

# شناسایی خسارت سازه‌ی در قاب‌های برشی براساس پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل S تعمیم‌یافته با پنجره‌ی مختلط

غلامرضا قدرتی‌امیری (استاد)

مصطفی اخوات (کارشناس ارشد)

حامد امینی تهرانی\* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (۲۸-۱۹)  
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۲۸-۱۹

در این نوشتار روشی مؤثر برای شناسایی خرابی در قاب‌های برشی براساس پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل S با پنجره‌ی مختلط و مدولاسیون فاز ( $SCW$ ) معرفی شده است. تبدیل S برای غلبه‌کردن بر محدودیت‌های ذاتی تبدیل موجک در نمایش زمان - بسامد سیگنال در چند سال گذشته توسعه داده شده است. نوع تعمیم‌یافته‌ی این تبدیل، تبدیل S با پنجره‌ی مختلط و مدولاسیون فاز ( $SCW$ ) است، که قابلیت بالایی در موضعی‌سازی اشکال موجی در حوزه‌ی زمان - بسامد بر روی سیگنال دارد. در این نوشتار تبدیل  $SCW$  به دلیل عملکرد مطلوب آن در تشخیص محل و تخمین مقدار خسارت مورد استفاده قرار گرفته است. عملکرد تبدیل  $SCW$  در روش معرفی شده با استفاده از دو مثال عددی و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش تبدیل موجک بررسی شده است. مقایسه بین محل و مقدار خسارت به دست آمده از روش معرفی شده و روش تبدیل موجک در مدل شبیه‌سازی شده، بیانگر این مطلب است که روش نسبت به محل و مقدار خسارت حساس است و علاوه بر تشخیص محل آسیب در سازه، تخمین بسیار خوبی از مقدار خرابی در سازه در دو حالت وجود و عدم وجود نویز در سیگنال‌های ثبت شده را به دست می‌دهد.

واژگان کلیدی: شناسایی خسارت، تبدیل S، تعمیم‌یافته با پنجره‌ی مختلط، تبدیل موجک، پردازش سیگنال، قاب‌های برشی.

ghodrati@iust.ac.ir  
hdma.akhavat@gmail.com  
hmdamini@yahoo.com

## ۱. مقدمه

گذشته توسط پژوهشگران بسیاری در شناسایی خسارت سازه‌ی مورد استفاده قرار گرفته است، که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۰، توانایی گسترده‌ی آنالیز موجک برای استخراج نقاط تکیه از سیگنال نمایش داده شده است، که در آن برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده، مطالعاتی بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی یک مدل ساده‌ی سازه‌ی با فنرهای موازی قابل شکست و همچنین داده‌های واقعی ثبت شده از بام یک قاب در مدت زمان وقوع زلزله انجام شده است.<sup>[۱]</sup>

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۱، از آنالیز موجک متعامد برای تحلیل داده‌های کرنشی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای پیزوالکتریک، به منظور شناسایی رشد ترک در وسط یک صفحه‌ی آلومینیومی مستطیلی استفاده شده است.<sup>[۲]</sup> همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، روشی مبتنی بر آنالیز بسته‌ی موجک برای شناسایی خسارت سازه‌ی پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی مذکور، ابتدا سیگنال ارتعاشی سازه به مؤلفه‌های بسته‌ی موجک تجزیه، سپس انرژی این مؤلفه‌ها محاسبه، و به عنوان ورودی شبکه‌ی عصبی برای شناسایی آسیب به‌کار برده شده

شناسایی خسارت در سازه‌ها در چند دهه‌ی گذشته با توجه به پیشرفت‌های اخیر در روش‌های پردازش سیگنال و ساخت دستگاه‌های ثبت سیگنال‌های پاسخ سازه از قبیل شتاب، سرعت و جابه‌جایی، رشد چشم‌گیری داشته است و توجه بسیاری از پژوهشگران در مهندسی سازه را به خود جلب کرده است. عموماً شناسایی خسارت در سازه‌ها شامل ۴ مرحله است: ۱. تشخیص وجود آسیب، ۲. تشخیص محل آسیب، ۳. کمی‌سازی شدت خرابی، ۴. پیش‌بینی عمر باقی‌مانده‌ی سازه.<sup>[۱]</sup>

محققان در سال ۱۹۹۸، تاریخچه‌ی جامع و کاملی از روش‌های پایش سلامت سازه‌ها و همچنین کارایی و معایب هر یک از روش‌ها ارائه دادند.<sup>[۲]</sup> از جمله ابزارهای پردازش سیگنال می‌توان به تبدیل فوریه‌ی سریع (FFT)،<sup>۱</sup> تبدیل فوریه‌ی زمان - کوتاه (STFT)،<sup>۲</sup> تبدیل موجک (WT)،<sup>۳</sup> و تبدیل بسته‌ی موجک (WPT)،<sup>۴</sup> اشاره کرد. در این میان تبدیل موجک و تبدیل بسته‌ی موجک در طول یک دهه‌ی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۷/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۷/۱۲

به دست آمده از مثال‌های عددی نشان می‌دهند که کاربرد تبدیل  $SCW$  در روش معرفی شده یک ابزار قوی و کارآمد در مسئله‌ی تشخیص و تخمین میزان خسارت در سازه‌ها در دو حالت با و بدون وجود نویز در سیگنال است. همچنین نتایج بیان‌کننده‌ی حساسیت بسیار بالای روش معرفی شده نسبت به خسارت ایجاد شده هستند.

## ۲. تبدیل $S$

فرض کنید که  $x(t)$  یک سیگنال متغیر با زمان باشد. بنابراین تبدیل موجک پیوسته‌ی (CWT) سیگنال با استفاده از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید: [۲۰]

$$CWT(\tau, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(\tau - t, a) dt, \quad (1)$$

که در آن،  $\tau$  و  $a$  به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس و نیز  $w(t)$  تابع موجک هستند. تبدیل  $S$  در پژوهشی در سال ۱۹۹۶ [۱۳] معرفی شده است (رابطه‌ی ۲):

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \times \left[ \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(\frac{-f^2(\tau - t)^2}{2}\right) \times \exp(-2\pi i f t) \right] dt \quad (2)$$

که در آن،  $S$  تبدیل  $S$  سیگنال  $x(t)$  را نشان می‌دهد، که در آن،  $x(t)$  یک سیگنال متغیر با زمان است. در رابطه‌ی ۲،  $f$  بسامد و  $\tau$  نیز یک پارامتر کنترل‌کننده‌ی موقعیت پنجره‌ی گاوسی بر روی محور زمان است. بنابراین تبدیل  $S$  تابع  $x(t)$  را می‌توان به صورت تابعی از تبدیل موجک پیوسته و به صورت حاصل ضرب یک موجک مخصوص در یک عبارت اضافی که فاکتور فاز است، تعریف کرد (رابطه‌ی ۳):

$$S(\tau, f) = CWT(\tau, a) \exp(-2\pi i f t), \quad (3)$$

از این رو تبدیل  $S$  دقیقاً تبدیل موجک نیست. [۱۳]

تابع پنجره‌ی گاوسی در تبدیل  $S$  دارای عملکرد گروهی زمان - بسامد بهتر است. پنجره‌ی گاوسی در این مطالعه به این دلایل انتخاب شده است: [۱۳]

