

شناسایی آسیب سازه‌های فولادی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود و برپایه‌ی داده‌های کرنش

نرگس فلاح (دانشجوی دکتری)

سید روح‌الله حسینی واعظ* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه قم

اکبر اسفندیاری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (پژوهشی)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۳۹-۴۹، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، یک روش جدید برای شناسایی آسیب سازه‌ها ارائه شده است، که بر پایه‌ی تحلیل مؤلفه‌های اصلی و داده‌های چگالی طیفی توان کرنش - محور فرمول‌بندی شده است. عیب‌یابی، شامل یافتن مکان و مقدار آسیب است، که توسط یک معادله‌ی حساسیت ابداعی و با استفاده از داده‌های کرنش و بهینه‌سازی کمینه‌ی مربعات حل شده است. داده‌های مذکور از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی غیرکامل سازه گرفته شده‌اند. روش ارائه شده مبتنی بر استفاده از داده‌های حوزه‌ی بسامد بوده و از تغییرات به وجود آمده در سختی المان‌ها به این منظور استفاده شده است. به منظور اثبات توانایی روش اخیر، دو سازه‌ی فازی، شامل یک خرپای دوطبقه و یک قاب دوطبقه دو دهانه انتخاب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که حتی با وجود خطای اندازه‌گیری، عملکرد روش ارائه شده خوب بوده است. همچنین، مقایسه‌ی روش ارائه شده با روش‌های دیگر نشان می‌دهد که نتایج معادله‌ی اشاره شده، حساسیت مناسب‌تری نسبت به دیگر روش‌های کرنش - محور دارد.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، به‌روزرسانی مدل، داده‌ی کرنش، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تجزیه‌ی مقادیر تکین، چگالی طیفی توان.

۱. مقدمه

بلایای طبیعی و ناخوشایند همچون زلزله، سیل و طوفان ممکن است در سازه‌های مهم مهندسی منجر به آسیب‌های ناگهانی فاجعه‌بار شود و با ایجاد خسارت‌های اقتصادی، تهدیدهای جانی برای انسان‌ها نیز به بار آورند. بنابراین سازه‌های مهم، با توجه به میزان اهمیت‌شان نیاز به تجهیز با حسگرهای مناسب جهت پایش و بازرسی سلامت دارند. به همین جهت، تلاش‌های بسیاری برای مکان و مقدار یابی خرابی سازه‌ها شده و پژوهشگران بسیاری از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود استفاده کرده‌اند. پژوهشگران بسیاری به منظور شناسایی آسیب سازه‌ها از روش‌های شناسایی آسیب کلی^۱ و تغییرات در پاسخ‌های سازه‌ی منتج شده از خرابی استفاده کرده‌اند. روش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۵، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2023.61055.3144

استناد به این مقاله:

فلاح، نرگس، حسینی واعظ، سید روح‌الله و اسفندیاری، اکبر، ۱۴۰۲. شناسایی آسیب سازه‌های فولادی با استفاده از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود و برپایه‌ی داده‌های کرنش. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۳۹-۴۹.

nfallah@stu.qom.ac.ir
hoseinivaez@qom.ac.ir
a_esfandiari@aut.ac.ir

ارائه شده در پژوهش حاضر، مبتنی بر استفاده از داده‌های حوزه‌ی بسامد است، که عملاً شفافیت بیشتری نسبت به داده‌های حاصل از روش‌های حوزه‌ی زمان دارد. همچنین در پژوهش حاضر، فقط از تغییرات به وجود آمده در سختی المان‌ها جهت عیب‌یابی استفاده شده است. تغییرات مذکور شامل تغییرات در مدول کشسانی المان‌ها و یا سطح مقطع‌شان بوده و نسبت به روش‌های دیگر که علاوه بر سختی، از تغییرات ماتریس‌های میرایی و جرم هم برای شناسایی آسیب بهره می‌گیرند، از پیچیدگی‌های غیرضروری خودداری می‌کند و در نتیجه، کارایی بیشتری در عیب‌یابی بسیاری از سازه‌های بزرگ و با جرم بالا دارد.

ویژگی‌هایی همچون مؤلفه‌های اصلی (PCs) داده‌های دینامیکی سازه به منظور عیب‌یابی، حساسیت بیشتری دارند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی معمولاً به دو شیوه استفاده می‌شود: در روش اول، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نقش اصلی را در فرایند

شناسایی و مکان‌یابی خرابی ایفا می‌کند. در حالی که در روش دوم، به عنوان مرحله‌ی اولیه برای دیگر الگوریتم‌های شناسایی آسیب استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر نیز حیطه‌ی کار معطوف به روش اول بوده است.

به منظور عیب‌یابی، ماتریس حساسیت مربوط به تغییرات ماتریس سختی با تغییرات به وجود آمده در تابع PSD و مقادیر اصلی حاصل از تجزیه‌ی مقادیر تکین آن تشکیل می‌شود. سپس با مقایسه بین مقادیر به دست آمده از حل معادله‌ی حساسیت و مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی اندازه‌گیری، مدل عددی اولیه جهت نزدیک شدن به مدل عددی تغییر یافته به علت خرابی به روزرسانی می‌شود. معادلات حساسیت با روش کمینه‌ی مربعات و با اعمال وزن‌دهی مناسب حل می‌شوند. فرضیات مهم لحاظ شده در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- تحریک سازه توسط نیرویی نظیر چکش مودال انجام و از آثار ارتعاش‌های محیطی صرف نظر می‌شود.
- رفتار سازه تحت بارهای وارده در دامنه‌ی ارتعاشی مورد مطالعه، خطی فرض شده است.
- در پژوهش حاضر، از آثار شرایط محیطی مثل دما و رطوبت در پاسخ سازه صرف نظر شده است.
- خرابی تحت بارگذاری استاتیکی ایجاد شده و به عواملی چون خوردگی فولاد و خزش پرداخته نشده است.

۱.۱. مروری بر ادبیات فنی

روش‌های عیب‌یابی کلی با بهره‌گیری از تغییرات پارامترهای سازه‌یی و توسط پاسخ‌های اندازه‌گیری شده‌ی آن، که عبارت‌اند از: تغییر شکل‌ها، کرنش‌های استاتیکی و شکل‌های مودی، [۲۱] پاسخ‌های بسامدی، [۲۲] توابع پاسخ بسامدی (FRF)، [۲۳]، [۲۴] نرمی مودال، [۲۵] انحنا‌ی شکل مودال، [۲۶] انرژی کرنشی مودال و کرنش‌های مودال، [۲۷] و [۲۸] دیگر پاسخ‌های دینامیکی [۲۹] و دیگر پاسخ‌های استاتیکی، [۳۰] کار می‌کنند.

برتری‌های به کارگیری داده‌های کرنش مودال اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج نسبت به شکل‌های مودی اندازه‌گیری شده با شتاب‌سنج توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. [۳۱] یاو و همکاران (۱۹۹۲)، نشان دادند که کرنش‌های مودال برای مکان‌یابی آسیب به مراتب بهتر از داده‌های تغییر شکل عمل می‌کنند. [۳۲] کرنش‌سنج‌ها در مقایسه با شتاب‌سنج، اولویت‌هایی همچون جمع و جور بودن، وزن سبک، دوام و استحکام بیشتر، نصب آسان و کم هزینه‌تر و مقاومت بیشتر در برابر دما دارند. بیهقی و اسفندیاری (۲۰۱۸)، با استفاده از داده‌های کرنش غیرکامل به عیب‌یابی پرداخته و روشی بر پایه‌ی به روزرسانی مدل سازه ارائه داده‌اند. [۳۳]

داده‌ی PSD، یکی از حساس‌ترین پارامترهای سازه‌یی به شمار می‌رود و از آنجایی که به دلیل تابع انتقال درجه‌ی دوم بودن، یک تابع غیرخطی نیز محسوب می‌شود، مزایای مطمئنی در به کارگیری در شناسایی آسیب دارد. [۳۴]

بنابراین PSD در مقایسه با FRF، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پارامترهای سازه‌یی دارد. [۳۵] همچنین ماتریس PSD به علت وجود پارامترهای طیف چگالی مستقیم^۴ و طیف چگالی متقاطع^۵، داده‌های بیشتری دارد. زنگ و همکاران (۲۰۱۵)، یک روش عیب‌یابی بر پایه‌ی تحلیل حساسیت داده‌ی PSD ارائه دادند. [۳۶] ایشان راستی‌آزمایی روش خود را با مدل کردن عددی یک سازه‌ی بلند برشی و یک سازه‌ی قاب دوطبقه بررسی کرده‌اند. پدram و همکاران (۲۰۱۷)،

نیز یک روش شناسایی خرابی حساسیت‌محور با استفاده از داده‌ی PSD ارائه داده‌اند. [۳۷]

ها و گالینوال^۶ (۲۰۱۰)، در بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی خرابی در سازه‌های خطی شکل مثل مدل تیر، روش شناسایی مکان خرابی خود را براساس حساسیت‌های مؤلفه‌های اصلی مربوط به داده‌های FRF ارائه داده‌اند. [۳۸] همچنین اسفندیاری و همکاران (۲۰۲۰)، معادله‌ی حساسیتی بر پایه‌ی تغییرات PCs متناظر با داده‌های FRF جهت شناسایی خرابی ارائه کرده‌اند. [۳۹] ایشان از تجزیه‌ی مقادیر تکین سمت چپ^۷ مربوط به داده‌های FRF برای عیب‌یابی تعدادی از سازه‌های دوطبقه بهره جستند. بولورانی و همکاران (۲۰۲۱)، از روش‌های PCA و ماشین بردار پشتیبان^۸ جهت توسعه‌ی یک سیستم پایش سلامت سازه‌یی برای شناسایی مؤثر در واکنش‌های بندر استفاده کرده‌اند. [۴۰]

