

شناسایی خسارت سازه‌ها با استفاده از آنالیز موجک بسته‌یی و کاهش ابعاد داده

Research Note

احسان درویشان (پژوهشگر بسادکتری)

غلامرضا قدرتی امیری* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

در نوشتار حاضر، یک روش برای شناسایی خسارت ساختمان‌ها براساس ترکیب دو روش پردازش سیگنال و داده‌کاوی ارائه شده است. از تبدیل موجک بسته‌یی برای پردازش سیگنال‌ها و آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت کاهش ابعاد داده‌ها استفاده شده است. مطالعات بر روی سازه‌ی مرجع فاز یک ASCE-AISC انجام شده است که تاکنون در مطالعات متعددی به‌عنوان یک سازه‌ی مرجع پایش سلامت به کار رفته است. در ابتدا، تبدیل موجک بسته‌یی برای حذف ناهه از سیگنال اصلی به کار رفته است. در مرحله‌ی بعد، روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شده است تا تعداد ابعاد مسئله به فقط یک داده کاهش داده شود. در نهایت، نیز انرژی ضرایب موجک مؤلفه‌ی سیگنال کاهش‌یافته به‌عنوان شاخص خسارت لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد روش موجک بسته‌یی می‌تواند خسارت را در سازه‌ی مذکور به خوبی شناسایی کند.

واژگان کلیدی: شناسایی خسارت، پردازش سیگنال، معیار انرژی، تبدیل موجک بسته‌یی، کاهش ابعاد داده‌ها.

۱. مقدمه

نشان می‌دهند که تعیین بسامدهای بالا در بسیاری از سازه‌های واقعی بسیار دشوار است.^[۷]

در سال ۲۰۱۲،^[۸] یک روش مبتنی بر آنالیز موجک برای شناسایی خسارت پل‌ها ارائه شد که در آن به جای ضرایب ویولت از محتوای انرژی ویولت استفاده شده بود، تا حساسیت نتایج را به ناهه کاهش دهد. با این حال دقت روش معرفی شده با افزایش سرعت وسائط نقلیه کاهش پیدا می‌کرد. همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۱۴)،^[۹] با تمرکز بر روی سازه‌های دریایی، موفق شدند با استفاده از آنالیز ویولت و شاخص نیروی گسترده، یک روش مبتنی بر داده‌های خروجی را معرفی و سپس دقت الگوریتم پیشنهادی را با استفاده از چند مدل عددی و آزمایشگاهی بررسی کنند. در پژوهش دیگری در همان سال،^[۱۰] با بهره‌گیری از تبدیل بسته‌یی موجک و تبدیل کارهون - لو، یک روش پایش سلامت ارائه و تبدیل موجک برای تجزیه‌ی سیگنال و تبدیل کارهون - لو به عنوان معیار شناسایی الگو استفاده شد. در سال ۲۰۱۶،^[۱۱] نیز یک روش مبتنی بر آنالیز موجک برای شناسایی خسارت سازه‌های بتنی ارائه و نشان داده شد که ضرایب موجک، ارتباط مستقیمی با تغییرات خصوصیات فیزیکی ارتعاش سازه دارند. همچنین از آنالیز موجک پیوسته (۲۰۱۶)،^[۱۲] برای شناسایی خسارت و محل آن و نیز یک مدل تحلیلی با درجه‌های مختلف پیچیدگی برای تشخیص ترک در یک تیر استفاده و سناریوهای خسارت متعدد، شامل: شدت بار، ابعاد ترک و محل ترک برای سنجش قابلیت روش آزمایش شد.

در پژوهش حاضر، خسارت در سازه‌ها با استفاده از انرژی مؤلفه‌های شتاب

روش‌های پردازش سیگنال، یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی خسارت سازه‌ها هستند. مبنای روش‌های مذکور، استخراج ویژگی‌های ارتعاشی سازه است و یکی از پرکاربردترین آن‌ها، تبدیل فوریه است. با این حال، تبدیل فوریه با حذف پارامتر زمان یا مکان از سیگنال سبب می‌شود تا زمان یا مکان وقوع یک رخداد مشخص نباشد. برای حذف اثر مذکور، تاکنون روش‌های متنوعی بر پایه‌ی زمان - بسامد ابداع شده‌اند که در آن‌ها محدوده‌ی کوچکی از سیگنال پردازش می‌شود.^[۴-۱] با این حال، نحوه‌ی انتخاب محدوده‌ی ذکر شده در میزان دقت نتایج بسیار تأثیرگذار است. تبدیل موجک، روشی نسبتاً جدید در پردازش سیگنال است که معایب روش‌های قبلی را از بین می‌برد. موجک‌ها ترکیبی از توابع هستند که توانایی توصیف سیگنال در یک زمان مشخص را دارند. مزیت اصلی استفاده از تبدیل موجک، تحلیل محلی یک سیگنال است.^[۵]