۱. گشتاور درجه دوم زمان - بسامد را به طور منحصر به فردی حول نقطه‌ی زمان - بسامد کمیته می‌کند.
۲. در زمان و بسامد متقارن است (تبدیل فوریه‌ی تابع گاوسی، نیز یک تابع گاوسی است).
۳. با استفاده از آن، هیچ‌کدام از بیشینه‌های نسبی در قدرمطلق تبدیل  $S$  یک مصنوع نیستند.
۴. در پنجره‌ی مذکور، عرض پنجره با  $|f|$  تغییر می‌کند. این تغییر، توزیع‌هایی با وضوح‌های زمان - بسامد مختلف را می‌سازد. با وجود این، مقدار  $|f|$  ثابت است و عرض پنجره نمی‌تواند به طور سازگار با توزیع بسامد سیگنال تنظیم شود. در رابطه‌ی ۲، یک صوت  $S(\tau, f_0)^A$ ، به صورت تابع یک بعدی از زمان برای بسامد ثابت  $f_0$  تعریف می‌شود، که بیانگر چگونگی تغییرات دامنه و فاز در طول زمان برای این بسامد دقیق است. یک طیف موضعی  $S(\tau_0, f)$  نیز تابعی یک بعدی، از بسامد در یک زمان ثابت  $\tau_0$  است. تبدیل  $S$ ، از پنجره‌ی با عرض متغیر استفاده می‌کند. بنابراین برای

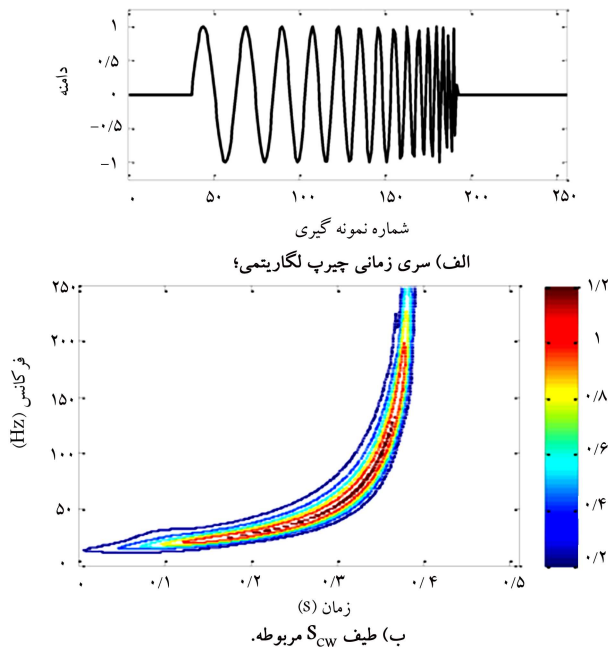
است. [۵] برخی پژوهشگران نیز یک بردار شاخص خرابی بدون بُعد را برای شناسایی خسارت در سازه‌های کامپوزیتی ایجاد کرده‌اند؛ که در آن بردار شاخص خرابی، براساس تغییرات انرژی مؤلفه‌های حاصل از آنالیز بسته‌ی موجک پاسخ ارتعاشی سازه، قبل و بعد از وقوع خسارت محاسبه می‌شود. [۶] در پژوهش دیگری (۲۰۰۴) نیز از تبدیل موجک برای شناسایی ترک در قاب‌ها استفاده و کارایی آنالیز موجک برای شناسایی ترک با استفاده از مثال‌های عددی بررسی شده است. [۷] همچنین برخی پژوهشگران در پژوهش خود (۲۰۰۵)، یک شاخص شناسایی خسارت را با عنوان شاخص نسبت انرژی بسته‌ی موجک (WPERI) معرفی و شاخص مذکور را بر روی یک تیر شبیه‌سازی شده با تکیه‌گاه‌های ساده و همچنین بر روی تیرهای فولادی با سه الگوی خسارت در آزمایشگاه ارزیابی کرده‌اند. [۸] در سال ۲۰۰۷ نیز از تلفیق روش تجزیه‌ی تجربی مودی و آنالیز موجک برای شناسایی تغییرات در پاسخ سازه و نیز برای شناسایی خسارت در یک قاب برشی ۴ طبقه استفاده شده است. [۹]

همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱) روشی برای تشخیص وجود آسیب در سازه‌ها با استفاده از ویژگی‌های حساس به خسارت مبتنی بر آنالیز موجک معرفی و ویژگی‌های مذکور از پاسخ سازه، که در مدت زمان وقوع زلزله ثبت شده‌اند، استخراج شده‌اند. [۱۰] پژوهشگرانی نیز در پژوهش خود (۲۰۱۲)، یک الگوی شناسایی خسارت براساس تبدیل موجک در پل‌ها معرفی کرده، و بارها را به صورت متحرک در نظر گرفته‌اند. [۱۱]

تبدیل موجک و تبدیل بسته‌ی موجک نقایصی نظیر در دسترس نبودن عرض پنجره‌ی زمان - بسامد برای تمامی بسامدهای قابل مشاهده دارد، که این نکته لازمی استفاده از پنجره‌هایی با عرض تنظیم‌شونده در عمل است. [۱۲] از این رو در پژوهشی در سال ۱۹۹۶، یک تبدیل جدید معرفی شد (تبدیل  $S$ )، که مزیت‌های تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه و تبدیل موجک را ترکیب می‌کرد. [۱۳] تبدیل  $S$  برخلاف تبدیل موجک، اطلاعات فاز مرجع را نیز حفظ کرده و این تبدیل توسط برخی از پژوهشگران در بسیاری از حوزه‌ها از قبیل لرزه‌شناسی استفاده شده است. [۱۴، ۱۵] در مهندسی سازه نیز اولین بار در سال ۲۰۰۹ از تبدیل  $S$  برای شناسایی ترک در تیر استفاده، [۱۶] و همچنین در سال ۲۰۱۲ فیلتری براساس تبدیل  $S$  به منظور پردازش سیگنال‌های پاسخ سازه معرفی شده است. [۱۷، ۱۸]

تبدیل  $S$  با تمام مزایایی که نسبت به سایر تبدیلات مانند تبدیل موجک و تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه دارد، معایبی نیز دارد. این تبدیل در تجزیه‌ی شکل‌های موجی، که بسامد مربوط در طول زمان تغییر می‌کند، مناسب نیست. از این رو برای غلبه بر این مشکل، تبدیل  $S$  با پنجره‌ی گاوسی مختلط<sup>۶</sup> به همراه مدولاسیون فاز<sup>۷</sup>، که یک نوع تبدیل  $S$  تعمیم‌یافته است، در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ معرفی شده است. [۱۹] پنجره‌ی گاوسی مختلط به همراه مدولاسیون فاز، منحنی سینوسی فوریه را برای دادن یک شکل موج مشخص مدوله می‌کند، که این کار موجب موضعی‌سازی بهتر شکل‌های موجی در حوزه‌ی زمان - بسامد بر روی سری‌های زمانی می‌شود.

