

استخراج ویژگی مقاوم به نویز با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد

سید امیرحسین اصفهانی (دانشجوی دکتری)

هاشم شریعتمدار* (استاد)

علیرضا انظهانی (دانشجوی بسا دکتری)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (۲-۳۸، شماره ۲/۴، ص. ۲۵-۳۶)، پژوهشی

شناسایی آسیب در سیگنال‌های با ابعاد بالا، بسیار پیچیده و زمان‌بر است. در صورتی که سیگنال‌های مذکور تحت تأثیر تحریکات نویزی خارجی قرار گرفته باشند، استفاده از آن‌ها موجب بروز عدم قطعیت در ویژگی‌های استخراج شده از آسیب می‌شود. در نوشتار حاضر، با استفاده از تحلیل سری زمانی، تابع مشخصه‌ی سیگنال محاسبه شده است. سپس با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد، یک ویژگی حساس به آسیب که مقداری مختلط است، استخراج شده است. با محاسبه‌ی زاویه‌ی ویژگی به دست آمده، آسیب سازه قابل تشخیص است. همچنین، مکان آسیب با مطالعه‌ی بخش حقیقی ویژگی به راحتی تعیین می‌شود. به منظور ارزیابی توانایی‌های ویژگی نوین در شناسایی آسیب، یک سازه واقعی همچون پل ۱° S۱۰ آزمایش شده است. نتایج به دست آمده در بخش‌های تشخیص و تعیین مکان آسیب با نتایج به دست آمده توسط پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی پایش سلامت مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده، توانایی‌های ویژگی استخراج شده را در حل چالش‌های شناسایی آسیب، یعنی داده‌های حجیم و تحریک‌های نویزی خارجی نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ها، ویژگی حساس به آسیب، تابع مشخصه‌ی بسامدی، ضریب همبستگی، نویز.

۱. مقدمه

پایش سلامت، یک فرایند پرکاربرد در تعیین وضعیت سلامت سازه‌های عمرانی است؛ که در آن، شناسایی آسیب از طریق اندازه‌گیری ارتعاش‌های بخش‌های مختلف سازه انجام می‌گیرد.^[۱] آسیب به هرگونه تغییرات در ویژگی‌های ساختاری سازه اطلاق می‌شود، که تأثیری نامطلوب در عملکرد آن داشته باشد.^[۲] روش‌های شناسایی آسیب به دو بخش کلی پایه‌ی مدل و پایه‌ی داده دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های پایه‌ی مدل، نیاز به یک مدل المان محدود از سازه‌ی مورد بررسی است.^[۳] در حالی که در روش‌های پایه‌ی داده، شناسایی آسیب بر اساس پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از سازه انجام می‌پذیرد.^[۴-۶] در سال‌های اخیر، توجه پژوهش‌گران زیادی به روش‌های پایه‌ی داده معطوف شده است.^[۷-۱۰]

پردازش سیگنال، اولین بخش از یک روش پایه‌ی داده است، که در آن سیگنال خام پاسخ پردازش می‌شود و اطلاعاتی ارزشمند، که نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های ذاتی سازه است، به دست می‌آید. یکی از روش‌های پرکاربرد و مؤثر در پردازش سیگنال‌های سازه، روش تحلیل سری زمانی است.^[۱۱] با استفاده از تحلیل سری زمانی، یک مدل خطی و نامتغیر با زمان برای سیگنال سازه به دست می‌آید، که در بردارنده‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۱۶

DOI:10.24200/J30.2022.60471.3105

esfehani@mail.um.ac.ir
shariatmadar@um.ac.ir
alireza.ent ezami@polimi.it

ویژگی‌های ذاتی و دینامیکی سازه‌ی مورد پایش است. سادگی پیاده‌سازی و حساسیت بخش‌های مختلف مدل به آسیب، از مزایای روش پردازش سیگنال مذکور است.^[۱۲] از طریق روش تحلیل سری زمانی، مدل‌های مختلفی برای یک سیگنال به دست می‌آید، که پرکاربردترین آن‌ها، عبارت‌اند از: مدل رگرسیون خودکار^۱ (AR)، مدل رگرسیون خودکار با محرک خروجی^۲ (ARX)، مدل رگرسیون خودکار با میانگین متحرک^۳ (ARMA) و مدل رگرسیون خودکار با میانگین متحرک و محرک خروجی^۴ (ARMAX). پس از آن که مدل مناسب برای یک سیگنال تعیین شد، پارامترهای مدل و باقیمانده‌ی آن که در بردارنده‌ی ویژگی‌های دینامیکی سیگنال مرتبط هستند، محاسبه می‌شوند.^[۱۳] انتظامی و همکاران (۲۰۱۹)، با بهره‌گیری از روش تحلیل سری زمانی، سیگنال‌های پاسخ سازه را پردازش کردند و با استفاده از باقیمانده‌های مدل، یک روش شناسایی آسیب ارائه کردند.^[۱۴] انتظامی و شریعتمدار (۲۰۱۸)، با استخراج پارامترهای مدل از سازه‌های سالم و آسیب دیده و همچنین مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، مکان آسیب را تعیین کردند و شدت خسارت وارده را تخمین زدند.^[۱۵] رضایی‌پژند و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از فیلترهای پایین‌گذر، روشی برای تعیین بهینه‌ی مراتب مدل سری زمانی ارائه کردند و دریافتند که بهره‌گیری از فیلترهای پایین‌گذر، مرتبه‌های مدل سری زمانی را کاهش می‌دهد و این موجب کاهش ابعاد مدل سری زمانی می‌شود.^[۱۶]

پس از آن که داده‌های خام اولیه پردازش شدند، ویژگی‌هایی استخراج می‌شوند که وضعیت سلامتی یک سیستم را نشان می‌دهند^[۲] که باید به آسیب موجود در سازه حساس باشند.^[۱۶] ویژگی‌های حساس به آسیب در سه حوزه‌ی: زمان، بسامد و زمان - بسامد استخراج می‌شوند.^[۱۷، ۱۸] از باقیمانده‌ی مدل‌های سری زمانی می‌توان به‌عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برد. جلالی‌فرو و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی با استفاده از مدل سری زمانی AR-ARX، به استخراج باقیمانده‌ی مدل به‌عنوان یک ویژگی حساس به آسیب پرداختند و روشی را برای تشخیص آسیب و تعیین مکان آن ابداع کردند.^[۱۹] رضوی و همکاران (۲۰۲۱)، چگالی طیف توانی به دست آمده از باقیمانده‌ی مدل سری زمانی را به‌عنوان ویژگی حساس به آسیب معرفی کردند.^[۲۰] باقری و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از تبدیل پیوسته‌ی موجک و تبدیل هیلبرت به استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب پرداختند.^[۲۱] پژوهشگران متعددی از الگوریتم‌های آماری برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برده‌اند.^[۲۲، ۲۳] آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، ۱۹ شاخص آماری شامل: قله، انرژي، عامل شکل، عامل کرس، مرتبه‌های مختلف از ممان‌های آماری و ... را به‌عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب استفاده کرده‌اند.^[۲۴] موسوی و همکاران (۲۰۲۱)، از آماره‌هایی چون آنتروپی و کشیدگی برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب بهره برده‌اند.^[۲۵] یکی از پرکاربردترین روش‌های استخراج ویژگی، که نشان‌دهنده‌ی میزان شباهت میان الگوهای رفتاری یک سازه است، ضریب همبستگی است.^[۲۶، ۲۷] هوال و امینزتر (۲۰۱۵)، برای فائق آمدن بر مشکلات استخراج پارامترهای مودال سازه، از جمله سختی و پیچیدگی محاسبه‌ی آن‌ها و نیز حساسیت پایین پارامترهای مذکور به آسیب‌های محلی از محاسبه‌ی همبستگی متقابل میان دو سیگنال استفاده کردند.^[۲۸] هوال^۸ و همکاران (۲۰۲۲)، از ضریب همبستگی به‌عنوان یک ویژگی حساس به آسیب برای تعیین مکان آسیب در سازه استفاده کردند.^[۲۹] فنگ و چن (۲۰۲۰)، نیز با محاسبه‌ی ضریب همبستگی سیگنال‌ها به تعیین مکان آسیب در سازه پرداختند.^[۳۰] یانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۷)، رابطه‌ی همبستگی میان دو سیگنال زمانی را در حوزه‌ی بسامد تعمیم دادند.^[۳۱] با توجه به رابطه‌سازی آن‌ها، ضریب همبستگی محاسبه شده میان دو سیگنال زمانی، به اندازه‌ی هر یک از سیگنال‌ها و اختلاف فاز آن‌ها در حوزه‌ی بسامد مرتبط است. با اینکه ویژگی استخراج شده به آسیب سازه حساس است، اما نویز موجود در سیگنال‌های پاسخ باعث انحراف ویژگی مذکور از مقدار دقیق آن می‌شود؛ که منجر به تصمیم‌گیری‌های اشتباه در شناسایی آسیب سازه می‌شود.