یکی از کلیدی‌ترین مسائل مهم برای یک به روزرسانی مدل موفق، داشتن یک رابطه‌ی حساسیت صحیح و مناسب است. برای برخی از ویژگی‌های سازه‌یی همچون PSD، که با توجه به آنچه که ذکر شده است، حساسیت بالایی دارد، کارا بودن معادله‌ی حساسیت نیز ضریب اهمیت بیشتری دارد. در پژوهش حاضر، یک معادله‌ی حساسیت بر پایه‌ی مؤلفه‌های اصلی متناظر با داده‌های غیرکامل پاسخ PSD کرنش - محور جهت عیب‌یابی ارائه شده است. جهت اثبات کارایی و صحت روش ارائه شده، دو مدل عددی دوطبقه شامل یک خرپا و یک قاب فولادی که دارای وزن زیرسازه روی اعضاء افقی‌شان هستند، بررسی شده‌اند. همچنین روش ارائه شده با دیگر روش‌ها مقایسه و نتایج ارائه شده‌اند.

۲. پیاده‌سازی معادله‌ی حساسیت

۲.۱. فرمول‌بندی

برای فرمول‌بندی یک معادله‌ی حساسیت براساس داده‌ی کرنش، ابتدا باید کرنش دینامیکی را محاسبه کرد و سپس تابع پاسخ بسامدی و تابع چگالی توان طیف کرنش - محور را به دست آورد. سپس برای فرمول‌بندی معادله‌ی حساسیت براساس تجزیه‌ی مقادیر تکین باید به سراغ پیاده کردن روش مذکور روی PSD رفت و معلومات و مجهولات معادله را به منظور پیاده‌سازی معادله‌ی باقی‌مانده دسته‌بندی کرد. برای این منظور، شکل ۱ ارائه شده است. همچنین قابل ذکر است که رابطه‌های ج ۱ تا ج ۱۳ که در شکل ۱ استفاده شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی المان‌های تیر و خرپا است.

سمت راست روابط ج ۱۳ و ج ۱۴ تابعی از تغییرات PSD یعنی δS_{ϵ}^l است، که به عبارتی تابعی از تغییرات مؤلفه‌های سازه‌یی هستند. همچنین، سمت چپ آنها مقادیر معلومی هستند که می‌توان آنها را محاسبه کرد. بنابراین سمت چپ روابط اخیر را می‌توان به صورت δr_j از آمین باقی‌مانده (δr_j) بازنویسی کرد (روابط ۱ و ۲):

$$\delta r_j^v = \delta \mathbf{V}_j - (\mathbf{S}_{\epsilon}^l)^T \mathbf{U}_j \sum_{jd}^{-1} - (\mathbf{S}_{\epsilon}^l)^T \delta \mathbf{U}_j \sum_{jd}^{-1} \quad (1)$$

$$\delta r_j^{\Sigma} = \delta \sum_j - \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_{\epsilon}^l \delta \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_{\epsilon}^l \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_{\epsilon}^l \delta \mathbf{V}_j \quad (2)$$

با توجه به آنچه گفته شد، معادله‌ی حساسیت به شکل روابط ۳ و ۴ خواهد بود:

$$\delta r_j^v = \mathbf{S} \mathbf{E}_j^v \delta \mathbf{P} \quad (3)$$

$$\delta r_j^{\Sigma} = \mathbf{S} \mathbf{E}_j^{\Sigma} \delta \mathbf{P} \quad (4)$$

۱- محاسبه ماتریس انتقال کرنش-تغییر مکان ($\mathbf{B}_n$) برای المان‌های خرپا و قاب با استفاده از روابط (ج ۱) و (ج ۲) و با توجه به روابط تعیین کرنش المان‌ها (ج ۳) و (ج ۴) و شکل (۲) [۲۲]

۲- محاسبه ماتریس انتقال کرنش-تغییر مکان ($\mathbf{B}$) کل سازه با سوار نمودن ماتریس هر المان در ماتریس جابه‌جایی کرنش کل سازه [۲۲]

۳- محاسبه ماتریس‌های انتقال یا FRF ($\mathbf{H}(\omega)$) و چگالی طیف توان، ($\mathbf{S}_{xx}(\omega)$) با استفاده از روابط (ج ۵) و (ج ۶)

۴- محاسبه ماتریس‌های FRF و سپس چگالی طیف توان کرنش-محور با استفاده از روابط (ج ۷) و (ج ۸)

۵- محاسبه ماتریس چگالی توان طیفی کرنش-محور، ($\mathbf{S}_e^l(\omega_i, \xi)$)، با استفاده از m المان اندازه‌گیری شده برای فرکانس نام در مکان تحریک λ ام با رابطه (ج ۹)

۶- ساخت ماتریس $\mathbf{S}_e^l$ با قرار دادن درایه‌های غیرتکراری ($\mathbf{S}_e^l(\omega_i, \xi)$) به ازای هر فرکانس i در یک ستون از ماتریس (ج ۱۰)؛ آرایه (k, r) از ماتریس $\mathbf{S}_e^l$ ، متناظر است با آرایه ردیف p ام و ستون q ام از ماتریس ($\mathbf{S}_e^l(\omega_p, \xi)$) که به ترتیب $1:m$ و $p:m$ هستند.

۷- تجزیه ماتریس $\mathbf{S}_e^l$ با استفاده از تکنیک SVD مطابق رابطه (ج ۱۱) و محاسبه سه ماتریس $\mathbf{U}$ ، $\mathbf{V}$ و $\mathbf{\Sigma}$.

۸- جداسازی معلومات و مجهولات مساله در دو سمت با فرمول‌بندی $\mathbf{V}$ و $\mathbf{\Sigma}$ بر اساس ماتریس $\mathbf{S}_e^l$ با توجه به (ج ۱۲) و رسیدن به روابط (ج ۱۳) و (ج ۱۴).

شکل ۱. مراحل پیاده‌سازی اولیه‌ی معادلات و جداسازی معلومات و مجهولات مسئله.

جدول ۱. روابط مربوط به شکل ۱.

رابطه	بر حسب رابطه
$\mathbf{B}_n = \frac{1}{L_n} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	(ج ۱)
$\mathbf{B}_n(\xi) = \frac{1}{L_n} \begin{bmatrix} -1 & -6\bar{y}\xi/L_n & -\bar{y}(6\xi-2)/2 & 1 & -6\bar{y}\xi/L_n & -\bar{y}(6\xi+2)/2 \end{bmatrix}$ که $\xi = \left(\frac{2\bar{x}}{L_n} \right) - 1$	(ج ۲)
$\varepsilon_n = \frac{1}{L_n} (\bar{u}_j - \bar{u}_i)$	(ج ۳)
$\varepsilon_n = -\bar{y} (d^2 \bar{v} / d^2 \bar{v}^2)$	(ج ۴)
$\mathbf{H}(\omega) = (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + i \omega \mathbf{C})^{-1}$	(ج ۵)
$\mathbf{S}_{xx}(\omega) = \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}^T(\omega)$	(ج ۶)
$\mathbf{H}_e(\omega, \xi) = \mathbf{B}(\xi) \mathbf{H}(\omega)$	(ج ۷)
$\mathbf{S}_{ee}(\omega, \xi) = \mathbf{H}_e^*(\omega, \xi) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}_e^T(\omega, \xi)$	(ج ۸)
$\mathbf{S}_e^l(\omega_i, \xi) = [s_{p,q}] \in \mathbb{R}^{m \times m}$	(ج ۹)
$n_{data} = m \times (m+1) / 2$ که $\mathbf{S}_e^l = [s_{k,r}] \in \mathbb{R}^{n_{data} \times n}$	(ج ۱۰)
$\mathbf{S}_e^l = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$	(ج ۱۱)
$\mathbf{\Sigma}_d = \mathbf{\Sigma} + \delta \mathbf{\Sigma}$ و $\mathbf{U}_d = \mathbf{U} + \delta \mathbf{U}$ ، $\mathbf{V}_d = \mathbf{V} + \delta \mathbf{V}$	(ج ۱۲)
$\delta \mathbf{V}_j - (\mathbf{S}_e^l)^T \mathbf{U}_j (\mathbf{\Sigma}_{jd})^{-1} - (\mathbf{S}_e^l)^T \delta \mathbf{U}_j \mathbf{\Sigma}_{jd}^{-1} = (\delta \mathbf{S}_e^l)^T \mathbf{U}_j^d \mathbf{\Sigma}_{jd}^{-1}$	(ج ۱۳)
$\delta \mathbf{\Sigma}_j - \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \delta \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \mathbf{V}_j - \delta \mathbf{U}_j^T \mathbf{S}_e^l \delta \mathbf{V}_j = (\mathbf{U}_j^d)^T \delta \mathbf{S}_e^l \mathbf{V}_j^d$	(ج ۱۴)

که در آنها، $\mathbf{SE}_j^{\Sigma}$ و $\mathbf{SE}_j^{\mathbf{V}}$ ماتریس‌های حساسیت به ازاء $\mathbf{Z}$ آمین مؤلفه‌ی اصلی و بر پایه‌ی ماتریس‌های $\mathbf{V}$ و $\mathbf{\Sigma}$ هستند.

