاد است.

جدول (۱۱): معیار MAC برای تمامی مودها.

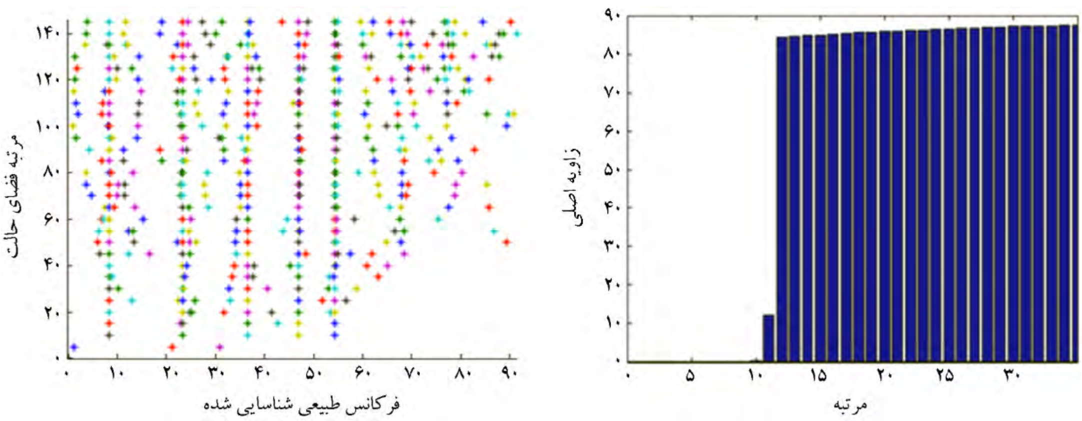
شماره مد	۱	۲	۳	۴	۵
معیار اطمینان مدی	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9994E-01	9.9987E-01	9.9965E-01

۴-۲-۲- تشخیص مرتبه‌ی سیستم سازه‌ای

در نمودار تغییرات زوایای اصلی، شکل (۷) راست، مرتبه سیستم از روی پرش در این نمودار ۱۰ تشخیص داده می‌شود. برای اطمینان از مرتبه‌ی سیستم سازه‌ای، از دیاگرام پایداری فرکانس‌های شناسایی شده نیز استفاده شده است (شکل ۷ چپ). با توجه به ثبات پنج فرکانس اصلی در تمامی تحلیل‌ها، درجه آزادی سازه ۵ و به این ترتیب مرتبه‌ی سیستم ۱۰ مورد تائید قرار می‌گیرد.



شکل (۶): مقایسه شکل‌های مدی سازه‌ی شناسایی شده و سازه‌ی مدل‌سازی شده.



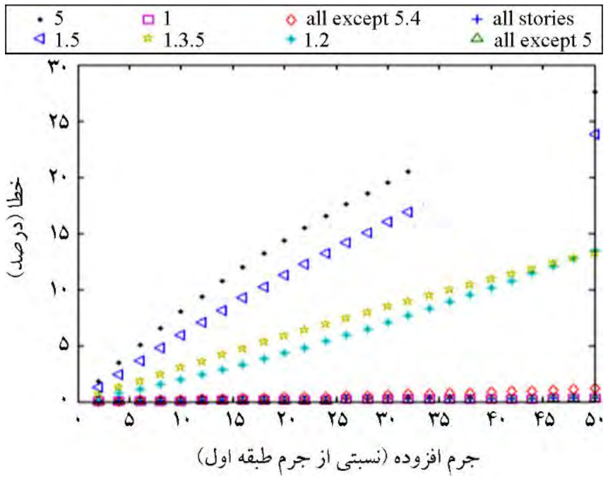
شکل (۷): نمودار تغییرات زوایای اصلی برای تشخیص مرتبه سیستم (راست)، تشکیل ستون‌های پایدار فرکانس‌های اصلی شناسایی شده برای تشخیص تعداد درجه آزادی (چپ).

۴-۲-۳- شناسـایی ماتریس‌های مشـخصه دینامیکی سیستم مرتبه دوم از روش مستقیم

مانند مثال قبل، پس از شناسایی پارامترهای دینامیکی سازه از روش شـناسایی زیرفضای تصادفی و نیز شناسایی ماتریس‌های حالت در فرم گسسته، با استفاده از روش مستقیم پیشنهادی ماتریس سیستم کلاسیک به فرم پیوسـته زمانی اسـتخراج می‌گردد. اکنون با داشتن ماتریس جرم، همان‌گونه که توضیح داده شد، ماتریس‌های سختی و میرایی به‌صورت مسـتقیم قابل شـناسـایی خواهند بود. برای تشـکیل ماتریس جرم دو راه وجود دارد: (۱) اسـتفاده از مشـخصـه‌های ظاهری، (۲) اسـتفاده از یک آزمایش مستقل ارتعاش محیطی. در مثال قبل توضیح داده شد که روش دوم از لحاظ نزدیک بودن به واقعیت، روش بهتری است.

