

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 بزرگ مقیاس 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 کلیه 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.

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

رسول خدایاری

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

امید بهار (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، omidbahar@iiees.ac.ir

محسن غفوری آشتیانی

استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

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 سازه‌های 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

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 به درستی تمامی خصوصیات و رفتارهای سازه را مدل نماید. این مدل به دست آمده باید از چنان دقتی برخوردار باشد که بتواند در مباحث پایش سلامت سازه‌ای به خصوص در هنگام ارزیابی رفتار یا عملکرد سازه، یا در هنگام تشخیص آسیب‌های سازه‌ای و تعیین عمر

استفاده کرد. کاتایاما [۱۵] در کتاب خود که در سال ۲۰۰۵ به چاپ رسید، روش‌های زیرفضا را برای شناسایی سیستم به صورت کاملاً دقیق بیان نمود. برینکر و اندرسن [۱۶] در سال ۲۰۰۶ تلاش کردند تا مفاهیم ریاضی به کار 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 به‌دست آمده حاکی از توانمندی روش پیشنهادی حتی در حضور داده‌های برداشت‌شده‌ی آلوده به نوفه‌های بالاست.

در کنار توانمندی‌ها، این روش 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

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^۱ و روش تجزیه در دامنه فرکانسی^۲ در حوزه فرکانس، و روش زیرفضای تصادفی^۳ در حوزه زمان [۳-۶]. 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]، فاجینی 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

ساده‌سازی می‌توان به شکل رابطه (۴) نوشت [۲].

$$y(t) = C_a \ddot{z}(t) + C_v \dot{z}(t) + C_d z(t) \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gu(t) \quad (4)$$

که در آن $C = [C_d - C_a M^{-1} K \quad C_v - C_a M^{-1} D]$ و $G = C_a M^{-1} B_2 u(t)$ است. بنابراین زوج معادله فضای حالت با m ورودی و l خروجی در فضای حالت به شکل روابط زیر ساده می‌گردد:

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad (5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Gu(t) \quad (6)$$

$\dot{x}(t)$ چهارتایی A_c از مرتبه‌ی $n \times n$ ، B_c از مرتبه‌ی $n \times m$ از C از مرتبه $l \times n$ و G از مرتبه $l \times n$ 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 عبارات‌های تصادفی جایگزین آنها می‌گردند. این عبارات‌های 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:

$$x_{k+1} = A_d x_k + w_k \quad (7)$$

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 زیر فضای 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:

$$M\ddot{z}(t) + D\dot{z}(t) + Kz(t) = f(z, t) \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}}_{A_c} \begin{Bmatrix} z(t) \\ \dot{z}(t) \end{Bmatrix} + \quad (2)$$

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{Bmatrix}}_{B_c} u(t)$$

در رابطه (۱) عبارت $f(z, t) = B_2 u(t)$ جایگزین شده است. از طرف دیگر ماتریس خروجی سیستم که به‌صورت یک ترکیب خطی از شتاب، سرعت و جابه‌جایی است را با جاگذاری $\dot{z}(t)$ از معادله مرتبه دوم دیفرانسیلی حرکت به فرم رابطه (۳) و

بلوک هنکل گذشته و آینده است که به طور کلی از رابطه زیر به دست می آید:

$$O = E(Y_{hf} | Y_{hp}) \quad (11)$$

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

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp} \quad (12)$$

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

$$\Gamma_s = \begin{bmatrix} C \\ CA_d \\ CA_d^2 \\ \vdots \\ CA_d^{i-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ماتریس مشاهده پذیری به همراه حالت های دنباله کالمن، ستون های ماتریس تصویرسازی O را تشکیل می دهند. بنابراین هر ستون ماتریس مشاهده پذیری را می توان مطابق رابطه (۱۴) فرض نمود:

$$O_{col} = \Gamma_s X_0 \quad (14)$$

بنابراین ماتریس کلی تصویرسازی به صورت ضرب ماتریس مشاهده پذیری در دنباله های حالت به صورت رابطه (۱۵) می باشد.

$$O = \Gamma_s X_0 \quad (15)$$

که X_0 حالت های کالمن در گام زمانی صفر است. اگر ماتریس مشاهده پذیری معلوم باشد، تمامی حالت ها به سادگی از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است، اما در واقع ماتریس مشاهده پذیری در دسترس نیست. برای به دست آوردن ماتریس مشاهده پذیری از روش تجزیه مقادیر تکین از روابط (۱۶) تا (۱۸) استفاده می شود.

$$O = USV^T \quad (16)$$

$$\hat{\Gamma}_s = US^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (8)$$

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

$$E \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} = 0, E \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^T(j) & v^T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \delta(t-j) \quad (9)$$

