نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.16919.6392

شناسایی خسارت سازه‌ها با استفاده از جداسازی کور منبع و تحلیل چند فراکتالی نوسانات روند زدایی شده

احسان درویشان

گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

خلاصه: امروزه روش‌های پایش سلامتی که بتوانند خسارت را در مراحل اولیه شناسایی کنند اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. برای این کار لازم است که روش‌های مذکور بتوانند خسارت‌های جزیی را شناسایی کنند. با این حال بسیاری از روش‌هایی که تاکنون برای شناسایی خسارت هاسازه‌ها معرفی شده‌اند در شناسایی خسارت‌های کوچک دچار ضعف هستند. یکی از راهکارهای نیل به این هدف استفاده از رویکرد فراکتالی است. در این مقاله یک روش شناسایی خسارت بر مبنای تلفیق تحلیل چندفراکتالی نوسانات روند زدایی شده و جداسازی کور منبع ارائه شده‌است. در بخش اول، سه روش جداسازی کور منبع با یکدیگر مقایسه شده و کارامدترین آنها برای تجزیه سیگنالهای سازه‌ای انتخاب شده‌است. این روش‌های عبارتند از روش شناسایی کور مودال، روش ترکیبی و روش با استفاده از برنامه نویسی تنک. از سه مدل سازه‌ای برای سنجش کارایی این روش‌ها استفاده شده‌است که بازه مدل‌های عددی با درجات آزادی محدود تا سازه واقعی را شامل می شود. در بخش دوم، یک شاخص خسارت بر مبنای عرض طیف چند فراکتالی ارائه شده‌است. نتایج نشان می دهد که روش مذکور می تواند با دقت بالایی الگوهای مختلف خسارت را تشخیص داده و خسارت‌های جزیی را شناسایی کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:
شناسایی خسارت
پایش سلامت سازه‌ها
شاخص خسارت
جداسازی کور منبع
تحلیل چند فراکتالی

۱- مقدمه

جلوگیری از تلفات جانی و مالی ناشی از وقوع خسارت در هاسازه‌ها همواره از اهداف اصلی پایش سلامت هاسازه‌ها بوده‌است. با پیشرفت تکنولوژی و بالا رفتن دقت سنسورها و توان محاسباتی کامپیوترها، امروزه توجه محققین این زمینه به شناسایی خسارت در مراحل اولیه (شناسایی خسارت‌های جزیی) جلب شده‌است. بدین ترتیب می‌توان هزینه‌های اقتصادی ناشی از ترمیم سازه را به حداقل رساند و حاشیه اطمینان وقوع خسارات جانی جلوگیری را افزایش داد. از طرف دیگر می‌توان هزینه‌های غیرمستقیم مانند کاهش زمان تعمیر سازه و هزینه‌های اجتماعی و سیاسی ناشی از توقف بهره‌برداری سازه را به حداقل رساند. بر این اساس تاکنون روش‌های مختلفی برای شناسایی خسارت در سازه ارائه شده‌است.

یکی از روش‌هایی که می‌تواند جهت افزایش دقت روش‌های پایش سلامت به کار رود رویکرد فراکتالی است. روش فراکتالی در سری‌های زمانی[1] نخستین بار توسط هارست [۱] در سال ۱۹۵۱ مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن روش‌های دیگری مانند شمارش جعبه ای[2]،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: darvishan@riau.ac.ir

1 Time series
2 Box counting

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

تحلیل حفره ای[1] ، و روش‌های وزنی[2] معرفی شدند. این روش‌ها به سرعت در بسیاری از علوم مانند پزشکی، هواشناسی، قوم شناسی، فیزیک و مهندسی کاربرد پیدا کرد [۲]. یکی از دلایل افزایش موفقیت این روش‌ها، استفاده گسترده از آن‌ها در فرایند تصادفی و انتقال از یک مقیاس بزرگ به مقیاس کوچکتر است. با این حال این روش‌ها در مهندسی سازه کاربرد اندکی پیدا کردند. علت آن است که بسیاری از سری‌های زمانی ناشی از ارتعاش سازه دارای نویز بوده و رفتاری غیرایستا دارند. در نتیجه روش‌های سنتی در تحلیل این سیگنالها دچار مشکل هستند. به علاوه بسیاری از روش‌های مورد استفاده در مواجهه با سری‌هایی که دارای روند[3] هستند (مانند تغییر شدت ارتعاش سازه در هنگام زلزله) پاسخهای مناسبی ارائه نمی‌دهند. بر این اساس در سالهای اخیر روش‌هایی ارائه شده‌است که بتوانند به طور ذاتی روند را از سری زمانی حذف کنند. از میان این روش‌ها می‌توان به تحلیل نوسانات روندزدایی شده [4] (DFA) [۳] و تحلیل چندفراکتالی نوسانات روند زدایی شده [5](MFDFA) [۴] اشاره کرد. روش DFA نخستین بار برای به‌دست آوردن بعد فراکتالی زنجیره DNA و بررسی پویایی ضربان قلب استفاده شد و سپس در سایر علوم نیز مورد استفاده قرار گرفت [۵].

سالامون و همکاران[۶] از تحلیل چند فراکتالی برای شناسایی الگوهای ترک در دیوارهای برشی بتنی استفاده کردند. آن‌ها از یک مدل تحلیلی و دو مدل آزمایشگاهی استفاده کردند و پارامترهای چند فراکتالی را برای این نمونه‌ها محاسبه کردند. میستریهی و همکاران [۷] از طیف چندفراکتالی برای پایش سلامت برخط هاسازه‌ها استفاده کردند. آن‌ها از معیار بعد همبستگی شبه بازگشتی[6] به عنوان پارامتر موثر جهت شناسایی خسارت در سطوح مختلف خسارت استفاده کردند. لین و چین [۸] برای کمی‌سازی پیچیدگی سیگنال‌های سازه‌ای از تئوری چندفراکتالی استفاده کردند. آن‌ها ابتدا برای بررسی وضعیت خسارت از تحلیل MFDFA استفاده کردند. سپس یک شاخص خسارت بر مبنای پارامترهای چند فراکتالی ارائه دادند. سپس کارایی روش پیشنهادی خود را بر روی یک سازه مرجع هفت طبقه آزمایش کردند. لین و فجری [۹] یک روش پایش سلامت هاسازه‌ها بر مبنای تحلیل DFA و DCCA ارائه دادند. آن‌ها ابتدا خسارت سازه را تحت بارهای محیطی با روش DFA محاسبه کردند. سپس با تحلیل همبستگی بین سیگنالهای طبقات توانستند محل خسارت را شناسایی کنند. سو و همکاران [۱۰] رفتار فراکتالی یک سد را با استفاده از روش MFDFA جهت پایش سلامت سدها مورد بررسی قرار دادند. در نهایت با ترکیب تحلیل فراکتالی و سیستم تابع تکرار شونده[7] یک مدل پیش بینی با دقت بالا ارائه شد.

به طور کلی رویکرد چند فراکتالی اگرچه در بسیاری از رشته‌ها کاربرد پیدا کرده، است ولی در مهندسی سازه با توجه به توانایی آن در مدل کردن پدیده‌های پیچیده، نامنظم و غیرخطی، به تازگی مورد توجه قرار گرفته است. [۱۱-۱۲]. در نتیجه تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود بوده و هنوز تحقیقی برای شناسایی خسارت‌های جزیی هاسازه‌ها با استفاده از این رویکرد انجام نشده‌است. هدف از این مقاله ارائه یک روش جدید شناسایی خسارت است که بتواند خسارت‌های جزیی سازه‌ای را شناسایی کند. بر این اساس از یک روش ترکیبی بر مبنای MFDFA و جداسازی کور منبع[8] (BSS) استفاده شده‌است: بدین ترتیب که با استفاده از روش BSS، سیگنال پاسخ ارتعاش سازه با چند درجه آزادی به چند سیگنال سازه با یک درجه آزادی معادل آن تجزیه می‌شوند. با این کار امکان تفکیک ویژگی‌های ارتعاشی سازه و استخراج این ویزگی‌ها جهت تشخیص آسیب با سهولت بیشتری انجام خواهد گرفت. سپس با استفاده از MFDFA تغییرات الگوی هر یک از این سیگنالها پایش می‌شود. در بخش اول مقاله چند روش BSS با یکدیگر مقایسه شده و بهترین روش انتخاب شده‌است. سه سازه برای انجام مقایسه استفاده شده اند که شامل دو مدل عددی و یک سازه واقعی است. در مرحله بعد سیگنالهای تجزیه شده با BSS توسط تحلیل چندفراکتالی مورد بررسی قرار گرفته و طیف چندفراکتالی رسم می‌شود. در نهایت نیز یک شاخص خسارت بر مبنای عرض طیف تعریف شده‌است. بدین ترتیب با شناسایی خسارت‌های جزیی، امکان تامین سطح عملکرد تعمیر سریع[9] سازه فراهم می‌شود که پیشگیرانه تر از سطوح عملکرد ایمنی جانی و جلوگیری از فروریزش است.

1 Lacunarity analysis
2 Mass methods
3 trend
4 Detrend Fluctuation Analysis (DFA)
5 MultiFractal Detrend Fluctuation Analysis (MFDFA)
6 Quasi Recessive Correlation Dimension (QRCD)
7 Iterative function system
8 Blind Source Separation (BSS)
9 Rapid Repair

۲- روش‌های جداسازی کور منبع

۲-۱- روش شناسایی کور مودال

در روش شناسایی کور مودال[1](BMID) از اصل جمع آثار مودها استفاده می‌شود. مطابق این اصل، ارتعاش یک سیستم از جمع آثار پاسخ مودهای سیستم تشکیل شده‌است [۱۳]

$$\mathbf{x}_r(t) = \boldsymbol{\Psi}\mathbf{p}(t) \qquad (۱)$$

که ماتریس شکل مودی مختلط با $\boldsymbol{\Phi}$ مشخص شده‌است و اندیس r نشان دهنده آن است که پاسخ فیزیکی سیستم مقادیر حقیقی است. حال اگر فرض کنیم شکلهای مودی و پاسخهای مودال باید به صورت مزدوج مختلط یکدیگر باشند، داریم

$$\mathbf{x}_r(t) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi} & \boldsymbol{\Phi}^*\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{q}(t)\\ \mathbf{q}^*(t)\end{bmatrix} = 2\,\mathrm{Re}\{\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q}(t)\} \qquad (۲)$$