از طرف دیگر، به دلیل آنکه بسامدهای طبیعی به سادگی و با دقت مناسبی قابل تعیین هستند، روش‌های مبتنی بر بسامد ارتعاش تاکنون بیش از سایر روش‌ها استفاده شده‌اند.^[۶] با وجود این، بسامدهای طبیعی نسبت به شرایط محیطی (مانند دما، رطوبت و ناهه) به شدت حساس هستند. علاوه بر این، روش‌های مذکور اطلاعاتی درباره‌ی موقعیت خطای احتمالی در بر نخواهند داشت و فقط مودهای بالاتر می‌توانند برای تعیین موقعیت آسیب به کار روند. با این حال مطالعات پیشین

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۶/۳/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1606.1896

که در آن، $c_{j,k}^i$ ضریب تابع موجک بسته‌ی است که از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (7)$$

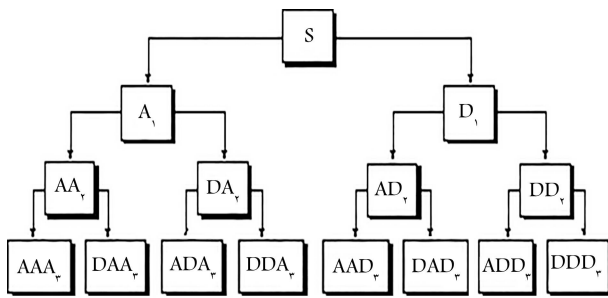
آنالیز سیگنال توسط تبدیل موجک پکتی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در هر گره، شاخه‌ی سمت چپ، بخش ضرایب تقریب سیگنال است و شاخه‌ی سمت راست، بخش ضرایب جزئی سیگنال است. توابع در شاخه‌ی سمت راست هر گره، به‌عنوان تابع موجک و توابع در شاخه‌ی سمت چپ هر گره، تابع مقیاس فرض می‌شوند.

۳. آنالیز مؤلفه‌های اصلی

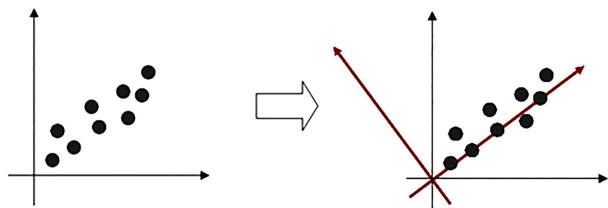
روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، بهترین روش برای کاهش ابعاد داده به صورت خطی است.^[۱۴] در روش مذکور، محورهای مختصات جدیدی برای داده‌ها تعریف و داده‌ها بر اساس محورهای مذکور بیان می‌شوند. اولین محور باید در جهتی قرار گیرد که واریانس داده‌ها بیشینه شود (یعنی در جهتی که پراکندگی داده‌ها بیشتر است). در شکل ۲، این مفهوم برای داده‌های دو بُعدی نشان داده شده است.

به عبارت دیگر، با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌توان تعداد زیادی متغیر توضیحی (متغیر مستقل) همبسته را با تعداد محدودی متغیر توضیحی جدید، که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند، جایگزین کرد. به این ترتیب نه فقط، بُعد مسئله تقلیل می‌یابد، بلکه مسئله‌ی چند همخطی پیش نمی‌آید. فرض کنید $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_P)^T$ یک بردار تصادفی با ماتریس کواریانس معین نامنفی \sum و $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_P \geq 0$ مقادیر ویژه باشد. همچنین a_1, a_2, \dots, a_P بردارهای ویژه‌ی یکا متعامد به ترتیب متناظر با $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_P$ باشند. متغیرهای Y_1, Y_2, \dots, Y_P تعریف شده در رابطه‌ی ۸ را مؤلفه‌های اصلی گویند.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{P1}X_P \\ Y_2 &= a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{P2}X_P \\ &\dots \\ Y_P &= a_{1P}X_1 + a_{2P}X_2 + \dots + a_{PP}X_P \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۱. درخت تجزیه در تبدیل موجک بسته‌ی.^[۱۴]



شکل ۲. ایده‌ی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی.^[۱۵]

باسخ و تبدیل موجک بسته‌ی بررسی شده است. برای این کار یک سازه‌ی مرجع به صورت تحلیلی بررسی شده است. همچنین برای شناسایی خسارت، ۶ سطح خرابی متفاوت تعریف شده است. در ابتدا، با استفاده از معیار آنتروپی شانون بهترین تراز برای تجزیه‌ی سیگنال‌های شتاب خروجی سازه از ناه تعین و سپس ضرایب موجک استخراج شده‌اند. در نهایت، نیز با استفاده از معیار انرژی سیگنال‌ها، معیار خرابی تعین شده است.