تغییرات پارامترهای سختی، جرم و میرایی به تغییرات $\mathbf{Z}$ آمین مقدار تکین وابسته است $\delta \mathbf{P}$ تغییرات بردار $\mathbf{P}$ با ابعاد $(1 \times ne)$ است، که شامل مقادیر خرابی در همه‌ی المان‌های سازه‌ی است.

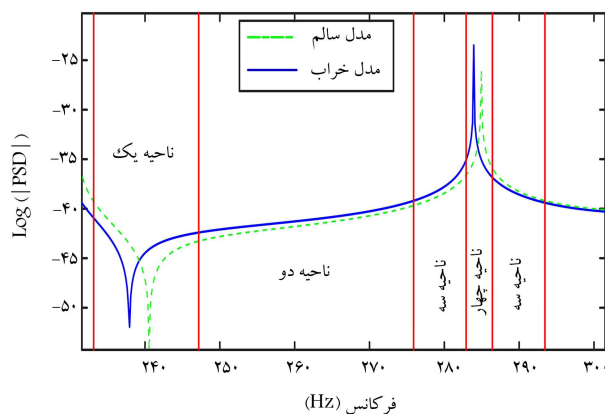
تغییرات چگالی طیفی پاسخ سازه از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید: [۱۹]

$$\delta \mathbf{S}_{ee}(\omega) = -\mathbf{H}_e^*(\omega) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}(\omega) \delta \mathbf{K}(\omega) \mathbf{H}_{ed}^T(\omega) - \mathbf{H}_{ed}^*(\omega) \delta \mathbf{K}(\omega) \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}_{ed}^T(\omega) \quad (۶)$$

$$\delta \mathbf{S}_{ee}(\omega) = -\mathbf{H}_e^*(\omega) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}(\omega) \delta \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{H}_{ed}^T(\omega) - \mathbf{H}_{ed}^*(\omega) \delta \mathbf{Z}^*(\omega) \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}_{ed}^T(\omega) \quad (۷)$$

$$\delta \mathbf{S}_{ee}(\omega) = -\mathbf{H}_e^*(\omega) \delta \mathbf{Z}^*(\omega) \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_{FF} \mathbf{H}_{ed}^T(\omega) \quad (۵)$$

تغییرات ماتریس سختی را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۸ بسط داد: [۲۲]



شکل ۳. شاخص‌گذاری نواحی مختلف نمودار طیف چگالی طیفی جهت انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب. [۲۴]

می‌شود. بنابراین به روشی برای اندازه‌گیری غیرکامل تابع پاسخ بسامدی کرنش - محور نیاز است. در پژوهش حاضر، از معادله‌ی ۱۳ جهت محاسبه‌ی FRF تقریبی کرنش - محور استفاده شده است: [۲۴]

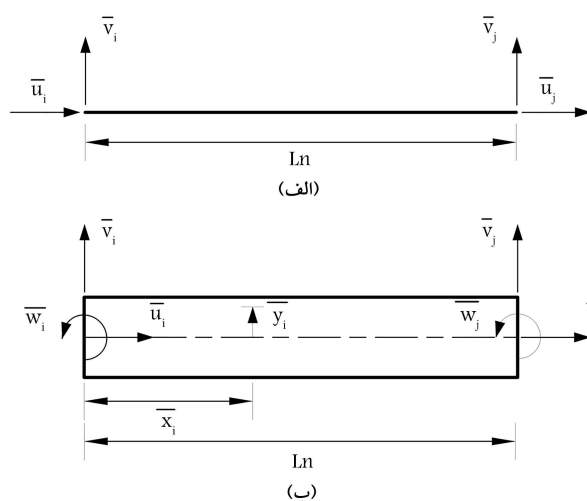
$$\mathbf{H}_{ed}^{approx}(\omega) = \mathbf{B} \left\{ \sum_{j=1}^m \frac{\phi_{jh} \phi_{jh}^T}{\Omega_{jd}^2 - \omega^2 + 2i\xi_{jd}\Omega_{jd}\omega} + \sum_{j=m+1}^{nd} \frac{\phi_{jh} \phi_{jh}^T}{\Omega_{jh}^2 - \omega^2 + 2i\xi_{jh}\Omega_{jh}\omega} \right\} \quad (13)$$

که در آن، ϕ_{jh} از آمین شکل مود سازه‌ی سالم و Ω_{jd} ، آمین بسامد طبیعی سازه‌ی آسیب‌دیده، ω بسامد تحریک، ξ_{jd} ضریب میرایی آمین مود و nd تعداد پاسخ‌های موجود هستند. اندازه‌گیری کامل شکل مودها در صورت کسر امکان‌پذیر نیست، بنابراین از روش تابع پاسخ بسامدی تقریبی استفاده می‌شود. عبارت دوم در معادله‌ی مذکور، برای کاهش اثر عدم اندازه‌گیری کامل در بسامدهای بالاتر اضافه شده است؛ که در حین فرایند بهنگام‌سازی ضمن تصحیح شکل مودهای بالاتر منجر به بهبود هم‌گرایی و بهنگام‌سازی می‌شود.

۳.۲. انتخاب محدوده‌ی بسامدی

انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب موجب می‌شود که تأثیر خطای ناشی از اندازه‌گیری و مشکلات در مدل‌سازی میرایی در فرایند شناسایی خرابی کمتر شود و فرایند بهنگام‌سازی آهنگ هم‌گرایی بهتری را داشته باشد. همچنین انتخاب محدوده‌ی بسامدی مناسب در کارکرد رابطه‌ی تقریبی نیز مهم است. برای روشن‌سازی این نکته، یک نمونه از نمودار چگالی طیفی $S_{xx}(\omega)$ در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که به چهار ناحیه‌ی A، B، C و D تقسیم‌بندی شده است. خواص و ویژگی‌های نواحی اخیر در ادامه ارائه شده است: [۲۴]

- **ناحیه‌ی A:** در ناحیه‌ی A، دامنه‌ی طیف چگالی کم و تحت تأثیر خطای اندازه‌گیری زیاد است، بنابراین از نقاط بسامدی مذکور صرف‌نظر می‌شود.
- **ناحیه‌ی B:** در این ناحیه، مقدار PSD دو حالت آسیب‌دیده و سالم تحت تأثیر خطای اندازه‌گیری بوده و معادله‌ی حساسیت استخراج شده، دقت کمی داشته است. به بیان بهتر، از آنجا که تابع پاسخ بسامدی تقریبی توسط مخرج کنترل می‌شود، دقت بالایی در نزدیکی بسامدهای طبیعی دارد.



شکل ۲. الف) المان خراب، ب) المان قاب.

$$\delta \mathbf{K} = \mathbf{A}_s \delta \mathbf{P}_s \mathbf{A}_s^T \quad (8)$$

که در آن، $\mathbf{P}_s$ و $\mathbf{A}_s$ به ترتیب شامل مقادیر ویژه و غیرصفر ماتریس سختی و بردارهای متناظر با مقادیر ویژه و غیرصفر ماتریس مذکور هستند و تغییرات متناظر با پارامترهای سختی المان‌ها در اثر خرابی است. با جایگذاری رابطه‌ی ۸ در رابطه‌ی ۷، برای آرایه‌ی $\mathbf{K}_e$ از $\delta \mathbf{S}_e^l$ ، رابطه‌ی ۹ را خواهیم داشت:

$$\delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} = -\mathbf{H}_{P_i}^{e,*}(\omega_r) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}(\omega_r) \mathbf{A}_s \text{diag}(\mathbf{A}_s^T \mathbf{H}_{T,q}^{T,ed}(\omega_r)) \delta \mathbf{P} - \mathbf{H}_{q,i}^{*,ed}(\omega_r) \mathbf{A}_s \text{diag}(\mathbf{A}_s^T \mathbf{H}^*(\omega_r) \mathbf{S}_{FF}^l \mathbf{H}_{T,q}^{T,ed}(\omega_r)) \delta \mathbf{P} \quad (9)$$

با جایگذاری رابطه‌ی اخیر در سمت راست روابط ج ۱۳ و ج ۱۴، ماتریس حساسیت برای آمین مؤلفه‌ی اصلی مطابق رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{SE}(r, :)^V_j = \sum_{k=1}^{n_{data}} \delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} \mathbf{U}_{pj}^d \sum_{jd=1}^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{SE}_j^\Sigma = \sum_{k=1}^{n_{data}} \sum_{r=1}^n \mathbf{U}_{kj}^d \delta \mathbf{S}_{k,r}^{el} \mathbf{V}_{kj}^d \quad (11)$$

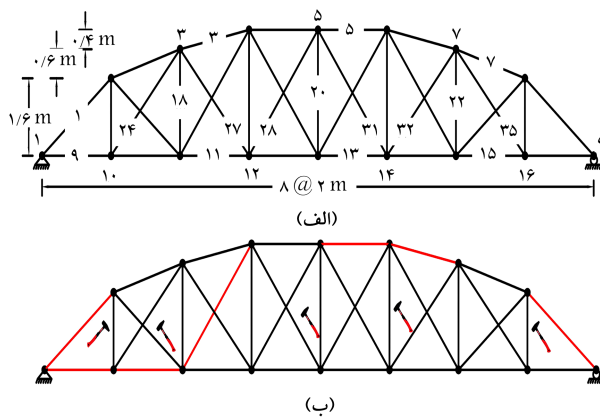
و برای تمامی مؤلفه‌های اصلی به طور خلاصه، معادله‌ی حساسیت به شکل رابطه‌ی ۱۲ است:

$$\begin{pmatrix} \delta r^V \\ \delta r^\Sigma \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{SE}^V \\ \mathbf{SE}^\Sigma \end{bmatrix} \delta \mathbf{P} \quad (12)$$

که رابطه‌ی اخیر می‌تواند به عنوان یک مسئله‌ی کمینه‌ی مربعات مقید خطی توسط تابع «lsqlin» نرم‌افزار متلب (نسخه‌ی ۲۰۱۴)، [۲۴] به منظور محاسبه‌ی $\delta \mathbf{P}$ حل شود.