که $(.)^*$ علامت مزدوج است. در حالت کلی پاسخ مودال به شکل $\tilde{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{q}_r(t) + i\hat{\mathbf{q}}_r(t)$ است که $\mathbf{q}_r(t)$ بخش حقیق و $\hat{\mathbf{q}}_r(t)$ تبدیل هیلبرت و i علامت اعداد مختلط است. تبدیل هیلبرت تابع f(t) به صورت انتگرال مقادیر اصلی کوشی تعریف می‌شودکه توسط آن می‌توان تابع را به فرم مختلط تبدیل کرد [۱۴]

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{\pi} P\int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t-\tau} d\tau \qquad (۳)$$

با این تعریف رابطه (۲) به شکل زیر خلاصه می‌شود

$$\mathbf{x}_r(t) = \mathrm{Re}\{[\boldsymbol{\Phi}_r + i\boldsymbol{\Phi}_i](\mathbf{q}_r(t) + i\hat{\mathbf{q}}_r(t))\} \qquad (۴)$$

اگر فرض کنیم در حالت کلی پاسخ سازه به صورت مختلط باشد، پاسخ به شکل $\mathbf{x}_r(t) + i\hat{\mathbf{x}}_r(t)$ خواهد بود که $\hat{\mathbf{x}}_r(t)$ تبدیل هیلبرت $\mathbf{x}_r(t)$ است. یعنی پاسخ ترکیب خطی پاسخهای تحلیلی است. با این حال پاسخ واقعی فیزیکی، بخش حقیقی پاسخ خواهد بود. با این فرضیات نتیجه جمع آثار مودها به صورت مختلط به شکل زیر خواهد بود

$$\begin{aligned}&\tilde{\mathbf{x}}_r(t) = \boldsymbol{\Phi}\tilde{\mathbf{q}}(t)\\ &\mathbf{x}_r(t) + i\hat{\mathbf{x}}_r(t) = [\boldsymbol{\Phi}_r + i\boldsymbol{\Phi}_i](\mathbf{q}_r(t) + i\hat{\mathbf{q}}_r(t))\end{aligned} \qquad (۵)$$

می‌توان بخش‌های حقیقی و مجازی پاسخ را به شکل زیر جدا کرد

$$\mathbf{x}_r(t) + i\hat{\mathbf{x}}_r(t) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}_r + i\boldsymbol{\Phi}_i - \boldsymbol{\Phi}_i + i\boldsymbol{\Phi}_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{q}_r(t)\\ \hat{\mathbf{q}}_r(t)\end{bmatrix} \qquad (۶)$$

به همین ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی‌پاسخ فیزیکی را می‌توان به شکل زیر جدا کرد

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_r(t)\\ \hat{\mathbf{x}}_r(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}_r & -\boldsymbol{\Phi}_i\\ \boldsymbol{\Phi}_i & \boldsymbol{\Phi}_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{q}_r(t)\\ \hat{\mathbf{q}}_r(t)\end{bmatrix} \qquad (۷)$$

حال می‌توان از روش شناسایی کور مرتبه دوم[2] [۱۵] استفاده کرد تا ماتریس مودال و مولفه‌های پاسخ مودال را در طرف راست معادله (۶) پیدا کرد. روش شناسایی کور مرتبه دوم بر اساس آمار مرتبه دوم ایستا استوار است.

۲-۲- روش ترکیبی

این روش از ترکیب دو روش جداسازی کور منبع مرتبه ۲ (SOBSS)[3] و روش تحقق فضای حالت (SSR)[4] تشکیل شده‌است. ابتدا سیگنال تحلیلی پاسخ با استفاده از تبدیل هیلبرت به شکل زیر در می‌آید [۱۶]

$$\tilde{y}(t) = y_r(t) + i\hat{y}_r(t) \qquad (۸)$$

سپس تعداد K ماتریس هنکل به شکلی سوار می‌شوند که المان‌های آن ماتریس‌های همبستگی پاسخ تحلیلی باشند

$$\boldsymbol{\Pi}_{yy}(\tau) = \begin{bmatrix}\mathbf{R}_{yy}(\tau) & \mathbf{R}_{yy}(\tau+1) & \cdots & \mathbf{R}_{yy}(\tau+P-1)\\ \mathbf{R}_{yy}(\tau+1) & \mathbf{R}_{yy}(\tau+2) & \cdots & \mathbf{R}_{yy}(\tau+P)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \mathbf{R}_{yy}(\tau+P-1) & \mathbf{R}_{yy}(\tau+P) & \cdots & \mathbf{R}_{yy}(\tau+2P-2)\end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که τ اپرانور جابجایی زمانی و P تعداد سطرها و ستونهای بلوک در ماتریس هنکل است. ماتریس هنکل یک ماتریس است که در آن هر زیرقطر از سمت چپ به سمت راست دارای مقدار ثابت است [۱۷]. حال الگوریتم الگوریتم قطری سازی تقریبی[5] غیرهرمیتی [۱۸]

1 Blind Modal IDentification (BMID)

2 Second Order Blind Identification (SOBI)
3 Second Order Blind Source Separation (SOBSS)
4 State Space realization (SSR)
5 Joint Approximation Diagonalization (JAD)

بر تعداد ماتریس‌های هنکل اعمال می‌شود تا تجزیه حاصل شود.

$$\mathbf{\Pi}_{yy}(\tau)=\begin{bmatrix}\mathbf{L}\\ \mathbf{L\Theta}\\ \vdots\\ \mathbf{L\Theta}^{P-1}\end{bmatrix}\mathbf{\Theta}^{*\tau}\begin{bmatrix}\mathbf{R} & \mathbf{\Theta R} & \dots & \mathbf{\Theta}^{P-1}\mathbf{R}\end{bmatrix}$$
$$\mathbf{\Pi}_{yy}(\tau)=\breve{\mathbf{L}}\mathbf{\Theta}^{\tau}\breve{\mathbf{R}}^{H} \quad (۱۰)$$

با استفاده از یک الگوریتم قطری سازی تقریبی غیرهرمیتی ماتریسهای $\breve{L}$ و $\breve{R}$ مستقیماً بدست می‌آیند. این روش با استفاده از ممان‌های مرتبه چهارم سیگنالهای منبع را از سیگنال مخلوط استخراج می‌کند.

دقت شود که ابعاد $\breve{R}$ و $\breve{L}$ به ترتیب برابر است با $IP\times j, j\times j, IP\times j$ می‌باشد. ماتریس‌های تقریباً قطری در هر با معکوس کردن رابطه (۱۰) بدست می‌آیند.

$$\mathbf{\Theta}^{\tau}=\breve{\mathbf{L}}^{+}\mathbf{\Pi}_{yy}(\tau)\breve{\mathbf{R}}^{H+} \quad (۱۱)$$

تعداد T نمونه از توابع همبستگی خودکار مودال را می‌توان از المآن‌های قطری زیر استخراج کرد

$$\mathbf{R}_{qq}(\tau)=\mathbf{R}_{qq}(0)\mathbf{\Theta}^{*\tau} \quad (۱۲)$$

از آنجایی که تنها المآن‌های قطری ماتریس $R_{qq}(\tau)$ مورد نظر هستند، می‌توان $R_{qq}(0)$ را حذف کرد. بنابراین توابع همبستگی خودکار مودال برابر خواهند بود با

$$\mathbf{R}_{q}(\tau)=diag\left(\mathbf{R}_{qq}(\tau)\right)=diag\left(\mathbf{\Theta}^{*\tau}\right) \quad (۱۳)$$

در نهایت نمونه‌های پاسخ مودال از رابطه زیر بدست می‌آید

$$\tilde{\mathbf{q}}(k)=\breve{\mathbf{R}}^{+}\breve{\mathbf{Y}} \quad (۱۴)$$

۲-۳- روش با استفاده از برنامه نویسی تنک

در صورتی که فرض کنیم سیستم ترکیبی زیر دارای n ورودی و m خروجی باشد [۱۹]

$$\mathbf{x}(t)=\mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (۱۵)$$

که $\mathbf{s}(t)=\left[s_1(t),s_2(t),\dots,s_n(t)\right]^T$ بردار ستونی داده‌های منبع در زمان t، $\mathbf{x}(t)=\left[x_1(t),x_2(t),\dots,x_n(t)\right]^T$ بردار اختلاط که نشان دهنده مقادیر سنسورها است، و $\mathbf{A}=\left[a_1,a_2,\dots,a_n\right]$ ماتریس اختلاط است. با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه رابطه (۱۵) به فرم زیر در دامنه زمان-فرکانس تبدیل می‌شود

$$\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\tilde{\mathbf{s}}(t,k) \quad (۱۶)$$

فرض می‌شود که بردارهای اختلاط زمان-فرکانس که دارای یک منبع فعال تکی هستند در یک زیرفضای یک بعدی قرار می‌گیرند و می‌توان این بردارها را با یک بردار اختلاط دیگر در دامنه زمان-فرکانس در همین زیرفضا نشان داد. بنابراین اگر $\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\tilde{\mathbf{s}}(t,k)$ و $\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\tilde{\mathbf{s}}(t,k)$ در یک منبع فعال قرار گیرند، یک عدد حقیقی وجود خواهد داشت که شرط زیر برقرار باشد.

$$\tilde{\mathbf{x}}(\mu,\nu)=\alpha\tilde{\mathbf{x}}(\psi,\omega) \quad (۱۷)$$

بدین ترتیب می‌توان مسئله شناسایی SSP را به شناسایی زیرفضاهای یک بعدی در مجموعه ای از بردارهای اختلاط تبدیل کرد. برای این کار می‌توان از برنامه نویسی تنک[1] استفاده کرد. با استفاده از این روش بردارهای اختلاط مذکور به صورت ترکیب خطی تعداد کمتری بردار اختلاط نوشته می‌شوند. فرض شود $y_1,y_2,\dots,y_Q$ تمام بردارهای اختلاط زمان-فرکانس باشند که Q تعداد نقاط زمان-فرکانس است. می‌توان نوشت

$$\mathbf{y}_i=\mathbf{Y}\mathbf{c}_i,\quad s.t.\ c_{ii}=0 \quad (۱۸)$$

که $\mathbf{Y}\triangleq\left[y_1,y_2,\dots,y_Q\right]$ و $\mathbf{c}_i\triangleq\left[c_{i1},c_{i2},\dots,c_{iQ}\right]$ بردار ضرایب می‌باشد. برنامه نویسی تنک سعی بر یافتن حلی برای $\mathbf{c}_i$ دارد. به عبارت دیگر

$$\min\|\mathbf{c}_i\|_0\quad s.t.\ \mathbf{y}_i=\mathbf{Y}\mathbf{c}_i,\quad c_{ii}=0 \quad (۱۹)$$

برای جزییات بیشتر در مورد نحوه حل رابطه فوق به [۱۴] مراجعه شود.