۲-۱- روش حل زیر فضای تصادفی

برای حل زوج معادله فضای حالت در فضای گسسته زمانی تصادفی و به دست آوردن A_d و C مراحل زیر انجام می پذیرد: گام اول- به دست آوردن ماتریس بلوک هنکل از داده های خروجی و تقسیم این ماتریس به دو بلوک گذشته و آینده: اگر بردار سطری شده پاسخ به شکل $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_s]$ باشد که در آن s تعداد پاسخ های برداشت شده و هر یک از پاسخ های y از مرتبه $1 \times l$ باشند، آنگاه ماتریس بلوک هنکل به شکل زیر خواهد بود:

$$Y_h = \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_{s-2i+1} \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{s-2i+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & \dots & y_{s-i} \\ \hline y_{i+1} & y_{i+2} & \dots & y_{s-i+1} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & \dots & y_{s-i+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & \dots & y_s \end{pmatrix} \quad (10)$$

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 ستون ها نیز بایستی به تعداد کافی بزرگ باشد. این امر به معنی ثبت پاسخ تعداد بیشتر درجات آزادی مستقل سازه ای است. در مثال های حل شده 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

$$\zeta_j = \frac{-a_j}{\sqrt{a_j^2 + b_j^2}} \quad (23)$$

$$\bar{X}_0 = S^{1/2} V^T \quad (18)$$

که ماتریس‌های \bar{X}_0 و $\bar{\Gamma}_s$ فقط یک برآورد طی مسئله تجزیه مقادیر تکین بوده و منحصر به فرد نیز نمی‌باشند. به عبارت دیگر 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:

$$\bar{\Gamma}_{A_d} = \bar{\Gamma} \quad (19)$$

که در آن $\bar{\Gamma}$ ماتریسی ستونی است که یک بلوک از پایین آن حذف شده، و $\bar{\Gamma}_{A_d}$ 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، به ترتیب از روابط (۲۰) و (۲۱)، به صورت موهومی به دست خواهند آمد.

$$\bar{\Phi} = C\Psi \quad (20)$$

$$\lambda_j = \frac{\ln(\mu)}{\Delta T} \quad (21)$$

که شکل‌های مدی سیستم بدون میرایی از محاسبه‌ی نرم ماتریس $\bar{\Phi}$ به دست می‌آیند. مقادیر فرکانس طبیعی و نسبت میرایی زیر بحرانی مد زام 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 (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند:

$$\omega_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \quad (22)$$

۲-۳- انتخاب مرتبه فضای حالت سیستم

برای انتخاب مرتبه فضای حالت، معیار متعارف یافتن پرش قابل توجه 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 فرکانس‌های مدی که در تمام مرتبه‌های سیستم تکرار شده باشند به عنوان فرکانس‌های اصلی سازه مشخص شده و به تبع 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. به عبارت دیگر دقت آن به دقت 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_d ها 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

تخمین مناسبی از طریق مدل سازی 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 به وسیله 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 به جای ماتریس جرم تحلیلی منجر به شناسایی ماتریس‌های دقیق‌تر سازه می‌گردد. هر چند که اختلاف به دست آمده برای مدل‌های سازه‌ای تحلیل شده در این مقاله خیلی زیاد نیست، اما این امکان وجود دارد که در سازه‌های بزرگ و پیچیده این اختلاف قابل توجه گردد. در ادامه به صورت 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، این روش‌ها 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 به صورت مجزا یا هم‌زمان قابل انجام است. پارلو و همکاران [۱۹-۲۰]، آنل و همکاران [۲۱] و ملک جعفریان و همکاران [۲۲] روش‌هایی برای محاسبه‌ی ضریب مقیاس با ایجاد تغییر در مقادیر جرم یا سختی به طور 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] اشاره نمود.

ماتریس‌های μ و Ψ را به ترتیب 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:

$$\Psi^{-1} A_d \Psi = \Psi_1^{-1} A_{d1} \Psi_1 \quad (24)$$

$$A_d = \Psi \Psi_1^{-1} A_{d1} \Psi_1 \Psi^{-1} \quad (25)$$

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.

$$A_d = \hat{\Phi} \Psi_1^{-1} A_{d1} \Psi_1 \hat{\Phi}^{-1} \quad (26)$$

در رابطه فوق تنها $\hat{\Phi}$ 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:

$$\hat{\Phi} = \begin{Bmatrix} C\Psi \\ C\Psi\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_1\Psi_1 \\ C_1\Psi_1\lambda_1 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

که در آن 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 به تبع 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

سازه اعمال گردد، به‌طور کامل برقرار است [۱۹]. با ضرب طرفین در Φ_j^T و با توجه به رابطه حاکم بر شکل‌های مدی مقیاس شده به جرم $(\bar{\Phi}_{0j}^T M \bar{\Phi}_{0j} = 1)$ و رابطه بین شکل‌های مدی مقیاس شده و نشده به جرم برای حالت اولیه $(\bar{\Phi}_{0j} = \alpha_{0j} \Phi_{0j})$ که در آن $\bar{\Phi}_{0j}$ شکل مد زام مقیاس شده به جرم است، می‌توان نوشت:

$$(\omega_{0j}^2 - \omega_{1j}^2) = \alpha_{0j}^2 \Phi_j^T \Delta M \Phi_j \omega_{1j}^2 \quad (31)$$

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

$$\alpha_{0j} = \sqrt{\frac{(\omega_{0j}^2 - \omega_{1j}^2)}{\omega_{1j}^2 \Phi_j^T \Delta M \Phi_j}} \quad (32)$$

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:

$$M = (\bar{\Phi} \bar{\Phi}^T)^{-1} \quad (33)$$

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 صفر و انحراف معیار یک مدل شده است، به مدت ۱۵ دقیقه با گام زمانی ۰/۱ ثانیه ثبت شدند.