۲.۲. اندازه‌گیری ناکامل

روش ارائه شده برای بهنگام‌سازی مدل اجزاء محدود، نیازمند به اندازه‌گیری تابع پاسخ بسامدی دقیق سازه‌ی آسیب‌دیده است. این در حالی است که در شرایط عملیاتی به دلیل محدودیت‌های فنی و مالی تهیه و نصب حسگر، اندازه‌گیری پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده در تمام اعضاء سازه از جمله در المان‌های سازه‌ی قاب غیرممکن



شکل ۵. الف) هندسه‌ی سازه‌ی خرپا؛ ب) المان‌های اندازه‌گیری و تحریک.

جدول ۲. ویژگی المان‌های خرپا.

المان‌ها	سطح مقطع (mm^2)
۱-۸	۱۸۰۰
۹-۱۶	۱۵۰۰
۱۷-۲۳	۱۰۰۰
۲۴-۳۵	۱۲۰۰
مدول کشسانی (MPa)	
۱-۳۵	2×10^5
چگالی جرمی (kg/m^3)	
۱-۳۵	۷۳۰۰

جدول ۳. سناریوهای خرابی سازه‌ی خرپا.

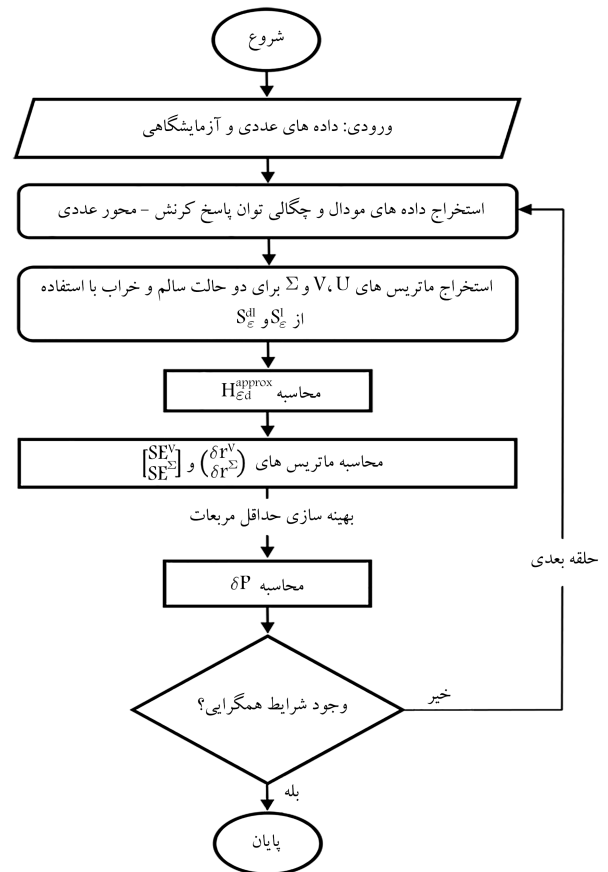
سناریو	شماره‌ی المان	مقدار خرابی
۱	۱۶، ۷	$0/30^\circ$ و $0/40^\circ$
۲	۱۸، ۵ و ۲۴	$0/30^\circ$ ، $0/35^\circ$ و $0/35^\circ$
۳	۲۸، ۱۵، ۹ و ۳۴	$0/30^\circ$ ، $0/40^\circ$ و $0/30^\circ$
۴	۸، ۵، ۱۰، ۲۷ و ۳۳	$0/20^\circ$ ، $0/30^\circ$ ، $0/30^\circ$ و $0/25^\circ$

می‌شود. در پژوهش حاضر، ۱۵ و $0/5^\circ$ درصد خطای اندازه‌گیری به ترتیب برای چگالی طیفی پاسخ و بسامدهای طبیعی در نظر گرفته شده و به صورت تصادفی به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود اضافه شده است.

۱.۳. خرابای ۳۵ عضوی

اولین سازه‌ی بررسی شده، یک خرپای فلزی معیار^۹ دوبعدی بوده است، که مشخصات هندسی و المان‌های اندازه‌گیری و تحریک آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مدل خرپا دارای ۳۵ عضو میله‌ای و ۲۹ درجه‌ی آزادی کلی بوده است، که ویژگی المان‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای بررسی کارکرد و توانایی روش ارائه شده، ۴ سناریوی خرابی فرض شده و جزئیات مقادیر و المان‌های خراب در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی وزن روسازه، مقدار 10000 کیلوگرم جرم متمرکز بر روی درجه‌های آزادی المان‌های پایینی سازه اعمال شده است.^[۲۷]

به منظور به‌روزرسانی خرپای ۳۵ عضوی، محدوده‌های بسامدی در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۴). برای شبیه‌سازی داده‌های مودال مدل آسیب‌دیده، المان‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۹، ۱۰ و ۲۶ اندازه‌گیری شده و به عبارت دیگر تعداد حسگرها، ۷ عدد



شکل ۴. الگوریتم روش ارائه شده.

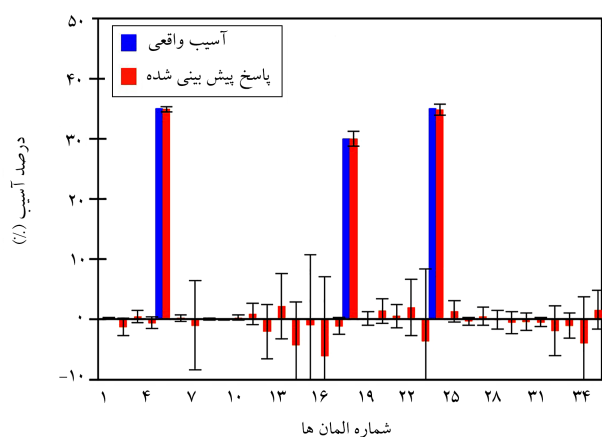
- ناحیه‌ی C: در بازه‌ی C بسامدی، اثر میرایی قابل صرف‌نظر و همچنین اختلاف دامنه‌ی پاسخ دو سازه، میزان چشمگیری دارد.
- ناحیه‌ی D: در این ناحیه، چگالی طیفی پاسخ هر دو مدل تحلیلی و آسیب‌دیده تحت تأثیر خواص میرایی است، بنابراین در غیاب یک مدل مناسب برای میرایی سازه‌ی، بهنگام‌سازی مدل موفق نخواهد بود.

با توجه به نکات ذکر شده، ناحیه‌ی A، بازه‌ی بسامدی مناسب برای بهنگام‌سازی خواهد بود.

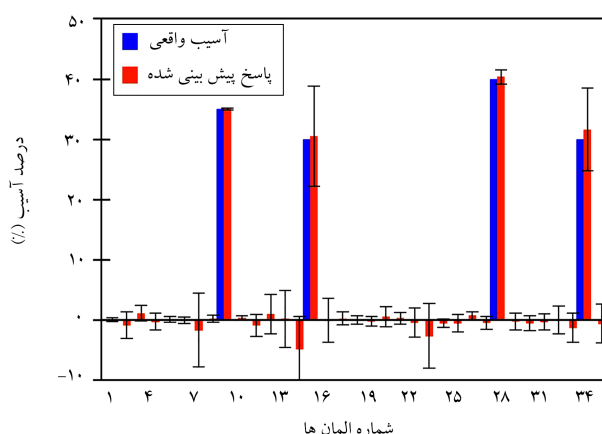
آثار میرایی باعث کنترل دامنه‌ی PSD می‌شود، لذا در بسامدهای نزدیک ناحیه‌ی تشدید بیشتر نمایان می‌شود. با دور شدن نقاط بسامدی از ناحیه‌ی تشدید، آثار میرایی به شدت کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر، به منظور عدم در نظرگیری میرایی برای به‌روزرسانی مدل، نواحی بسامدی به اندازه‌ی کافی از مناطق تشدید دور در نظر گرفته شده‌اند.^[۲۵، ۲۶] به طور کلی روش ارائه شده در قالب یک فلوچارت در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳. مثال‌های عددی

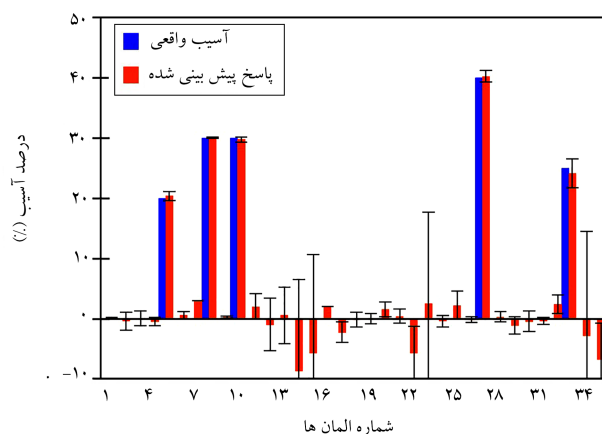
به منظور بررسی توانایی و دقت معادله‌ی حساسیت ارائه شده در شناسایی خرابی، روش پیشنهادی روی دو سازه‌ی فلزی خرپا و قاب دوبعدی اعمال و نتایج بررسی شده است. جهت بررسی عددی پایداری روش‌های بهنگام‌سازی در مقابل خطای اندازه‌گیری، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و انجام ۵۰ اجرای مستقل توسط برنامه استفاده



شکل ۷. پاسخ سناریوی دوم خرپای ۳۵ عضوی.