۳- تحلیل چندفراکتالی نوسانات روندزدایی شده

روش MFDFA، تعمیم روش DFA است که برای شناسایی

1 Sparse coding

خواص فراکتالی و همین طور تعیین همبستگی در بازه‌های بزرگ سری‌های زمانی دارای نویز و رفتار غیرخطی کاربرد دارد. این روش شامل چند مرحله اصلی به شرح زیر است[۴]

۱- اگر فرض کنیم سری زمانی به صورت $x_i, i=1,...,N$ باشد. گام تصادفی[1] سری زمانی به صورت زیر است

$$Y(i)=\sum_{k=1}^{i}\left[x_k-\langle x\rangle\right] \qquad (۲۰)$$

که $\langle x\rangle$ میانگین سری زمانی x_i است. هدف از کسر میانگین از سری زمانی حذف کردن روندها است. با این وجود کسر میانگین الزامی‌نیست زیرا همان طور که در مراحل بعد نشان داده خواهد شد، میانگین از داده‌ها حذف می‌شود. برای انجام آنالیز تحلیل نوسانات روندزدایی شده تبدیل سری زمانی از حالت نویز مانند به گام تصادفی الزامی‌است.

۲- سری تبدیل شده به گام تصادفی $Y(i)$ به $N_s=\mathrm{int}\left(\frac{N}{s}\right)$ تکه که هر یک دارای s نقطه می‌باشند تقسیم می‌شود. به تعداد نقاط s اصطلاحاً مقیاس[2] سری زمانی گفته می‌شود. این بلوک‌ها مستقل بوده و با هم همپوشانی ندارند. در هر بلوک، داده‌ها با یک چند جمله ای درون یابی شده که روند محلی هر تکه را نشان می‌دهد تقریب زده می‌شوند. سپس RMS هر تکه حول هر روند محاسبه می‌شود. هدف از این کار آن است که بتوان نوسانات محلی در سیگنال را شناسایی کرد. اگر چند جمله ای در بخش v ام را با نشان دهیم، خواهیم داشت

$$F(s,v)=\sqrt{\sum_{i=1}^{s}\left\{Y\left[(v-1)s+i\right]-y_v(i)\right\}^2} \qquad (۲۱)$$

برای برازش در هر تکه می‌توان از یک چند جمله ای مرتبه m استفاده کرد. انتخاب مرتبه چند جمله ای بستگی به توان آن برای روندزدایی داده‌ها دارد.

۳- در این مرحله تابع افت و خیز محاسبه می‌شود. برای این کار روی کل بلوک‌ها میانگین گیری می‌شود.

$$F_q(s)=\left[\frac{1}{N_s}\sum_{v=1}^{N_s}F(s,v)^q\right]^{\frac{1}{q}} \qquad (۲۲)$$

پارامتر q می‌تواند هر عددی مخالف صفر باشد. معمولاً q را بین ۵- تا ۵ انتخاب می‌کنند.

۴- مراحل فوق برای sهای مختلف تکرار می‌شود. در این صورت رابطه زیر بین s و Fq برقرار است.

$$F_q(s)\cong s^{h(q)} \qquad (۲۳)$$

اگر نمودار $F_q(s)$ log-log بر حسب s با یک خط راست برازش داده شود، شیب خط حاصل نمای هارست[3] ،h(q) ، مرتبه q نامیده می‌شود. در صورتی که h(q) وابسته به s باشد، سری زمانی دارای خاصیت چند فراکتالی می‌باشد و در غیر ان صورت سری دارای خاصیت تک فراکتالی است. تفاوت سری‌های تک فراکتالی و چند فراکتالی در این است که سری‌های چند فراکتالی دارای نوسانات محلی کوچک و بزرگ هستند در نتیجه نوسانات محلی آن‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد. بر این اساس سری‌های چندفراکتالی به صورت نرمال توزیع نمی‌شوند و در نتیجه به جای ممان دوم، ممان qام آن‌ها باید محاسبه شود.

۵- استفاده از نمای مرتبه q هارست، h(q) ، تنها یکی از راه‌های کمی‌سازی سری‌های چندفراکتالی است. می‌توان نمای هارست را به نمای وزن، t(q) ، و سپس نمای وزن را به نمای تکینی، D(q) ، تبدیل کرد. به نمودار h(q) بر حسب D(q) اصطلاحاً طیف چند فراکتالی گفته می‌شود.

$$t(q)=qh(q)-1 \qquad (۲۴)$$

و

$$D(q)\equiv\frac{t(q)}{q-1}=\frac{qh(q)-1}{q-1} \qquad (۲۵)$$

۴- هاسازه‌های مورد استفاده

۴-۱- مدل جرم-فنر

به عنوان اولین مدل جهت انجام محاسبات از یک مدل جرم-فنر با ۵ درجه آزادی استفاده شده‌است. ماتریس جرم و سختی مدل در زیر نشان داده شده‌است

1 Random walk
2 Scale
3 Hurst Exponent

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0\\0&2&0&0&0\\0&0&2&0&0\\0&0&0&2&0\\0&2&0&0&3\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix}800&-800&0&0&0\\-800&2400&-1600&0&0\\0&-1600&4000&-2400&0\\0&0&-2400&5600&-4000\\0&0&0&-4000&7200\end{bmatrix} \quad (۲۶)$$

از میرایی رایلی برای مدل استفاده شده‌است که به صورت $\mathbf{C}=0.5\mathbf{M}+0.0004\mathbf{K}$ می‌باشد. در نتیجه ضرایب میرایی مودال به صورت $\xi_1=0.0278,\ \xi_2=0.0151,\ \xi_3=0.0142,\ \xi_4=0.0150,\ \xi_5=0.0173$ می‌باشد. با حل معادله تعادل مقادیر فرکانس میرایی سازه به صورت $\omega_1=1.5354,\ \omega_2=3.9079,\ \omega_3=5.9273,\ \omega_4=7.9737,\ \omega_5=10.7995$ خواهند بود.

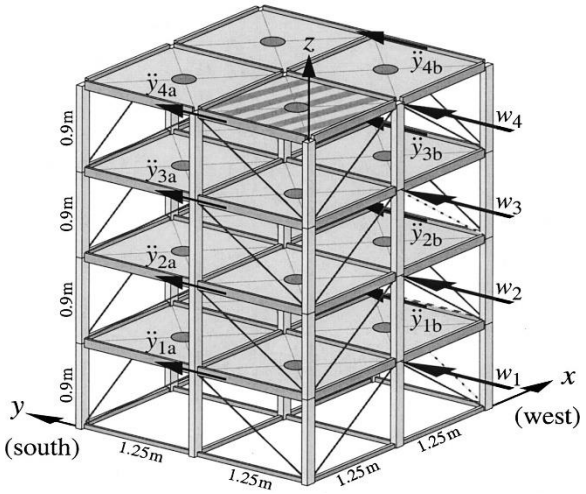
۴-۲- سازه مرجع ASCE/IASC

در این پژوهش از سازه مرجع پایش سلامت سازه که توسط IASC-ASCE توسعه داده شده‌استفاده شده‌است [۲۰]. این سازه، یک ساختمان فولادی ۴ طبقه دو دهانه است که اقتباس شده از مدل آزمایشگاهی یک چهارم مقیاس دانشگاه بریتیش کلمبیا است. سازه در پلان دارای ابعاد ۲٫۵ × ۲٫۵ متر است و ۳٫۶ متر ارتفاع دارد. دو مهاربند قطری نیز در وجوه پیرامونی سازه در هر طبقه قرار گرفته‌اند. بارگذاری به صورت نویز سفید نرمال فیلتر شده مستقل مدل سازی شده و با استفاده از یک فیلتر پایین گذر باتروورس مرتبه شش[1] با فرکانس قطع ۱۰۰ هرتز تولید شده‌است. در این تحقیق از حالت سالم سازه برای مقایسه عملکرد روش‌های جداسازی کور منبع و حالت‌های آسیب سازه برای صحت سنجی کارایی روش پیشنهادی شناسایی خسارت استفاده شده‌است. شش حالت آسیب سازه مورد استفاده قرار گرفته است: ۱) عدم سختی در مهاربندهای (حذف مهاربند) طبقه اول ۲) عدم سختی در همه مهاربندهای طبقات اول و سوم ۳) عدم سختی در یک مهاربند در طبقه اول (مهاربند شمالی در وجه غربی سازه ۴) عدم سختی در یک مهاربند طبقه اول و یک مهاربند در طبقه سوم ۵) همانند الگوی ۴ به علاوه پیچ‌های یکی از اتصالات تیر به ستون طبقه اول شل شده اند ۶) دو سوم سختی در یک مهاربند طبقه اول. الگوهای خسارت به ترتیبی مدل شده اند که خسارات شدید تا جزیی را لحاظ کنند. شکل ۱ سازه واقعی و مدل عددی آن را نشان می‌دهد.

۴-۳- سازه ۶ طبقه بربانک

این سازه یک قاب خمشی فولادی ۶ طبقه می‌باشد و در بربانک[2] کالیفرنیا واقع شده‌است که در سال ۱۹۷۶ مطابق آیین نامه UBC۱۹۳ طراحی شده‌است [۲۱]. شکل ۲ نمایی از ساختمان مذکور را نشان

الف) مدل واقعی آزمایشگاهی



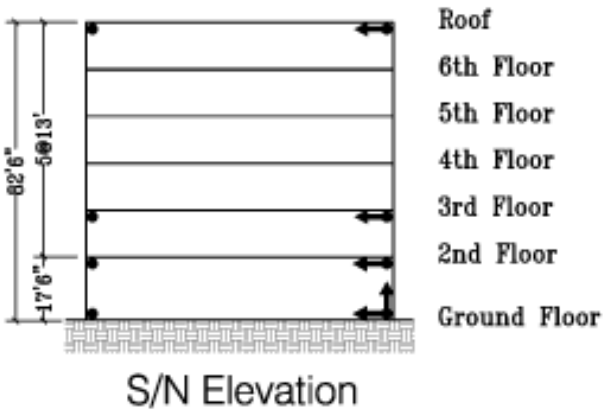
ب) مدل عددی

شکل ۱. نمایی از سازه مرجع ASCE/IASC [20]

Fig. 1. ASCE0IASC benchmark structure [20]

1 sixth-order low-pass Butterworth filter
2 Burbank

الف) نمایی از ساختمان



ب) موقعیت سنسورها

شکل ۲. سازه ۶ طبقه بربانک [۲۱]

Fig. 2. Burbank 6-story building [21]

می‌دهد. سازه در پلان مستطیلی شکل به ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ فوت می‌باشد. سیستم باربر جانبی سازه یک قاب در پیرامون سازه می‌باشد و قاب‌های داخلی سازه به صورت ثقلی طراحی شده و دارای اتصالات ساده می‌باشند. سازه در پلان منظم می‌باشد. تعداد ۱۳ سنسور شتاب بر روی سازه نصب شده‌است. شکل ۶ جانمایی سنسورها در طبقات نشان می‌دهد. در طول مدتی که سازه مجهز به سنسور شده، پنج زلزله رخ داده است که رکورد این زلزله‌ها و شتاب‌های ثبت شده توسط سنسورها موجود است. داده‌ها نشان می‌دهد که این سازه در تمامی‌این زلزله‌ها عملکرد خوبی داشته و به صورت الاستیک رفتار کرده است. در این پژوهش از رکورد زلزله نورتریج برای محاسبات استفاده شده‌است.