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 به صورت 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:

$$M \Phi_{0j} \omega_{0j}^2 = K \Phi_{0j} \quad (28)$$

$$(M + \Delta M) \Phi_{1j} \omega_{1j}^2 = K \Phi_{1j} \quad (29)$$

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

$$M(\Phi_{0j} \omega_{0j}^2 - \Phi_{1j} \omega_{1j}^2) - \Delta M \Phi_{1j} \omega_{1j}^2 = K(\Phi_{0j} - \Phi_{1j}) \quad (30)$$

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، در صورتی که توزیع جرم افزوده با نسبت جرم موجود طبقات

انتقالی، با جرم ۲۰، ۱۸ و ۱۶ تن، و سختی ۲۴۰۰۰، ۹۷۵۰ و ۷۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر با استفاده از نرم افزار اجزای محدود OpenSees مدل سازی شده است. میرایی سازه به صورت کلاسیک فرض شده و از روابط رایلی با نسبت میرایی ۵ درصد برای مدهای اول و سوم محاسبه شده است. پاسخ های ثبت شده، شتاب مطلق طبقات سازه ناشی از ارتعاشات محیطی زمین، اعمالی در پای سازه است. از آنجا که در عمل ثبت داده ها با نوفه های محیطی و دستگامی همراه است، نتایج ثبت شده به نوفه هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصد دامنه ی پیشینه ی شتاب ثبت شده نیز آلوده شدند.

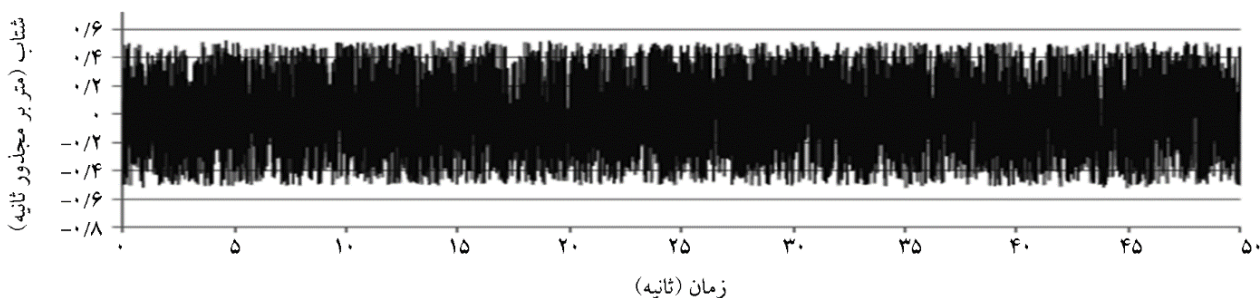
۴-۱-۱- شناسایی پارامترهای مدی

پارامترهای مدی از طریق روش شناسایی زیرفضای تصادفی بر اساس روابط (۲۰) تا (۲۳) برای داده های برداشت شده برای چهار حالت بدون نوفه و آلوده به نوفه های ۲، ۵ و ۱۰ درصد، به دست آمده اند که با مقادیر حقیقی سازه مقایسه شده اند. نتایج ارزیابی در جدول (۲) ارائه شده است.

در شکل (۱)، ۵۰ ثانیه اول تحریک محیطی رسم شده است. تحلیل ها دینامیکی خطی تاریخچه زمانی بوده و در نرم افزار اجزای محدود OpenSees انجام پذیرفته است. سپس نتایج حاصل از تحلیل به عنوان ورودی اندازه گیری شده به نرم افزار نوشته شده در محیط Matlab داده می شود. مراحل اجرایی این نرم افزار به شرح زیر است: (۱) مشخصه های مدی سازه توسط روش شناسایی زیرفضای تصادفی شناسایی می شود، (۲) توسط الگوریتم پیشنهادی ماتریس شناسایی شده ی سیستم به فرم کلاسیک درمی آید، (۳) با ماتریس جرم شناسایی شده که طی آزمایشی مستقل محاسبه می شود، ماتریس های مشخصه ی دینامیکی سازه اعم از سختی و میرایی به دست می آیند. در انتها نیز رفتار دینامیکی مدل تحلیلی سازه های شناسایی شده تحت زلزله طیس مورد بررسی قرار گرفته و پاسخ های آن با پاسخ های مدل حقیقی سازه مقایسه شده است.

۴-۱- سازه سه طبقه برشی

سازه ی سه طبقه ی برشی دارای سه درجه ی آزادی



شکل (۱): بخشی از تحریک ورودی نوفه ی 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		
۱ مد	1.2486E+01	1.2543E+01	1.2543E+01	1.2505E+01	فرکانس rad/sec	۱ مد
۲ مد	3.1197E+01	3.1303E+01	3.1303E+01	3.1222E+01		
۳ مد	4.4402E+01	4.4740E+01	4.4740E+01	4.4450E+01		
۱ مد	5.25E-02	5.24E-02	5.22E-02	5.20E-02	نسبت میرایی	۱ مد
۲ مد	4.22E-02	4.22E-02	4.20E-02	4.19E-02		
۳ مد	4.74E-02	4.74E-02	4.74E-02	4.74E-02		

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 کمی شکل‌های مدی با معیار MAC برای داده‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد.