شکل ۸. پاسخ سناریوی سوم خرپای ۳۵ عضوی.



شکل ۹. پاسخ سناریوی چهارم خرپای ۳۵ عضوی.

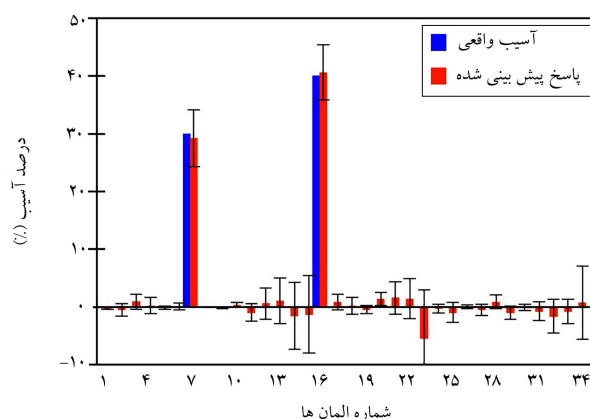
به دست آمده در اطراف میانگین پراکنده شده باشند، این موضوع را با ارزیابی مقادیر انحراف معیار پارامترها در اجراهای انجام شده، می‌توان بررسی کرد. به همین علت انحراف معیار مقادیر خرابی المان‌ها در طی اجراهای انجام شده در هر سناریو بر روی نمودار میانگین در شکل‌های ۶ الی ۹ رسم شده است. همچنین نسبت انحراف معیار به مقادیر میانگین خرابی، که یک شاخص به نام ضریب تغییرات (COV) 1° است،^[۲۶] در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. بنابراین هر چقدر مقدار COV المان‌ها کمتر باشد، توان روش بالاتر است. مطابق

جدول ۴. بسامدهای تحریک در سناریوهای سازه‌ی خرابی ۳۵ عضوی (Hz).

سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۱۹/۳-۲۵	۱۴-۱۸/۷	۱۳-۱۸	۱۳-۱۷/۹
۲۸-۳۲/۵	۲۶-۳۲/۴	۳۰-۳۲/۶	۱۹/۲-۲۳
۳۳/۸-۳۶/۸	۳۳/۶-۳۵/۲	۳۳/۶-۳۴/۶	۲۹-۳۱/۶
۴۲-۴۶/۵	۴۱-۴۵/۸	۴۰-۴۴/۸	۳۳/۶-۳۵/۸
۴۷/۳-۵۰	۴۷-۴۹	۴۷/۳-۴۹/۵	۴۱-۴۶/۱
۵۰-۵۲	۴۹-۵۱/۲	۴۹/۵-۵۰/۱	۴۹/۱-۵۰/۷
۵۳/۳-۵۶/۳	۵۲/۶-۵۵	۵۲/۵-۵۵	۵۲/۵-۵۴/۶
۵۷-۵۹	۵۷-۵۸	۵۷-۵۸	۵۷-۵۸/۵

جدول ۵. بسامدهای طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده‌ی خرابی ۳۵ عضوی (Hz).

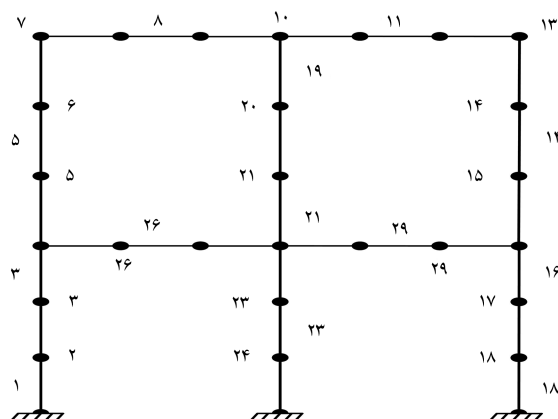
سازه‌ی سالم	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۶/۸۲	۶/۸۲	۶/۸۳	۶/۸۱	۶/۹۶
۱۸/۲	۱۸/۲	۱۸/۹	۱۸/۳	۱۹
۳۲/۸	۳۲/۸	۳۲/۶	۳۲/۹	۳۳/۴
۴۵/۱	۴۵/۱	۴۵/۹	۴۶/۸	۴۷/۱
۵۰/۳	۵۰/۳	۵۱/۴	۵۲/۲	۵۲/۲
۵۵/۴	۵۵/۴	۵۵/۶	۵۶/۶	۵۶/۸



شکل ۶. پاسخ سناریوی اول خرپای ۳۵ عضوی.

بوده است. همچنین المان‌های ۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۵ و ۲۹ به عنوان مکان‌های تحریک انتخاب شده‌اند. ۶ بسامد طبیعی اول سازه‌ی آسیب‌دیده به عنوان داده‌ی مودال اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین، ۶ بسامد طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده و محدوده‌های بسامدی انتخابی در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که ۶ مؤلفه‌ی اصلی از ماتریس‌های V و $\sum$ استفاده شده است و نتایج در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل‌های ۶ الی ۹، مکان و مقدار خرابی المان‌های آسیب‌دیده تقریباً به درستی ارزیابی شده‌اند. همچنین تعداد المان‌های سالم کمی با مقدار آسیب قابل صرف‌نظر (مقدار خرابی بین -9% تا $+2\%$) یافت شده‌اند، که وجود آنها نیز به دلیل اندازه‌گیری ناکامل داده‌ی PSD و وجود خطاهای اندازه‌گیری بوده است. می‌توان به این نتیجه رسید که میانگین نتایج نمی‌توانند به تنهایی معیار قابل قبولی برای محک کارایی روش ارائه شده باشند. بنابراین، در صورتی که مقادیر پارامترهای



شکل ۱۱. مشخصات هندسی قاب ۳۰ عضوی.

جدول ۷. ویژگی المان‌های قاب.

المان‌ها	طول (m)
۱-۳، ۱۸-۱۶، ۲۴-۲۲	۱
۴-۶، ۱۵-۱۳، ۲۱-۱۹	۱/۲۵
۷-۱۲، ۳۰-۲۵	۰/۷۵
سطح مقطع (mm ^۲)	
۱-۳	۳۱۲۰۰
مدول کشسانی (MPa)	
۱-۳	۲ × ۱۰ ^۵
چگالی جرمی (kg/m ^۳)	
۱-۳	۷۲۰۰
ممان اینرسی (mm ^۴)	
۱-۳	۶۷۸ × ۱۰ ^۵

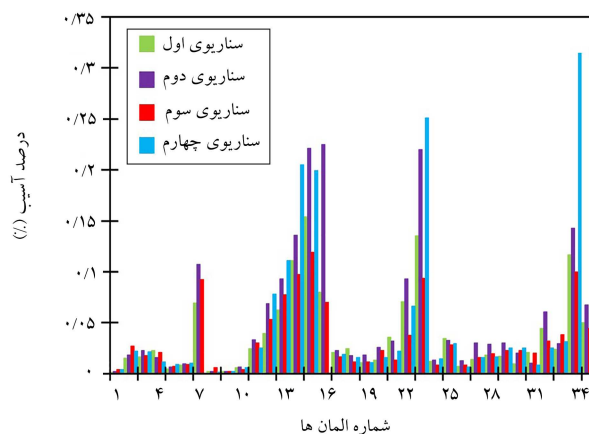
جدول ۸. سناریوهای خرابی سازه‌ی قاب.

سناریو	شماره‌ی المان	مقدار خرابی
۱	۳ و ۱۰	۰/۳۵ و ۰/۳۰
۲	۱۱ و ۸، ۴	۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۳۰ و ۰/۳۵
۳	۹، ۱۲، ۱۵، ۲۷	۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۳۰ و ۰/۳۵
۴	۶، ۱۱، ۱۴، ۱۹، ۲۲، ۲۵، ۲۷ و ۳۰	۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۴۰، ۰/۳۰ و ۰/۳۵

المان‌های افقی سازه اعمال شده است. لازم به ذکر است که به جهت تحلیل مدل اجزاء محدود المان‌های قاب از روش دوگره‌یی استفاده شده است.