۲. تبدیل موجک بسته‌ی

توابع موجک بسته‌ی از یک سری توابع خطی موجک تشکیل شده‌اند، که جانشین بعضی خصوصیات‌ها، همانند: تعامد و تمرکز زمان - بسامد از توابع موجک هستند. $\psi_{j,k}^i(t)$ تابعی با ۳ پارامتر i, j و k است که به ترتیب، پارامترهای: مدولاسیون، مقیاس و انتقال هستند (رابطه‌ی ۱):^[۱۴]

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

که در آن، ψ^i تابع موجک است که از روابط ۲ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \psi^{2^j}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2^j t - k) \\ \psi^{2^{j+1}}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2^{j+1} t - k) \end{aligned} \quad (2)$$

اولین تابع موجک، تابع مادر نامیده می‌شود.

فیلترهای گسسته‌ی $h(k)$ و $g(k)$ ، قرینه‌ی مربع فیلترهایی هستند که با توابع مقیاس و تابع موجک مادر در ارتباط هستند. تبدیل موجک بسته‌ی، شامل یک تجزیه‌ی کامل از هر سطحی است که به همین دلیل در ناحیه با بسامد بالا، تجزیه و تحلیل بالایی انجام می‌دهد. رابطه‌ی بازگشتی بین مؤلفه‌های سطح j و $j+1$ به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$\begin{aligned} f_j^i(t) &= f_{j+1}^{i-1}(t) + f_{j+1}^i(t) \\ f_{j+1}^{i-1}(t) &= H f_j^i(t) \\ f_{j+1}^i(t) &= G f_j^i(t) \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن، مقادیر H و G اپراتورهای کاهنده‌ی فیلتر هستند و مربوط به فیلترهای گسسته‌ی $h(k)$ و $g(k)$ می‌شوند که از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آیند:

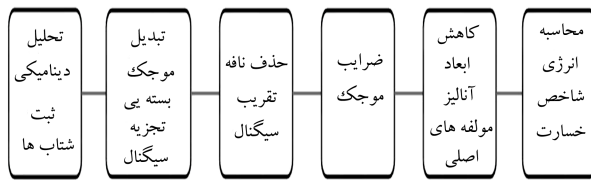
$$\begin{aligned} H\{f\} &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k - 2t) \\ G\{f\} &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k - 2t) \end{aligned} \quad (4)$$

با تجزیه در سطح j ، می‌توان تابع $f(t)$ را به صورت رابطه‌ی ۵ نوشت:

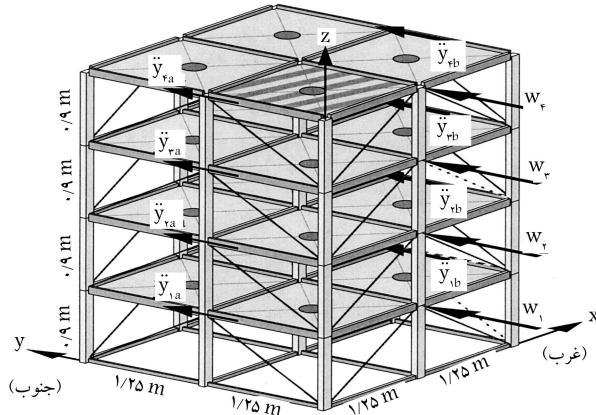
$$f(t) = \sum_{i=1}^r f_j^i(t) \quad (5)$$

که در آن $f_j^i(t)$ از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

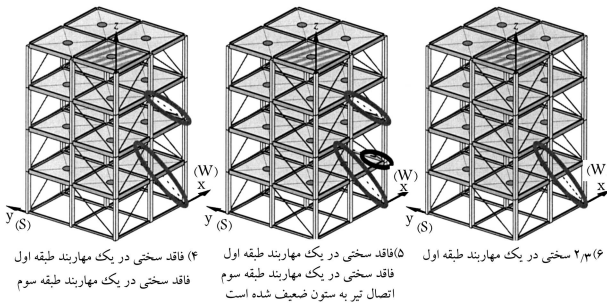
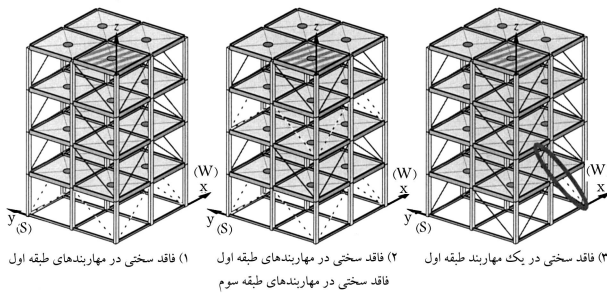
$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \quad (6)$$



شکل ۳. الگوریتم روش شناسایی خسارت.



شکل ۴. دیاگرام بارگذاری مدل سازه. [۱۳]



شکل ۵. شش الگوی خسارت سازه‌یی. [۱۳]

متر ارتفاع دارد. دو مهاربند قطری نیز در وجوه پیرامونی سازه در هر طبقه قرار گرفته‌اند. بارگذاری به صورت نافه‌ی سفید نرمال فیلترشده‌ی مستقل مدل‌سازی و با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر باتوروس مرتبه‌ی شش^۱ با بسامد قطع ۱۰۰ هرتز تولید شده است. شکل ۴، به صورت گرافیکی مدل سازه و نحوه‌ی بارگذاری آن را نشان می‌دهد.