شماره مد	۱	۲	۳
معیار اطمینان مدی	۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹۵

۴-۱-۲- تعیین مرتبه سیستم

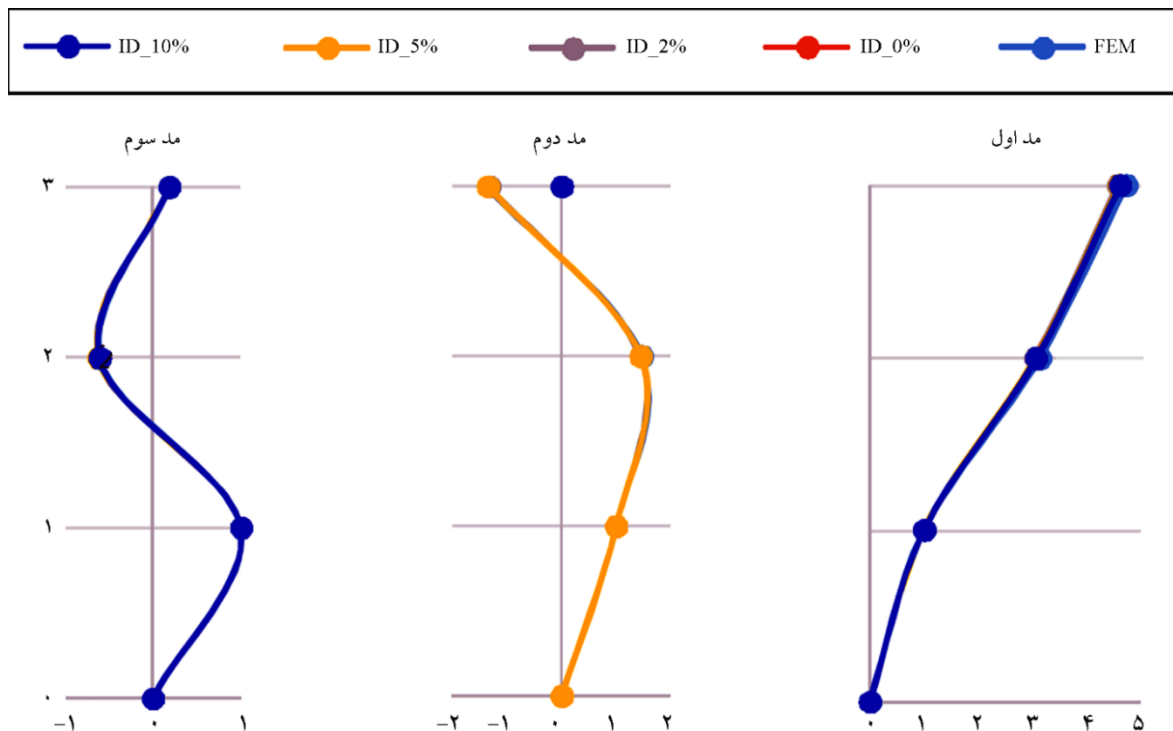
همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، برای اطمینان از نتیجه تشخیص مرتبه سیستم، در کنار روش موجود که بر پایه تشخیص مرتبه‌ی سیستم از روی پرش در نمودارهای زوایای اصلی می‌باشد، شکل (۳) بالا، از نمودارهای ثبات، مطابق شکل (۳) پایین، نیز استفاده شده است؛ بدین ترتیب که تغییر فرکانس طبیعی شناسایی شده با روش شناسایی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

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 به‌دست آمده 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 کمی شکل‌های مدی نیز می‌توان از معیار اطمینان مدی MAC، تعریف شده در رابطه‌ی (۳۴) استفاده نمود.

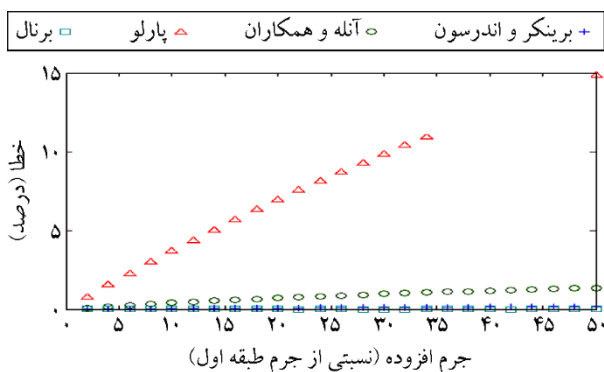
$$MAC_{i,j} = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)} \quad (34)$$

نتایج ارزیابی کمی مقایسه‌ی شکل‌های مدی در جدول (۳)



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

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 به صورت درصدی از جرم مد اول در مقابل درصد خطای روش‌های مختلف ترسیم شده است.