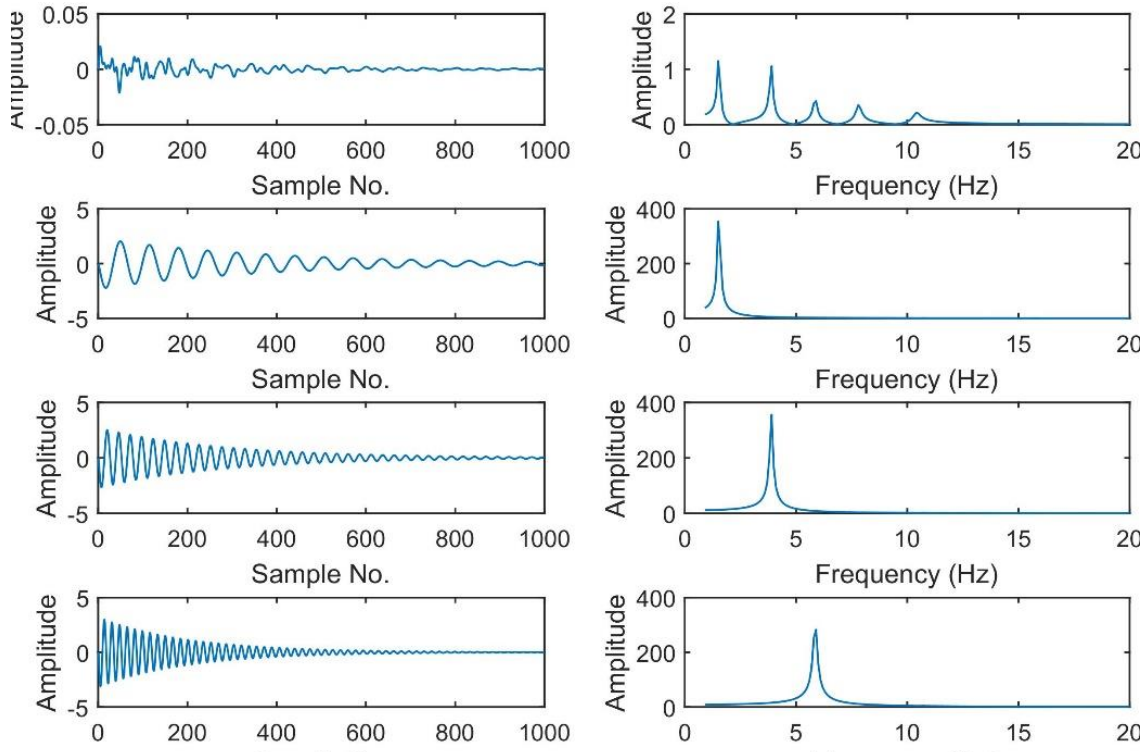
۵- شناسایی مودال هاسازه‌ها

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، کاربرد اصلی جداسازی کور منبع، تفکیک سیگنال‌های ترکیبی است. بدین معنا که یک سیگنال که ترکیبی از چند سیگنال ساده‌تر است را با استفاده از این روش می‌توان به سیگنال‌های ساده اصلی تجزیه کرد. در این تحقیق از جداسازی کور منبع برای تفکیک سیگنال ارتعاش سازه چند درجه آزادی به مجموعه ای از سیگنال‌های مربوط به ارتعاش سازه یک درجه آزاد استفاده شده‌است تا بتوان فرکانس مودهای ارتعاش سازه را یافت. بر این اساس، کارایی سه روش جداسازی کور منبع با یکدیگر مقایسه شده‌است. در ادامه دقت روش‌های مذکور بر روی سه سازه فوق الذکر بررسی شده و با یکدیگر مقایسه شده‌است. هاسازه‌های به گونه ای انتخاب شده اند که بازه مدلهای عددی با درجه آزادی کم تا هاسازه‌های واقعی با درجات آزاد زیاد را شامل می‌شود. در ادامه جهت سادگی، هر یک از روش‌های شناسایی کور مودال، روش ترکیبی، و روش با استفاده از برنامه نویسی تنک به ترتیب روش‌های ۱ الی ۳ خوانده می‌شوند.

۵-۱- مدل جرم فنر

این مدل ساده به عنوان اولین مدل برای مقایسه روش‌ها انتخاب شده‌است. سازه تحت یک تحریک اولیه قرار گرفته و پاسخ آزاد آن ثبت شده‌است. شکل ۳ به عنوان نمونه پاسخ هر یک از مودهای استخراج شده و طیف فوریه متناظر با هر مود را به روش ۱ برای ۳ مود اول نشان می‌دهد. ردیف اول سیگنال اصلی (شتاب پاسخ طبقه آخر) و طیف فوریه آن و ردیف‌های دوم تا چهارم سه مود اول تجزیه شده و طیف فوریه هر یک را نشان می‌دهد. مطابق شکل، مودهای ارتعاش به خوبی از یکدیگر تفکیک شده اند (طیف فوریه هر مود تنها دارای یک قله می‌باشد) به عبارت دیگر ارتعاش یک سیستم چند درجه آزادی به ارتعاش چند سیستم یک درجه ازادی تبدیل شده‌است. در جدول (۱) فرکانس مودهای استخراج شده از روش‌های ۱ تا ۳ با مقادیر دقیق آن مقایسه شده‌است. همان‌طور که از جدول پیدا است، هر سه روش با دقت بسیار بالایی توانسته اند فرکانس‌های سازه را استخراج کنند. با این حال دقت فرکانس‌ها از مودهای پایین به بالا اندکی کاهش می‌یابد به طوری که روش‌های ۱ تا ۳ در مود ۵ دارای حدود ٪۳ خطا می‌باشند.

۵-۲- سازه مرجع ASCE/IASC



شکل ۳. سیگنالهای تجزیه شده مدل جرم فنر و طیف فوریه متناظر هر یک به روش ۱

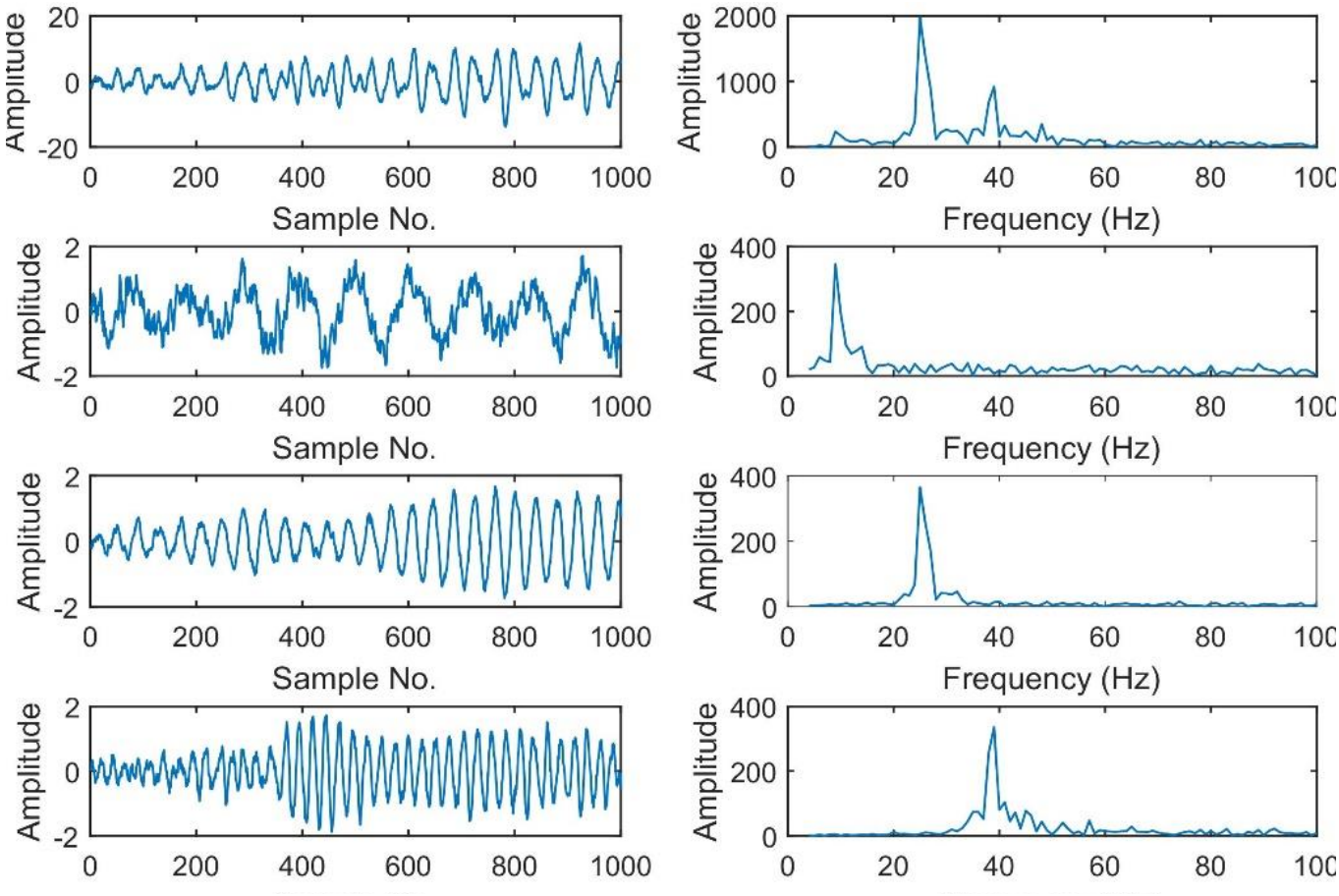
Fig. 3. Extracted signals of mass-spring system and the corresponding Fourier spectra for method 1