یکی از چالش‌های موجود که روش‌های شناسایی آسیب با آن درگیر هستند، حجم بالای داده‌های اندازه‌گیری شده است، که نه فقط موجب پیچیده شدن الگوی به دست آمده از رفتار سازه می‌شود، بلکه کاهش سرعت و کیفیت عملکرد روش‌های شناسایی آسیب را به دنبال دارد.^[۳۲] برای کاهش ابعاد داده‌ها، پاولوپو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶)، از تحلیل مؤلفه‌ی ذاتی غیرخطی (NPCA)^{۱۲} بهره‌گرفته‌اند.^[۳۳] با اینکه روش پیشنهاد شده در کاهش ابعاد داده توانمند بوده است، اما از نظر اجرایی، محاسبات سنگین و پیچیده‌ی را دربر داشته است. ماتیلاین^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷)، بر اساس سری‌های زمانی چندمتغیره و استفاده از روش‌های رگرسیون وارون ورقه شده (SIR)^{۱۴} و جداسازی کورمنج (BSS)^{۱۵} روشی را برای کاهش ابعاد داده‌های چندکاناله معرفی کرده‌اند.^[۳۴] دران-ززال^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۸)، با انتخابی بهینه از قطعه‌های سیگنال پاسخ به معرفی روشی برای کاهش ابعاد داده پرداختند و برای انتخاب بهینه‌ی قطعه‌های سیگنال از روش بهینه‌سازی تپه‌های مرجانی (CRO)^{۱۷} استفاده کردند.^[۳۵]

از طرفی دیگر، اگر پاسخ‌های سازه تحت تأثیر منابع محرک نویزی به دست آمده باشند، ویژگی‌های استخراج شده از آن‌ها، عدم قطعیت بالایی دارند؛ در این صورت، بهره‌گیری از داده‌های مذکور موجب کاهش اطمینان از نتایج شناسایی آسیب می‌شود.^[۳۶] در چنین شرایطی، بسیار حیاتی است که ویژگی‌های به دست آمده از پاسخ‌های سازه به آسیب حساس باشند و به‌طور هم‌زمان به نویز موجود در بار، حساسیتی از خود نشان ندهند. راوری و کارکاتز^{۱۸} (۲۰۱۲)، بر پایه‌ی تبدیل هیلبرت - هوانگ (HHT)،^{۱۹} یک الگوریتم نوین برای شناسایی آسیب در شرایط نویزی ارائه داده‌اند.^[۳۷] در شیوه‌ی آن‌ها، سیگنال پاسخ به‌وسیله‌ی روش HHT پردازش و مکان آسیب با بررسی اولین مود بسامدی از سیگنال تعیین می‌شود. انتظامی و شریعتمدار (۲۰۱۹)، برای استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب در شرایط نویزی از یک الگوریتم ترکیبی بر پایه‌ی تحلیل سری زمانی و تجزیه‌ی مودهای تجربی استفاده کرده‌اند.^[۸] بر اساس پایش سلامت به‌وسیله‌ی امواج هدایت شونده، یو^{۲۰} و علی‌آبادی (۲۰۲۰)، یک روش سلسله‌مراتبی چندسطحی را برای شناسایی آسیب در شرایط نویزی و عدم قطعیت ارائه کردند، تا آثار عدم قطعیت در نتایج شناسایی آسیب با بهینه‌یابی مکان حسگرها و نیز تعیین آستانه‌های بهینه برای شاخص‌های آسیب حذف و از تشخیص‌های اشتباه جلوگیری شود.^[۳۸]

در نوشتار حاضر، یک الگوریتم استخراج ویژگی نوین ارائه شده است، که توانایی مقابله با چالش‌های موجود در پایش سلامت سازه‌ها را دارد. در ابتدا، با بهره‌گیری از روش مؤثر تحلیل سری زمانی، پارامترهای مدل و باقیمانده‌ی آن برای هر سیگنال پاسخ به‌دست آمده است. با کنارگذاشتن باقیمانده‌ی مدل، که حاوی آثار نویز منبع محرک است، آثار منفی نویز ورودی از نتایج شناسایی آسیب حذف شده‌اند. به‌صورت هم‌زمان، استخراج پارامترهای مدل از سیگنال پاسخ، موجب انتقال داده‌های اولیه به فضایی با ابعاد پایین شده است. با استفاده از پارامترهای مذکور، که حاوی خواص ذاتی و دینامیکی سازه هستند، تابع مشخصه‌ی سیگنال در حوزه‌ی بسامد به دست آمده است. با تعمیم رابطه‌ی ضریب همبستگی در حوزه‌ی بسامد، یک ویژگی مختلط و دوتبعی، که به آسیب سازه حساس است، استخراج شده است. توانایی‌های ویژگی استخراج شده در تشخیص و تعیین مکان آسیب با آزمایش یک سازه‌ی معیار واقعی، همچون سازه‌ی پل S1۰۱،^[۳۹] ارزیابی شده است. قابل توجه است که بارهای وارد آمده به سازه‌ی مذکور، از نوع تحریک‌های نویزی خارجی بوده‌اند. به‌منظور نمایشی دقیق‌تر از برتری‌های روش پژوهش حاضر در شناسایی آسیب سازه، نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی پایش سلامت، یعنی روش پراوین^{۲۱} (۲۰۲۱)،^[۴۰] و پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)،^[۲۴] مقایسه شده‌اند. مقایسه‌های انجام گرفته، به خوبی توانمندی‌های روش پیشنهادی نوشتار حاضر را بر دیگر روش‌ها نشان می‌دهد. علاوه‌بر آن، نتایج به دست آمده از سازه‌ی پل بیانگر آن هستند که ویژگی استخراج شده، توانایی تشخیص وضعیت دقیق سازه و تعیین مکان درست آسیب را دارد.

۲. پردازش سیگنال ۲.۱. تبدیل Z

تبدیل Z، یک عملیات خطی است که به‌واسطه‌ی آن، یک سیگنال گسسته‌ی زمانی به یک فضای پیوسته‌ی بسامدی انتقال می‌یابد.^[۴۱] رابطه‌ی انتقال از طریق تبدیل Z

محاسبه‌ی پارامترهای بخش AR از مدل‌های سری زمانی، تابع مشخصه‌ی سیگنال رابطه‌ی ۱ است:

$$x_c(t) \text{ توسط رابطه‌ی ۶ در حوزه‌ی بسامد به دست می‌آید:} \quad (۶)$$

$$x_c(\omega) = \frac{1}{(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i e^{-ij\omega})}$$

۳. استخراج ویژگی

در بخش ۱.۳، نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب همبستگی میان دو متغیر x_c و y_c در حوزه‌ی زمان ($x_c(t)$ و $y_c(t)$) ارائه شده است. از آنجایی که متغیرهای x_c و y_c به ترتیب توابع مشخصه‌ی سیگنال‌های $x(t)$ و $y(t)$ هستند و مقدار آن‌ها در حوزه‌ی بسامد وجود دارد (مطابق رابطه‌ی ۶)، امکان محاسبه‌ی مستقیم ضریب همبستگی در حوزه‌ی زمان وجود ندارد. در بخش ۲.۳، با تعمیم رابطه‌ی همبستگی در حوزه‌ی بسامد، راه‌حلی برای مسئله‌ی حاضر ارائه شده است. در بخش ۳.۳، نحوه‌ی استخراج ویژگی نوین، که یک مقدار مختلط و دو بعدی است، معرفی شده است. ویژگی به دست آمده نه فقط میزان همبستگی دو متغیر را نشان می‌دهد، بلکه شدت ناهمبستگی آن‌ها را نیز تعیین می‌کند. در نهایت، در بخش ۴.۳ به ارائه‌ی روشی برای محاسبه‌ی ویژگی نوین در حضور عدم قطعیت آزمایش‌های مختلف پرداخته شده است.

۱.۳. ضریب همبستگی در حوزه‌ی زمان

ضریب همبستگی، یک شاخص آماری است که نشان دهنده‌ی ارتباط خطی میان دو متغیر است. بازه‌ی تغییرات ضریب همبستگی برابر $[-1, +1]$ است. مقدار $+1$ ، بیانگر بیشترین مقدار همبستگی میان دو متغیر است؛ به نحوی که افزایش و کاهش در مقدار یکی از متغیرها، نشان‌دهنده‌ی افزایش و یا کاهش در مقدار متغیر دوم است. در صورتی که مقدار ضریب همبستگی -1 باشد، دو متغیر دارای بیشترین همبستگی ولی در جهت عکس یکدیگر هستند؛ به گونه‌ی که افزایش در مقدار یک متغیر، موجب کاهش مقدار در متغیر دوم می‌شود. رابطه‌ی ضریب همبستگی میان متغیرهای $x_c(t)$ و $y_c(t)$ به شکل رابطه‌ی ۷ است:

$$corr_{xy} = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} (x_c(t) - \bar{x}_c)(y_c(t) - \bar{y}_c)}{\sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} (x_c(t) - \bar{x}_c)^2} \sqrt{\sum_{t=0}^{\infty} (y_c(t) - \bar{y}_c)^2}} \quad (۷)$$

که در آن، $corr_{xy}$ ضریب همبستگی میان متغیرهای زمانی x_c و y_c است و \bar{x}_c و \bar{y}_c نیز میانگین‌های دو متغیر اخیر هستند.

۲.۳. محاسبه‌ی ضریب همبستگی با استفاده از اطلاعات حوزه‌ی بسامد

با توجه به رابطه‌ی ۷، برای محاسبه‌ی ضریب همبستگی میان دو متغیر x_c و y_c ، به فرم زمانی دو متغیر ذکر شده نیاز است و در صورتی که فقط اطلاعات بسامدی آن‌ها در دسترس باشد، نمی‌توان به صورت مستقیم ضریب همبستگی را محاسبه کرد. با این حال، امکان محاسبه‌ی ضریب همبستگی با استفاده از اطلاعات بسامدی متغیرها وجود دارد. برای این کار، عبارت‌های موجود در معادله‌ی ۷، باید به حوزه‌ی بسامد انتقال یابند. برای سادگی در محاسبات، از دو معادله‌ی ۸ و ۹ استفاده می‌شود:

$$\tilde{x}(t) = x_c(t) - \bar{x}_c \quad (۸)$$

$$\tilde{y}(t) = y_c(t) - \bar{y}_c \quad (۹)$$

برای سیگنال زمانی $u(t)$ ، که در آن، t نشان‌دهنده‌ی زمان نمونه‌هاست، مطابق رابطه‌ی ۱ است:

$$u(z) = \mathcal{Z}\{u(t)\} = \sum_{t=0}^{\infty} u(t) z^{-t} \quad (۱)$$

که در آن، z متغیر بسامدی و یک مقدار مختلط و $\mathcal{Z}\{\cdot\}$ نماینده‌ی عملگر تبدیل Z هستند. در پژوهش حاضر، $u(z)$ انتقال یافته‌ی متغیر $u(t)$ تحت تبدیل Z است. در صورتی که تابع $u(z)$ موجود باشد، متغیر زمانی $u(t)$ با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$u(t) = \mathcal{Z}^{-1}\{u(z)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi j}} \oint_c u(z) \times z^{t-1} dz \quad (۲)$$

که در آن، z نشان دهنده‌ی یک مقدار موهومی و برابر $\sqrt{-1}$ است. عبارت $\oint_c(\cdot)$ نیز عملگر انتگرال‌گیری بر روی مسیر بسته‌ی c است. در صورتی که مسیر بسته‌ی c ، یک دایره به شعاع ۱ در صفحه‌ی مختلط باشد ($z = 1e^{j\omega} \forall \omega \in [-\pi, \pi]$)، رابطه‌ی ۲ به شکل رابطه‌ی ۳ بازنویسی می‌شود:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} u(e^{j\omega}) \times e^{(j\omega t)} d\omega \quad (۳)$$

که در آن، ω متغیر بسامدی و مقداری حقیقی است.