۴-۲-۳-۱- شناسایی ماتریس جرم

با انجام یک‌سـری کارهای تحلیلی، بر روی پاسخ‌های اندازه‌گیری شـده طی آزمایش دوم ارتعاش محیطی، ماتریس جرم سـازه شـناسایی می‌گردد. برای انجـام این آزمایش، علاوه بر میزان جرم افزوده طبقات، محل قرارگیری آنها نیز در میزان دقت روش بسـیار تأثیرگذار است. در این مثـال بـا بـه‌کارگیری روش برینکر و اندرســن [۲۴]، مقدار خطای نتـایج حاصــل از مقادیر مختلف جرم افزوده و محل قرارگیری آن در طبقات بررسی شده که نتایج در شکل (۸) ترسیم شده‌اند.



شـکل (۸): خطای ایجاد شـده در محاسبه ضریب مقیاس در ترکیب‌های مختلف جرم افزوده.

در شـکل (۸) نکاتی به چشم می‌خورند: اول، انتخاب مقادیر کوچک جرم افزوده به مقدار خطای کوچک‌تری در شـناسـایی منتهی می‌گردد. دوم، بارگذاری فقط طبقه‌ی اول به نتایج بسـیار خوبی منتهی شـده اسـت. سوم، در صورت بارگذاری چند طبقه، انتخاب طبقه‌های پایین از اهمیت بیشـتری برخوردار اسـت. شاید بتوان گفـت کـه باید حتماً طبقات بیش از نصــف ارتفاع ســازه بارگذاری شـوند. ماتریس جرم از رابطه (۳۳) شـناسـایی شـده و نتایج در جدول (۱۲) برای وضـــعیت حال‌های بدون نوفه و نوفه ۱۰ درصد با مقدار تحلیلی اجزای محدود مقایسه شده است.

جدول (۱۲): مقایسه ماتریس جرم حاصل از شکل‌های مدی شناسایی شده‌ی مقیاس شده و ماتریس جرم سازه مدل‌سازی شده (تن).

مدل اجزای محدود	2.0000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.0000E+00	1.8000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.0000E+00	0.0000E+00	1.6000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.5000E+01	0.0000E+00
	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4000E+01
شناسایی شده بدون نوفه	2.0012E+01	-4.5099E-03	1.7999E-02	-1.2904E-02	-1.9309E-02
	-4.5099E-03	1.8026E+01	-5.9301E-04	-1.2525E-02	-3.4603E-02
	1.7999E-02	-5.9301E-04	1.5994E+01	-1.7820E-02	-3.7486E-02
	-1.2904E-02	-1.2525E-02	-1.7820E-02	1.4968E+01	-2.6091E-02
	-1.9309E-02	-3.4603E-02	-3.7486E-02	-2.6091E-02	1.3983E+01
شناسایی شده با نوفه ۱۰ درصد	2.0024E+01	-1.9724E-03	2.6236E-02	-4.0850E-03	-1.3225E-02
	-1.9724E-03	1.8013E+01	-3.5190E-03	-1.5420E-02	-4.0434E-02
	2.6236E-02	-3.5190E-03	1.5998E+01	-1.3049E-02	-3.7440E-02
	-4.0850E-03	-1.5420E-02	-1.3049E-02	1.4972E+01	-2.6659E-02
	-1.3225E-02	-4.0434E-02	-3.7440E-02	-2.6659E-02	1.3979E+01