جدول ۱. فرکانس و میرایی مدل جرم فنر

Table 1. Damage indices for different damage patterns

مود	تحلیلی		روش ۱		روش ۲		روش ۳	
	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی
۱	۱/۵۳	۰/۰۲۷۸	۱/۵۳	۰/۲۸۰۰	۱/۵۳	۰/۰۱۷۱	۱/۵۳	۰/۰۲۸۰۰
۲	۳/۹۰	۰/۰۱۵۱	۳/۸۸	۰/۰۱۵۰	۳/۸۸	۰/۰۱۰۶	۳/۸۸	۰/۰۱۵۰
۳	۵/۹۲	۰/۰۱۴۲	۵/۸۵	۰/۰۱۳۸	۵/۸۶	۰/۰۱۰۹	۵/۸۶	۰/۰۱۳۸
۴	۷/۹۷	۰/۰۱۵۰	۷/۸۱	۰/۰۱۴۴	۷/۸۱	۰/۰۱۲۲	۷/۸۱	۰/۰۱۴۴
۵	۱۰/۸۰	۰/۰۱۷۳	۱۰/۴۱	۰/۰۱۶۰	۱۰/۴۱	۰/۰۱۴۴	۱۰/۴۱	۰/۰۱۶۰

سازه مرجع ASCE/IASC به عنوان یک سازه مرجع در بسیاری از روش‌های پایش سلامت استفاده شده‌است. برخلاف سازه قبل، این سازه از یک بار تصادفی به عنوان نیروی ورودی استفاده می‌کند. شکل ۴ به عنوان نمونه مودهای ارتعاش استخراج شده را به روش ۱ نشان می‌دهد (ردیف اول شتاب ارتعاش طبقه چهارم و طیف فوریه آن و ردیف‌های دوم الی چهارم ارتعاش تجزیه شده). همان طور که از شکل پیدا است طیف فوریه نتوانسته است برای ۱۰۰۰ داده اول ۴ فرکانس اصلی را استخراج کند. با این حال با استفاده از روش‌های شناسایی کور منبع این مودها با موفقیت بدست آمده اند. جدول (۲) خلاصه مقادیر به‌دست آمده را نشان می‌دهد. مطابق جدول، مقادیر هر سه روش بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشد. با این حال حداکثر خطای روش ۲ اندکی کمتر از سایر روش‌ها می‌باشد (حدود ٪۰/۶) . روش‌های ۱ و ۳ نتایج تقریباً مشابهی را بدست داده اند. در مورد میرایی اختلاف مقادیر به‌دست آمده بیشتر است. به طوری که روش‌های اول و دوم ضرایب میرایی مودهای ۱، ۳ و ۴ را بسیار متفاوت از یکدیگر محاسبه کرده اند. به طور کلی می‌توان گفت که در روش ۲ مقادیر میرایی به واقعیت نزدیک تر است (حدود ٪۳ ضریب میرایی در مورد اول).



شکل ۴. سیگنالهای تجزیه شده سازه ASCE/IASC و طیف فوریه متناظر هر یک به روش ۱

Fig. 4. Extracted signals of ASCE/IASC structure and the corresponding Fourier spectra for method 1

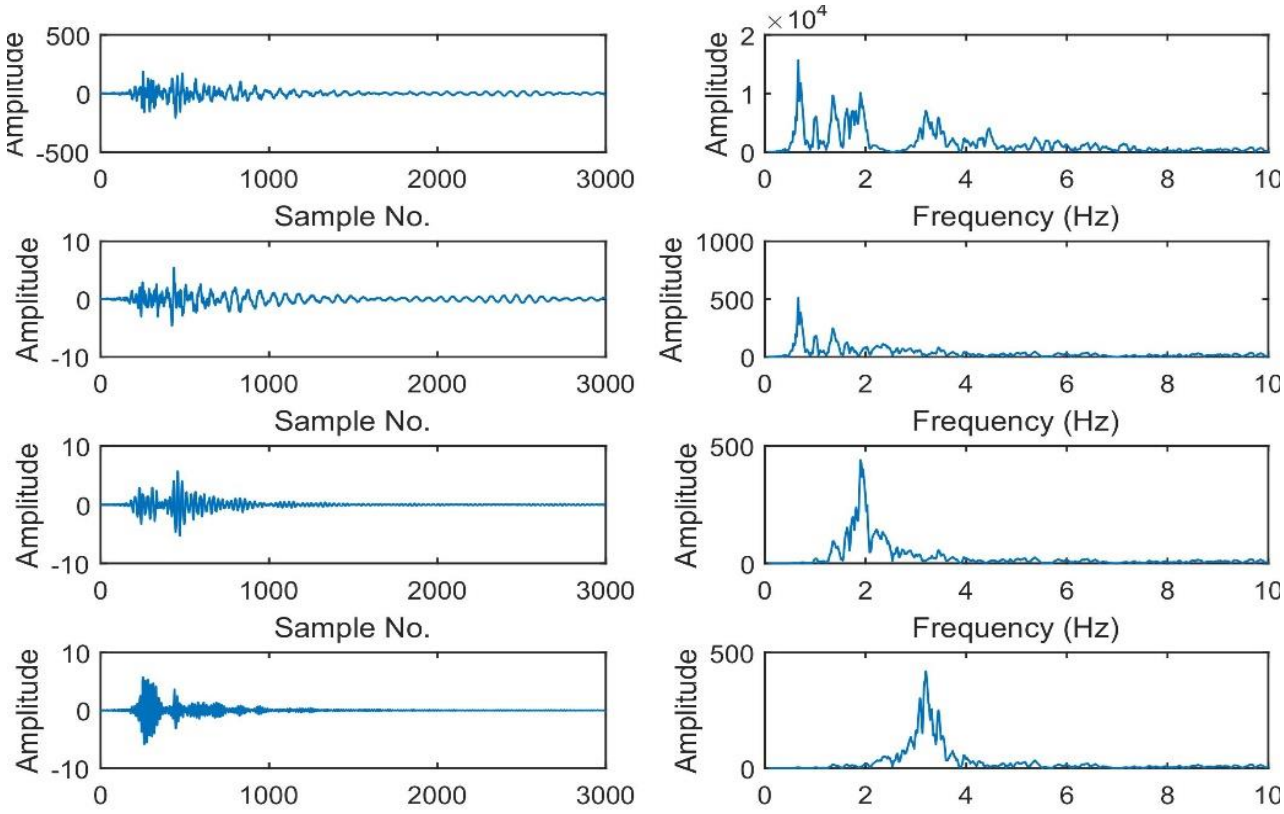
جدول ۲. فرکانس و میرایی سازه مرجع ASCE/IASC

Table 2. Frequency and damping of ASCE/IASC structure

مود	تحلیلی [۱۵]		روش ۱		روش ۲		روش ۳	
	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی
۱	۹/۴۱	-	۹/۳۸	۰/۰۰۲۷	۹/۴۲	۰/۰۳۱۴	۹/۳۸	۰/۰۰۲۷
۲	۲۵/۶۰	-	۲۵/۵۴	۰/۰۰۱۱	۲۵/۵۲	۰/۰۰۳۳	۲۵/۵۴	۰/۰۰۱۱
۳	۳۸/۸۵	-	۳۸/۵۹	۰/۰۰۰۲	۳۸/۶۳	۰/۰۱۳۰	۳۸/۶۰	۰/۰۰۲
۴	۴۸/۳۷	-	۴۸/۰۵	۰/۰۰۰۱	۴۸/۰۷	۰/۰۱۹۵	۴۸/۰۵	۰/۰۰۰۱

۵-۳- سازه ۶ طبقه بربانک

این ساختمان یک سازه قاب خمشی است که زلزله‌های متعددی را در طول عمر خود تجربه کرده است. در این بخش از داده‌های زلزله نورتریج برای آنالیز استفاده شده‌است. شکل (۵) مودهای ارتعاش تجزیه شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل مودها به درستی استخراج شده‌اند (طیف فوریه هر مود تنها دارای یک قله است). در جدول ۳ مودهای سازه و میرایی نظیر آن‌ها نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که مقادیر تحلیلی از مدل اجزا محدود کالیبره شده سازه بدست آمده اند. برای این سازه روش ۳ نتوانست مودهای سازه را استخراج کند. در روش‌های ۱ و ۲ مقادیر فرکانس نزدیک به یکدیگر است. تنها در مود سوم فرکانس‌ها با یکدیگر تفاوت دارند. در روش ۱ در مود سوم فرکانسها به مقادیر تحلیلی نزدیک تر است و در روش ۳ فرکانس‌های مود اول به مقادیر تحلیلی نزدیک تر است. به طور کلی خطای حداکثر در روش اول برابر با ۷٪ و در روش دوم برابر با ۸٪ می‌باشد. لذا هر دو



شکل ۵. سیگنالهای تجزیه شده سازه ۶ طبقه بربانک و طیف فوریه متناظر هر یک به روش ۱

Fig. 5. Extracted signals of Burbank 6-story structure and the corresponding Fourier spectra for method 1

جدول ۳. فرکانس و میرایی سازه ۶ طبقه بربانک

Table. 3. Frequency and damping of Burbank 6-story structure

مود	تحلیلی [۱۶]		روش ۱		روش ۲		روش ۳	
	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی	فرکانس	میرایی
۱	۰/۷۱	–	۰/۶۶	۰/۰۰۰۶	۰/۷۰	۰/۰۹۷۳	–	–
۲	۱/۹۶	–	۱/۹۰	۰/۰۰۳۱	۱/۹۱	۰/۰۴۱۴	–	–
۳	۳/۲۲	–	۳/۱۹	۰/۰۰۵۳	۲/۹۳	۰/۱۲۸۹	–	–

روش تقریبا در استخراج فرکانس‌ها دارای عملکرد یکسانی می‌باشند. برخلاف فرکانس‌ها، دو روش اول و دوم در استخراج مقادیر میرایی بسیار متمایز عمل کرده‌اند. به طور کلی در روش اول مقدار ضریب میرایی زیر ٪۰/۶ درصد و در روش دوم بالای ٪۴ به‌دست آمده است. بیشترین اختلاف در مودهای اول و سوم است. بر این اساس به نظر می‌رسد مقادیر روش دوم به میرایی سازه واقعی نزدیک تر باشد (بین ٪۴ الی ٪۱۲ در مودهای اول تا سوم).