در این نوشتار استفاده از تبدیل  $S$  با پنجره‌ی گاوسی مختلط به منظور تشخیص محل و مقدار خسارت در قاب‌های برشی معرفی شده است، لذا ابتدا ضمن معرفی تبدیل  $S$ ، تفاوت آن با تبدیل موجک بیان شده است. در ادامه، تبدیل  $S$  با پنجره‌ی گاوسی مختلط به همراه مدولاسیون فاز معرفی و فرایند شناسایی خسارت در قاب‌های برشی با استفاده از این تبدیل توضیح داده شده است. کارایی تبدیل  $SCW$  در روش ارائه‌شده در شناسایی خرابی در دو مثال شامل دو قاب برشی ۴ و ۸ طبقه تحت بارگذاری لرزه‌ی بررسی شده است. همچنین با جایگزین کردن تبدیل موجک در الگوریتم ارائه‌شده به جای تبدیل  $SCW$  در پردازش سیگنال مربوط، یک مقایسه‌ی کلی از کاربرد این دو تبدیل در شناسایی خسارت سازه‌ی انجام شده است. نتایج



شکل ۱. سری زمانی چیرپ لگاریتمی و نمایش زمان - بسامد آن با استفاده از تبدیل  $S$  تعمیم یافته.

$S$  تعمیم یافته با پنجره‌ی گاوسی مختلط در شکل ۱ آورده شده است که حاوی سری زمانی چیرپ لگاریتمی با طول ۲۵۶ نقطه و فاصله‌ی نمونه‌گیری ۱ ثانیه است. در این شکل، سری زمانی مورد استفاده و طیف  $SCW$  مربوط با فرض  $\sigma = 6$  نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، این تبدیل تمرکز بهتری از انرژی این سیگنال در صفحه‌ی زمان - بسامد را نشان می‌دهد.

#### ۴. فرایند تشخیص خرابی با استفاده از تبدیل $SCW$

در اینجا ابتدا شاخص SAD<sup>۱</sup> معرفی شده است، که براساس پردازش سیگنال و با استفاده از تبدیل  $SCW$  به دست می‌آید. سپس با استفاده از این شاخص یک روش مؤثر و کارآمد به منظور شناسایی محل و تخمین میزان آسیب در سازه ارائه شده است. در اینجا فرایندی به منظور شناسایی خسارت در قاب‌های برشی توسط تبدیل  $SCW$  معرفی شده است:

۱. اندازه‌گیری سیگنال‌های پاسخ تغییرمکان در تمامی طبقات سازه در دو حالت سالم و خسارت دیده تحت بارگذاری لرزه‌یی؛
۲. محاسبه‌ی سیگنال تغییرمکان نسبی طبقه‌ی  $k$ ام از سازه به صورت تفاضل سیگنال تغییرمکان طبقه‌ی  $k$ ام از سیگنال تغییرمکان طبقه‌ی  $(k-1)$ ام؛
۳. پردازش سیگنال محاسبه شده در گام ۲ با استفاده از تبدیل  $SCW$  و محاسبه‌ی ماتریس  $M \times N$  تبدیل  $SCW$  با مقادیر مختلط، که  $M$  و  $N$  به ترتیب تعداد سطرها و ستون‌های ماتریس  $SCW$  هستند؛
۴. محاسبه‌ی میانگین قدرمطلق هر ستون ماتریس  $SCW$ ، که نتیجه‌ی آن یک بردار  $1 \times N$  است. درایه‌ی  $i$ ام از این بردار، میانگین ستون  $i$ ام از قدرمطلق ماتریس  $SCW$  است. بردار میانگین از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$Mean\ Vector(1 \times N) = Mean[abs(SCW - matrix)] \quad (8)$$

به دست آوردن وضوح بسامدی بالاتر در پهنای بسامدی کم، پنجره‌ی زمان پهن است و بالعکس، در پهنای بسامدی بالا برای به دست آوردن وضوح بسامدی بالا، پنجره‌ی زمان باریک است.

هر دو تبدیل  $S$  و موجک، خصوصیات وضوحی چندگانه دارند. اما بسامد در تبدیل موجک بیان نمی‌شود و تبدیل  $S$  ترکیبی از زمان و بسامد است. تبدیل موجک چند پارگی دارد، زیرا تابع موجک، انتخاب‌های بسیار دارد. علاوه بر این، احیای موجک منجر به از دست رفتن اطلاعات می‌شود، در صورتی که تبدیل  $S$  غیرمخرب و معکوس پذیر است. تفاوت اساسی دو تبدیل در این نکته است که تبدیل  $S$  در برگزیده‌ی ضریب فاز است.<sup>[۲۱]</sup>

تبدیل  $S$  تعمیم یافته با استفاده از تبدیل  $S$  اصلی و با جایگزین کردن پنجره‌ی گاوسی با یک پنجره‌ی تعمیم یافته به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:<sup>[۲۲]</sup>

$$S(\tau, f, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w_{gen}(\tau - t, f, p) \exp(-\gamma \pi i f t) dt \quad (4)$$

که در آن،  $p$  بیانگر مجموعه پارامترهای کنترل کننده‌ی شکل پنجره‌ی تعمیم یافته است.

#### ۳. تبدیل $S$ تعمیم یافته با پنجره‌ی گاوسی مختلط

( $SCW$ )

تبدیل  $S$  تعمیم یافته با پنجره‌ی گاوسی مختلط به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:<sup>[۱۹]</sup>

$$SCW(\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\{w_{CG}(\tau - t, f, \sigma) \times \exp(-\gamma \pi i f t)\} dt \quad (5)$$

که در آن،  $w_{CG}$  پنجره‌ی گاوسی مختلط است، که با اعمال مدولاسیون فاز با استفاده از یک فاکتور مختلط مناسب به صورت رابطه‌ی ۶ حاصل می‌شود:

$$w_{CG}(\tau - t, f, \sigma) = \begin{cases} P \exp\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{\gamma}\right] \exp\{-\gamma \pi i f(\tau - t)\} & , t < \tau + \sigma/|f| \\ + \gamma \pi i \text{sign}(f) \sigma \log[\sigma + |f|(\tau - t)] & \\ 0 & , t \geq \tau + \sigma/|f| \end{cases} \quad (6)$$

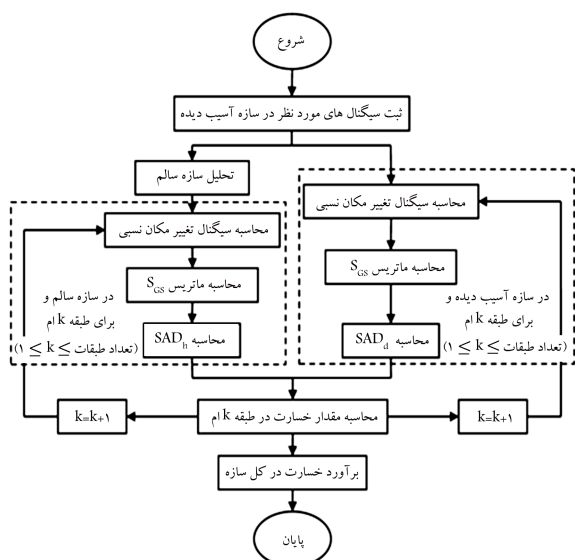
پیش ضریب  $P$  در  $w_{CG}$  به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$P^{-1} = \int_{-\sigma/|f|}^{\infty} \exp\left\{-\frac{f^2 \tau^2}{\gamma} - \gamma \pi i f \tau + \gamma \pi i \text{sign}(f)\right. \\ \left. \times \sigma \log[\sigma + |f| \tau]\right\} d\tau \quad (7)$$

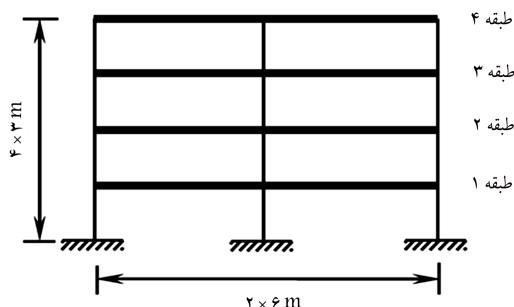
که در آن، پارامتر مثبت  $\sigma$  کنترل کننده‌ی درجه‌ی مدولاسیون فاز است، که در این مطالعه ۶ در نظر گرفته شده است.