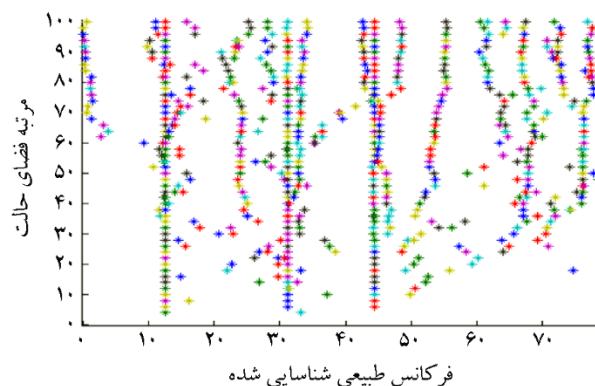
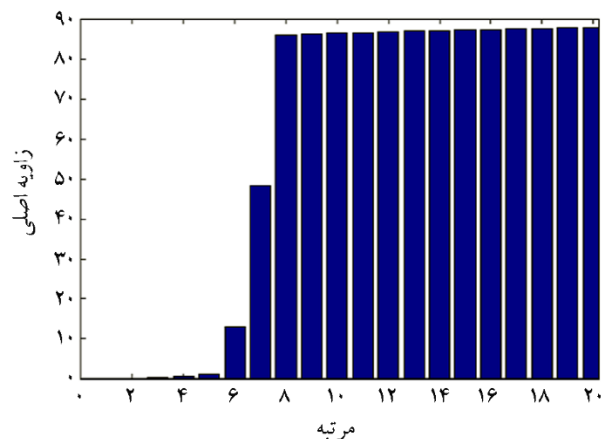
شکل (۴): مقایسه روش‌های مختلف محاسبه ضریب مقیاس در جرم‌های افزوده متفاوت.

بر اساس شکل (۴)، به جز 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.

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

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 تأیید قرار می‌گیرد.



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

۱-۳-۴- 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.

۱-۳-۱-۴- شناسایی ماتریس جرم

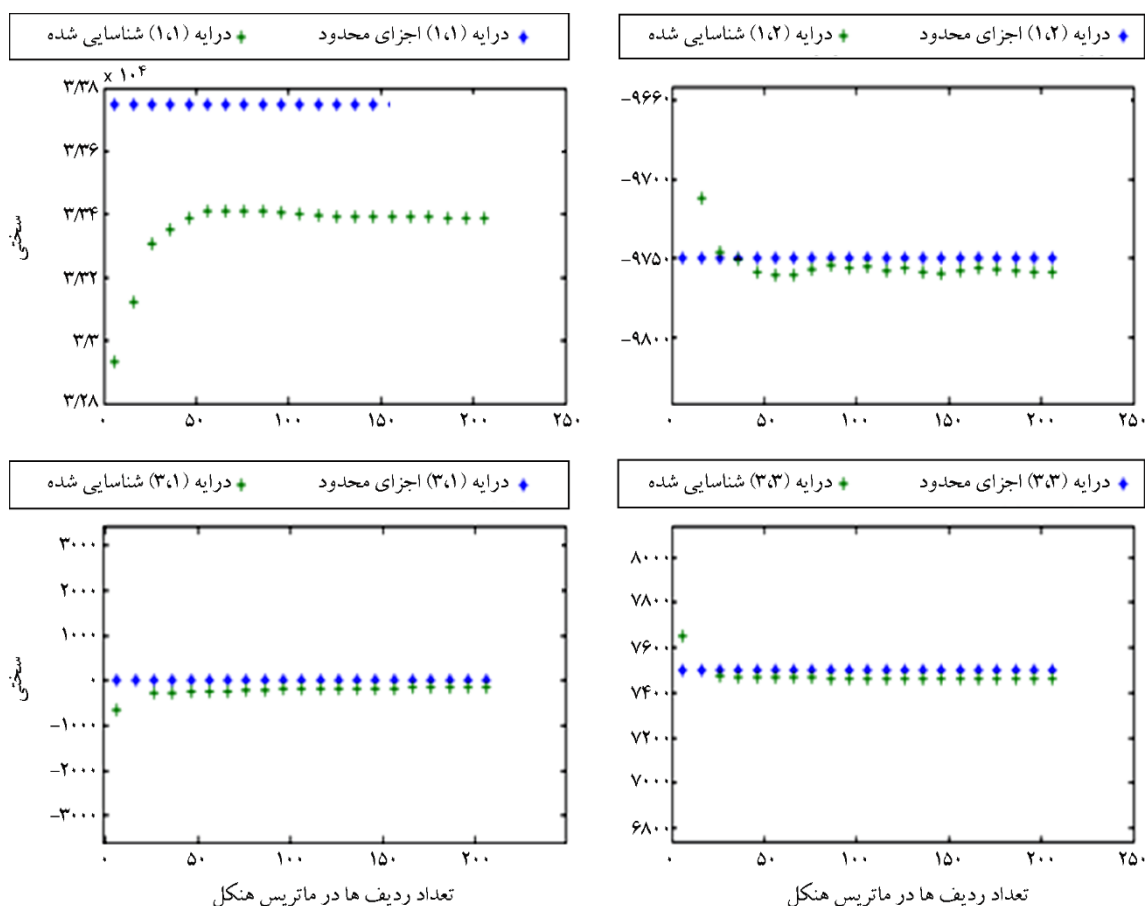
برای انجام این کار باید آزمایش ارتعاش محیطی دومی با افزودن جرم طبقات انجام پذیرد. پیش‌تر توضیح داده شد که اگر تغییر جرم