علاوه بر سازه‌ی سالم، ۶ الگوی خسارت به‌عنوان بخشی از مسئله‌ی مرجع مطالعه شده است که شامل خسارت‌های ساده که بیشتر روش‌ها باید قادر به تشخیص آن باشند تا حالت‌های دشوارتر هستند که به این صورت تعریف شده‌اند (ضمناً الگوهای مذکور به‌صورت گرافیکی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند):

که در آن، Y_i را مؤلفه‌ی اصلی i ام گویند. بردار $\underline{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_P)^T$ مؤلفه‌های بردار اصلی نام دارد.

۴. روش شناسایی خسارت

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، در پژوهش حاضر، خسارت در سازه‌ها با استفاده از تبدیل موجک بسته‌یی بر روی یک سازه‌ی مرجع به‌صورت تحلیلی بررسی شده است. برای شناسایی خسارت، ۶ سطح خرابی متفاوت تعریف شده است. هدف از کاربرد تبدیل موجک بسته‌یی، استفاده از قابلیت پایین‌گذر و بالاگذر تبدیل به‌طور هم‌زمان است (برخلاف تبدیل پیوسته و گسسته)، که امکان جداسازی نافه از سیگنال را فراهم می‌کند. برای حذف نافه، در ابتدا ترازهای تجزیه بررسی و یک درخت بهینه، جهت تجزیه‌ی سیگنال انتخاب شده است. علت انتخاب یک درخت برای کلیه‌ی پاسخ طبقات سازه، تفاوت در شتاب پاسخ طبقات مختلف است که باعث عملکرد متفاوت تبدیل موجک در طبقات مختلف می‌شود. برای این کار در ابتدا با استفاده از معیار انرژی شانون، بهترین تراز برای تجزیه‌ی سیگنال‌های شتاب خروجی سازه از نافه تعیین و سپس ضرایب موجک استخراج می‌شوند. در مرحله بعد، با استفاده از کاهش ابعاد داده‌ها، کلیه‌ی پاسخ طبقات به یک پاسخ (که نشان‌دهنده‌ی رفتار کل سازه است) کاهش می‌یابد. لذا به جای بررسی پاسخ‌های مختلف و جمع آن‌ها، فقط یک پاسخ بررسی و از حجم محاسبات به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. به‌طور خلاصه، روش انجام کار به این شرح است:

۱. برای شناسایی خسارت، ابتدا سازه تحت بارگذاری تحلیل و خروجی شتاب حسگرها ثبت می‌شود.
۲. کارایی توابع موجک مختلف بررسی و بهترین تابع موجک برای این مسئله انتخاب می‌شود.
۳. با استفاده از تبدیل موجک بسته‌یی، شتاب هر حسگر تجزیه و نوفه حذف می‌شود.
۴. ضرایب موجک برای شتاب‌های تقریب تراز اول برای هر حسگر محاسبه می‌شود.
۵. با استفاده از روش کاهش ابعاد با بهره‌گیری از آنالیز مؤلفه‌های اصلی، ضرایب موجک برای تمامی حسگرها فقط به یک محور تصویر می‌شوند تا ابعاد مسئله از ۱۶ به ۱ کاهش یابد.
۶. انرژی سیگنال حاصل مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه و مجموع انرژی به‌عنوان شاخص خسارت در نظر گرفته می‌شود.

$$E = \int s^2 dt \quad (9)$$

شکل ۳، نمودار کلی روش شناسایی خسارت را نشان می‌دهد. در ادامه، کلیه مراحل روش ارائه شده با جزئیات بحث شده است.

۱.۴. مدل و تحلیل سازه

در پژوهش حاضر، از سازه‌ی مرجع پایش سلامت سازه که توسط IASC-ASCE توسعه داده شده، استفاده شده است. [۱۳] سازه‌ی مرجع، یک ساختمان فولادی ۴ طبقه‌ی دو دهانه است که از مدل آزمایشگاهی یک چهارم مقیاس دانشگاه بریتیش کلمبیا اقتباس شده است. سازه در پلان به ابعاد 2.75×2.75 متر است و $3/6$

جدول ۱. دقت توابع موجک مورد بررسی.