از آنجا که  $P$  یک کمیت مختلط است، نرمال سازی از طریق  $P$ ، یک شیفت فاز را وارد می‌کند. این شیفت موجب می‌شود تا هنگام بزرگ تر شدن  $w_{CG}$  فاز  $w_{CG}$  در  $t = \tau$  غیر صفر شود.

همچنین مدولاسیون سینوس وار فوریه با افزایش پهنای باند  $w_{CG}$  در حوزه‌ی فوریه موجب برخی لکه‌های قائم بر روی  $SCW$  می‌شود. یک نمونه از کاربرد تبدیل



شکل ۲. الگوریتم روش معرفی شده برای شناسایی محل و تخمین میزان خسارت.



شکل ۳. مدل تحلیلی قاب فولادی ۴ طبقه.

جدول ۱. مشخصات قاب فولادی ۴ طبقه.

تمام طبقات	مقطع
تیر	۲IPE۲۲۰
ستون	۲IPE۱۸۰ + PL۲۵۰ X ۸

### ۱.۵. مثال اول: قاب ۴ طبقه

در این بخش، از الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی خسارت سازه‌ی در یک قاب فولادی ۴ طبقه استفاده شده است. این قاب دو دهانه‌ی ۶ متری دارد. قاب مورد نظر با بستن درجات آزادی دورانی در گره‌های تراز طبقات، در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ طراحی و مشخصات مقاطع ستون‌های آن تعیین شده است. جرم تمام طبقات در نرم‌افزار به منظور تحلیل دینامیکی،  $m = ۲۵۶۹ \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. میرایی سیستم، به صورت میرایی رایلی که متناسب با جرم و سختی سازه است، در نظر گرفته شده است. مشخصات و مدل تحلیلی قاب به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است.

برای این سازه، ۳ الگوی خسارت مختلف در نظر گرفته شده است. همچنین یک الگوی خسارت در حالت وجود نویز (الگوی خسارت چهارم) نیز به منظور لحاظ کردن اثر وجود نویز در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی سیگنال‌های آغشته به نویز در نرم‌افزار متلب (MATLAB)، از تابع randn استفاده شده است.

۵. به دست آوردن قدرمطلق تفاضل هر درایه‌ی ستون  $n$ ام ماتریس  $SCW$  از میانگین ستون مربوط (درایه‌ی  $n$ ام از بردار میانگین) و سپس محاسبه‌ی مجموع این مقادیر برای هر ستون که در نهایت، یک بردار  $1 \times N$  به دست می‌آید، که بردار انحراف مطلق (ADV)  $1^0$  است (رابطه‌ی ۹):

$$ADV(1, n) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{abs}[abs SCW(m, n) - Median Vector(1, n)] \quad (9)$$

که در آن،  $SCW(m, n)$  درایه‌ی سطر  $m$ ام و ستون  $n$ ام از ماتریس  $SCW$  است.

۶. تعیین شاخص SAD با استفاده از جمع درایه‌های بردار انحراف مطلق و براساس رابطه‌ی ۱۰:

$$SAD = \sum_{n=1}^N ADV(1, n) \quad (10)$$

$ADV(1, n)$  درایه‌ی ستون  $n$ ام از بردار انحراف مطلق است. با بررسی‌های انجام شده بر روی شاخص SAD مشخص شده است که این شاخص حساسیت بالایی نسبت به خرابی ایجاد شده در سازه‌ی مربوط دارد و افزایش آن نشانگر خرابی بیشتر در سازه است. گام‌های ۲ الی ۶ برای هر طبقه و در دو حالت سالم و آسیب دیده باید تکرار شوند.

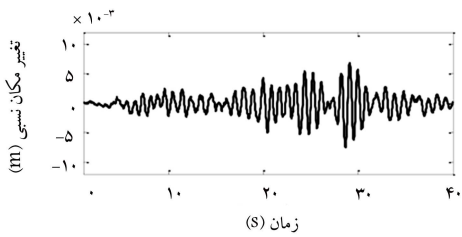
۷. محاسبه‌ی مقدار خسارت در طبقه‌ی  $k$ ام مطابق رابطه‌ی ۱۱:

$$Damage_k = \frac{(SAD_d^k - SAD_h^k)}{SAD_h^k} \times 100 \quad (11)$$

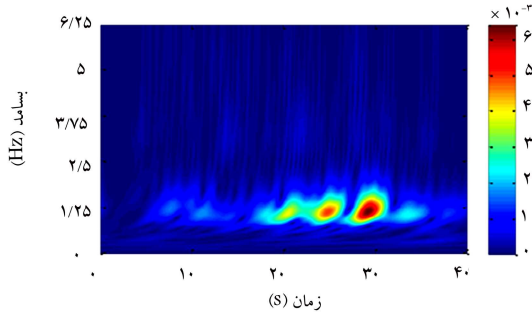
که در آن،  $SAD_d^k$  و  $SAD_h^k$  به ترتیب شاخص‌های محاسبه شده برای دو حالت سالم و آسیب دیده در طبقه‌ی  $k$ ام هستند. در رابطه‌ی ۱۱،  $Damage_k$  نیز مقدار خسارت در طبقه‌ی  $k$ ام سازه است، که بر حسب درصد بیان می‌شود. در عمل سیگنال سازه‌ی سالم با استفاده از تحلیل دینامیکی سازه و براساس مشخصات سازه‌ی سالم نظیر مشخصات هندسی و خواص مصالح به دست می‌آید. به منظور تحلیل دینامیکی سازه‌ی سالم باید شتاب‌نگاشتی مورد استفاده قرار گیرد که تحت آن سیگنال‌های سازه‌ی آسیب دیده در هر طبقه توسط حسگر مربوط ثبت شده‌اند. این شتاب‌نگاشت هم‌زمان با ثبت سیگنال‌های سازه‌ی آسیب دیده در پای سازه ثبت می‌شود. در شکل ۲، الگوریتم کلی روش معرفی شده برای شناسایی محل و تخمین میزان خسارت ارائه شده است.

### ۵. مثال عددی

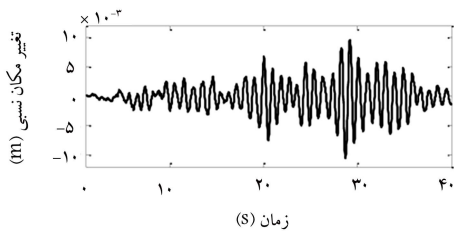
توانایی تبدیل  $SCW$  در شناسایی خسارت سازه‌ی با دو مثال عددی بررسی شده است. مثال‌های عددی شامل دو قاب پرشی ۴ و ۸ طبقه در معرض بارگذاری لرزه‌ی است. در مثال‌های ذکر شده، کلیه‌ی الگوهای خسارت در نظر گرفته شده به صورت کاهش سختی در طبقه‌ی خسارت دیده است. در این بخش، الگوهای خسارت در طبقات سازه به گونه‌ی انتخاب شده‌اند تا خرابی‌های ایجاد شده در اثر خستگی‌های کم‌سیکل (خرابی‌های ناشی از زلزله) را در عمل به نوعی شبیه‌سازی کنند. علاوه بر این، در هر یک از مثال‌های عنوان شده، یک الگوی خسارت نیز در حالت وجود نویز در سیگنال پاسخ سازه به منظور لحاظ کردن اثر وجود نویز در سیگنال در نظر گرفته شده است.