به منظور به‌روزرسانی مدل سازه‌ی ذکر شده، لیست محدوده‌های بسامدی در جدول ۹ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی داده‌های مودال مدل آسیب‌دیده، المان‌های ۱، ۳، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۹، ۲۲، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ اندازه‌گیری شده و به عبارت دیگر، تعداد حسگرها ۱۰ عدد بوده است. همچنین المان‌های ۱، ۸، ۱۰، ۲۰، ۲۳، ۲۶ و ۳۰ به عنوان مکان‌های تحریک انتخاب شده‌اند. المان‌های اندازه‌گیری و تحریک در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند. ۱۰ بسامد طبیعی اول سازه‌ی آسیب‌دیده به عنوان داده‌ی مودال اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده‌اند. همچنین ۱۰ بسامد طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده و محدوده‌های بسامدی انتخابی در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند. قابل ذکر است که ۸ مؤلفه‌ی اصلی از ماتریس‌های V و Σ استفاده کرده و نتایج در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ ارائه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، مکان و مقدار خرابی المان‌های آسیب‌دیده



شکل ۱۰. نمودار ضریب تغییرات سناریوهای خرابی ۳۵ عضوی.

جدول ۶. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای سازه‌ی خرابی ۳۵ عضوی.

شماره‌ی سناریو	مقدار CI
۱	۰/۸۲
۲	۰/۸۹
۳	۰/۹۴
۴	۰/۸۵

شکل ۱۰، بیشینه‌ی مقدار COV متعلق به المان‌های ۲۳ و ۳۴ به ترتیب با مقداری حدود ۰/۲۵ و ۰/۳۲ در سناریوی چهارم است. بقیه‌ی مقادیر در همه‌ی المان‌ها و سناریوها کمتر از ۰/۲۳ بوده است، که کارایی روش را در برابر خطاهای موجود نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که مقادیر انحراف معیارهای روی نمودارهای نتیجه و همچنین مقدار COV المان‌ها توانایی روش در برابر نویز و اندازه‌گیری ناکامل را به طور واضح، خوب گزارش می‌دهند.

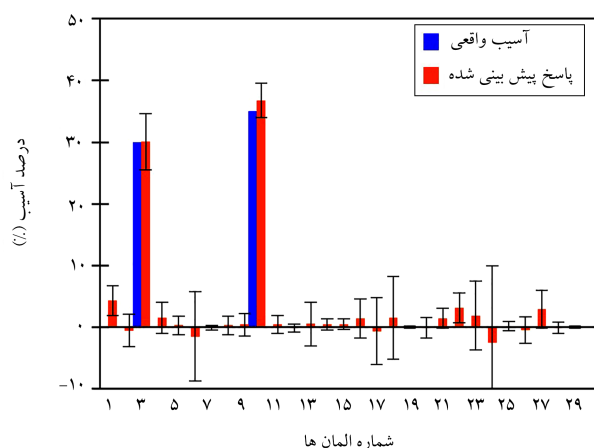
برای بررسی و مقایسه‌ی کمی دقیق‌ی از پاسخ‌ها، شاخص‌های زیادی تاکنون ارائه شده‌اند، که یکی از آنها شاخص CI^{۱۱} است، که با استفاده از بردار پاسخ‌های خرابی به دست آمده و خرابی‌های واقعی به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود: [۲۸]

$$CI = 1 - \frac{\|\delta P^p - \delta P^a\|}{\|\delta P^a\|} \quad (۱۴)$$

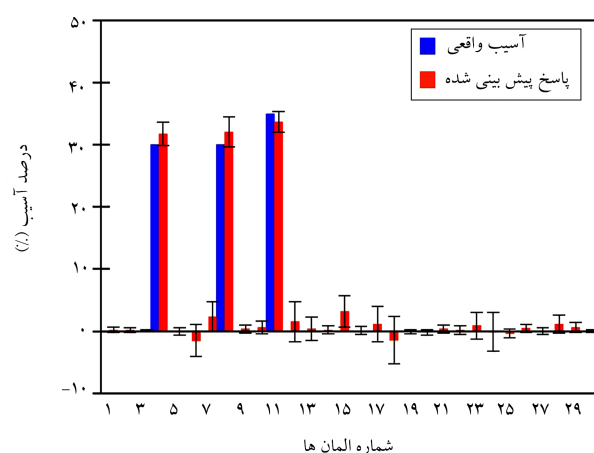
که در آن، δP^p و δP^a به ترتیب بردارهای خرابی‌های واقعی و ارزیابی شده هستند. همچنین $\|\cdot\|$ نشان از نرم بردار دارد. بنابراین هر چقدر مقادیر CI به ۱ نزدیک‌تر باشند، بدین معناست که پاسخ ارزیابی شده به مقدار دقیق نزدیک‌تر بوده است. مقادیر شاخص CI، متناظر با ۴ سناریوی بررسی شده در جدول ۶ ارائه شده‌اند. می‌توان با توجه به اعداد جدول به مناسب بودن پاسخ ۴ سناریوی مربوط به سازه‌ی خرابی ۳۵ عضوی پی برد.

۲.۳. قاب ۳۰ عضوی

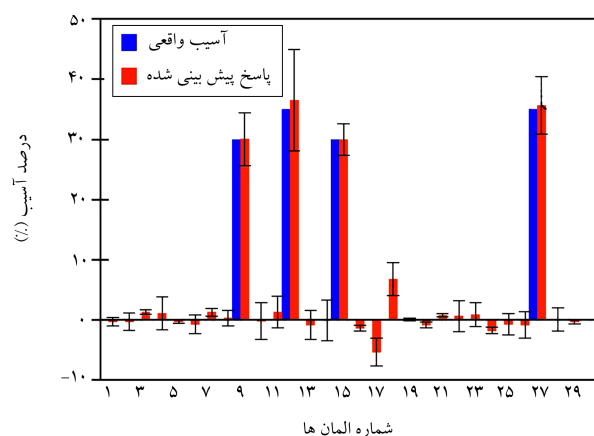
دومین سازه‌ی بررسی شده، یک قاب فلزی دو دهانه‌ی دو طبقه‌ی دوبعدی است، که مشخصات هندسی آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مدل قاب، دارای ۳۰ عضو میله‌یی و ۲۹ درجه‌ی آزادی کلی بوده است، که ویژگی المان‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. برای بررسی کارکرد و توانایی روش ارائه شده، ۴ سناریوی خرابی فرض شده است، که جزئیات مقادیر و المان‌های خراب در جدول ۸ ارائه شده است. به منظور مدل‌سازی وزن روسازه، مقدار ۶۰ (kg/m) بار یکنواخت بر روی تمامی



شکل ۱۳. پاسخ سناریوی اول قاب ۳۰ عضوی.



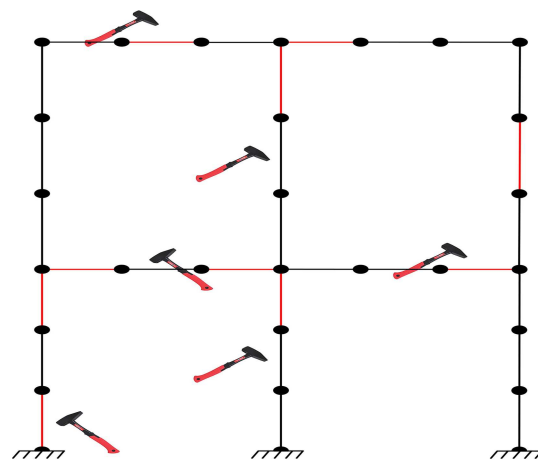
شکل ۱۴. پاسخ سناریوی دوم قاب ۳۰ عضوی.



شکل ۱۵. پاسخ سناریوی سوم قاب ۳۰ عضوی.

جدول ۱۱. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای سازه‌ی قاب ۳۰ عضوی.

مقدار CI	شاخص سناریو
۰/۸۳	۱
۰/۸۹	۲
۰/۸۶	۳
۰/۸۰	۴



شکل ۱۲. المان‌های اندازه‌گیری و تحریک قاب ۳۰ عضوی.

جدول ۹. بسامدهای تحریک در سناریوهای سازه‌ی قاب ۳۰ عضوی (Hz).

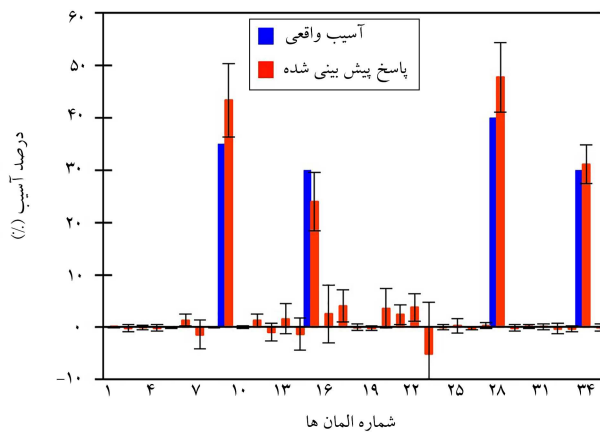
سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۵۸-۶۰/۴	۵۷-۶۰/۵	۵۶-۵۹/۳	۵۶-۵۸/۳
۶۱/۶۲-۴	۶۱/۶۲-۴	۶۱/۶۱-۴/۸	۶۱/۶۱-۴/۶
۶۴/۶۹-۵	۶۴/۶۸-۵	۶۴/۶۸-۵	۶۴/۶۸-۵
۶۹-۷۳/۴	۶۸-۶۹/۸	۶۸-۷۱/۸	۶۸-۶۹/۸
۷۴/۷۶-۲	۷۴/۷۵-۲	۷۴/۷۵-۲/۲	۷۴/۷۵-۲
۷۶-۷۸/۵	۷۵-۷۷/۳	۷۵/۷۶-۲/۲	۷۵/۷۶-۲/۴
۸۵-۸۰	۸۵-۸۰	۸۵-۸۰	۸۵-۸۰
۸۵-۹۰/۸	۸۵-۹۲/۷	۸۵-۹۱	۸۵-۹۱/۷
۹۳/۹۵-۴	۹۳/۹۵-۴	۹۳/۹۵-۳/۳	۹۳/۹۵-۳/۴