موجک	Sym ^۲	dmey	db ^۸	db ^۴
انرژی	۹۹٫۳۹	۹۹٫۵۰	۹۹٫۵۰	۹۹٫۵۰
موجک	db ^۲	haar	bior ^{۳٫۳}	bior ^{۲٫۲}
انرژی	۹۹٫۳۹	۹۸٫۲	۹۹٫۷۰	۹۹٫۶۰
موجک	coif ^۴	coif ^۲	coif ^۱	sym ^۴
انرژی	۹۹٫۵۰	۹۹٫۵۰	۹۹٫۴۰	۹۹٫۵۰

۳.۴. تجزیه‌ی سیگنال و حذف نافه

جهت حذف نافه از سیگنال اصلی، ابتدا باید سیگنال به مؤلفه‌های آن تجزیه شود. به منظور تخمین بهینه‌ی سیگنال تجزیه‌شده، نیاز به انتخاب درخت بهینه برای تجزیه‌ی سیگنال است. در واقع تجزیه‌ی بسته‌ی موجک، یک تجزیه با افزونگی زیاد است و روش انتخاب درخت بهینه، سعی در کاهش آن دارد، به طوری که با بازسازی درخت بهینه، سیگنال حاصل، کمترین اختلاف را با سیگنال اصلی دارد. لذا می‌توان نشان داد که در تجزیه‌ی بسته‌ی موجک، به گونه‌ی گره‌های مناسب در درخت تجزیه را می‌توان انتخاب کرد که بیشترین اطلاعات در بین گره‌های زیرمجموعه‌ی خود را داشته باشند. برای این منظور از توابعی که قادر به اندازه‌گیری و مقایسه‌ی اطلاعات موجود در هر گره باشد، استفاده می‌شود. الگوریتم انتخاب درخت بهینه به این صورت است که برای هر گره در درخت تجزیه، با استفاده از تابع مذکور میزان اطلاعات موجود در آن گره محاسبه می‌شود، سپس مجموع میزان اطلاعات موجود در گره‌های زیرمجموعه‌ی گره‌ی مذکور نیز محاسبه و با مقدار محاسبه‌شده برای آن گره مقایسه می‌شود. اگر میزان اطلاعات موجود در زیرگره‌های مذکور بیشتر از گره‌ی موردنظر باشد، تجزیه از سمت آن گره در درخت تجزیه متوقف می‌شود؛ اما اگر به جز این باشد، لازم است تا تجزیه از طرف گره‌ی مذکور ادامه پیدا کند.^[۱۴] الگوریتم ذکرشده به صورت بالا به پایین و برای زیرگره‌های موجود در سطح تجزیه انجام می‌پذیرد و الگوریتم تا جایی ادامه می‌یابد که در تمام گره‌های باقی‌مانده در درخت تجزیه متوقف شده باشد. شرط ذکرشده به همراه بیشینه‌ی سطح تجزیه‌ی بسته‌ی موجک، شرایط پایان الگوریتم انتخاب بهترین درخت را برآورده می‌سازد. به علاوه تابع اندازه‌گیری اطلاعات بر نحوه‌ی تجزیه و همین‌طور تعداد ترازهای لازم تأثیرگذار است. توابع اندازه‌گیری اطلاعات هر گره بسیار شبیه به توابع انرژی برای محاسبه‌ی ویژگی‌های سیگنال هستند. توابع متداول برای اندازه‌گیری آنتروپی هر گره مطابق روابط ۱۰ هستند:

$$\sqrt[p]{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X_k|^p}$$

$$-\sum_{k=1}^N |X_k|^t \log |X_k|^t$$

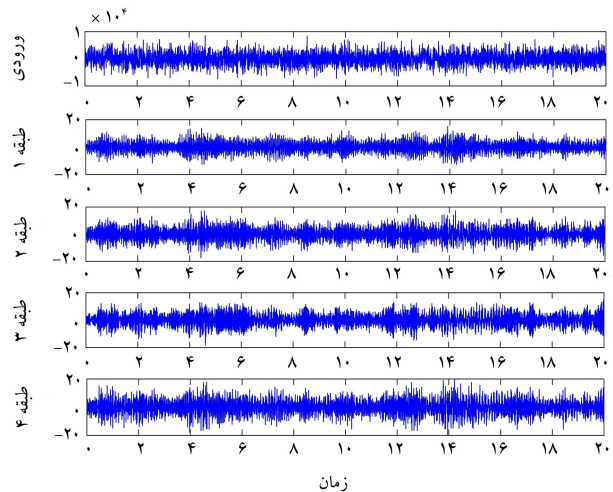
$$\sum_{k=1}^N \log |X_k|^t$$

Thresholding with fixthreshold(ϵ)

Thresholding with adaptive threshold ($\sqrt{2 \ln(N \log_2 N)}$)

(۱۰)