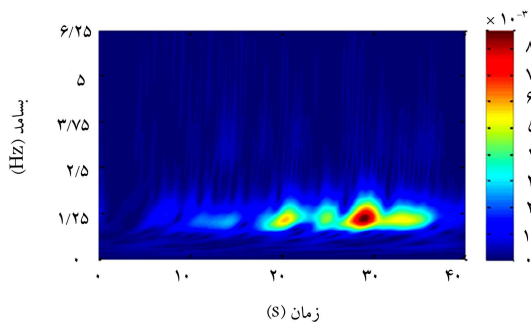
الف) سیگنال تغییر مکان نسبی طبقه ی اول در سازه ی سالم؛



ب) طیف تبدیل  $S_{CW}$  مربوط؛

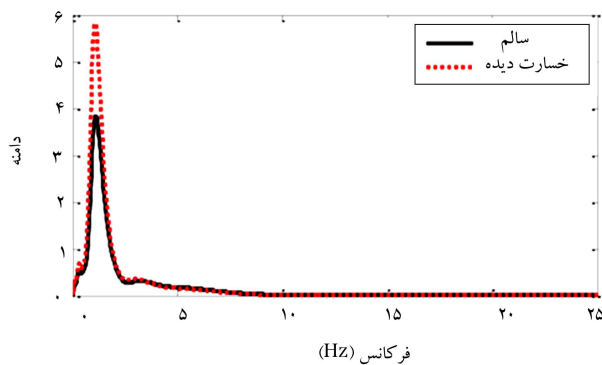


ج) سیگنال تغییر مکان نسبی طبقه اول در الگوی خسارت دوم در حالت آسیب دیده؛

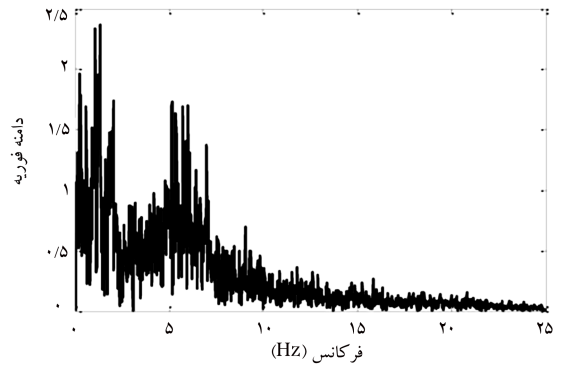


د) طیف تبدیل  $S_{CW}$  مربوط.

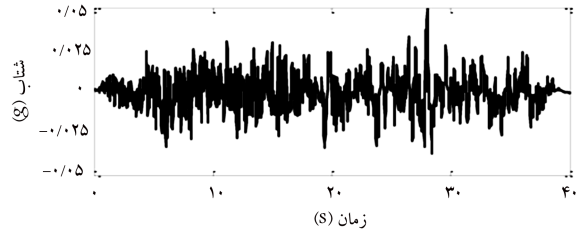
شکل ۵. نمونه‌یی از سیگنال‌های تغییر مکان سازه‌ی چهار طبقه و طیف‌های مربوطه.



شکل ۶. منحنی بردار انحراف مطلق طبقه‌ی اول در الگوی خسارت اول.



الف) در ایستگاه سده؛



ب) طیف فوریه ی مربوط.

شکل ۴. شتاب‌نگاشت زلزله‌ی طیس ثبت شده در ایستگاه سده.

این تابع، یک توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس ۱ تولید می‌کند. دنباله‌ی تولیدشده در یک ضریب ثابت ضرب می‌شود، به نحوی که جذر میانگین مربعات آن در حدود ۵٪ جذر میانگین مربعات سیگنال پاسخ ارتعاشی در درجه‌ی آزادی موردنظر شود. این میزان نویز به تمام سیگنال‌های ثبت شده در درجات آزادی مختلف در الگوی خسارت چهارم اضافه شده است.

#### ۱.۱.۵. تحریک زلزله

پس از وقوع هر زلزله، تشخیص وجود، محل و شدت آسیب‌های وارده در سازه برای ارزیابی آن در اولویت قرار دارد. بعد از وقوع زلزله‌ی اصلی در منطقه، پس‌لرزه‌های متعدد با شتاب بیشینه‌های کم ( $PGA < 0.1g$ ) در منطقه روی می‌دهند، که تقریباً می‌توان گفت که سازه‌ها در معرض پس‌لرزه‌های مذکور، هیچ‌گونه خرابی را متحمل نمی‌شوند. از این رو می‌توان از پس‌لرزه‌های ذکرشده به‌عنوان تحریک ورودی در شناسایی خسارت به‌وجودآمده در زلزله‌ی اصلی استفاده کرد. مهم‌ترین ویژگی شتاب‌نگاشت مربوط به پس‌لرزه‌های ذکرشده، علاوه بر  $PGA$  کم، پهنای بسامدی باریک است؛ به‌طوری که شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های دور از گسل نیز چنین خصوصیتی دارند.<sup>[۲۳]</sup> لذا در این پژوهش از تحریک زلزله‌ی طیس که در ایستگاه سده و در فاصله‌ی ۱۶۵ کیلومتری از محل وقوع با  $PGA = 0.276g$  ثبت شده است، با مقیاس  $PGA = 0.05g$  به‌عنوان تحریک ورودی قاب‌ها استفاده شده است. در شکل ۴، نیز به ترتیب شتاب‌نگاشت و طیف فوریه مربوط به تحریک ذکرشده، ارائه شده است.

#### ۲.۱.۵. نتایج

به‌منظور شناسایی و تخمین میزان آسیب در سازه براساس روند ارائه‌شده و با استفاده از تحریک معرفی‌شده در بخش پیشین، ابتدا سیگنال موردنظر در هر طبقه و در دو حالت سالم و آسیب‌دیده استخراج شده است. سپس ماتریس تبدیل  $S_{CW}$  و متعاقب آن بردار انحراف مطلق هر سیگنال به دست آمده است. شکل ۵، سیگنال‌های تغییر مکان نسبی در طبقه‌ی اول، مربوط به الگوی خسارت اول در دو حالت سالم و آسیب‌دیده به علاوه طیف تبدیل  $S_{CW}$  این سیگنال‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۶،

مقادیر تخمین زده شده با استفاده از روش ذکر شده ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود روش معرفی شده توانسته است با تقریب قابل قبولی مقادیر خسارت را در هر طبقه و برای هر الگوی خسارت برآورد کند.

همچنین در الگوی خسارت چهارم که مربوط به سیگنال‌های آلوده به نویز است، دقت کاربرد تبدیل  $SCW$  در روش ارائه شده در تقریب مقدار خسارت به خوبی نمایان است. در شکل ۷ نیز علاوه بر تشخیص وجود خرابی در طبقه‌ی آسیب دیده، تخمین میزان خسارت به وضوح مشاهده می‌شود. نکته‌ی قابل توجه، اینکه در برخی از طبقات بدون آسیب، مقدار خسارت منفی است؛ که با توجه به میزان کم و منفی بودن این مقادیر، می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد و ملاک را براساس مقادیر مثبت خسارت قرار داد.