جدول ۱۰. بسامدهای طبیعی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده‌ی قاب ۳۰ عضوی

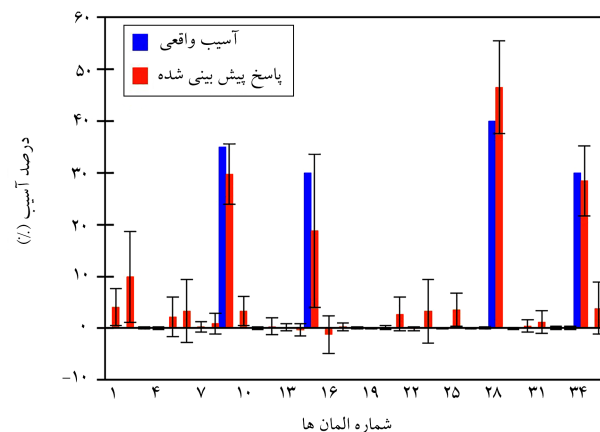
(Hz)

سازه‌ی سالم	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۶/۰۱	۵/۹۸	۵/۹۸	۵/۹۰	۵/۸۱
۱۷/۶	۱۷/۴	۱۷/۳	۱۷/۲	۱۷/۱
۳۷/۷	۳۷/۲	۳۶/۰	۳۶/۸	۳۵/۴
۴۳/۶	۴۳/۱	۴۲/۵	۴۲/۲	۴۱/۶
۵۵/۴	۵۴/۹	۵۳/۵	۵۴/۳	۵۲/۲
۶۱/۲	۶۰/۶	۶۰/۸	۵۹/۷	۵۸/۵
۶۴/۳	۶۳/۳	۶۲/۲	۶۲/۳	۶۱/۸
۷۴/۰	۷۳/۶	۷۲/۰	۷۲/۲	۷۰/۰
۷۹/۷	۷۸/۷	۷۷/۵	۷۶/۷	۷۶/۶
۹۳/۲	۹۱/۱	۹۲/۹	۹۱/۹	۹۲/۰

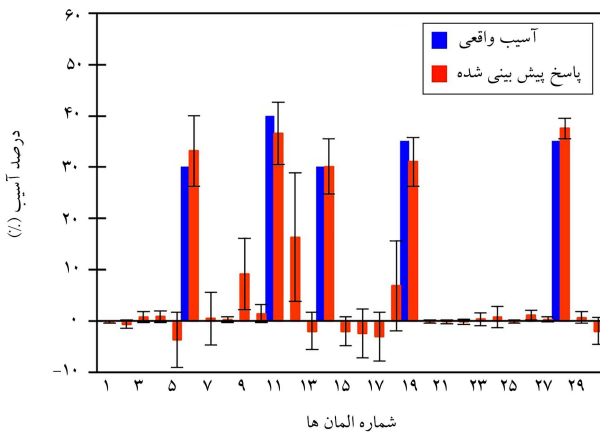
تقریباً به درستی ارزیابی شده‌اند. همچنین تعداد المان‌های سالم کمی با مقدار آسیب قابل صرف‌نظر (مقدار خرابی بین ۸- تا ۵٪) یافت شده‌اند، که وجود آنها نیز به دلیل اندازه‌گیری ناکامل داده‌ی PSD و وجود خطاهای اندازه‌گیری بوده است. مقادیر COV همه‌ی المان‌ها و CI در همگی سناریوها در شکل ۱۷ و جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. مطابق شکل ۱۷، بیشینه‌ی مقدار COV متعلق به المان‌های ۱۲ و ۲۴ به ترتیب با مقداری حدود ۱۳/۰ و ۱۲/۰ در سناریوهای سوم و اول است. بقیه‌ی مقادیر در همه‌ی المان‌ها و سناریوها کمتر از حدود ۸/۰ بوده است، که کارایی روش را در



شکل ۱۸. پاسخ سناریوی سوم خرپا با روش PCA-FRF.

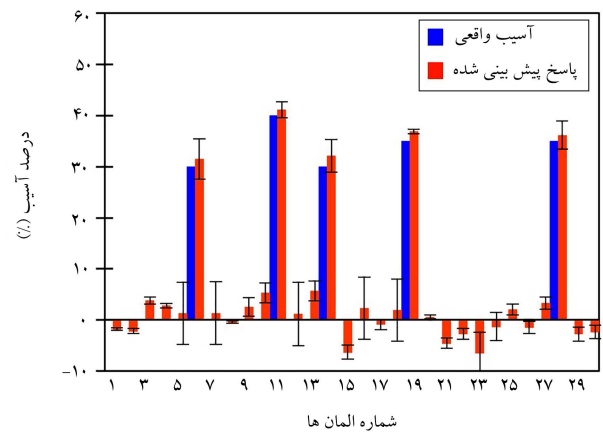


شکل ۱۹. پاسخ سناریوی سوم خرپا با روش PSD.

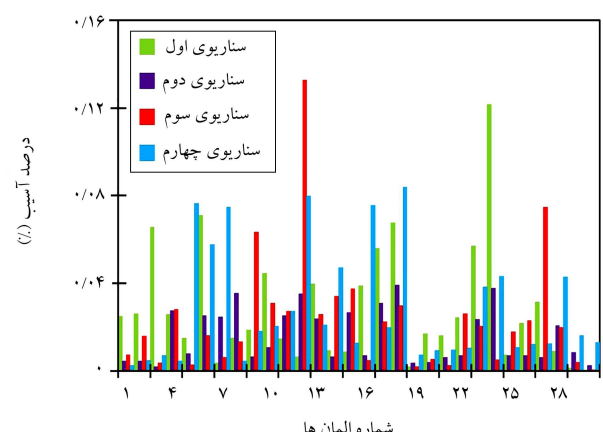


شکل ۲۰. پاسخ سناریوی چهارم قاب با روش PCA-FRF.

FRF، همان‌طور که گفته شد، اسفندیاری و همکاران با استفاده از ترکیب داده‌های FRF و روش SVD به ارائه‌ی روش خود پرداخته‌اند. همچنین در روش ملقب به PSD، پدرام و همکاران با استفاده از معادله‌ی حساسیت خطی و با استفاده از داده‌های چگالی طیفی کرنش - محور مستقیماً به ارائه‌ی روش خود پرداخته‌اند. قابل ذکر است که روش FRF به صورت کرنش - محور برای مقایسه در پژوهش حاضر پیاده‌سازی شده است. دو سناریوی مذکور با توجه به تمام ویژگی‌های ذکر شده‌ی اخیر توسط سه الگوریتم اشاره شده، پیاده‌سازی شده‌اند و نتایج در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۶. پاسخ سناریوی چهارم قاب ۳۰ عضوی.



شکل ۱۷. نمودار ضریب تغییرات سناریوهای قاب ۳۰ عضوی.

برابر خطاهای موجود نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر انحراف معیارهای روی نمودارهای نتیجه و همچنین مقدار COV المان‌ها، توانایی روش در برابر نویز و اندازه‌گیری ناکامل را به طور واضح خوب گزارش می‌دهند. می‌توان با توجه به اعداد جدول ۱۱ به مناسب بودن پاسخ ۴ سناریوی مربوط به سازی قاب ۳۰ عضوی پی برد.

۴. مقایسه‌ی روش ارائه شده با دیگر روش‌ها

در انتها، برای ارزیابی کامل و بهتر روش ارائه شده، بهتر است آن را با دیگر روش‌های بررسی شده در گذشته مقایسه کرد. به همین منظور روش ارائه شده با دو روش دیگر مقایسه شده است. مقایسه‌ی اول با روشی است که نقطه‌ی اشتراک بیشتری با روش معرفی شده در مطالعه‌ی حاضر دارد، اما با داده‌های پاسخ بسامدی FRF انجام شده است. به این ترتیب برتری داده‌های PSD بر FRF مشخص می‌شود. در وهله‌ی بعدی، فرایند مقایسه توسط روشی ساده و بدون استفاده از SVD، فقط با استفاده از داده‌های PSD و معادله‌ی حساسیت مستقیم انجام شده است. به این ترتیب برتری استفاده از ترکیب روش SVD و داده‌های PSD نیز مشخص شده است. برای این هدف، سناریوی ۳ از سازی خرپا و سناریوی ۴ از سازی قاب انتخاب شده‌اند. در نتیجه، الگوریتم‌هایی که مقایسه شده‌اند، شامل روش ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر (PCA-PSD)، روش ارائه شده توسط اسفندیاری و همکاران (FRF) [۵] و روش ارائه شده توسط پدرام و همکاران (PSD) [۲۴] است. در روش ملقب به

شده از روش ارائه شده در پژوهش حاضر بهتر نبوده‌اند. برای بررسی بیشتر پاسخ‌های ذکر شده، جدول ۱۲، که شامل مقادیر CI است، ارائه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۱۲، به طور میانگین روش PCA-FRF دارای مقدار CI بیشتری نسبت به روش PSD بوده است. در نتیجه هر کدام از روش‌های PCA-FRF با PSD می‌توانند از جهاتی بر دیگری برتری داشته باشند، اما به طور کلی چه از لحاظ مقادیر اندیس CI و یا چه از نظر کیفیت خرابی در المان‌های آسیب‌دیده یا سالم، هیچ‌یک بر روش ارائه شده در پژوهش حاضر برتری نداشته‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