معمولاً آنتروپی شانون کاربرد بیشتری در پردازش سیگنال‌های یک بُعدی



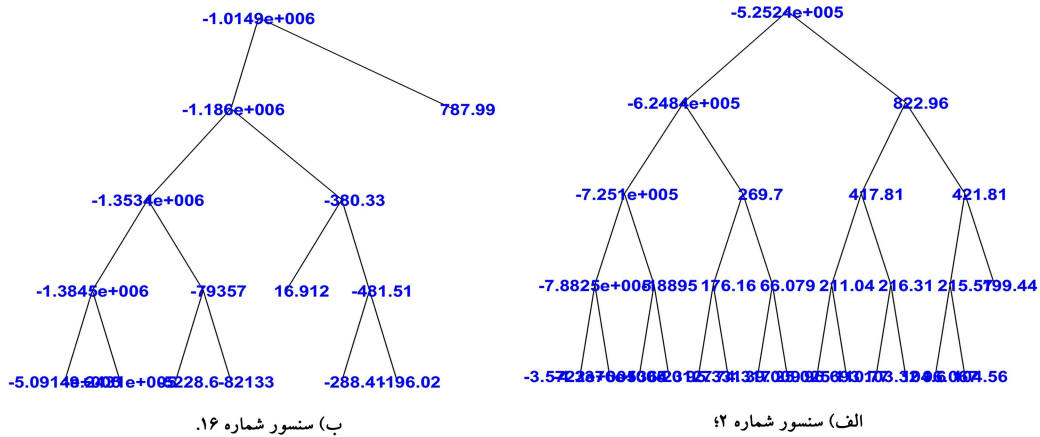
شکل ۶. شتاب ورودی و شتاب پاسخ طبقات.

۱. حالت سلامت سازه؛
۲. عدم سختی در مهاربندهای طبقه‌ی اول (مهاربندهای مذکور هنوز در جرم مشارکت دارند، اما هیچ مقاومتی درون سازه فراهم نمی‌کنند)؛
۳. عدم سختی در همه‌ی مهاربندهای طبقات اول و سوم؛
۴. عدم سختی در یک مهاربند در طبقه‌ی اول (مهاربند شمالی در وجه غربی سازه)؛
۵. عدم سختی در یک مهاربند در طبقه‌ی اول (مهاربند شمالی در وجه غربی) و یک مهاربند در طبقه‌ی سوم (مهاربند غربی در وجه شمالی)؛
۶. مشابه الگوی خسارت ۵ ولی اتصال تیر به ستون در طبقه‌ی اول فقط می‌تواند نیروها را انتقال دهد و قادر به تحمل هیچ لنگر خمشی نیست؛
۷. دو سوم سختی (یک سوم سختی از دست رفته است) در یک مهاربند در طبقه‌ی اول.

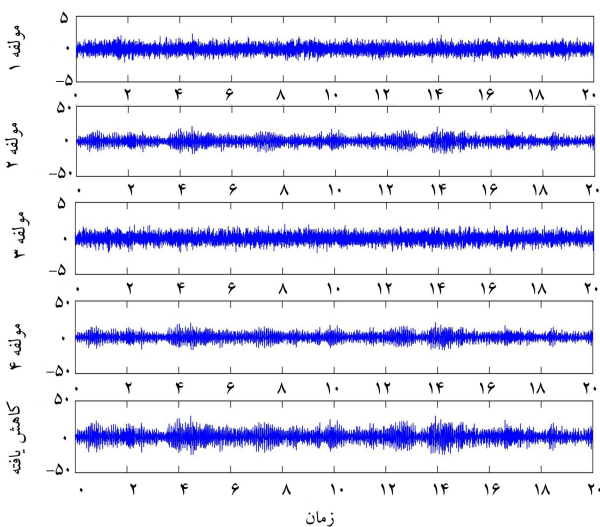
در پژوهش حاضر، از سیستم ۱۲ درجه‌ی آزادی مدل اجزاء محدود سازه‌ی مرجع استفاده و کلیه‌ی محاسبات در نرم‌افزار متلب^۲ انجام شده است. میزان میرایی سازه برابر ۰٫۰۱ در نظر گرفته شده است. زمان آنالیز ۲۰ ثانیه و گام زمانی آنالیز برابر ۰٫۱ ثانیه انتخاب و فرض شده است که هر طبقه، ۴ حسگر دارد، که شتاب پاسخ سازه را ثبت می‌کنند. جهت شبیه‌سازی شرایط واقعی حسگرها، مقدار ۰٫۱٪ نافه با توزیع نرمال نیز به مقادیر خروجی شتاب حسگرها اضافه شده است. شکل ۶، نمونه‌ی از بار وارده و پاسخ شتاب طبقات را نشان می‌دهد.

۲.۴. انتخاب تابع موجک

تاکنون توابع موجک متعددی معرفی شده‌اند که هر یک مرایا و معایبی دارند. لذا از بین توابع موجک موجود باید تابع مناسب را انتخاب کرد. از این میان، ۱۲ تابع که نسبت به سایرین کاربرد بیشتری دارند، انتخاب شده‌اند. جدول ۱، دقت این توابع را براساس انرژی مؤلفه‌ها در ساخت سیگنال اصلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کلیه‌ی توابع موجک مورد مطالعه، قابلیت مناسبی در تجزیه‌ی سیگنال نشان می‌دهند. با این حال تابع bior^{۳٫۳} به میزان اندکی نسبت به سایرین عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. بر این اساس، در ادامه تابع bior^{۳٫۳} استفاده شده است.