۴-۲-۳-۲- شناسایی ماتریس سختی و میرایی

پس از شناسایی ماتریس جرم از انجام آزمایش مستقل جرم افزوده، از روش مستقیم برای شناسایی ماتریس‌های سختی و میرایی استفاده می‌گردد. بدین‌ترتیب که با پیش‌ضرب وارون ماتریس جرم در نیمه پایین ماتریس سیستم در فرم کلاسیک، ماتریس‌های سختی و میرایی به دست می‌آیند که نتایج در جداول (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند. در این شناسایی نیز از i بیست برابر مرتبه‌ی سیستم استفاده شده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند، هرچند ماتریس‌های شناسایی شده در اعضای غیر قطری اختلافاتی با مدل حقیقی دارند اما این اختلاف‌ها در مقایسه با مقدار اعضای روی قطر اصلی ماتریس‌ها بسیار کوچک‌اند و می‌توان آنها را نادیده گرفت. به‌عبارت‌دیگر، روش پیشنهادی قادر است ماتریس‌های بسیار نزدیک به ماتریس حقیقی سازه را حتی برای پاسخ‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد نیز به‌خوبی و با دقت بالا شناسایی نماید.

جدول (۱۳): مقایسه ماتریس سختی شناسایی شده از روش مستقیم و ماتریس سختی سازه‌ی مدل‌سازی شده (kN/m).

مدل اجزای محدود	4.4000E+04	-2.0000E+04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	-2.0000E+04	3.5000E+04	-1.5000E+04	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.0000E+00	-1.5000E+04	2.5000E+04	-1.0000E+04	0.0000E+00
	0.0000E+00	0.0000E+00	-1.0000E+04	1.8000E+04	-8.0000E+03
	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-8.0000E+03	8.0000E+03
شناسایی شده بدون نوفه	4.4018E+04	-2.0031E+04	3.8577E+01	-1.4439E+01	-4.2373E+00
	-2.0031E+04	3.5046E+04	-1.5009E+04	4.3377E+00	-1.3150E+01
	3.8577E+01	-1.5009E+04	2.4998E+04	-9.9935E+03	-1.2607E+01
	-1.4439E+01	4.3377E+00	-9.9935E+03	1.7985E+04	-7.9967E+03
	-4.2373E+00	-1.3150E+01	-1.2607E+01	-7.9967E+03	8.0032E+03
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	4.4029E+04	-2.0032E+04	4.1257E+01	-9.3779E+00	-1.8181E+00
	-2.0032E+04	3.5041E+04	-1.5008E+04	2.3907E+00	-1.3408E+01
	4.1257E+01	-1.5008E+04	2.4998E+04	-9.9920E+03	-1.2805E+01
	-9.3779E+00	2.3907E+00	-9.9920E+03	1.7983E+04	-7.9976E+03
	-1.8181E+00	-1.3408E+01	-1.2805E+01	-7.9976E+03	8.0032E+03

جدول (۱۴): مقایسه ماتریس میرایی شناسایی شده از روش مستقیم و ماتریس میرایی مدل‌سازی شده (kNs/m).

مدل اجزای محدود	1.1096E+02	-4.3545E+01	2.1316E-14	-8.8818E-15	-1.2434E-14
	-4.3545E+01	8.9853E+01	-3.2659E+01	-7.1054E-15	1.4211E-14
	3.5527E-14	-3.2659E+01	6.6564E+01	-2.1773E+01	-8.2157E-15
	-5.3291E-15	-5.3291E-15	-2.1773E+01	5.0565E+01	-1.7418E+01
	1.1102E-15	4.8850E-15	2.2204E-15	-1.7418E+01	2.8034E+01
شناسایی شده بدون نوفه	9.7899E+01	-3.4369E+01	-1.5225E+00	-1.8321E+00	1.3925E+00
	-3.7573E+01	8.5575E+01	-3.1695E+01	-8.9350E-01	1.1469E+00
	-3.4327E+00	-2.4748E+01	6.0592E+01	-1.8880E+01	-6.4242E-01
	-4.6464E+00	2.9309E+00	-2.2493E+01	4.9876E+01	-1.5956E+01
	-4.0859E+00	8.2449E+00	-3.5130E+00	-1.6050E+01	2.7399E+01
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	9.7544E+01	-3.4199E+01	-1.6061E+00	-1.7373E+00	1.3740E+00
	-3.7109E+01	8.5030E+01	-3.1347E+01	-9.1140E-01	1.0987E+00
	-3.8513E+00	-2.5251E+01	5.9970E+01	-1.8816E+01	-2.8627E-02
	-3.8457E+00	3.5455E+00	-2.1735E+01	4.9745E+01	-1.6627E+01
	-4.3660E+00	7.3112E+00	-3.8323E+00	-1.5968E+01	2.7960E+01

۴-۲-۴- ارزیابی رفتار لرزه‌ای مدل‌های شناسایی شده

در مرحله آخر همانند مثال قبل، برای بررسی رفتار مدل‌های شناسایی شده آنها را تحت تحریک تکیه‌گاهی ناشی از زلزله طبس قرار داده‌ایم. نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی در جداول (۱۵) تا (۱۷) با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول (۱۵): مقایسه جذر میانگین مربعات پاسخ شتاب طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده سازه (متر بر مجذور ثانیه).