مقادیر شناسایی در روش شناسایی زیرفضای تصادفی، ابعاد ماتریس بلوک هنکل است. ون اوورشی [۲] تعداد ردیف‌های ماتریس هنکل، n را بر اساس حداکثر مرتبه سیستم و تعداد نقاط داده‌برداری پیشنهاد می‌دهد. اما ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که برای محاسبه‌ی مستقیم ماتریس‌های سیستم به خصوص برای سیستم‌های با میرایی بالا و داده‌های آلوده به درصد بالایی از نوفه نیاز به n بزرگ‌تری داریم. از طرفی، با تعریف n بزرگ‌تر، زمان تحلیل با مرتبه‌ی دوم n 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 n 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.

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 این رو اختلاف ماتریس‌های شناسایی شده با ماتریس حقیقی سازه حتی برای داده‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد نیز بسیار ناچیز است.

۴-۳-۲- 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



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

نسبت به استفاده از ماتریس جرم از طریق شبیه‌سازی و مشاهدات ظاهری، به واقعیت نزدیک‌تر است.

۴-۳-۱-۳- 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.

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

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
$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.73E+03 & -1.23E+02 \\ -9.94E+03 & 1.74E+04 & -7.57E+03 \\ -2.47E+02 & -7.34E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.72E+03 & -1.53E+01 \\ -9.72E+03 & 1.73E+04 & -7.52E+03 \\ -1.53E+01 & -7.52E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.37E+04 & -9.72E+03 & -1.53E+01 \\ -9.72E+03 & 1.73E+04 & -7.52E+03 \\ -1.53E+01 & -7.52E+03 & 7.51E+03 \end{bmatrix}$

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

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

۴-۱-۴- ارزیابی رفتار لرزه‌ای

تصادفی برای چهار حالت بدون نوبه و نوبه 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

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

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 نوبه	6.86E+00	7.85E+00	8.95E+00
شناسایی شده با نوبه ۱۰ درصد	6.86E+00	7.85E+00	8.95E+00

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 نوبه در سازه‌های حقیقی، پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده به نوبه‌هایی با درصدهای ۲، ۵ و ۱۰ (بر اساس حداکثر دامنه) آلوده شده‌اند.

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 نوبه	2.91E-02	1.99E-02	8.19E-03
شناسایی شده با نوبه ۱۰ درصد	2.91E-02	1.99E-02	8.18E-03

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

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 نوبه	7.46E-02	4.77E-02	2.51E-02
شناسایی شده با نوبه ۱۰ درصد	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 نوبه	شناسایی شده با نوبه ۲ درصد	شناسایی شده با نوبه ۵ درصد	شناسایی شده با نوبه ۱۰ درصد	فرکانس (rad/sec)	نسبت میرایی
9.5817E+00	9.5934E+00	9.5930E+00	9.5938E+00	9.5943E+00	مد ۱	
2.3265E+01	2.3295E+01	2.3297E+01	2.3296E+01	2.3297E+01	مد ۲	
3.6348E+01	3.6196E+01	3.6191E+01	3.6190E+01	3.6191E+01	مد ۳	
4.6359E+01	4.6090E+01	4.6086E+01	4.6085E+01	4.6087E+01	مد ۴	
5.8095E+01	5.7938E+01	5.7928E+01	5.7928E+01	5.7927E+01	مد ۵	
5.00E-02	5.29E-02	5.27E-02	5.29E-02	5.31E-02	مد ۱	
4.16E-02	3.97E-02	4.00E-02	3.99E-02	3.99E-02	مد ۲	
5.00E-02	5.08E-02	5.03E-02	5.05E-02	5.05E-02	مد ۳	
5.86E-02	5.42E-02	5.41E-02	5.41E-02	5.41E-02	مد ۴	
6.98E-02	6.20E-02	6.18E-02	6.15E-02	6.16E-02	مد ۵	

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.