شکل ۷. بهترین درخت تجزیه به روش تبدیل موجک بسته‌ی.

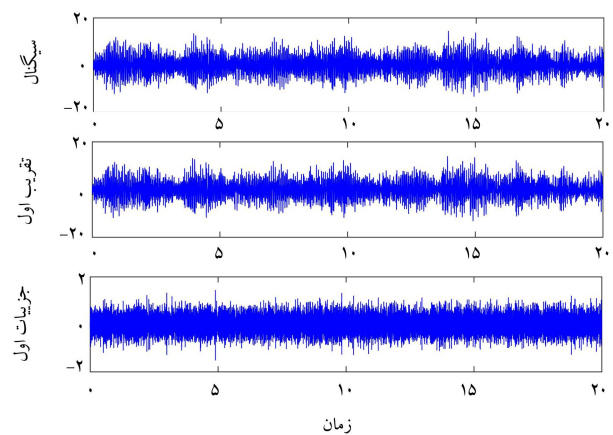


شکل ۹. ضرایب موجک طبقات و فرم کاهش یافته‌ی آن.

مسئله از ۱۶ به ۱ کاهش یافته و برای آن از آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شده است. روش کاهش ابعاد داده‌ها، نتایج بهتری نسبت به روابط ریاضی ساده، مانند جمع و یا میانگین‌گیری به دست می‌دهد و در مواردی که حجم داده‌ها بالاست، بسیار مؤثر است. ضمناً روش مذکور، سرعت بسیار بالایی دارد. لذا در بسیاری از مسائل مهندسی استفاده از آن نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد. در شکل ۹، نمونه‌ی از کاهش سیگنال شتاب طبقات با روش کاهش ابعاد داده‌ها مشاهده می‌شود.

۵. تفسیر نتایج

همان‌طور که پیشتر گفته شد، خسارت در الگوهای خسارت ۲ و ۳ بالاست. ضمناً الگوی ۳ بیشترین شدت را در میان همه‌ی الگوها دارد. برخلاف آن، الگوهای خسارت ۴ الی ۶ جزئی‌تر هستند و الگوی ۷ کمترین خسارت را دارد. در شکل ۱۰، مقادیر شاخص خسارت محاسبه شده برای کل سازه مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که روش ارائه شده به خوبی قابلیت شناسایی خسارت و شدت



شکل ۸. تجزیه‌ی سیگنال و حذف نافه.

دارد.^[۱۲] بر این اساس معیار شانون برای محاسبه‌ی درخت تجزیه استفاده شده است. به عنوان نمونه، شکل ۷ بهترین درخت تجزیه را برای دو حسگر ۲ و ۱۶ واقع در طبقات اول و چهارم برای ۴ تراز تجزیه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، با توجه به متفاوت بودن شتاب طبقات، درخت بهینه‌ی هر حسگر نیز متفاوت خواهد بود. ضمناً ترکیب سیگنال‌های تجزیه شده باید به گونه‌ی باشد که بتوان تا حد امکان نافه را نیز از سیگنال حذف کرد. جدول ۲، درصد خطای انرژی سیگنال ساخته شده و سیگنال اصلی را برای حسگرها در حالت سالم نشان می‌دهد. مطابق جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که در تراز اول تجزیه، انرژی سیگنال تقریباً بسیار نزدیک به سیگنال اولیه دارد و انرژی سیگنال جزئیات بسیار کم است. در نتیجه جهت یکسان‌سازی روش تجزیه‌ی سیگنال برای تمامی حسگرها، تجزیه فقط در یک مرحله انجام شده است. شکل ۸، نمودار سیگنال اصلی حسگر ۲ را به همراه جزئیات و تقریب آن نشان می‌دهد که مطابق آن با تجزیه در یک تراز، نافه به خوبی از سیگنال اصلی جدا شده است. آنتروپی در سیگنال‌های به شکل نافه بسیار کم است. لذا در ادامه، از تقریب سیگنال به جای سیگنال اصلی استفاده شده است.

۴.۴. کاهش ابعاد داده‌ها

جهت کاهش حجم داده‌ها و همین‌طور حذف داده‌های پراکنده^۳، تعداد ابعاد

جدول ۲. مقادیر نسبی انرژی جزئیات به سیگنال اصلی در تراز اول تجزیه.