۲.۲. تحلیل سری زمانی و تابع مشخصه‌ی سیگنال

تحلیل سری زمانی، یک ابزار آماری قدرتمند است که به منظور مدل‌سازی سیگنال‌های پاسخ سازه استفاده می‌شود و توانایی استخراج ویژگی‌های ذاتی و دینامیکی سیگنال پاسخ را دارد.^[۱۷] در صورتی که سیگنال زمانی ایستا و خطی باشد، یکی از ۴ مدل AR، ARMA، ARX و ARMAX برای سیگنال مورد بررسی انتخاب می‌شود؛ که نحوه‌ی انتخاب آن به ذات و خواص آماری سیگنال بستگی دارد. در صورت معین بودن داده‌های منبع محرک، از روش‌های ARX و ARMAX استفاده می‌شود. در غیر این صورت، اگر سازه تحت بارهای نامشخص خارجی قرار گرفته و فقط پاسخ خروجی سازه موجود باشد، یکی از دو مدل AR و ARMA استفاده می‌شود. روابط مدل‌سازی سیگنال پاسخ $x(t)$ تحت مدل‌های AR و ARMA به ترتیب در روابط ۴ و ۵ ارائه شده‌اند:

$$x(t) = \sum_{i=1}^p \phi_i x(t-i) + e(t) \quad (۴)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^p \phi_i x(t-i) + \sum_{k=1}^r \theta_k e(t-k) + e(t) \quad (۵)$$

که در آن‌ها، پارامترهای p و r به ترتیب مراتب بخش‌های AR و MA^{۲۲} از مدل‌های AR و ARMA هستند و نیز باقیمانده‌ی مدل‌های ذکر شده است. $e(t)$ نشان‌دهنده‌ی میزان اختلاف مقدار واقعی سیگنال $x(t)$ از مقدار تخمینی آن است، که توسط هر یک از رابطه‌های ۴ و ۵ قابل دستیابی است. بردارهای $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_r]$ و $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_p]$ نیز به ترتیب حاوی ضرایب بخش‌های MA و AR از مدل‌های ارائه شده هستند. به منظور اجرای روش تحلیل سری زمانی، باید نوع مدل و مقادیر بهینه‌ی مراتب آن (p و r) تعیین شوند. در نوشتار حاضر، از روش ارائه شده توسط انتظامی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۷] برای تعیین مدل مناسب سری زمانی و انتخاب بهینه‌ی پارامترهای آن استفاده شده است. پس از

با توجه به روابط ۱۱ و ۱۵ و نیز با توجه به برابری اخیر در رابطه ۱۶، رابطه ۱۷ نتیجه می‌شود:

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) \tilde{y}^*(\omega) d\omega \quad (17)$$

که مطابق آن، مجموع مقادیر حاصل ضرب دو متغیر در حوزه زمان، با انتگرال حاصل ضرب یک تابع در مزدوج دیگری در حوزه بسامد $(x(\omega) \times (y)^*(\omega))$ ارتباط دارد. مشابه رابطه ۱۷، برای عبارت‌های $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{y}^2(t)$ و $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}^2(t)$ نیز برابری‌هایی به شکل روابط ۱۸ و ۱۹ ارائه شده‌اند:

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}^2(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) \tilde{x}^*(\omega) d\omega = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega)|^2 d\omega \quad (18)$$

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{y}^2(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} y(\omega) \tilde{y}^*(\omega) d\omega = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega)|^2 d\omega \quad (19)$$

که در آن‌ها، $|\cdot|$ بیانگر اندازه‌ی آرگومان است. ذکر این نکته الزامی است که با توجه به روابط اخیر و این مورد که توابع مشخصه‌ی $x_c(\omega)$ و $y_c(\omega)$ ، انتقال یافته‌ی توابع $x_c(t)$ و $y_c(t)$ به حوزه بسامد هستند، می‌توان روابط ۲۰ و ۲۱ را میان توابع $x(\omega)$ و $x_c(\omega)$ و نیز توابع $y(\omega)$ و $y_c(\omega)$ برقرار کرد: [۲۱]

$$x(\omega) = \begin{cases} x_c(\omega) & \omega \neq 0 \\ 0 & \omega = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$y(\omega) = \begin{cases} y_c(\omega) & \omega \neq 0 \\ 0 & \omega = 0 \end{cases} \quad (21)$$

با جایگذاری رابطه‌های ۱۷ الی ۱۹ در رابطه ۱۰، معادله‌ی ضریب همبستگی در حوزه بسامد مطابق رابطه ۲۲ به دست می‌آید:

$$corr_{xy} = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) y^*(\omega) d\omega}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x} \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}} \quad (22)$$

که در آن، ω_x و ω_y همچون ω متغیر بسامدی هستند و فقط برای عدم تشابه با متغیر ω استفاده شده‌اند. عبارت‌های مخرج را می‌توان به داخل انتگرال هدایت کرد (رابطه ۲۳):

$$corr_{xy} = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}} \frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}} d\omega \quad (23)$$

که در آن، عبارت‌های $\frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}}$ و $\frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}}$ به صورت اندازه و فاز در حوزه بسامد، مطابق روابط ۲۴ و ۲۵، بیان می‌شوند:

$$\frac{x(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |x(\omega_x)|^2 d\omega_x}} = a_x(\omega) e^{j\phi_x(\omega)} \quad (24)$$

$$\frac{y^*(\omega)}{\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |y(\omega_y)|^2 d\omega_y}} = a_y(\omega) e^{-j\phi_y(\omega)} \quad (25)$$

که در آن‌ها، $a_x(\omega)$ و $a_y(\omega)$ اندازه‌ی عبارت‌های سمت چپ روابط ۲۴ و ۲۵ هستند. $\phi_x(\omega)$ نیز فاز عبارت‌های اخیر هستند. بنابراین، رابطه ۲۳ به شکل رابطه ۲۶ قابل بازنویسی است:

$$corr_{xy} = \int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega) e^{j\phi_x(\omega)} a_y(\omega) e^{-j\phi_y(\omega)} d\omega = \int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega) a_y(\omega) e^{j(\phi_x(\omega) - \phi_y(\omega))} d\omega \quad (26)$$

با جایگذاری برابری‌های روابط اخیر در رابطه ۷، فرم ساده‌تری از آن مطابق رابطه ۱۰ ارائه شده است:

$$corr_{xy} = \frac{\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}(t)}{\sqrt{\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}^2(t)} \sqrt{\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{y}^2(t)}} \quad (10)$$

در صورتی که به جای هر یک از عبارت‌های به کاررفته در معادله ۱۰، عبارت‌های: $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{y}^2(t)$ ، $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}^2(t)$ ، $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}(t)$ شود، یک ارتباط میان ضریب همبستگی و اطلاعات بسامدی متغیرهای $\tilde{x}(t)$ و $\tilde{y}(t)$ برقرار می‌شود. به دلیل شباهت میان عبارت‌های ذکر شده، فقط نحوه‌ی محاسبه‌ی معادل بسامدی برای عبارت $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}(t)$ ارائه شده است. معادل‌های بسامدی دو عبارت دیگر به صورت مشابه قابل دستیابی هستند. برای محاسبه‌ی معادل عبارت $\sum_{t=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}(t)$ در حوزه بسامد، باید تبدیل Z عبارت $\tilde{x}(t) \tilde{y}(t)$ به دست آید. این تبدیل با توجه به رابطه ۱، به شکل رابطه ۱۱ نوشته می‌شود:

$$\tilde{w}(z) = \mathcal{Z} \{ \tilde{x}(t) \tilde{y}(t) \} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} (\tilde{x}(t) \tilde{y}(t)) z^{-t} \quad (11)$$

جواب جامع تبدیل ذکر شده در رابطه ۱۱، با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود: [۲۱]

$$\tilde{w}(z) = \mathcal{Z} \{ \tilde{x}(t) \tilde{y}(t) \} = \frac{1}{\sqrt{\pi} j} \oint_c \tilde{x}(v) \tilde{y}\left(\frac{z}{v}\right) v^{-1} dv \quad (12)$$

که در آن، v متغیر داخلی انتگرال است و منحنی بسته‌ی c ، دایره‌ی به شعاع ۱ است، که مرکز آن مبدأ مختصات است. با جایگذاری عبارت‌های $e^{j\omega'}$ $z = e^{j\omega}$ و $v = e^{j\omega'}$ در انتگرال اخیر، رابطه ۱۲ به شکل رابطه ۱۳ بسط داده می‌شود. ω' و ω نیز متغیرهای بسامدی هستند.

$$\begin{aligned} \tilde{w}(e^{j\omega}) &= \frac{1}{\sqrt{\pi} j} \int_{-\pi}^{\pi} \tilde{x}(e^{j\omega}) \tilde{y}(e^{j(\omega' - \omega)}) e^{-j\omega} \times j e^{j\omega} d\omega \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} \tilde{x}(e^{j\omega}) \tilde{y}(e^{j(\omega' - \omega)}) d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

برای سادگی، به جای عبارت‌های $\tilde{x}(e^{j\omega})$ و $\tilde{y}(e^{j(\omega' - \omega)})$ به ترتیب از عبارت‌های $x(\omega)$ و $y(\omega' - \omega)$ نیز به جای عبارت $\tilde{w}(e^{j\omega'})$ از عبارت $w(\omega')$ استفاده شده است. در نتیجه‌ی جایگذاری‌های ذکر شده، رابطه ۱۳ به شکل رابطه ۱۴ در می‌آید:

$$w(\omega') = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) y(\omega' - \omega) d\omega \quad (14)$$