جدول ۴ زمان مورد نیاز انجام محاسبات برای استخراج مودهای ارتعاش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات توسط یک رایانه شخصی با پردازنده corei۷ مدل ۶۶۰۰ انجام شده‌است. مطابق جدول، روش اول بسیار سریع است و تنها در چندم صدم ثانیه می‌تواند سیگنال ارتعاش را تجزیه کند. روش دوم بیشترین حجم محاسبات را دارا بوده و به همین ترتیب زمان بیشتری را برای انجام محاسبات نیاز دارد (تا حدود ۸۰ ثانیه برای سازه ۶ طبقه بربانک). روش ۳ از نظر زمان محاسبات در میانه قرار دارد ولی همانطور که قبلاً اشاره شد این روش نتوانست مودهای ارتعاش سازه ۶ طبقه بربانک را استخراج کند. علت آن است که روش سوم از یک الگوریتم بهینه یابی برای یافتن بردارهای ضرایب استفاده می‌کند. زمانی که درجات آزادی

جدول۴. مقایسه زمان لازم برای محاسبات روش‌های ۱ الی ۳

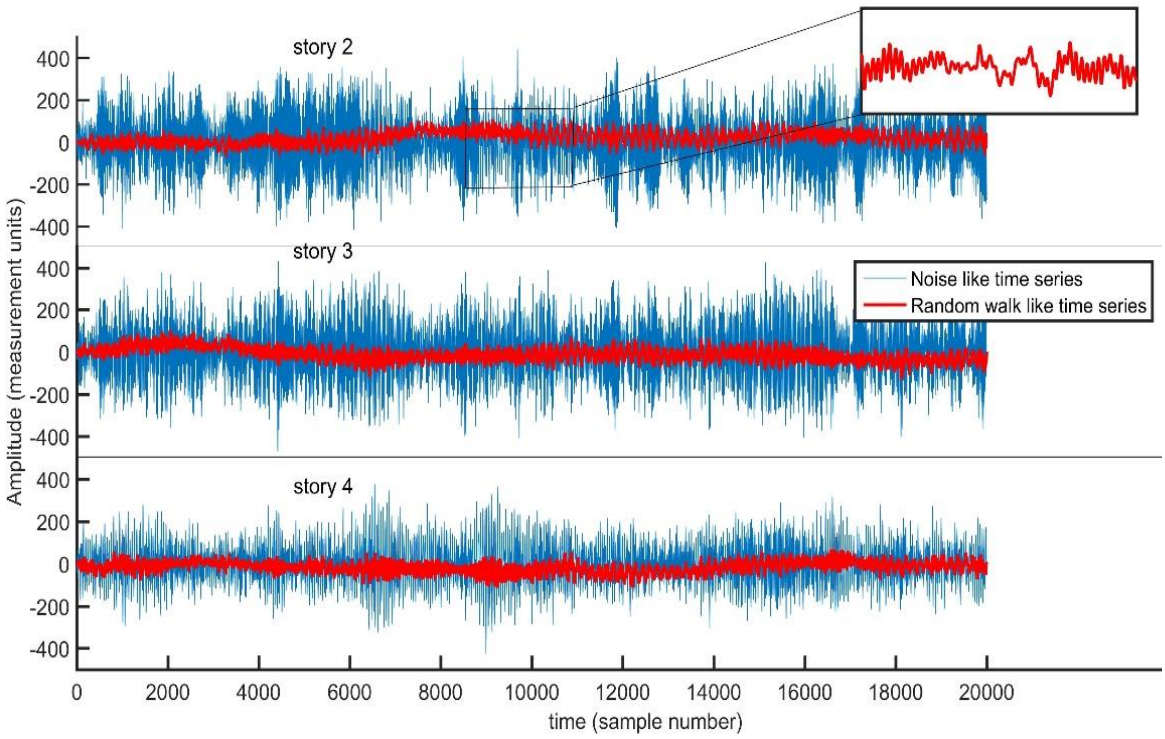
Table. 4. Comparing computational time of methods 1 to 3

	مدل جرم فنر	سازه ASCE/IASC	سازه ۶ طبقه بربانک
روش ۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳
روش ۲	۶/۹۳	۱۲/۷۰	۷۹/۱۹
روش ۳	۱/۸۱	۳/۹۹	-

سازه بالا بوده و شدت سیگنال نیز دارای تغییرات زیاد باشد، تابع هدف به شدت ناهموار خواهد بود. لذا این تابع دارای مقادیر اکسترمم محلی زیاد می‌باشد که باعث افزایش زمان محاسبات می‌شود. در نتیجه الگوریتم بهینه یابی قادر نخواهد بود که در یک زمان متعارف مقدار اکسترمم تابع را پیدا کند. در نهایت بر اساس نتایج این بخش می‌توان گفت که روش اول هم دارای سرعت بالا و هم دقت کافی برای استخراج فرکانس‌ها است. با این حال این روش در استخراج مقادیر میرایی ضعف دارد. لذا در ادامه از روش ۲ به عنوان یک روش موثر جهت تجزیه سیگنال‌ها استفاده شده‌است.

۶- تحلیل چند فراکتالی

همان‌طور که پیشتر گفته شد، در تحلیل چند فراکتالی هدف بررسی رفتار سری‌های زمانی از بعد فراکتالی است. در این بخش رفتار سیگنال‌های ارتعاش سازه مورد بررسی قرار گرفته است تا مشاهده شود که سیگنال‌های سازه‌ای دارای چه نوع رفتار فراکتالی هستند. برای نمونه سیگنال‌های سازه مرجع ASCE/IASC مورد بررسی قرار گرفته اند. شکل (۶) به عنوان نمونه سیگنال ارتعاش سه طبقه آخر سازه را نشان می‌دهد که از حالت نویز مانند (خطوط آبی) به گام تصادفی (خطوط قرمز) نگاشت شده اند. مطابق شکل، برخلاف سیگنال‌های بیولوژیک، سیگنال‌های سازه‌ای در فضای گام تصادفی همچنان به صورت نویز مانند عمل می‌کنند و فاقد قله‌ها و دره‌های



شکل ۶. تبدیل سری زمانی پاسخ طبقات سازه به گام تصادفی

Fig. 6. random walk representation of story response time series

بلند هستند. با این حال به صورت محلی سیگنال‌ها دارای نوساناتی هستند ولی دامنه این نوسانات محدود است.

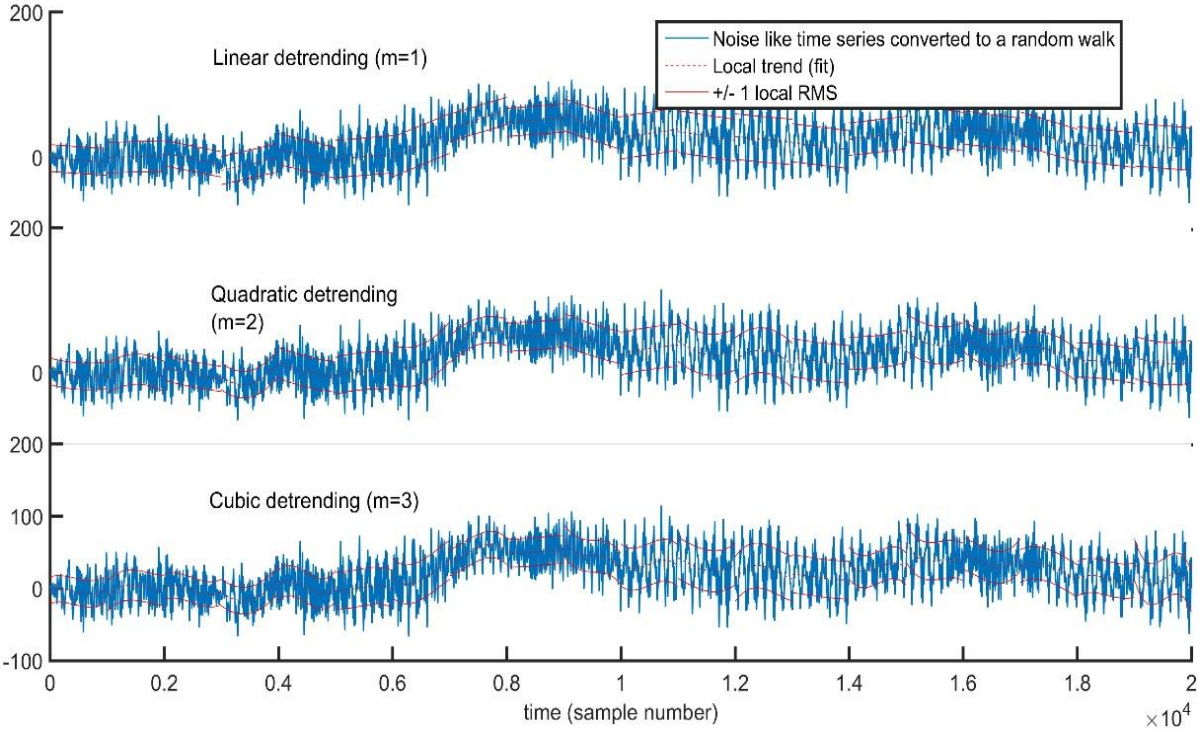
شکل ۷ نحوه روند زدایی سری‌ها را نشان می‌دهد. منحنی‌های آبی رنگ سیگنال‌های نگاشت شده به گام تصادفی و منحنی‌های قرمز رنگ منحنی‌های برازش شده به هر بلوک را نشان می‌دهد. درجه منحنی‌ها از ۱ تا ۳ متغیر است. همان‌طور که از شکل پیدا است منحنی درجه ۳ بهتر از سایر منحنی‌ها توانسته با سیگنال اصلی مطابقت کند. لذا این منحنی بیشترین توانایی را برای روند زدایی دارد. بر این اساس در ادامه از منحنی درجه ۳ استفاده شده‌است.

شکل ۸ نمای هارست، $h(q)$ ، را برای qهای مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل مقادیر $h(q)$ به s وابسته است. لذا می‌توان گفت که در تمامی‌مقادیر پاسخ مودی سازه مقادیر پاسخ دارای خاصیت چند فراکتالی می‌باشند. این بدین معنا است که سیگنال‌ها دارای نوسانات محلی با دامنه زیاد می‌باشند. همچنین تفاوت در مقادیر متناظر q منفی و مثبت در بلوک‌های کوچک تر قابل ملاحظه تر است زیرا بلوک‌های کوچک تر می‌توانند مقادیر کوچک و بزرگ نوسان را در سری زمانی بهتر نشان دهند. برعکس، بلوک‌های بزرگ مقادیر نوسان را در طول زیاد بلوک میانگین گیری کرده و اثر آن‌ها را حذف می‌کنند. بر این اساس خاصیت چند فراکتالی در بلوک‌های بزرگ ناپدید شده و نزدیک به خاصیت تک فراکتالی می‌شود. این نوسانات بلوک‌های کوچک در مود اول مشهود تر هستند. کاهش $h(q)$ برای مقادیر q بزرگتر نشان دهنده آن است که بلوک‌های با نوسانات کوچک بیشتر ساختار شبیه گام تصادفی دارند در حالی که بلوک‌های با نوسانات بزرگ ساختاری شبیه به نویز دارند.