### ۲.۵. مثال دوم: قاب ۸ طبقه

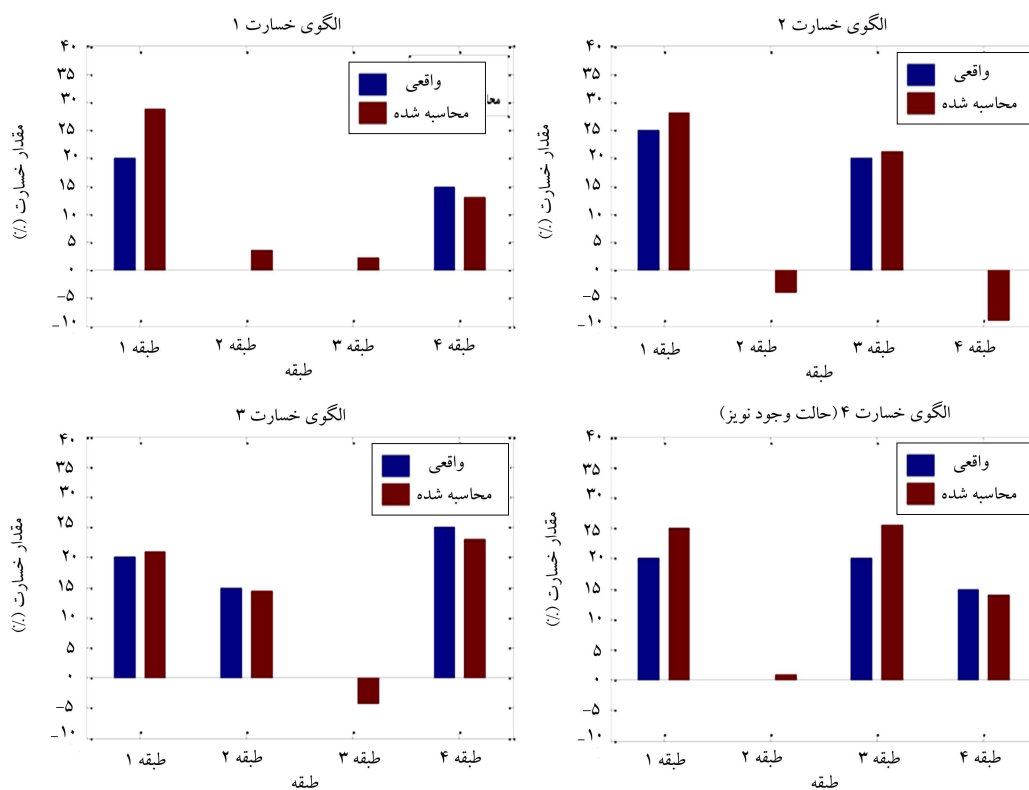
در این بخش از الگوریتم پیشنهادی به منظور شناسایی و تخمین مقدار خسارت سازه‌ی در یک قاب فولادی ۸ طبقه استفاده شده است. قاب مذکور، ۲ دهانه‌ی ۶ متری دارد. قاب مورد نظر با بستن درجات آزادی دورانی در گره‌های تراز طبقات با استفاده از نرم افزار SAP2000، طراحی و مشخصات مقاطع ستون‌های آن تعیین شده است. به منظور تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، جرم تمام طبقات در نرم افزار  $m = 2569 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. همچنین میرایی سیستم، به صورت میرایی رایلی که متناسب با جرم و سختی سازه است، در نظر گرفته شده است. مدل تحلیلی و مشخصات این قاب در شکل ۸ و جدول ۳ ارائه شده است.

در این مثال، ۵ الگوی خسارت مختلف در نظر گرفته شده است. همچنین یک الگوی خسارت در حالت وجود نویز (الگوی خسارت ششم) نیز به منظور لحاظ کردن اثر وجود نویز مطابق توضیحات ارائه شده در مثال قبل در نظر گرفته شده است.

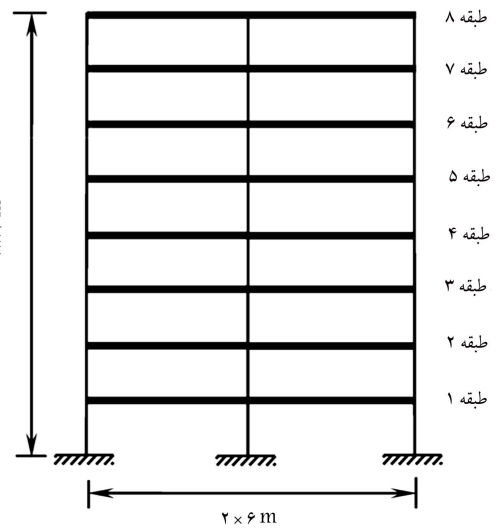
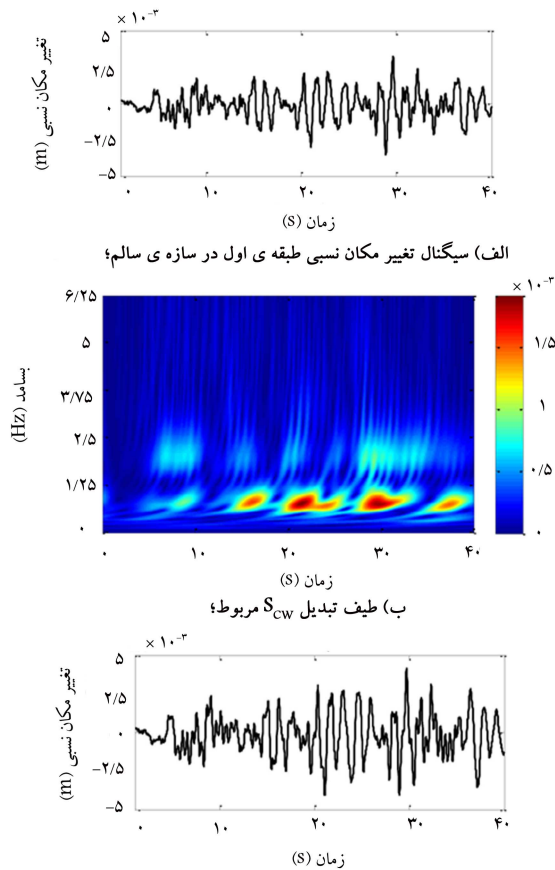
نیز می‌توان منحنی بردار انحراف مطلق سیگنال‌ها نشان داده شده در شکل ۵ را مشاهده کرد. در ادامه، بعد از محاسبه‌ی شاخص SAE هر سیگنال، مقدار خسارت در هر طبقه تعیین شده است. با جای‌گذاری تبدیل موجک در روند ذکر شده و محاسبه‌ی ماتریس مربوط با استفاده از تبدیل موجک، مقادیر خسارت نیز محاسبه شده است. در جدول ۲، مقدار خسارت در نظر گرفته شده برای هر الگوی خسارت و

جدول ۲. مقادیر واقعی و محاسبه شده‌ی خرابی در قاب ۴ طبقه‌ی فولادی.