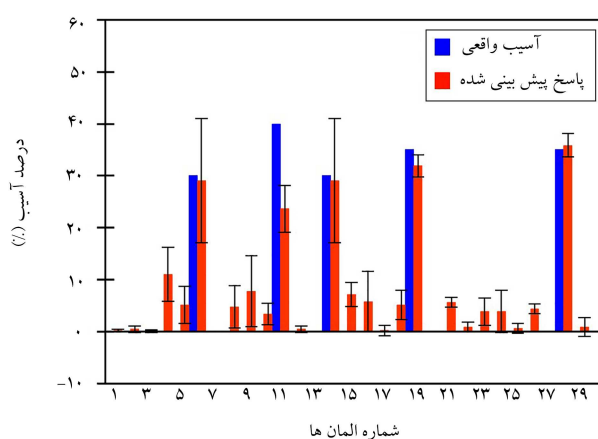
در پژوهش حاضر، یک روش جدید برای بررسی مسئله‌ی شناسایی آسیب سازه‌ی با بهره‌گیری از PCA داده‌ی PSD ارائه شده است. این روش که در محدوده‌ی بسامدی و کرنش - محور است، به شکلی پیاده‌سازی شده است که برای به نتیجه رسیدن فقط به بسامدهای طبیعی سازه‌ی خراب و اجزاء اصلی PSD اندازه‌گیری شده نیازمند است. بنابراین، روش مذکور نسبت به روش‌هایی که نیازمند مشتق مرتبه‌ی اول بوده و احتمالاً به همین سبب خطاهایی داشته‌اند، برتری دارد. به سبب بررسی کارایی و راستی‌آزمایی روش ارائه شده از تعدادی مثال شامل شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه شده بر روی سازه‌های فلزی خراب و قاب با وجود خطاهای اندازه‌گیری مؤثر است. همچنین روش ارائه شده با دو روش دیگر مقایسه شده و با توجه به بالا بودن شاخص CI در پاسخ‌های روش ارائه شده، دقیق‌تر بودن مقادیر درصد آسیب در المان‌های خراب و کمتر بودن مقادیر عددی پیدا شده در المان‌های سالم می‌توان به این نتیجه رسید که پاسخ‌های روش ارائه شده مناسب‌تر هستند. بنابراین، نتایج در ابعاد مختلف بر مؤثرتر و کاراتر بودن روش ارائه شده در پژوهش حاضر تأکید می‌کنند.

پانویس‌ها

1. Global Damage Detection
2. Frequency Response Functions (FRF)
3. Yao
4. Auto Spectral Density
5. Cross Spectral Density
6. Ha & Golinval
7. Left Singular Values
8. Support Vector Machine
9. Benchmark
10. Coefficient of Variation (COV)
11. Closeness Index

منابع (References)

1. Fallah, N., Hoseini Vaez, S.R. and Mohammadzadeh, A. "Multi-damage identification of large-scale truss structures using a two-step approach", *Journal of Building Engineering*, **19**, pp. 494-505 (2018).



شکل ۲۱. پاسخ سناریوی چهارم قاب با روش PSD.

جدول ۱۲. مقادیر شاخص CI متناظر با سناریوهای مقایسه‌ی.

روش	سازه	مقدار CI
PCA-FRF	خرابا	۰/۷۶
	قاب	۰/۷۱
PSD	خرابا	۰/۷۱
	قاب	۰/۶۵

مطابق شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، بیشینه‌ی مقدار خرابی در المان‌های سالم حدود ۱۶ و ۱۰ درصد به ترتیب با روش‌های PCA-FRF و PSD بوده است، که از این نظر برتری استفاده از داده‌های PSD در برابر FRF را اثبات می‌کند. همچنین بیشینه‌ی اختلاف خرابی در المان‌های آسیب‌دیده در هر دو روش حدود ۱۰٪ بوده است. همان‌طور که مشخص است، پاسخ هیچ‌کدام از روش‌ها از پاسخ‌های منتج

2. Hou, R., Xia, Y. and Zhou, X. "Structural damage detection based on l1 regularization using natural frequencies and mode shapes", *Structural Control and Health Monitoring*, **25**(3), p. e2107 (2018).
3. Jiang, Y., Xiang, J.W., Li, B. and et al. "A hybrid multiple damages detection method for plate structures", *Science China Technological Sciences*, **60**(5), pp. 726-736 (2017).
4. Xiang, J. and Liang, M. "Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **27**(6), pp. 439-454 (2012).
5. Esfandiari, A., Nabiyan, M.S. and Rofooei, F.R. "Structural damage detection using principal component analysis of frequency response function data", *Structural Control and Health Monitoring*, **27**(7), p. e2550 (2020).
6. Niu, Z. "Frequency response-based structural damage detection using Gibbs sampler", *Journal of Sound and Vibration*, **470**, p. 115160 (2020).
7. Bernagozzi, G., Ventura, C.E., Allahdadian, S. and et al. "Output-only damage diagnosis for plan-

- symmetric buildings with asymmetric damage using modal flexibility-based deflections", *Engineering Structures*, **207**, pp. 110-115 (2020).
8. Janeliukstis, R., Ručevskis, S. and Kaewunruen, S. "Mode shape curvature squares method for crack detection in railway prestressed concrete sleepers", *Engineering Failure Analysis*, **105**, pp. 386-401 (2019).
9. Wang, Y., Liang, M. and Xiang, J. "Damage detection method for wind turbine blades based on dynamics analysis and mode shape difference curvature information", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **48**(1), pp. 351-367 (2014).
10. Jayasundara, N., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T. and et al. "Damage detection and quantification in deck type arch bridges using vibration based methods and artificial neural networks", *Engineering Failure Analysis*, **109**, p. 104265 (2020).
11. Huang, M., Li, X., Lei, Y. and et al. "Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced moth-flame optimization", *Structures*, **28**, pp. 1119-1136 (2020).
12. Fallah, N., Vaez, S.R.H. and Fasihi, H. "Damage identification in laminated composite plates using a new multi-step approach", *Steel and Composite Structures*, **29**(1), pp. 139-149 (2018).
13. Abdel-Basset, M. "Parametric study of using only static response in structural damage detection", *Engineering Structures*, **34**, pp. 124-131 (2012).
14. Adewuyi, A. and Wu, Z. "Modal macro-strain flexibility methods for damage localization in flexural structures using long-gage FBG sensors", *Structural Control and Health Monitoring*, **18**(3), pp. 341-360 (2011).
15. Yao, G.C., Chang, K.-C. and Lee, G. "Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, **118**(9), pp. 1949-1961 (1992).
16. Beyhaqi, A. and Esfandiari, A. "FRF-based structural parameters estimation using strain data: Sensitivity equation, measurement and excitation selection", *Inverse Problems in Science and Engineering*, **26**(7), pp. 942-965 (2018).
17. Kammer, D.C. and Nimityongskul, S. "Frequency band averaging of spectral densities for updating finite element models", *Journal of Vibration and Acoustics*, August, **131**(4), pp.041007-1 (2009). <https://doi.org/10.1115/1.3085885>.
18. Zheng, Z., Lu, Z.R., Chen, W.H. and et al. "Structural damage identification based on power spectral density sensitivity analysis of dynamic responses", *Computers & Structures*, **146**, pp. 176-184 (2019).
19. Pedram, M., Esfandiari, A. and Khedmati, M.R. "Damage detection by a FE model updating method using power spectral density: Numerical and experimental investigation", *Journal of Sound and Vibration*, **397**, pp. 51-76 (2017).
20. Ha, N.V. and Golinval, J.-C. "Damage localization in linear-form structures based on sensitivity investigation for principal component analysis", *Journal of Sound and Vibration*, **329**(21), pp. 4550-4566 (2010).
21. Bolourani, A., Bitaraf, M. and Tak, A.N. "Structural health monitoring of harbor caissons using support vector machine and principal component analysis", *Structures, Elsevier*, **33**, pp. 4501-4513 (2021).
22. Doebling, S.W., Peterson, L.D. and Alvin, K.F. "Experimental determination of local structural stiffness by disassembly of measured flexibility matrices", *Journal of Vibration and Acoustics*, **120**(4), pp. 949-957 (1998).
23. MATLAB, V., (R2014a), Natick, MA: The MathWorks Inc. (2014).
24. Pedram, M., Esfandiari, A. and Khedmati, M.R. "Finite element model updating using strain-based power spectral density for damage detection", *Structural Control and Health Monitoring*, **23**(11), pp. 1314-1333 (2016).
25. Esfandiari, A., et al., "Finite element model updating using frequency response function of incomplete strain data", *AIAA Journal*, **48**(7), pp. 1420-1433 (2010).
26. Fallah, N., Hoseini Vaez, S.R. and Esfandiari, A. "Damage identification of structures based on sensitivity equations using PCA and PSD data", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **237**(11), pp. 2606-2620 (2022).
27. Esfandiari, A. "Structural model updating using incomplete transfer function of strain data", *Journal of Sound and Vibration*, **333**(16), pp. 3657-3670 (2014).
28. Esfandiari, A., et al., "Structural model updating using frequency response function and quasi-linear sensitivity equation", *Journal of Sound and Vibration*, **326**(3-5), pp. 557-573 (2009).