که در آن با میل دادن ω' به سمت مقدار صفر، رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \lim_{\omega' \rightarrow 0} w(\omega') &= \lim_{\omega' \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) y(\omega' - \omega) d\omega \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) y(-\omega) d\omega = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega) y^*(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن، $(\cdot)^*$ عملگر مزدوج است. به دلیل رابطه‌ی میان ω' و $z (z = e^{j\omega'})$ ، در صورتی که ω' به سمت صفر میل داده شود، مقدار z نیز به سمت ۱ حرکت خواهد کرد. در نتیجه، به دلیل ارتباط میان $\tilde{w}(z)$ و $\tilde{w}(z)_{z=e^{j\omega'}}$ و $w(\omega')$ ، رابطه ۱۶ به دست می‌آید:

$$\lim_{z \rightarrow 1} \tilde{w}(z) = \lim_{\omega' \rightarrow 0} w(\omega') \quad (16)$$

شده، نرمال ترین آزمایش موجود گفته می شود. برای تعیین نرمال ترین آزمایش در سازی سالم، ماتریس $X = [x_1, \dots, x_{NT}]$ ، که حاوی آزمایش های مختلف از سیگنال پاسخ سازه (x) است، در نظر گرفته می شود. که در آن i شماره بندی آزمایش های موجود است، یک متغیر عمودی است، که نمونه های زمانی سیگنال پاسخ سازه در آزمایش نام را در خود جای داده است. تعداد آزمایش های انجام شده برابر NT است. مقدار ویژگی $\rho_{x_i x_j}$ برای هر دو سیگنال موجود در ماتریس X ($i, j = 1, 2, \dots, NT$) به دست می آید. با استفاده از رابطه ی ۳۱، میزان انحراف ویژگی های به دست آمده، که نسبت به سیگنال x_i محاسبه شده اند، مشخص می شود:

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^{NT} |\phi_{x_i x_j}|^2 \quad (31)$$

که در آن، $\phi_{x_i x_j}$ زاویه ی ویژگی $\rho_{x_i x_j}$ است. شماره ی آزمایشی از ماتریس X ، که کمترین مقدار را در خروجی تابع $F(\cdot)$ به دست دهد، با i_{norm} مشخص و به عنوان شماره ی نرمال ترین آزمایش در نظر گرفته می شود. از این پس، ویژگی ρ فقط نسبت به نرمال ترین آزمایش موجود در حالت سالم از سازی مورد پایش محاسبه می شود.

۴. الگوریتم پیشنهادی شناسایی آسیب

در بخش کنونی، بر پایه ی روش های یادگیری بدون نظارت و با استفاده از ویژگی نوین استخراج شده (ρ) ، به اجرای سطوح مختلف شناسایی آسیب پرداخته شده است (شکل ۱). مطابق این شکل، با استفاده از تحلیل سری زمانی، توابع مشخصه ی بسامدی برای سیگنال های اندازه گیری شده از سازی سالم به دست می آیند. سپس، با استفاده از توابع به دست آمده، ویژگی های حساس به آسیب محاسبه می شوند. با بهره گیری از ویژگی های استخراج شده از سازی سالم، یک محدوده ی آستانه، که نشان دهنده ی رفتار سازه در حالت سالم است، به دست می آید.

برای بررسی وضعیت یک سازی نامعلوم، توابع مشخصه برای سیگنال های اندازه گیری شده از آن سازه محاسبه می شوند. سپس، با استفاده از توابع مشخصه ی سازه در دو حالت سالم و نامعلوم، ویژگی های حساس به آسیب برای سازی نامعلوم به دست می آیند. در این جا، با مقایسه ی ویژگی های استخراج شده از سازی نامعلوم و آستانه یی که برای سازی سالم تعیین شده است، وجود آسیب و مکان آن تعیین می شود. در ادامه، ابتدا روش مورد استفاده برای تشخیص وجود آسیب در سازه و پس از آن، توضیحات مکان یابی آسیب بر اساس ویژگی استخراج شده ارائه شده است.

۴.۱. تشخیص آسیب با استفاده از زاویه ی ویژگی $\rho(\phi)$

هنگامی که آسیبی به سازه وارد شود، خواص بسامدی پاسخ از جمله فاز آن تغییر می یابد و تغییر فاز سیگنال موجب تغییر در زاویه ی ویژگی $\rho(\phi)$ می شود. یکی از راه های قابل اطمینان در تشخیص آسیب، تعیین آستانه یی است که سلامتی سازه را در وضعیت های گوناگون نشان می دهد و بر اساس تغییرات ϕ در سازی سالم مشخص می شود. برای تعیین آستانه ی سلامتی، مقدار ϕ برای تمام آزمایش های موجود از سازی سالم نسبت به نرمال ترین آزمایش از حالت سالم محاسبه می شود. در این صورت، یک محدوده برای تغییر ϕ ، که با ϕ_{limit} نمایش داده می شود، به دست می آید. در صورتی که آسیبی به سازه وارد شود، مقدار ϕ از آستانه ی سلامتی خارج

رابطه ی ۲۶، نشان دهنده ی معادله ی ضریب همبستگی میان متغیرهای x_c و y_c در حوزه ی بسامد است و در آن، مقدار ضریب همبستگی نه فقط به اندازه ی دو متغیر x_c و y_c در حوزه ی بسامد وابسته است، بلکه به اختلاف فاز میان آن دو نیز بستگی دارد.

۳.۳. استخراج ویژگی نوین

در روابط پیشین، با فرض حقیقی بودن توابع $\tilde{x}(t)$ و $\tilde{y}(t)$ ، می توان نتیجه گرفت که توابع $a_x(\omega)$ و $a_y(\omega)$ بر روی محور ω زوج و توابع $\phi_x(\omega)$ و $\phi_y(\omega)$ نیز فرد هستند.^[۲۱] در نتیجه، انتگرال موجود در رابطه ی ۲۶ به شکل رابطه ی ۲۷ تجزیه می شود:

$$\begin{aligned} corr_{xy} = & \int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega) a_y(\omega) e^{j(\phi_x(\omega) - \phi_y(\omega))} d\omega \\ & + \int_{\pi}^{\pi} a_x(\omega) a_y(\omega) e^{j(\phi_x(\omega) - \phi_y(\omega))} d\omega \end{aligned} \quad (27)$$

که در آن، حاصل انتگرال مرتبط با بخش منفی محور ω برابر مزدوج حاصل انتگرال در بخش مثبت محور ω است. به همین دلیل، فقط بخش حقیقی باقی می ماند، و بخش موهومی آن صفر می شود. بخش های حقیقی و موهومی هر یک از انتگرال های موجود در رابطه ی ۲۷ در روابط ۲۸ و ۲۹ ارائه شده اند:

$$\int_{-\pi}^{\pi} a_x(\omega) a_y(\omega) e^{j(\phi_x(\omega) - \phi_y(\omega))} d\omega = \alpha_{xy} - j\beta_{xy} \quad (28)$$

$$\int_{\pi}^{\pi} a_x(\omega) a_y(\omega) e^{j(\phi_x(\omega) - \phi_y(\omega))} d\omega = \alpha_{xy} + j\beta_{xy} \quad (29)$$

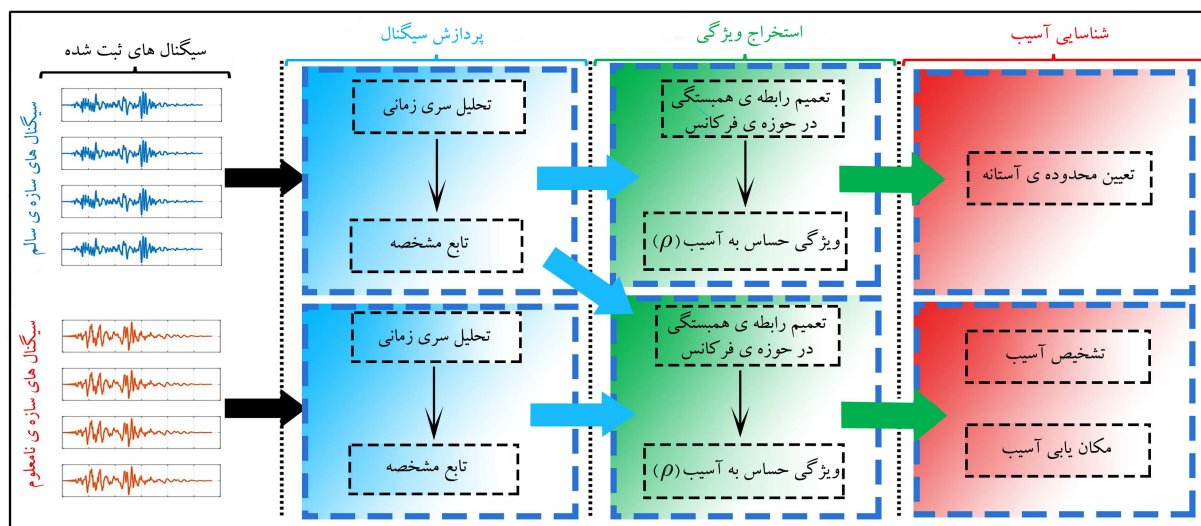
که در آن، α_{xy} و β_{xy} به ترتیب با بخش های حقیقی و موهومی هر یک از انتگرال های بالا در ارتباط هستند. ویژگی نوین، که با ρ_{xy} نمایش داده می شود، با استفاده از دو مقدار ذکر شده قابل استخراج است (رابطه ی ۳۰):

$$\rho_{xy} = 2\alpha_{xy} + 2j \times \beta_{xy} \quad (30)$$

با توجه به روابط ۲۷ الی ۳۰، به راحتی می توان دریافت که بخش حقیقی ویژگی ρ_{xy} ، همان ضریب همبستگی میان متغیرهای x_c و y_c است؛ به عبارت دیگر، $corr_{xy} = 2\alpha_{xy}$. با این حال، بخش موهومی ویژگی مذکور $(2\beta_{xy})$ ، اطلاعات جدیدی را از ارتباط دو متغیر x_c و y_c با یکدیگر در اختیار قرار می دهد. اگر دو متغیر x_c و y_c در حوزه ی زمان، ضریبی ثابت و مثبت از یکدیگر باشند ($a > 0$ و $y_c(t) = ax_c(t)$)، آنگاه فازهای دو متغیر در حوزه ی بسامد ($\phi_y(\omega)$ و $\phi_x(\omega)$) با یکدیگر برابر خواهند بود و اختلاف آن ها برابر صفر می شود. در نتیجه، بخش موهومی ویژگی نوین $(2\beta_{xy})$ حذف می شود و بخش حقیقی که ضریب همبستگی را نشان می دهد، برابر ۱ (همبستگی کامل) می شود. در وضعیتی دیگر، اگر دو متغیر x_c و y_c ناهمبسته ی کامل ($corr_{xy} = 0$) باشند، آنگاه ویژگی ρ_{xy} یک عدد کاملاً موهومی خواهد بود. برای سادگی بیشتر، در مطالعه ی حاضر، بخش های حقیقی و موهومی ویژگی نوین (ρ) به ترتیب با α و β نمایش داده شده اند.