الگوی خسارت	طبقه	مقدار خسارت (%)	
		واقعی	تبدیل $SCW$ / تبدیل موجک
الگوی ۱	اول	۲۰	۲۸
	چهارم	۱۵	۴۱
الگوی ۲	اول	۲۵	۲۸
	سوم	۲۰	۴۳
الگوی ۳	اول	۲۰	۲۱
	دوم	۱۵	۳۴
الگوی ۴ (وجود نویز)	اول	۲۰	۲۵
	چهارم	۱۵	۴۱



شکل ۷. نمودار میله‌ی خسارت‌های واقعی و محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی در قاب ۴ طبقه‌ی فولادی.



شکل ۸. مدل تحلیل قاب ۸ طبقه‌ی فولادی.

جدول ۳. مشخصات ستون‌های قاب ۸ طبقه‌ی فولادی.

طبقه	مقطع ستون
۱ و ۲	۲IPE۱۸۰+PL۲۵۰X۲۰
۳ و ۴	۲IPE۱۸۰+PL۲۵۰X۱۵
۵ و ۶	۲IPE۱۸۰+PL۲۵۰X۱۲
۷ و ۸	۲IPE۱۸۰+PL۲۵۰X۶

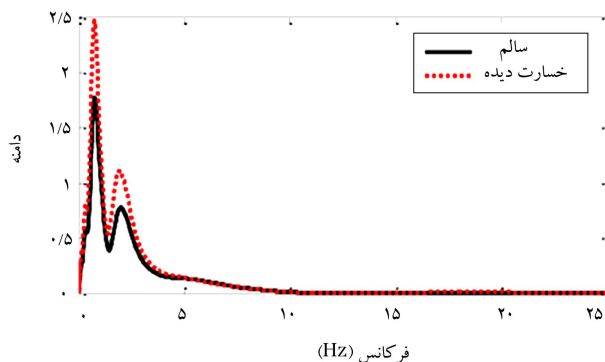
### ۱.۲.۵. نتایج

در اینجا نیز به منظور استخراج سیگنال‌های موردنظر از تحریک ارائه شده در مثال قبل استفاده شده است.

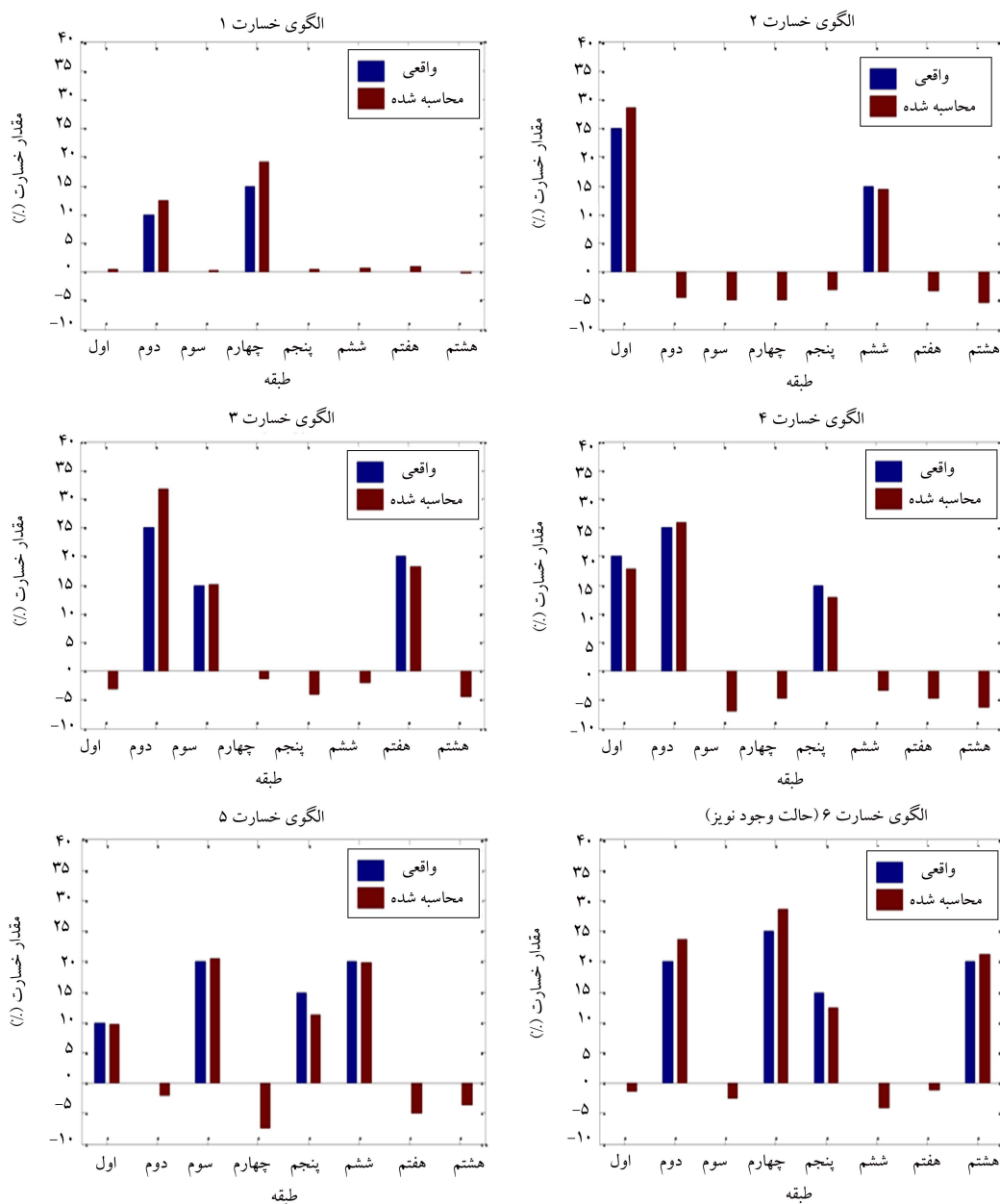
مشابه روند طی شده در مثال قبل، پس از محاسبه‌ی سیگنال موردنظر در هر طبقه و در دو حالت سالم و آسیب دیده، ماتریس تبدیل  $S_{CW}$  و متعاقب آن بردار انحراف مطلق هر سیگنال به دست آمده است. بعد از این کار با استفاده از شاخص  $S_{CW}$ ، هر سیگنال مقدار خسارت در هر طبقه تعیین شده است. علاوه بر این، با جای‌گذاری تبدیل موجک در روند ذکر شده و محاسبه‌ی ماتریس مربوط با استفاده از تبدیل موجک، مقادیر خسارت نیز محاسبه شده است. شکل ۹، سیگنال‌های تغییر مکان نسبی در طبقه‌ی اول، مربوط به الگوی خسارت دوم در دو حالت سالم و آسیب دیده به علاوه طیف تبدیل  $S_{CW}$  این سیگنال‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ نیز می‌توان منحنی بردار انحراف مطلق سیگنال‌ها را مشاهده کرد.

چنانچه در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، کاربرد تبدیل  $S_{CW}$  در روش معرفی شده در مقایسه با تبدیل موجک توانسته است با تقریب قابل قبولی، مقادیر خسارت را در هر طبقه و برای هر الگوی خسارت برآورد کند. در الگوی خسارت ششم، که مربوط به سیگنال‌های آلوده به نویز است، توانایی بالای تبدیل  $S_{CW}$  در تخمین مقدار خسارت به خوبی مشاهده می‌شود. همچنین طبقات آسیب دیده و میزان خسارت با توجه به شکل ۱۱ با دقت بالایی تشخیص داده شده است. نکته‌ی قابل توجه در مثال ۲.۵، وجود مقدار خسارت منفی در برخی از طبقات فاقد آسیب است، که با توجه به میزان کم و منفی بودن مقادیر خسارت منفی، می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد و ملاک را براساس مقادیر مثبت خسارت قرار داد.