نام حسگر	حسگر						
	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴
انرژی سیگنال	$2,07 \times 10^6$	$2,07 \times 10^6$	$1,44 \times 10^6$	$1,44 \times 10^6$	$1,55 \times 10^6$	$1,55 \times 10^6$	$1,49 \times 10^6$
انرژی جزئیات	۷۹۲۱	۸۳۲۰	۷۹۰۸	۷۶۵۷	۶۸۷۵	۶۷۲۷	۱۷۰۱
نسبت	۰,۳۸	۰,۴۰	۰,۵۴	۰,۵۳	۰,۴۴	۰,۴۳	۰,۱۱

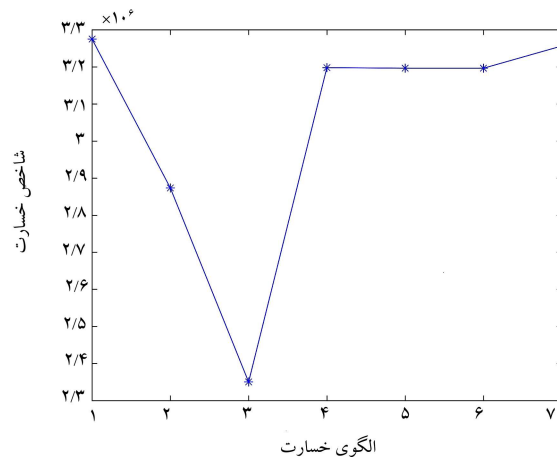
حالت سالم (الگوی ۱) تفاوت کمتری دارد، که نشان از خسارت کمتر دارد. شاخص الگوی ۷ نیز کمترین اختلاف را با حالت سالم دارد که نشانگر خرابی جزئی سازه است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش پردازش سیگنال و کاهش ابعاد داده‌ها روشی برای شناسایی خسارت در سازه‌ها ارائه شده است، که در آن برخلاف روش‌های سنتی از معیار انرژی به جای بسامد استفاده شده است و نتایج نشان از دقت بالای روش مذکور در تشخیص شدت خرابی سازه‌ی مورد مطالعه دارد. به طور کلی می‌توان نتایج را به این شرح خلاصه کرد:

-- تبدیل موجک گسسته در سازه‌ی مورد مطالعه، یک ابزار پردازش سیگنال کارآمد برای شناسایی خسارت سازه است. به علاوه، روش تبدیل موجک گسسته عملکرد مناسبی برای فیلتر کردن ناهمه از سیگنال دارد.

-- روش تبدیل موجک گسسته قابلیت شناسایی خرابی‌های کلی سازه‌ی مذکور را با دقت بسیار بالا دارد و در مورد خرابی‌های جزئی نیز نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.



شکل ۱۰. مقدار شاخص خسارت برای الگوهای خرابی مختلف.

آن را دارد. مطابق شکل می‌توان مشاهده کرد که افت شاخص انرژی در دو الگوی ۲ و ۳ بسیار بالاست، که نشان از خسارت شدید سازه دارد. الگوی ۳ نیز بیشترین افت انرژی را نشان می‌دهد. شاخص انرژی الگوهای ۴ الی ۶ با

پانوشته‌ها

1. sixth-order low-pass Butterworth filter
2. Matlab
3. outliers

منابع (References)

1. Goyal, D. and Pabla B.S. "The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **23**(4), pp. 1-10 (2015).
2. Wei, F. and Qiao, P. "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study", *Structural Health Monitoring*, **10**(1), pp. 83-111 (2011).
3. Zhipeng, F., Liang, M. and Chu, F. "Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **38**(1), pp. 165-205 (2013).
4. Haldar, A. "Health assessment of engineered structures: Bridges, buildings and other infrastructures", *World Scientific*, 352 p. (2013).
5. Pyayt, A.L., Kozionov, A.P., Mokhov, I.I. and et al. "Time-frequency methods for structural health monitoring", *Sensors*, **14**(3), pp. 5147-5173 (2014).
6. Farrar, C.R. and Worden K. "An introduction to structural health monitoring", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365**(1851), pp. 303-315 (2007).
7. Dackerman, U. "Vibration based damage identification method for civil structures using artificial neural network", Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney (2010).
8. 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).
9. Huang, C. and Nagarajaiah, S. "Output-only structural health monitoring for deepwater risers: Experimental

- study of wavelet modified SOBI and distributed force index algorithm”, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **14**(05), pp.1440010 (2014).
10. Facchini, G., Bernardini, L., Atek, S. and et al. “Use of the wavelet packet transform for pattern recognition in a structural health monitoring application”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **26**(12), pp.1513-1529 (2014).
 11. Patel, S.S., Chourasia, A.P., Panigrahi, S.K. and et al. “Damage identification of RC structures using wavelet transformation”, *Procedia Engineering*, **144**, pp. 336-342 (2016).
 12. Andreaus, U. and Casini, P. “Identification of multiple open and fatigue cracks in beam-like structures using wavelets on deflection signals”, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, **28**(1-2), pp. 361-378 (2016).
 13. Johnson, E.A. and et al. “Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data”, *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), pp. 3-15 (2003).
 14. Coifman, R.R. and Wickerhauser, M.V. “Entropy-based Algorithms for best basis selection”, *IEEE Trans. on Inf. Theory*, **38**(2), pp. 713-718 (1992).
 15. Jackson, J.E., *A User’s Guide to Principal Components*, John Wiley and Sons (1991).