شکل ۹ نمودار طیف چند فراکتالی را نشان می‌دهد. مطابق شکل $t(q)$ به صورت خطی با q تغییر نمی‌کند که نشان‌دهنده چندفراکتالی بودن سیگنال‌ها است. به همین علت نیز طیف چند فراکتالی به صورت یک کمان پهن است (در مقابل طیف‌های تک فراکتالی که طیف به صورت یک کمان کم عرض است). اصطلاحاً به عرض طیف چند فراکتالی، که نشان دهنده اختلاف مقادیر حداکثر و حداقل $h(q)$ است، عرض طیف می‌گویند. در سیگنال‌های مذکور به علت چند فراکتالی بودن سیگنال‌ها، عرض طیف زیاد است. در بخش بعد عرض طیف به عنوان شاخص خسارت سازه در نظر گرفته شده‌است.

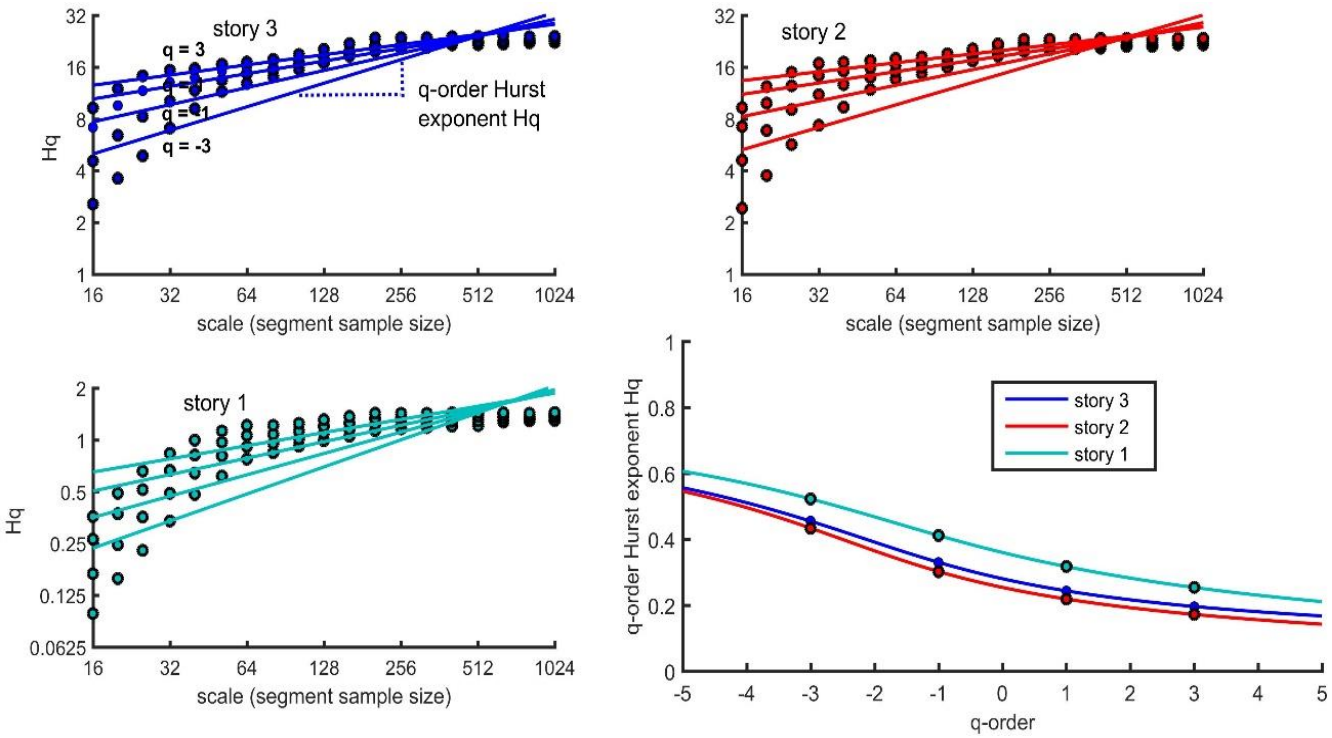
۷- روش شناسایی خسارت

در بخش‌های قبل یک روش کارامد برای تجزیه سیگنال‌های ارتعاش انتخاب شد و مشخص شد که با استفاده از تکنیک جداسازی



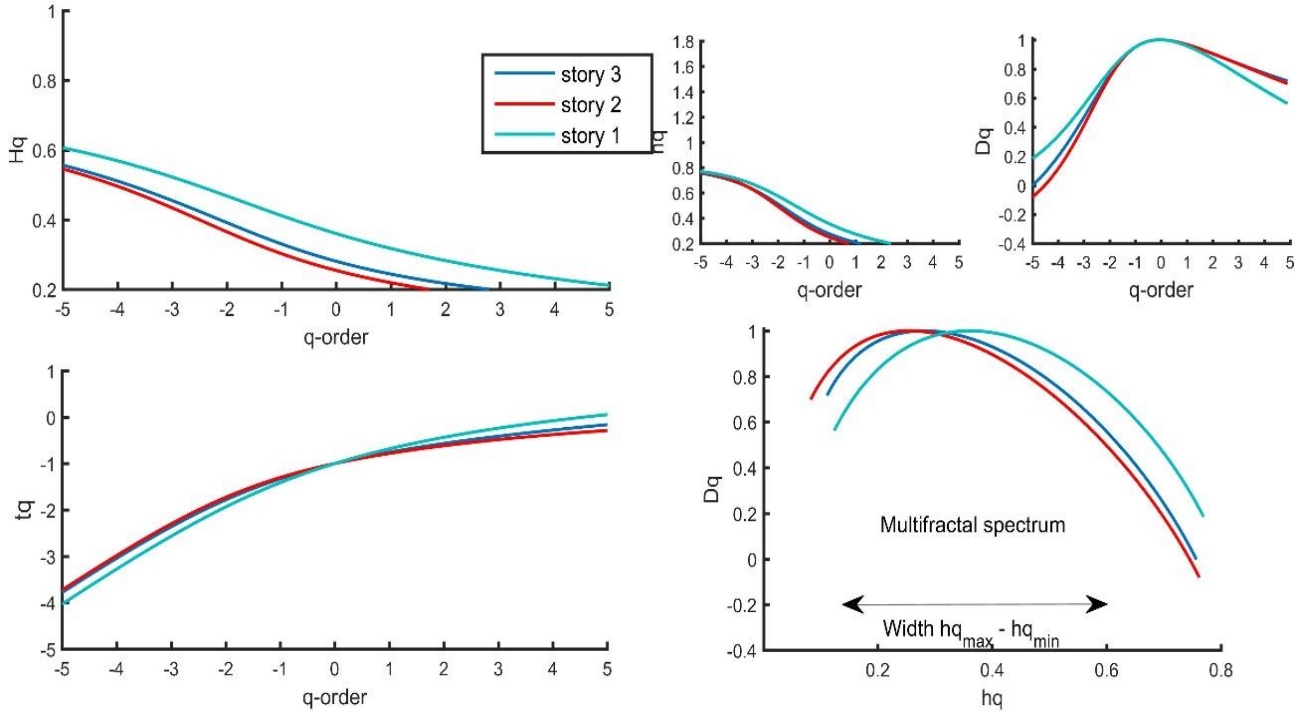
شکل ۷. روند زدایی سری‌های زمانی با منحنی‌های درجات ۱ الی ۳

Fig. 7. time series detrending with linear to cubic curves



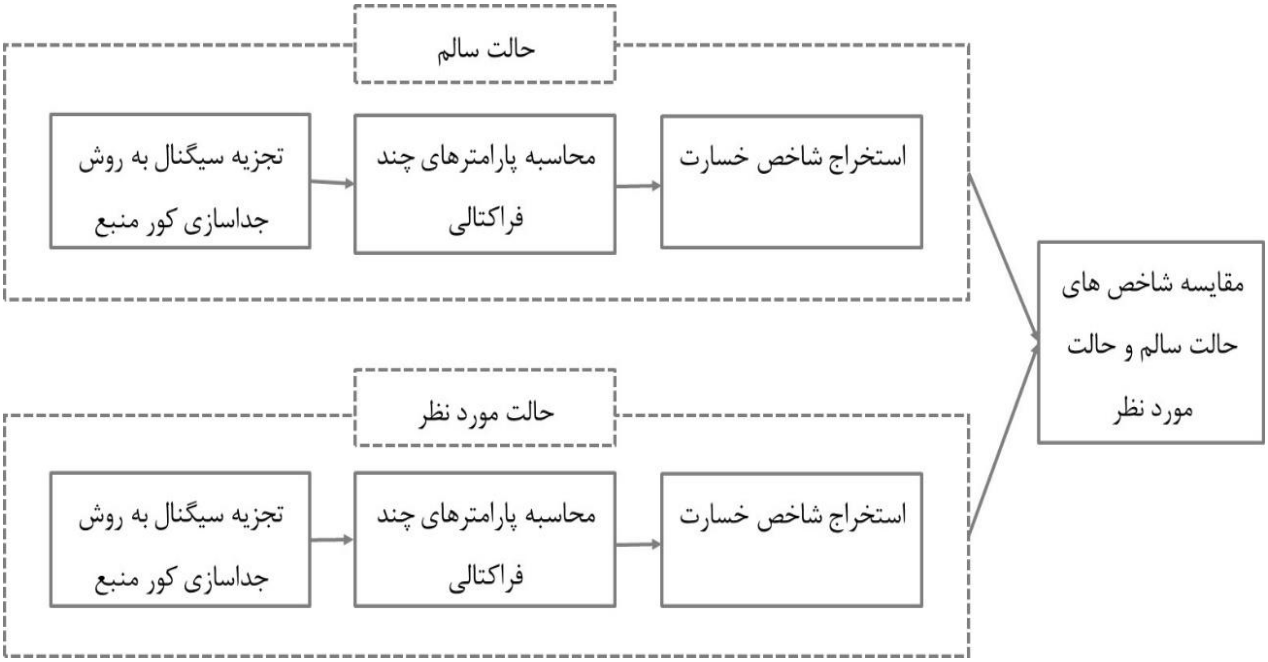
شکل ۸. نمای هارست برای مقادیر مختلف q

Fig. 8. Hurst exponent for different q



شکل ۹. مقادیر پارامترهای چند فراکتالی شامل t(q)، h(q) و D(q)

Fig. 9. multifractal values including h(q), t(q) and D(q)