شکل ۹. نمونه‌ی سیگنال‌های تغییر مکان نسبی هشت طبقه و طیف‌های مربوطه.



شکل ۱۰. منحنی بردار انحراف مطلق طبقه‌ی اول در الگوی خسارت دوم.



شکل ۱۱. نمودار میله‌ای واقعی و محاسبه‌شده با استفاده از روش پیشنهادی در قاب ۸ طبقه‌ی فولادی.

۲. تغییر عرض پنجره در تبدیل  $SCW$  با تغییر بسامد سیگنال؛

۳. مدولاسیون فاز سیگنال و کنترل درجه‌ی مدولاسیون با استفاده از پارامتر  $\sigma$  که مهم‌ترین عامل در آشکارسازی تغییرات بسامد و دامنه‌ی سیگنال ناشی از وجود خرابی است.

به‌منظور بررسی کارایی و قابلیت کاربرد روش معرفی‌شده در شناسایی خسارت سازه‌ی، از دو مثال عددی استفاده شده است. مثال‌ها شامل دو قاب ۴ و ۸ طبقه‌ی فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ی هستند. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه بین تبدیل موجک و تبدیل  $SCW$  نشان می‌دهد که کاربرد تبدیل  $SCW$  در روش ارائه‌شده، یک ابزار قوی و قابل اعتماد در تشخیص وجود و تخمین شدت خرابی در سازه‌ها حتی با وجود نويز در سیگنال‌هاست.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک روش مؤثر در شناسایی محل و تخمین میزان خسارت سازه‌ی براساس پردازش سیگنال تغییرمکان نسبی معرفی شده است. در این روش از تبدیل  $S$  با پنجره‌ی مختلط و مدولاسیون فاز برای شناسایی خسارت سازه‌ی استفاده شده است.

تبدیل  $SCW$  به این دلایل ابزار قدرتمندتری در پردازش سیگنال تغییرمکان نسبی طبقه و به تبع آن آشکارکردن تغییرات سختی طبقات به دلیل وجود خرابی است:

۱. استفاده از پارامتر بسامد به جای پارامتر مقیاس؛



جدول ۴. مقادیر واقعی و محاسبه شده‌ی خرابی در قاب ۸ طبقه‌ی فولادی.

الگوی خسارت	طبقه	مقدار خسارت (%)		
		واقعی	تبدیل $SCW$	تبدیل موجک
الگوی ۱	دوم	۱۰	۱۲	۱۳
	چهارم	۱۵	۱۹	۲۰
	اول	۲۵	۲۸	۳۷
	ششم	۱۵	۱۴	۲۲
الگوی ۲	دوم	۲۵	۳۱	۳۴
	سوم	۱۵	۱۵	۱۹
	هفتم	۲۰	۱۸	۲۶
الگوی ۳	اول	۲۰	۱۸	۲۷
	دوم	۲۵	۲۶	۳۵
	پنجم	۱۵	۱۳	۱۸
الگوی ۴	اول	۱۰	۱۰	۱۰
	سوم	۲۰	۲۱	۲۵
	پنجم	۱۵	۱۱	۱۸
	ششم	۲۰	۲۰	۲۶
الگوی ۵	دوم	۲۰	۲۳	۲۲
	چهارم	۲۵	۲۸	۳۸
	پنجم	۱۵	۱۲	۱۶
	هشتم	۲۰	۲۱	۲۸

## پانویسها

1. fast fourier transform (FFT)
2. Short-time fourier transform (STFT)
3. wavelet transform (WT)
4. wavelet packet transform (WPT)
5. S-transform
6. complex Gaussian window
7. phase Modulation
8. voice
9. sum of the absolute deviation (SAD)
10. absolute deviation vector (ADV)

## منابع (References)

1. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).
2. Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B. "A summary review of vibration-based damage identification methods", *Shock and Vibration Digest*, **30**(2), pp. 91-105 (1998).
3. Hou, Z., Noori, M. and Amand, R.S. "Wavelet-based approach for structural damage detection", *Journal of Engineering Mechanics*, **126**(7), pp. 677-683 (2000).

4. Biemans, C. and et.al. "Crack detection in metallic structures using broadband excitation of acousto-ultrasonics", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **12**(8), pp. 589-597 (2001).
5. Sun, Z. and Chang, C. "Structural damage assessment based on wavelet packet transform", *Journal of Structural Engineering*, **128**(10), pp. 1354-1361 (2002).
6. Yam, L., Yan, Y. and Jiang, J. "Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification", *Composite Structures*, **60**(4), pp. 403-412 (2003).
7. Ovanesoava, A. and Suarez, L. "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures", *Engineering Structures*, **26**(1), pp. 39-49 (2004).
8. Han, J.-G., Ren, W.-X. and Sun, Z.-S. "Wavelet packet based damage identification of beam structures", *International Journal of Solids and Structures*, **42**(26), pp. 6610-6627 (2005).
9. Li, H., Deng, X. and Dai, H. "Structural damage detection using the combination method of EMD and wavelet analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(1), pp. 298-306 (2007).
10. Young Noh, H. and et.al. "Use of wavelet-based damage-sensitive features for structural damage diagnosis using strong motion data", *Journal of Structural Engineering*, **137**(10), pp. 1215-1228 (2011).
11. Hester, D. and Gonzalez, A. "A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 145-166 (2012).
12. Stockwell, R. "Why use the S-transform", *AMS Pseudo-Differential Operators: Partial Differential Equations and Time-Frequency Analysis*, **52**, pp. 279-309 (2007).
13. Stockwell, R., Mansinha, L. and Lowe, R. "Localization of the complex spectrum: The S transform", *Signal Processing, IEEE Transactions on*, **44**(4), pp.998-1001(1996).
14. Bindi, D. and et.al., "Site amplifications observed in the gubbio basin, central Italy: Hints for lateral propagation effects", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(2A), pp. 741-760 (2009).
15. Parolai, S. "Denoising of seismograms using the S transform", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(1), pp. 226-234 (2009).
16. Pakrashi, V. and Ghosh, B. "Application of S transform in structural health monitoring", in 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering (NDTCE), Nantes, France (30 Jun-3 July 2009).
17. Ditommaso, R. and et.al. "Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: Comparing classical and time-frequency analyses", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**(4), pp. 1221-1235 (2012).
18. Ditommaso, R., Mucciarelli, M. and Ponzio, F.C. "Analysis of non-stationary structural systems by using a band-variable filter", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**(3), pp. 895-911 (2012).
19. Pinnegar, C. and Mansinha, L. "Time-local fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: The S-transform with a complex window", *Signal Processing*, **84**(7), pp. 1167-1176 (2004).

20. Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic press (1999).
21. Liu, J., Ma, D. and Li, M. "S-transform and its application in the spectrum analysis of seismic signal", in *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management*, **1**, Springer, pp. 81-86 (2012).
22. Pinnegar, C.R. and Mansinha, L. "The bi-Gaussian S-transform", *SIAM Journal on Scientific Computing*, **24**(5), pp. 1678-1692 (2003).
23. Limongelli, M. "The interpolation damage detection method for frames under seismic excitation", *Journal of Sound and Vibration*, **330**(22), pp. 5474-5489 (2011).