مدل	طبقه پنجم	طبقه چهارم	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	8.43E+00	7.56E+00	5.54E+00	5.05E+00	4.15E+00
شناسایی شده بدون نوفه	8.48E+00	7.66E+00	5.58E+00	5.13E+00	4.26E+00
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	8.48E+00	7.66E+00	5.58E+00	5.13E+00	4.26E+00

جدول (۱۶): مقایسه جذر میانگین مربعات پاسخ جابه‌جایی طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده سازه (متر).

مدل	طبقه پنجم	طبقه چهارم	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	7.72E-02	6.46E-02	4.59E-02	2.91E-02	1.41E-02
شناسایی شده بدون نوفه	7.71E-02	6.46E-02	4.59E-02	2.91E-02	1.41E-02
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	7.72E-02	6.46E-02	4.59E-02	2.91E-02	1.41E-02

جدول (۱۷): مقایسه بیشینه جابه‌جایی طبقات مدل‌های اجزای محدود و شناسایی شده سازه (متر).

مدل	طبقه پنجم	طبقه چهارم	طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
اجزای محدود	1.64E-01	1.32E-01	9.81E-02	6.67E-02	3.52E-02
شناسایی شده بدون نوفه	1.64E-01	1.33E-01	9.82E-02	6.69E-02	3.54E-02
شناسایی شده با نوفه ۱۰درصد	1.64E-01	1.33E-01	9.82E-02	6.68E-02	3.53E-02

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش مستقیم پیشنهادی مبتنی بر شناسایی زیرفضای تصادفی با دقت بسیار بالایی توانایی شناسایی ماتریس‌های سازه‌ای را حتی در حضور نوفه‌های بالا داشته و به‌عنوان یک روش قابل اعتماد در شناسایی بر اساس داده‌های خروجی تنها پیشنهاد می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت‌های عنوان شده در استفاده از روش‌های شناسایی با استفاده از داده‌های ورودی- خروجی به‌صورت توأم و نیز با عنایت به اینکه در روش‌های شناسایی بر اساس داده های خروجی تنها تاکنون به شناسایی پارامترهای مدی اکتفا شده، در این مقاله به معرفی روشی مستقیم جهت شناسایی تمامی ماتریس‌های سازه‌ای با در دست داشتن تنها پاسخ‌های سازه پرداخته شده است.

اساس روش مستقیم پیشنهادی بر شناسایی ماتریس سیستم فضای حالت پیوسته زمانی به فرم کلاسیک استوار است. این ماتریس حاوی ترکیبی از ماتریس‌های مشخصه سازه‌ای است و با تبدیل ریاضی از ماتریس سیستم گسسته زمانی به دست می‌آید. با توجه به اینکه شناسایی از پاسخ‌های سازه یک نوع حل معکوس است، بی‌نهایت ماتریس سیستم گسسته زمانی وجود دارند که شرایط تئوری تحقق را ارضا می‌نمایند و دارای حداقل مرتبه سیستم هستند. در این پژوهش روشی جهت دستیابی به تحقق اصلی از ماتریس سیستم گسسته زمانی ارائه شده است.

در ادامه برای بررسی روش مستقیم ارائه شده دو تحلیلی شامل سازه‌های برشی سه و پنج طبقه مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی‌ها نشان دادند، با توجه به توانمندی روش زیرفضای تصادفی در شناسایی ماتریس سیستم سازه و روش مستقیم پیشنهادی، با استخراج ماتریس جرم سازه با انجام یک آزمایش ارتعاش محیطی دوم بر روی سازه‌ها، ماتریس‌های سختی و میرایی متقارن سازه به‌طور مستقیم شناسایی می‌گردند. نکته‌ی حائز اهمیت در این است که اگر ماتریس جرم سازه از مشخصه‌های قابل مشاهده در مدل سازه‌ای استخراج شود، ماتریس‌های شناسایی شده‌ی سختی و میرایی علاوه بر متقارن نبودن، با ماتریس‌های حقیقی سازه نیز اختلاف بیشتری دارند.