۴.۳. تعیین نرمال ترین آزمایش

به دلیل عدم قطعیت هایی که در شرایط اندازه گیری بر سیگنال های ثبت شده اعمال می شوند، ویژگی های استخراج شده از مقدار حقیقی خود انحراف پیدا می کنند؛ که برای رفع آن، ویژگی های حساس به آسیب با استفاده از آزمایشی به دست می آیند که کمترین انحراف را با توجه عدم قطعیت های موجود داشته باشند. به آزمایش اشاره



شکل ۱. فلوجارت اجرایی روش آسیب شناسی پیشنهادی.



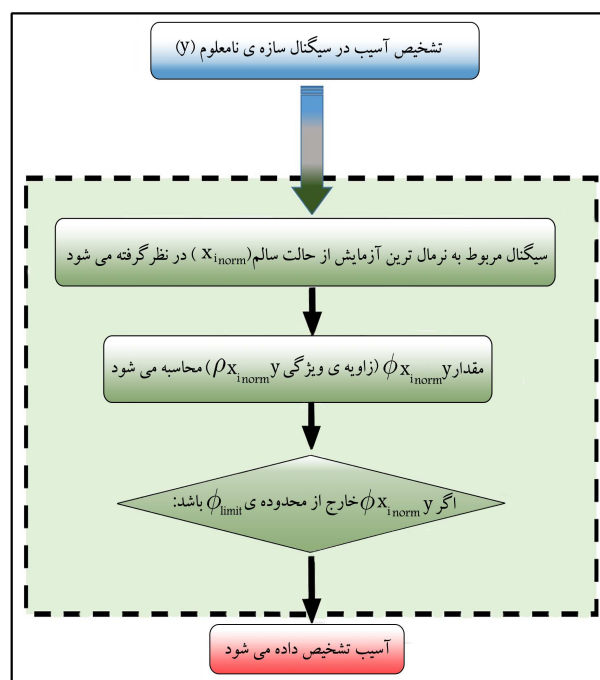
شکل ۳. نمای کناری پل S101 در حین اجرای آزمایش های آسیب شناسی. [۳۹].

تغییر بیشتری را نسبت به ویژگی های استخراج شده از دیگر بخش های سازه دارد. [۸] در بخش کنونی، از مقدار حقیقی ویژگی $\rho(\alpha)$ که نشان دهنده ضریب همبستگی میان سیگنال های سازه آسیب دیده و سازه سالم است، برای مکان یابی آسیب استفاده می شود. در مکان آسیب، مقدار α عددی منفی خواهد بود. بنابراین هر حسگرگی که بخش حقیقی ویژگی ρ برای آن منفی باشد، مکان آسیب شناخته می شود.

۵. سازه ی مطالعاتی: پل S101

در بخش حاضر، یک سازه ی مقیاس کامل واقعی (پل S101) مطالعه شده است، تا قابلیت اطمینان و توانمندی های روش نوین در شناسایی آسیب سازه های دنیای واقعی ارزیابی شود. پل S101، که یک سازه ی بتنی پیش تنیده است، در اوایل سال ۱۹۶۰ بر روی یک بزرگراه ۴ - خطه در اتریش احداث شده است. [۳۹] پل S101، از یک قاب سه بخشی تشکیل شده است، که بخش میانی آن به طول ۳۲m و دو بخش کناره ی آن به طول ۱۲m هستند و پهنای عرضی آن نیز برابر ۷٫۲m است. نمای کناری پل S101، در شکل ۳ مشاهده می شود.

به منظور بررسی رفتار سازه در وضعیت آسیب دیدگی، چند آزمایش آسیب زای



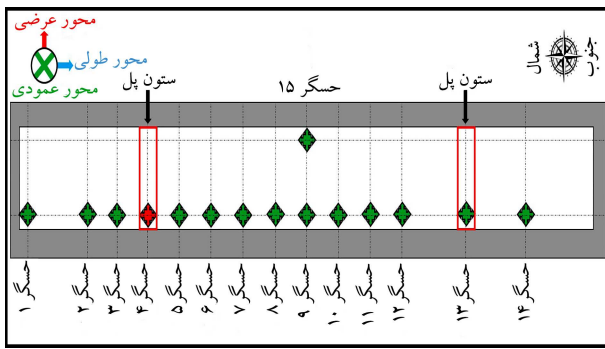
شکل ۲. فلوجارت تشخیص آسیب در سیگنال های ثبت شده از یک حسگر خاص.

می شود. در نتیجه، وجود آسیب در سازه تشخیص داده می شود. در شکل ۲، فلوجارت تشخیص آسیب با استفاده از سیگنال ثبت شده توسط یک حسگر مشاهده می شود. در صورتی که تعداد حسگرهای سازه بیشتر از ۱ باشد، عملیات تشخیص آسیب برای هر حسگر به صورت جداگانه اجرا می شود. به دلیل محلی بودن ویژگی آسیب، اگر آسیب در یک حسگر تشخیص داده شود، سازه ی بررسی شده، آسیب دیده قلمداد می شود.

۲.۴. تعیین مکان آسیب با استفاده از بخش حقیقی ویژگی $\rho(\alpha)$ ، به دلیل خواص محلی آسیب، مقدار ویژگی استخراج شده از سیگنال مکان آسیب،

جدول ۱. مراحل مختلف از سناریوی آسیب‌زای اول و ویژگی‌های هر مرحله. [۴۳ و ۳۹]

مرحله	شرح عملیات	اثر اجرای عملیات در سازه
A	شروع عملیات برش ستون	هیچ‌گونه اثری از رخداد ترک و یا افزایش ترک‌های موجود مشاهده نشد.
B	انتهای عملیات برش ستون (برش یک قطعه از ستون به ضخامت ۵ cm)	ایجاد یک مفصل (درجه آزادی) اضافه دقیقاً در بالای محل فونداسیون
C	گام اول از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان ۱ cm پایین آورده شد. سر و صدای ملایم توسط پل ایجاد شد.
D	گام دوم از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان ۲ cm پایین آورده شد. یک نشست ۲۱ mm در وسط پل مشاهده شده است.
E	گام سوم از پایین آوردن ستون به میزان ۱ cm	ستون به میزان تقریباً ۳ cm پایین آورده شده است. در این حالت سختی ستون به حد کشسانی بحرانی رسید و ترک‌های افقی در ستون مجاور مشاهده شد.
F	جاسازی صفحات فولادی	-
G	بازگرداندن ستون به وضعیت اولیه و ترمیم آن	ترمیم شدن ترک‌های بوجود آمده



شکل ۴. شماتیک نمای قرارگیری حسگرها بر روی عرشه‌ی پل. [۴۳]

پس از پایین آوردن ستون در مرحله‌ی E، پل به حد کشسانی بحرانی خود نزدیک شده است. همچنین، ترک‌های افقی در ستون مجاور ایجاد شده است. به دلیل جلوگیری از پارگی اتصال‌های المان‌های پل، از پایین آوردن ستون به میزان بیشتر صرف‌نظر شد. بنابراین، می‌توان گفت که آسیب وارده به حد نهایی رسیده و سازه تحت آسیب با شدت بالا قرار گرفته است. در مراحل F و G، ستون به وضعیت اولیه‌اش برگردانده و با استفاده از صفحات فولادی، استوار و ترمیم شد.

برای اندازه‌گیری شتاب بخش‌های مختلف سازه، از یک سیستم اندازه‌گیری BRIMOS®، که شامل یک شبکه‌ی دائمی از حسگرهای شتاب‌سنج بوده است، [۴۳] استفاده و شتاب سازه در ۱۵ مکان مختلف و در سه محور طولی، عرضی و عمود بر سازه‌ی پل اندازه‌گیری شده است. شماتیک مکان قرارگیری حسگرها در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، سیگنال‌های مکان آسیب توسط حسگر ۴ اندازه‌گیری شده‌اند. بسماد اندازه‌گیری و مدت زمان ثبت سیگنال برای همه‌ی حسگرها یکسان و به ترتیب برابر ۵۰۰ Hz و ۳۳۰ s بوده است. در مجموع، ۷۱۴ فایل داده، که هر یک حاوی ۴۵ سیگنال با تعداد نمونه‌های ۱۶۵۰۰۰ بوده‌اند، جمع‌آوری و ذخیره شده‌اند. تغییر شرایط محیطی پل به دلیل زمان فصل اجرای عملیات‌ها و نیز ابری بودن روزهای آزمایش بسیار ناچیز و به طور کلی، در طول اجرای آزمایش‌ها،

پیش‌رونده توسط یک شرکت اتریشی به نام VCE، طی روزهای دهم تا دوازدهم ماه دسامبر ۲۰۰۸ انجام شده است. به صورت کلی، آزمایش‌های آسیب‌زا در دو مرحله انجام شده‌اند: در مرحله‌ی اول، یکی از ۴ ستون سازه تحت یک آسیب جدی قرار گرفته و در محل اتصال پایه به زمین، یک بریدگی عرضی ایجاد شده است. در این سناریوی آسیب‌زا، که از اطلاعات آن در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است، یکی از چهار ستون پل به صورت عرضی و از پایه‌ی ستون برش خورده و سپس ستون پایین آورده شده است. با اجرای سناریوی اخیر، یک تغییر اساسی در سیستم جهانی پل اعمال شده است؛ چرا که یک مفصل (درجه آزادی) اضافه درست بالای فونداسیون پل در محل بریدگی ایجاد شده است. در آغاز عملیات اخیر، با یک برش اولیه، ستون از پایه‌ی متصل به زمین و سپس، در برش دوم، یک قطعه از ستون به ضخامت ۵ cm جدا شده است. پس از آن، ستون طی سه گام متوالی به میزان ۳ cm (در هر گام به میزان ۱ cm) پایین آورده شده است. در طی اجرای مراحل، از یک جک هیدرولیک استفاده شده است، تا سختی سازه از حد کشسانی خود خارج نشود و اتصال‌های پل، پارگی پیدا نکنند. پس از اجرای سناریوی آسیب‌زای اول، ستون آسیب‌دیده به وضعیت اولیه‌ی خود برگشت و با استفاده از صفحات فولادی محافظ در جای خود استوار و ترمیم شده است. در جدول ۱، اطلاعات مربوط به سناریوی آسیب‌زای اول از سازه‌ی پل S۱۰۱ ارائه شده است.