شکل ۱۰. مراحل روش پیشنهادی شناسایی خسارت هاسازه‌ها

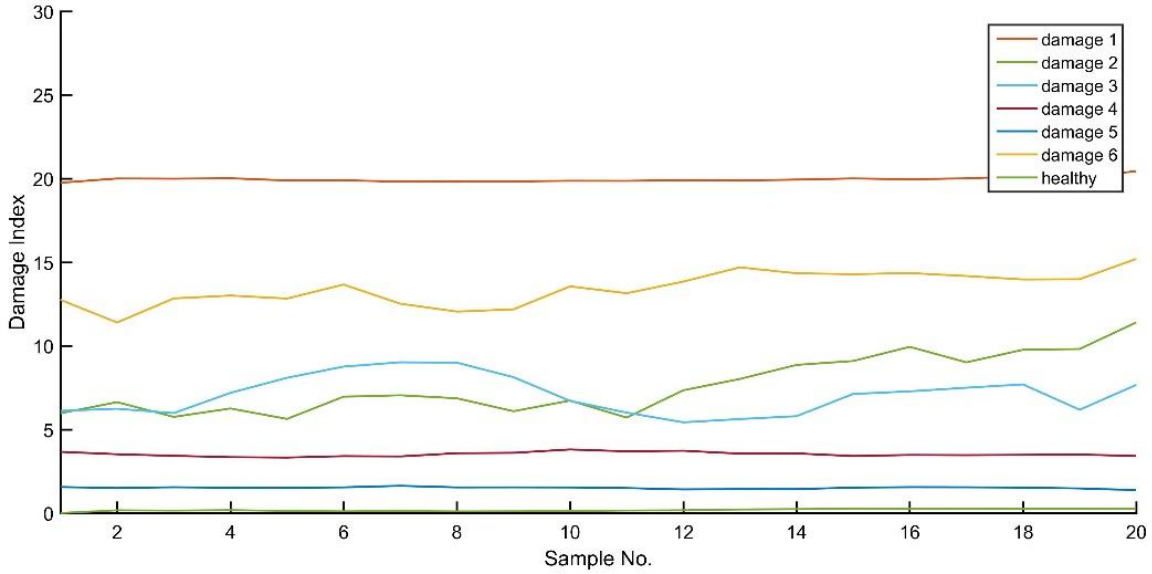
Fig. 10. damage detection algorithm

کور منبع می‌توان به خوبی ارتعاش سازه را به ارتعاشهای ساده تر تجزیه کرد. بر این اساس در این بخش بر اساس تجزیه سیگنال‌ها و تحلیل آن‌ها به روش چند فراکتالی، یک روش شناسایی خسارت معرفی شده‌است. از مدل ASCE/IASC به عنوان یک سازه مرجع پایش سلامت استفاده شده‌است. این سازه دارای یک حالت سالم و ۶ حالت آسیب می‌باشد. شکل (۱۰) روند کلی شناسایی خسارت را نشان می‌دهد. ابتدا با استفاده از جداسازی کور منبع سیگنال پاسخ ارتعاش سازه در طبقه آخر تجزیه می‌شود و مولفه‌های یک درجه آزادی ارتعاش سازه استخراج می‌شوند (سیگنال‌های ارتعاش یک سازه با چند درجه آزادی به چند سیگنال سازه با یک درجه آزادی معادل آن تجزیه می‌شوند). سپس به کمک روش تحلیل چندفراکتالی مقدار شاخص خسارت (عرض طیف چندفراکتالی) هر یک سیگنال‌های تجزیه شده محاسبه شده و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. این پارامتر به عنوان شاخص خسارت در نظر گرفته می‌شود. شاخص خسارت حالت آسیب با حالت مبنا مقایسه می‌شود تا خسارت شناسایی گردد. معیار خسارت به شکل زیر تعریف می‌شود

$$DI = \frac{I_h - I_d}{I_h} \times 100 \qquad (۲۷)$$

که I_h شاخص خسارت حالت سالم و شاخص خسارت حالت آسیب می‌باشد. اگر مقدار این شاخص از یک میزان از پیش تعیین شده بیشتر شود، حالت مورد نظر به عنوان حالت آسیب در نظر گرفته می‌شود.

برای اطمینان از این که حالت سالم به اشتباه به عنوان آسیب در نظر گرفته نمی‌شود. یک حالت مبنا (با ٪۵ نویز و نیروی طبقات ۱۵۰) انتخاب شده و سایر حالت‌ها با مقادیر نویز متفاوت (٪۵ الی ٪۱۰) و نیروی ورودی متفاوت (۱۵۰ الی ۲۵۰) به عنوان سایر حالت‌های سالم در نظر گرفته شده‌است. بدین ترتیب به نحوی می‌توان اثرات شرایط محیطی بر ارتعاش سازه را در نظر گرفت. شکل (۱۱) مقادیر معیار خسارت را برای ۲۰ حالت سالم با پارامترهای ورودی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، کلیه مقادیر معیار خسارت در حالت سالم از ۰ الی ۰/۲ متغیر است. شکل ۱۱ همچنین معیار خسارت را برای ۶ حالت خسارت نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است، کمترین مقدار معیار خسارت در حالت خسارت برابر ۳/۳ است که اختلاف زیادی با مقادیر حالت سالم دارد. بر این اساس با در نظر گرفتن یک حاشیه اطمینان، مقدار آستانه اعلام خسارت برابر با ۰/۵۰ در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی از آنجا که روش مذکور توانسته است هر ۶ حالت خسارت را به خوبی شناسایی کند می‌توان گفت که این روش قابلیت شناسایی خسارت را از خسارت‌های بزرگ تا جزیی دارا است.



شکل ۱۱. مقادیر معیار خسارت برای الگوهای مختلف خسارت

Fig. 11. Damage indices for different damage patterns

۸- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش شناسایی خسارت بر اساس روش جداسازی کور منبع و تحلیل چندفراکتالی نوسانات روندزدایی شده ارائه شد که دارای قابلیت شناسایی خسارت‌های جزیی است. در بخش اول سه روش شناخته شده برای جداسازی سیگنال‌ها مورد بررسی قرار گرفته و مناسب ترین روش برای هاسازه‌های مورد نظر انتخاب شد. سپس با استفاده از تحلیل چندفراکتالی مقادیر نمای هارست محاسبه شده و از عرض طیف فراکتالی به عنوان شاخص خسارت استفاده شد. به طور کلی می‌توان گفت که از میان روش‌های جداسازی کور منبع، روش شناسایی کور مودال دارای دقت کافی برای تجزیه مودها بوده و دارای حجم محاسبات کمتری است که منجر به سرعت پردازش بسیار بالای این روش می‌شود. با این حال روش ترکیبی در تخمین میرایی سازه دارای دقت بهتری نسبت به روش اول است ولی این روش دارای بیشترین زمان محاسبات لازم است. در مورد تحلیل چندفراکتالی نیز می‌توان گفت که این روش به خوبی می‌تواند تغییر فراکتالی ناشی از وقوع خسارت را شناسایی کند. لذا با ترکیب دو روش جداسازی کور منبع و تحلیل چندفراکتالی می‌توان یک روش کارامد برای شناسایی خسارت ارائه کرد که قادر به شناسایی خسارت جزیی باشد.

مراجع

[1] H. Hurst, The Long-Term Storage Capacity of Reservoirs, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116, (1951).

[2] J. Feder, Fractals, Springer Science & Business Media, 2013.

[3] C.-K. Peng, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H.E. Stanley, A.L. Goldberger, Mosaic organization of DNA nucleotides, Physical review e, 49(2) (1994) 1685.

[4] J.W. Kantelhardt, S.A. Zschiegner, E. Koscielny-Bunde, S. Havlin, A. Bunde, H.E. Stanley, Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 316(1-4) (2002) 87-114.

[5] P. Jurica, Multifractal analysis for all, Frontiers in physiology, 6 (2015) 27.

[6] A. Ebrahimkhanlou, A. Farhidzadeh, S. Salamone, Multifractal analysis of crack patterns in reinforced concrete shear walls, Structural Health Monitoring, 15(1) (2016) 81-92.

[7] M.Z. Mistarihi, Z.J. Kong, S.T. Bukkapatnam, A Multi-fractal Spectrum Analysis for online Structural Health Monitoring.

[8] T.-K. Lin, Y.-H. Chien, A structural health monitoring system based on multifractal detrended cross-correlation analysis, Structural Engineering and Mechanics, 63(6) (2017) 751-760.

[9] T.-K. Lin, H. Fajri, Damage detection of structures with

detrended fluctuation and detrended cross-correlation analyses, Smart Materials and Structures, 26(3) (2017) 035027.

[10] H. Su, Z. Wen, F. Wang, J. Hu, Dam structural behavior identification and prediction by using variable dimension fractal model and iterated function system, Applied Soft Computing, 48 (2016) 612-620.

[11] T.-K. Lin, Y.-H. Chien, Development of a Structural Health Monitoring System Based on Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis.

[12] S.M. Fang, J.M. Niedzwecki, M.C. Ozbey, T.J. Cummis, A Brief Review of Structural Health Monitoring with Special Focus on Damage Detection and Sensor Optimization, Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, (2017) 1-8.

[13] S. McNeill, D. Zimmerman, A framework for blind modal identification using joint approximate diagonalization, Mechanical Systems and Signal Processing, 22(7) (2008) 1526-1548.

[14] V. Bargmann, Irreducible unitary representations of the Lorentz group, Annals of Mathematics, (1947) 568-640.

[15] A. Belouchrani, K. Abed-Meraim, J.-F. Cardoso, E. Moulines, A blind source separation technique using second-order statistics, IEEE Transactions on signal processing, 45(2) (1997) 434-444.

[16] S. McNeill, A modal identification algorithm combining blind source separation and state space realization, (2013).

[17] M. Aoki, Notes on economic time series analysis: system theoretic perspectives, Springer Science & Business Media, 2012.

[18] J.-F. Cardoso, A. Souloumiac, Blind beamforming for non-Gaussian signals, in: IEE proceedings F (radar and signal processing), IET, 1993, pp. 362-370.

[19] L. Zhen, D. Peng, Z. Yi, Y. Xiang, P. Chen, Underdetermined blind source separation using sparse coding, IEEE transactions on neural networks and learning systems, 28(12) (2016) 3102-3108.

[20] E.A. Johnson, H.-F. Lam, L.S. Katafygiotis, J.L. Beck, Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data, Journal of engineering mechanics, 130(1) (2004) 3-15.

[21] E. Kolkan, Analytical models of instrumented moment frame steel buildings in OpenSees, Report no., Callii orniia Geollogiicall Survey, Sacramento, CA, (2006).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

E. Darvishan, Damage Detection of Structures Using Blind Source Separation and Multifractal Detrend Fluctuation Analysis, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1367-1382.

DOI: 10.22060/ceej.2020.16919.6392