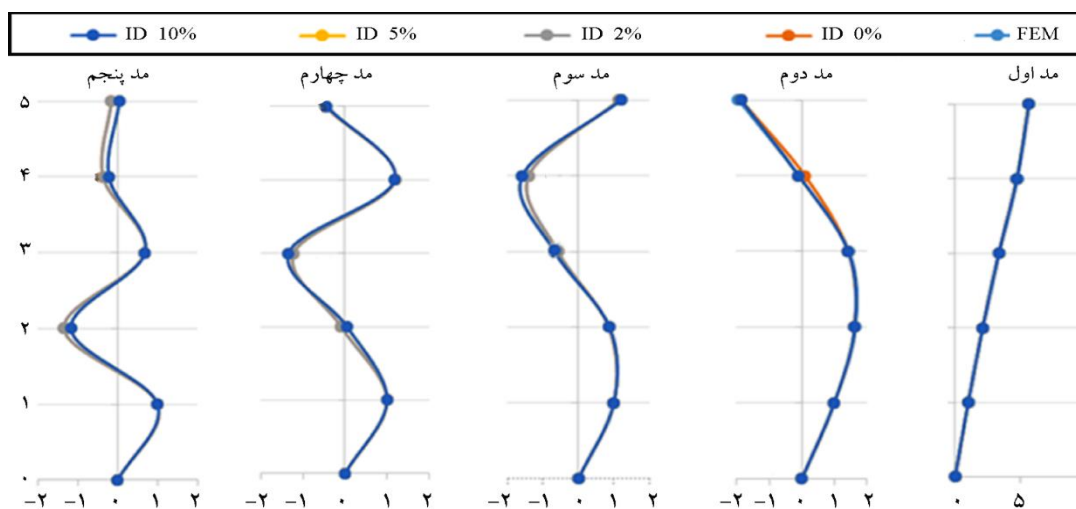
۴-۲-۲- تشخیص مرتبه‌ی سیستم سازه‌ای

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 تأیید قرار می‌گیرد.

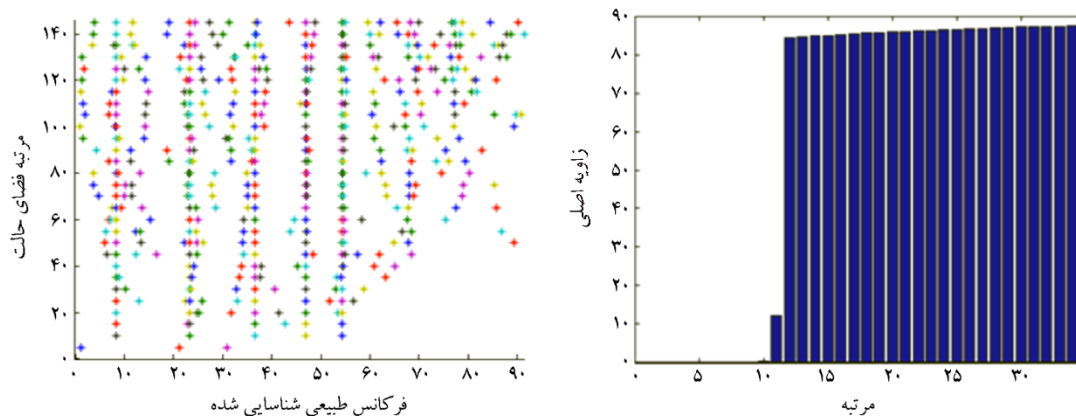
در حالی که مقادیر شناسایی شده‌ی نسبت فرکانسی از دقت کمتری برخوردارند. البته با اندکی دقت معلوم می‌شود که این مسئله به خود روش شناسایی زیرفضای تصادفی مربوط می‌شود و اثرات ناشی از آلودگی داده‌های اندازه‌گیری شده به نوفه در میزان خطای برآورد نسبت میرایی، نقش عمده‌ای ایفا نمی‌کند. در گام بعد شکل‌های مدی 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

جدول (۱۱): معیار MAC برای تمامی موده‌ها.

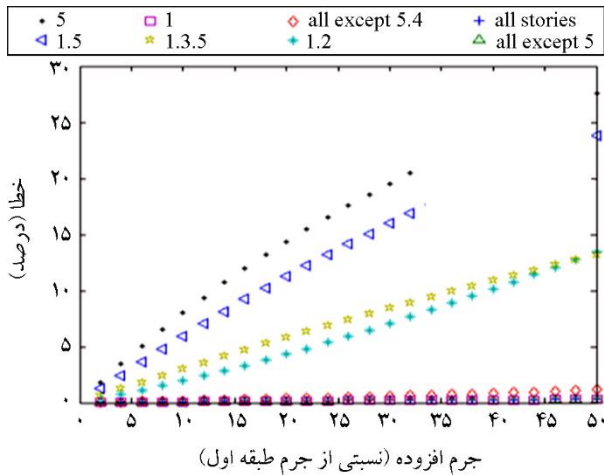
شماره مد	۱	۲	۳	۴	۵
معیار اطمینان مدی	1.0000E+00	1.0000E+00	9.9994E-01	9.9987E-01	9.9965E-01



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



شکل (۸): خطای ایجاد شده در محاسبه ضریب مقیاس در ترکیب‌های مختلف جرم افزوده.

در شکل (۸) نکاتی به چشم می‌خورند: اول، انتخاب مقادیر کوچک جرم افزوده به مقدار خطای کوچک‌تری در شناسایی منتهی می‌گردد. دوم، بارگذاری فقط طبقه‌ی اول به نتایج بسیار خوبی منتهی شده است. سوم، در صورت بارگذاری چند طبقه، انتخاب طبقه‌های پایین از اهمیت بیشتری برخوردار است. شاید بتوان گفت که باید حتماً طبقات بیش از نصف ارتفاع سازه بارگذاری شوند. ماتریس جرم از رابطه (۳۳) شناسایی شده و نتایج در جدول (۱۲) برای وضعیت حال‌های بدون نوبه و نوبه 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 نوبه	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 1.5994E+01 1.4968E+01 -2.6091E-02	-1.9309E-02 -3.4603E-02 -3.7486E-02 -2.6091E-02 1.3983E+01
شناسایی شده با نوبه 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 1.4972E+01 1.4972E+01 -2.6659E-02	-1.3225E-02 -4.0434E-02 -3.7440E-02 -2.6659E-02 1.3979E+01