مطابق گزارش ارائه شده توسط شرکت VCE، در انتهای مراحل A و B، اثر قابل توجهی از آسیب در سازه و نیز پاسخ‌های آن مشاهده نشده است. [۴۳] همچنین، نتایج پژوهش‌های انجام گرفته، [۳۹ و ۴۳] نشان می‌دهند که شاخص آسیب برای دو مرحله‌ی A و B، نزدیک به وضعیت سالم از سازه است. با این حال، پس از اجرای مرحله‌ی C، یک صدای ملایم از پایین آمدن عرشه‌ی پل تولید شد. در نتیجه، می‌توان شدت آسیب وارده به سازه را در مرحله‌ی C، پایین در نظر گرفت. پس از مرحله‌ی D، یک نشست ۲۱ mm در وسط پل، که نشان‌دهنده‌ی واکنش درونی پل است، مشاهده شد. از این رو، می‌توان گفت که در مرحله‌ی D، یک آسیب با شدت متوسط به سازه اعمال شده است.

جدول ۲. سناریوهای مختلف برای حالت‌های سالم و آسیب دیده از پل S101. [۴۳]

سناریو	توضیح	وضعیت
الف	قبل از شروع عملیات آسیب‌زا	سازه‌ی سالم
ب	مرحله‌ی C از جدول ۱	آسیب با شدت پایین
ج	مرحله‌ی D از جدول ۱	آسیب با شدت متوسط
د	مرحله‌ی E از جدول ۱	آسیب با شدت بالا
هـ	مرحله‌ی G از جدول ۱	سازه‌ی سالم

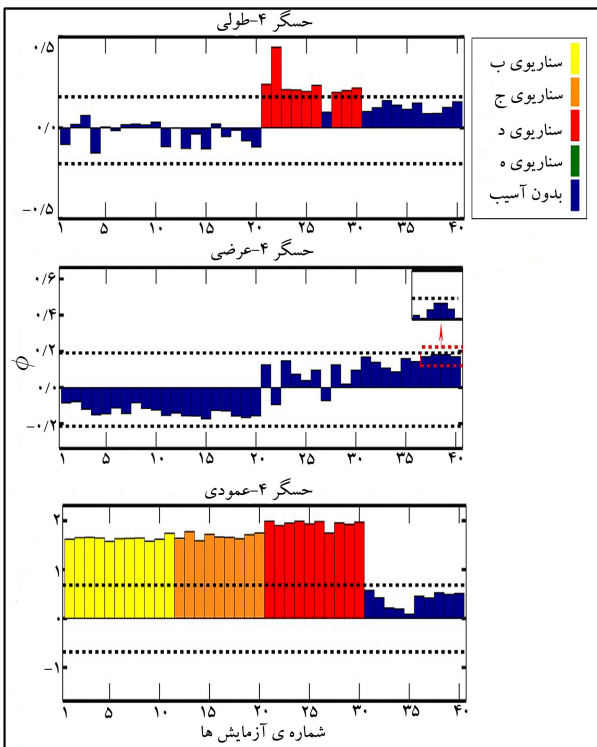
یک شرایط ثابت بر سازه‌ی پل حاکم بوده است. علاوه بر نوبت شرایط اندازه‌گیری، که جزء جدا نشدنی از هر آزمایش است، دو منبع نویزی دیگر در پاسخ‌های سازه تأثیرگذار بوده‌اند. هنگام اجرای عملیات‌ها، جاده در یکی از دو طرف پل باز بوده و بنابراین، سیگنال‌های پاسخ شتاب سازه تحت تأثیر بارهای دینامیکی ناگهانی و مزاحم، همچون ترافیک ماشین‌آلات سنگین قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن، در نزدیکی طرف دیگر جاده که بسته بود، عملیات‌های ساخت و ساز جریان داشته است. از این رو، اغتشاش‌های مختلفی بر روی پاسخ‌های شتاب اعمال شده‌اند.

برای ارزیابی عملکرد روش شناسایی آسیب پیشنهادی، با استفاده از اطلاعات سازه‌ی سالم و همچنین مراحل ارائه شده در جدول ۱، پنج سناریوی مختلف برای حالت‌های سالم و آسیب دیده از سازه‌ی پل انتخاب شده‌اند، که اطلاعات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مطابق جدول ۲، سناریوی الف مربوط به حالت سازه قبل از اجرای عملیات آسیب‌زای اول است. از سناریوی الف، به‌عنوان حالت عادی و سالم از سازه‌ی پل و از سیگنال‌های آن برای تعیین آستانه‌ی سلامتی سازه (ϕ_{limit}) استفاده می‌شود. تعداد آزمایش‌های استفاده شده در سناریوی الف برابر ۵۰ است. سناریوهای ب، ج و د نیز به ترتیب مراحل C، D و E از جدول ۱ هستند؛ که در آن‌ها، ستون پل پایین آورده می‌شود. در سناریوهای اخیر، شدت آسیب رفته‌رفته افزایش می‌یابد. سناریوی هـ نیز مرحله‌ی G از جدول ۱ است. وضعیت سازه در سناریوی هـ، سالم است. از سناریوهای ب تا هـ، به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی در تعیین وضعیت دقیق سازه‌ی پل استفاده می‌شود. تعداد آزمایش‌های بررسی شده در هر یک از سناریوهای مذکور برابر ۱۰ است. قابل توجه است که اطلاعات دینامیکی سازه‌ی پل، که شامل سیگنال‌های زمانی ثبت شده از سازه است، از طریق نوشتارهای دوهار ۲۳ و همکاران (۲۰۱۴) [۳۹] و هیل ۲۴ و همکاران (۲۰۱۱) [۴۳] قابل دسترسی است.

۱.۵. نتایج تشخیص آسیب

برای تشخیص آسیب در سازه‌ی پل S101، مقدار ϕ (زاویه‌ی ویژگی ρ) برای سناریوهای مختلف آسیب برای حسگر ۴ در جهت‌های طولی، عرضی و عمودی محاسبه شده است (شکل ۵). خطوط سیاه‌رنگ در هر نمودار بیانگر حدود بالا و پایین آستانه‌ی ϕ_{limit} برای هر یک از حسگرها هستند. مقادیر بازه‌های ϕ_{limit} برای حسگر ۴ در محورهای طولی، عرضی و عمودی به ترتیب برابر [۰٫۱۷۱، ۰٫۱۹۶]، [۰٫۱۹۱، ۰٫۲۱۴] و [۰٫۶۸۳، ۰٫۶۸۱] هستند. دلایل تفاوت در مقادیر بازه‌های مذکور آن است که رفتار مودی سازه در حسگرهای مختلف و در محورهای طولی، عرضی و عمودی با یکدیگر متفاوت است. در نتیجه، شدت انحراف‌هایی که به‌دلیل گوناگون، اعم از تغییرات دمایی جزئی، اغتشاش‌های خارجی و نوبت اندازه‌گیری بر پاسخ مودهای مختلف از سازه اعمال می‌شود، متفاوت است. با توجه به شکل ۵، در سناریوهای ب، ج و د، مقادیر ϕ برای حسگر ۴- عمودی

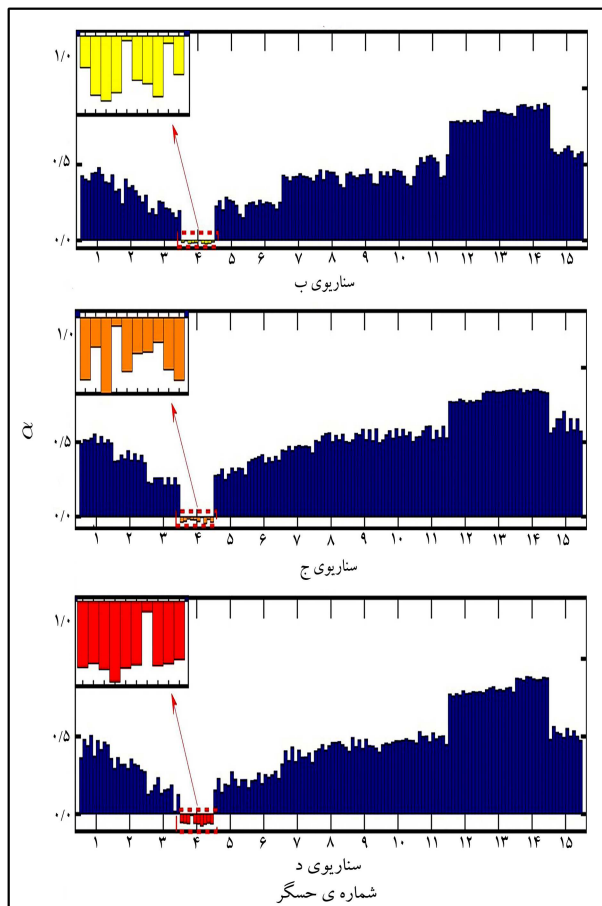


شکل ۵. نتایج تشخیص آسیب در پل S101 با استفاده از روش پیشنهادی.