در نهایت می‌توان گفت، همان‌گونه که نتایج نشان داده‌اند روش پیشنهادی حاضر می‌تواند ماتریس‌های سازه‌های برشی را با استفاده از داده‌های خروجی تنها حتی هنگامی که پاسخ‌های برداشت شده آلوده به نوفه‌ی بالا نیز باشند، به‌خوبی شناسایی نماید.

مراجع

1. Juang J-N (1994) *Applied System Identification, NASA Langley Research Center*. Prentice Hall PTR.

2. Van Overschee, P. and De Moor, B. (1996) *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications.*

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

4. Benjamin. B. (2001) *Output only modal Analysis using Frequency Domain Decomposition*. Bachelor of Engineering Thesis, University of Queensland.

5. Brinvker, R., Lingmi, Z., Anderson, P. (2000) Modal Identification from Ambient Response using Frequency Domain Decomposition. *18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, Texas, Society for Experimental Mechanics.

6. Peeters, B., De Roeck, G. (1999) *Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering.* 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, UK, March.

7. Yuan, P., Wu, Z., & Ma, X. (1998) Estimated mass and stiffness matrices of shear building from modal test data. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**(5), 415-422.

8. Takewaki, I. and Nakamura, M. (2000) Stiffness-damping simultaneous identification using limited earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **29**(8), 1219-1238.

9. Ghafory-Ashtiany, M., Adhami, B., Khanlari, K. (2014) Identification of structural systems with full characteristic matrices under single point excitation. *Journal of Sound and Vibration*, **333**(24), 6381-6394.

10. Du, X.L. and Wang, F.Q. (2009) New modal identification method under the nonstationary Gaussian ambient excitation. *Applied Mathematics and Mechanics*, **30**(10), 1295-1304

11. Rainiery, C., Fabbrocino, G. (2010) Automaated output-only dynamic identification of civil engineering structure. *Mechanical Systems and Signal Processing*.

12. Facchini, L., Betti, M., Biagini, P. (2014) Neural network based modal identification of structural systems through output-only measurement. *Computers and Structures.*

13. Ni, P., Xia, Y., Hao, H., (2018) Improved decentralized structural identification with output-only measurement. *Measurement*, 597-610.

14. Peeters, B. (2000*) System Identification and Dmage Detection in Civil Engineering*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.

15. Katayama, T. (2005) *Subsapace Methods for System Identification.* Springer.

16. Brincker, R., Anderson, P. (2006) Understanding Stochastic Subspace Identification. *Proceeding of International Modal Analysis Conference*, IMAC.

17. Lardies, J. (2017) Modal parameter identification by an iterative approach and by the state space model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 239-251.

18. Nilvetti, F., Pappalardo, C.M. (2012) Mass stiffness and damping identification of a two story building model. *International Journal of Mechanical Engineering and Industrial Design.*

19. Parloo, E., Verboven, P., Guillame, P. and Overmeire, M. (2000) Sensitivity-based operational mode shape normalization. *Mech. Systems and Signal Proc.*, **16**, 757-767.

20. Parloo, E., Guillaume, P., Anthonis, J., Heylen, W. and Swers, N. (2003) Modelling of sprayer boom dynamics by means of maximum likelihood identification techniques, part 2: Sensivity-based mode shape normalization. *Biosystem Engineering.*

21. Aenelle, M.L., Brincker, R., Fernandez-Canteli, A. (2005) Some methods to determine scaled mode shapes in natural input modal analysis. *Proc. of the International Modal Analysis Conference (IMAC) XXIII.*

22. Malekjafarian, A., Ashory, M.R., Khatibi, M.M.,

Saber Latibari, M. (2016) Rigid body stiffness matrix for identification of inertia properties from output-only data. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 85-94.

23. Khatibi, M.M., Ashory, M.R., Malekjafarian, A. (2012) Mass stiffness change method for scaling of operational mode shapes. *Mechanical Systems and Signal Processing.*

24. Brincker, R. and Anderson, P. (2003) A way of getting scaled mode shapes in output only modal analysis. *Proc. of the International Modal Analysis Conference (IMAC) XXI.*

25. Bernal. D. (2004) Modal scaling from known mass perturbation. *Journal of Engineering Mechanics*, 130-1083.

واژه‌نامه

۱- جستار قله	Peak Picking
۲- تجزیه در دامنه فرکانسی	Frequency Domain Decomposition
۳- روش زیرفضای تصادفی	Stochastic Subspace Identification