۳-۲-۴- شناسایی ماتریس‌های مشخصه دینامیکی سیستم مرتبه دوم از روش مستقیم

مانند مثال قبل، پس از شناسایی پارامترهای دینامیکی سازه از روش شناسایی زیرفضای تصادفی و نیز شناسایی ماتریس‌های حالت در فرم گسسته، با استفاده از روش مستقیم پیشنهادی ماتریس سیستم کلاسیک به فرم پیوسته زمانی استخراج می‌گردد. اکنون با داشتن ماتریس جرم، همان گونه که توضیح داده شد، ماتریس‌های سختی و میرایی به صورت مستقیم قابل شناسایی خواهند بود. برای تشکیل ماتریس جرم دو راه وجود دارد: (۱) استفاده از مشخصه‌های ظاهری، (۲) استفاده از یک آزمایش مستقل ارتعاش محیطی. در مثال قبل توضیح داده شد که روش دوم از لحاظ نزدیک بودن به واقعیت، روش بهتری است.

۳-۲-۴-۱- شناسایی ماتریس جرم

با انجام یک سری کارهای تحلیلی، بر روی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده طی آزمایش دوم ارتعاش محیطی، ماتریس جرم سازه شناسایی می‌گردد. برای انجام این آزمایش، علاوه بر میزان جرم افزوده طبقات، محل قرارگیری آنها نیز در میزان دقت روش بسیار تأثیرگذار است. در این مثال با به کارگیری روش برینکر و اندرسن [۲۴]، مقدار خطای نتایج حاصل از مقادیر مختلف جرم افزوده و محل قرارگیری آن در طبقات بررسی شده که نتایج در شکل (۸) ترسیم شده‌اند.

۲-۳-۲-۴- شناسایی ماتریس سختی و میرایی

استفاده شده است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند، هر چند 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. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی قادر است ماتریس‌های بسیار نزدیک به ماتریس حقیقی سازه را حتی برای پاسخ‌های آلوده به نوفه ۱۰ درصد نیز به خوبی و با دقت بالا شناسایی نماید.

پس از شناسایی ماتریس جرم از انجام آزمایش مستقل جرم افزوده، از روش مستقیم برای شناسایی ماتریس‌های سختی و میرایی استفاده می‌گردد. بدین ترتیب که با پیش‌ضرب وارون ماتریس جرم در نیمه پایین ماتریس سیستم در فرم کلاسیک، ماتریس‌های سختی و میرایی به دست می‌آیند که نتایج در جدول‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند. در این شناسایی نیز از ۱ بیست برابر مرتبه‌ی سیستم

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

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

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

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

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 تکیه گاهی ناشی از زلزله طبس قرار داده‌ایم. نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی در جدول‌های (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 ۱۰ درصد	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 ۱۰ درصد	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 ۱۰ درصد	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 داده‌های 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

- Automated output-only dynamic identification of civil engineering structure. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
12. Facchini, L., Betti, M., and Biagini, P. (2014) Neural network based modal identification of structural systems through output-only measurement. *Computers and Structures*.
 13. Ni, P., Xia, Y., and Hao, H. (2018) Improved decentralized structural identification with output-only measurement. *Measurement*, 597-610.
 14. Peeters, B. (2000) *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.
 15. Katayama, T. (2005) *Subspace Methods for System Identification*. Springer.
 16. Brincker, R. and 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. and 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., Guillaume, 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., and 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*.
 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. and 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. Brincker, R., Lingmi, Z., and 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., and 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., and 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. Rainieri, C. and Fabbrocino, G. (2010)

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

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

Introducing a Method for Identification of All Dynamic Characteristics Matrices of Shear Buildings Using Output-Only Data

Rasoul Khodayari¹, Omid Bahar^{2*}, and Mohsen Ghafory-Ashtiany³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: omidbahar@iiees.ac.ir
3. Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Nowadays, system identification methods have found special place in civil engineering due to extended application in health monitoring and damage detection of structures. Among these, due to limitations caused by stimulation of large scale actual structures, structure engineers are mostly leading toward identification methods based on output-only data. In this study, a method was proposed based on identification of Stochastic Subspace Identification (SSI) method in time domain to identify all structural matrices including mass, damping and stiffness in shear buildings. This method is highly able to identify structural matrices even in working with noise-polluted data. When using SSI with reviewing realization theory, we have never proper information about real degrees of freedom of the system. Hence, system matrices are identifiable in various forms, all of which are true realizations of the system. To explore the main matrices of structural model, the proposed method relies on finding realization of the minimal matrix of the system in the classical form. To evaluate the effectiveness of suggested method, two numerical models of 3 and 5 stories is used. Results of the numerical analysis indicate accuracy of suggested identification method, even in using high noise polluted data.

Keywords: System Recognition; Dynamic Feature Matrix; Output-Only; Random Subspace; Shear Structure.