از حد بالای ϕ_{limit} خارج شده است. در نتیجه، آسیب موجود در سه سناریوی ذکر شده، تشخیص داده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در نمودارهای مربوط به حسگرهای ۴- طولی و ۴- عرضی، می‌توان مشاهده کرد که در دو حسگر اخیر، آسیب تأثیر کمی در مقدار ϕ داشته است؛ به گونه‌ی که در آزمایش‌های سناریوهای ب و ج، مقدار ϕ در بازه‌ی ϕ_{limit} قرار گرفته است. با این حال، در سناریوی د، که شدت آسیب بالاست، مقدار ϕ در حسگر ۴- طولی از محدوده‌ی آستانه خارج شده است. این موضوع نشان می‌دهد که آسیب رخ داده، مودهای عمودی پل را بیشتر از مودهای طولی و عرضی تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که آسیب در سازه‌ی پل S101 با برش مقطعی یکی از ستون‌ها رخ داده است، کاملاً روشن است که اثر آن در پاسخ مودهای عمودی بیشتر از پاسخ مودهای طولی و عرضی مشاهده شده است.

در رابطه با سناریوی هـ، که سازه در وضعیت تعمیر شده و سالم قرار دارد، هیچ‌گونه آسیبی توسط حسگرهای ۴- طولی، عرضی و عمودی تشخیص داده نشده است. مطابق نتایج به دست آمده برای سناریوی هـ در شکل ۵، برای هر سه حسگر، مقدار ϕ در داخل آستانه‌ی سلامتی (ϕ_{limit}) قرار گرفته است. بنابراین، روش پیشنهادی به خوبی توانسته است وضعیت دقیق سازه‌ی پل S101 را در وضعیت‌های آسیب دیده و سالم تشخیص دهد.

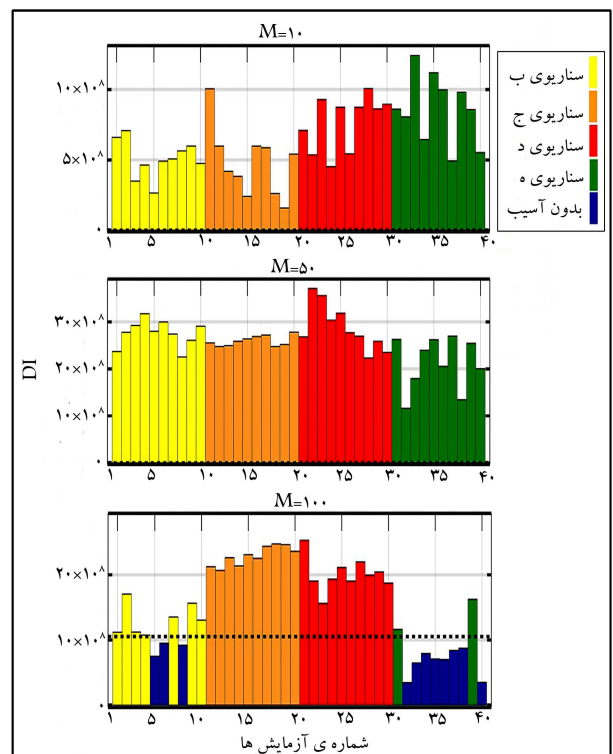
برای مقایسه‌ی توانمندی‌های روش پیشنهادی در تشخیص آسیب، نتایج تشخیص آسیب برای سناریوهای ب تا هـ توسط روش پروین (۲۰۲۱) نیز محاسبه شده است. در روش پروین، ضرایب کپستال بسامدی میل (MFCC) از سیگنال‌های مختلف سازه به دست می‌آید و با بررسی آستانه‌ی تعیین شده توسط حالت سالم از سازه (T)، آسیب تشخیص داده می‌شود. [۴۰] در استخراج ضرایب MFCC، لازم است که اندازه‌ی قاب زمانی سیگنال (M) مشخص شود. به‌منظور بررسی کامل نتایج تشخیص آسیب توسط روش پروین، از مقادیر مختلف پارامتر M برابر



شکل ۷. مقدار α برای آزمایش‌های گوناگون از سناریوهای آسیب در حسگرهای مختلف.

شده است و در حسگرهای دیگر مقدار α مثبت بوده است. این موضوع بیانگر آن است که در سناریوهای گوناگون، مکان آسیب در سازه‌ی پل فقط حسگر ۴ است.

به‌عنوان مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی نویسندگان پژوهش حاضر با پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱) [۲۴] مقادیر شاخص آسیب (DI) برای آزمایش‌های سناریوهای ب، ج و د به دست آمده‌اند. در پژوهش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، مقدار شاخص آسیب بر اساس ۱۹ ویژگی آماری، مانند: انرژی، عامل شکل، عامل کِرسِت و ... که از سیگنال پاسخ سازه استخراج شده‌اند، محاسبه شده است. در روش حاضر، هر حسگری که بیشترین مقدار شاخص آسیب را داشته باشد، به‌عنوان محتمل‌ترین مکان آسیب انتخاب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص مکان آسیب برای حسگرهای ۱- طولی و ۴- عمودی محاسبه شده است؛ که مطابق آن، با توجه نتایج به دست آمده در سناریوهای مختلف، مقدار DI برای حسگر ۱- طولی بیشتر از مقدار مربوط به حسگر ۴- عمودی است. بنابراین در آزمایش‌های مختلف، حسگر ۱- طولی با احتمال بالاتری مکان آسیب است. این در حالی است که با توجه به شکل ۴، حسگر ۱ در مکان دوری از آسیب و حسگر ۴، نزدیک‌ترین مکان را به محل وقوع آسیب داشته‌اند. از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده توسط روش پیشنهادی در پژوهش حاضر و روش آلوس و کیوری، توانمندی روش پیشنهادی در تعیین مکان آسیب برای سازه‌ی واقعی پل S۱۰۱ به اثبات می‌رسد.



شکل ۶. نتایج تشخیص آسیب با استفاده از مقادیر مختلف برای پارامتر M .

با ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ استفاده شده است. مقدار آستانه‌ی سلامتی Γ ، که به ازاء مقادیر مختلف پارامتر M به دست آمده است، به ترتیب برابر ۳۲/۸، ۷۰/۲ و ۱۰۵۲۱۵۸۴۰/۱۲ بوده است. نتایج تشخیص آسیب توسط روش پروین در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

نتایج ارائه شده برای پارامتر M برابر با ۱۰ و ۵۰ نشان می‌دهند که روش پروین به خوبی می‌تواند آسیب سناریوهای ب، ج و د را تشخیص دهد. با این حال، افزایش مقدار M منجر به عدم توانایی روش در تشخیص آسیب‌های با شدت پایین می‌شود؛ به طوری که به ازاء $M = ۱۰۰$ ، در برخی از آزمایش‌های سناریوی ب، همچون آزمایش‌های شماره‌ی ۵، ۶ و ۸، آسیب سازه قابل تشخیص نیست. در رابطه با سناریوی ه، افزایش مقدار پارامتر M موجب بهبود نتایج در شناسایی وضعیت سازه در سناریوی ه شده است؛ با این حال، حتی به ازاء $M = ۱۰۰$ ، همچنان در برخی آزمایش‌های سناریوی ه، سازه به اشتباه، آسیب دیده تشخیص داده شده است. این در حالی است که سازه‌ی پل S۱۰۱ در سناریوی ه تعمیر شده و آسیبی به سازه وارد نشده است.

۲.۵. نتایج مکان‌یابی آسیب

برای تعیین مکان آسیب در سازه‌ی پل، بخش حقیقی و بزرگی $(\alpha)\rho$ ، که برای حسگرهای مختلف به دست می‌آید، بررسی می‌شود. مقدار α برای حسگرهای مختلف در سناریوهای آسیب‌دیدگی (ب، ج و د) به دست آمده و در شکل ۷ نمایش داده شده است. به دلیل اثر بسزای آسیب در مودهای عمودی سازه، فقط نتایج به دست آمده از حسگرهای محور عمودی نشان داده شده‌اند. مقدار α برای حسگرهای طولی و عرضی در تمامی آزمایش‌های سناریوهای ب، ج و د مثبت بوده و به همین منظور از آوردن آن‌ها در شکل ۷ پرهیز شده است. مطابق نتایج شکل ۷، در هر یک از سناریوهای آسیب، مقدار α فقط برای حسگر ۴ منفی

تعیین مکان آسیب در روش پیشنهادی حاضر به راحتی انجام می پذیرد. در صورت آسیب دیدگی سازه، بخش حقیقی ویژگی استخراج شده از سیگنال مرتبط با مکان آسیب (α)، مقداری منفی است. با این حال، در روش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، ویژگی های حساس به آسیب از سیگنال های آغشته به نویز استخراج می شوند. نویز موجود در سیگنال ها موجب می شود که ویژگی های به دست آمده، علاوه بر آنکه به آسیب حساس باشند، به نویز نیز از خود حساسیت نشان دهند. در این صورت، اثر منفی نویز پاسخ در نتایج شناسایی آسیب مشاهده می شود. مطابق شکل ۸، مقدار شاخص DI در حسگر ۱، نیز که از مکان آسیب دور است، بیشتر از مقدار به دست آمده برای حسگر ۴ است. به عبارت دیگر، حسگر ۱ با احتمال بیشتری نسبت به حسگر ۴ مکان آسیب است. در مقایسه با روش آلوس و کیوری (۲۰۲۱)، ویژگی نوین ρ ، حساسیت کمتری به نویز موجود در پاسخ سیگنال دارد. این برتری به دلیل حذف آثار نویز منبع از تابع مشخصه سیگنال پاسخ است. از مقایسه ی نتایج شکل های ۷ و ۸، می توان دریافت که شیوه ی پیشنهادی نوشتار حاضر، در مکان یابی آسیب با دقت بیشتری عمل می کند و عملکرد درستی در مکان یابی دقیق آسیب دارد.

۷. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک روش استخراج ویژگی با قابلیت اطمینان بالا در برابر نویز و عدم قطعیت ارائه شده است، که نوآوری های آن عبارتند از:

-- با محاسبه ی تابع مشخصه ی بسامدی، ویژگی های ذاتی و دینامیکی سازه از نویز پاسخ جدا می شوند؛

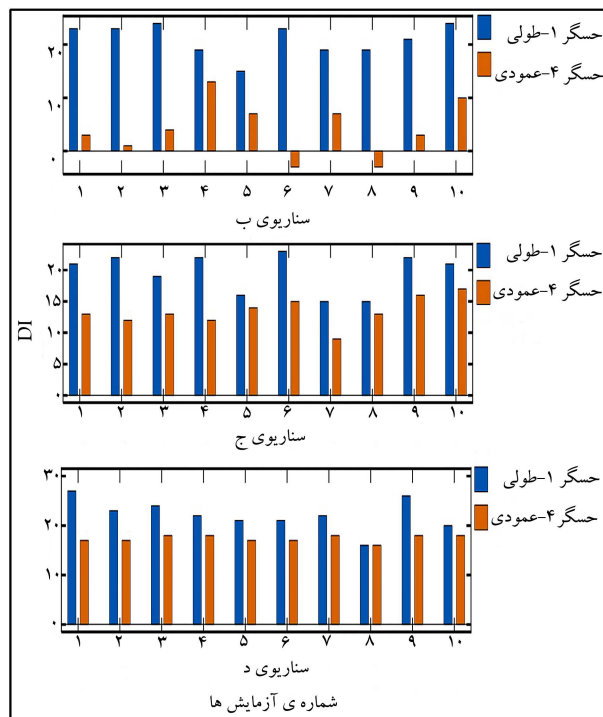
-- با تعمیم رابطه ی همبستگی در حوزه ی بسامد، یک ویژگی دو بُعدی با مقداری مختلط (ρ) به دست می آید، که به صورت هم زمان میزان همبستگی و ناهمبستگی دو متغیر را نشان می دهد. علاوه بر آن، ویژگی استخراج شده به آسیب سازه بسیار حساس است.

-- با بررسی ابعاد مختلف از ویژگی استخراج شده، سطوح مختلف آسیب شناسایی می شوند. با بررسی زاویه ی ρ (ϕ)، وجود آسیب در سازه تشخیص داده می شود. همچنین، مکان آسیب با بررسی بخش حقیقی ρ (α) به راحتی تعیین می شود؛

-- قابلیت اطمینان و توانمندی های ویژگی پیشنهادی در شناسایی آسیب سازه های عمرانی با بررسی یک سازه ی معیار واقعی (سازه ی پل S101) ارزیابی شده است. دستاوردهای سطوح مختلف از شناسایی آسیب در سازه ی پل S101، توانایی بالای روش پیشنهادی را در رابطه با بررسی وضعیت سازه های واقعی نشان می دهند. همچنین به منظور نشان دادن برتری های روش شناسایی آسیب پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش های اخیر در حوزه ی پایش سلامت، یعنی روش های پراوین (۲۰۲۱) و آلوس و کیوری (۲۰۲۱) مقایسه شده اند. آزمایش های انجام گرفته، برتری روش پیشنهادی را بر روش های ذکر شده در تشخیص آسیب سازه یی و تعیین مکان آن نشان می دهند.

پانویس ها

1. auto regressive
2. auto regressive with eXogenous input
3. auto regressive moving average



شکل ۸. مقادیر DI برای حسگرهای ۱- طولی و ۴- عمودی در سناریوهای مختلف.

۶. بحث بر نتایج

آزمایش های انجام شده در سازه ی پل نشان می دهند که روش پیشنهادی، عملکردی مقاوم در برابر تحریک های ناگهانی خارجی دارد؛ به گونه یی که می تواند آسیب سازه را در شرایطی که سازه تحت بارهای ناگهانی، همچون ترافیک و ساخت و سازهای انسانی قرار گرفته است، به خوبی تشخیص دهد. با توجه به نتایج روش پیشنهادی در شکل ۵، تشخیص وجود آسیب در سناریوهای آسیب دیده (ب، ج و د) فقط با بررسی حسگر ۴- عمودی امکان پذیر است، و نیازی به بررسی نتایج حسگرهای دیگر نیست. این در حالی است که در شیوه ی پراوین، از اطلاعات همه ی حسگرها در تشخیص آسیب استفاده می شود. بنابراین، بی نیازی به اطلاعات همه ی حسگرها، یکی از برتری های روش پیشنهادی نوشتار حاضر، بر روش پراوین است. علاوه بر آن، با توجه به نتایج شکل ۶، روش پراوین به ازاء هیچ مقداری از پارامتر M توانایی تعیین وضعیت درست از سازه ی پل را ندارد. نتایج به دست آمده برای مقادیر $M = 10^\circ$ و $M = 50^\circ$ نشان می دهند که در سناریوی ه، سازه ی پل به اشتباه آسیب دیده تشخیص داده شده است؛ در حالی که پل S101 در سناریوی ه- تعمیر شده و سازه در وضعیتی سالم قرار داشته است. اگر مقدار M افزایش یابد ($M = 100^\circ$)، این نوع خطای تشخیص کاهش می یابد؛ با این حال خطای بزرگ تری رخ می دهد. به گونه یی که در برخی آزمایش های سناریوی ب، که سازه در وضعیتی آسیب دیده قرار داشته است، آسیب قابل تشخیص نبوده است.

4. auto regressive moving average with eXogenous input
5. Alves & Cury
6. crest
7. Hoell & Omenzetter
8. Hua
9. Fang & Chen

10. Yang
11. Pavlopoulou
12. nonlinear principal component analysis
13. Matilainen
14. sliced inverse regression
15. blind source separation
16. Duran & rosál
17. Coral Reef Optimization
18. Roveri & Carcaterra
19. hilbert-huang transform
20. Yue
21. Prawin
22. moving average
23. Döhler
24. Hille
25. mel-frequency cepstral coefficient

منابع (References)

1. Ghodrati Amiri, G., Talebzadeh, M., Talebi, M. and et al. "Damage assessment in connections of moment resistant frames using Hilbert-Huang transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), pp. 3-11 (2016).
2. Entezami, A. "Structural health monitoring by time series analysis and statistical distance measures", Springer (2021).
3. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. "Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast panel building based on experimental results and numerical method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(2.2), pp. 131-147 (2021).
4. Giahi, A.M., Asgari Marnani, J., Ahmadi, H. and et al. "Investigating the effect of intensity and location of damage on modal characteristics in concrete arch dams", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(3.2), pp. 93-104 (2021).
5. Ghannadi, P. and Kourehli, S.S. "Data-driven method of damage detection using sparse sensors installation by SEREPa", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **9**(4), pp. 459-475 (2019).
6. Zhang, Z. and Sun, C. "Structural damage identification via physics-guided machine learning: a methodology integrating pattern recognition with finite element model updating", *Structural Health Monitoring*, **20**(4), pp. 1675-1688 (2021).
7. Entezami, A. and Shariatmadar, H. "An unsupervised learning approach by novel damage indices in structural health monitoring for damage localization and quantification", *Structural Health Monitoring*, **17**(2), pp. 325-345 (2018).
8. Entezami, A. and Shariatmadar, H. "Damage localization under ambient excitations and non-stationary vibration signals by a new hybrid algorithm for feature extraction and multivariate distance correlation methods", *Structural Health Monitoring*, **18**(2), pp. 347-375 (2019).
9. Svendsen, B.T., Frøseth, G.T., Øiseth, O. and et al. "A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **12**(1), pp. 101-115 (2021).
10. Darvishan, E. and Ghodrati Amiri, G. "Damage detection of structures using wavelet packet analysis and dimensionality reduction", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35.2**(1.2), pp. 85-91 (2019).
11. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Karamodin, A. "Improving feature extraction via time series modeling for structural health monitoring based on unsupervised learning methods", *Scientia Iranica*, **27**(3), pp. 1001-1018 (2020).
12. Guo, H. and Wang, Z. "Experimental study of transmission tower damage detection using time series model", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **711**(3), p.012069 (2020).
13. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Mariani, S. "Early damage assessment in large-scale structures by innovative statistical pattern recognition methods based on time series modeling and novelty detection", *Advances in Engineering Software*, **150**, p.102923 (2020).
14. Entezami, A., Shariatmadar, H. and Karamodin, A. "Data-driven damage diagnosis under environmental and operational variability by novel statistical pattern recognition methods", *Structural Health Monitoring*, **18**(5-6), pp. 1416-1443 (2019).
15. Rezaiee-Pajand, M., Entezami, A. and Shariatmadar, H. "An iterative order determination method for time-series modeling in structural health monitoring", *Advances in Structural Engineering*, **21**(2), pp. 300-314 (2018).
16. Amezcua-Sanchez, J.P. and Adeli, H. "Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures", *Archives of Computational Methods in Engineering*, **23**(1), pp. 1-15 (2016).
17. Hoell, S. and Omenzetter, P. "Improved damage detectability in a wind turbine blade by optimal selection of vibration signal correlation coefficients", *Structural Health Monitoring*, **15**(6), pp. 685-705 (2016).
18. Yu, Y., Wang, C., Gu, X. and et al. "A novel deep learning-based method for damage identification of smart building structures", *Structural Health Monitoring*, **18**(1), pp. 143-163 (2019).
19. Jalalifar, F., Shahabian Moghadam, F. and Esfahani, M.R. "Application of random decrement technique and bhattacharyya measure to damage detection under environmental and operational variability", *Modares Civil Engineering Journal*, **20**(6), pp. 115-126 (In Persian) (2020).
20. Razavi, B.S., Mahmoudkelayeh, M.R. and Razavi, S.S. "Damage identification under ambient vibration and unpredictable signal nature", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **11**(5), pp. 1253-1273 (2021).
21. Bagheri, A., Rizzo, P. and Li, K. "Ultrasonic imaging algorithm for the health monitoring of pipes", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **7**(1), pp. 99-121 (2017).
22. Vinay, V., Kumar, G.V. and Kumar, K.P. "Bearing fault component identification using information gain and machine learning algorithms", *In Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015*, 9437, pp. 162-169 (2015).

23. Zhu, X. and Rizzo, P. "Sensor array for the health monitoring of truss structures by means of guided ultrasonic waves", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **4**(3), pp. 221-234 (2014).
24. Alves, V. and Cury, A. "A fast and efficient feature extraction methodology for structural damage localization based on raw acceleration measurements", *Structural Control and Health Monitoring*, **28**(7), p.e2748 (2021).
25. Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F. and et al. "Structural damage detection method based on the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise: a model steel truss bridge case study", *Structural Health Monitoring*, **21**(3), pp.887-912 (2021).
26. Pérez, M.A., Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J.A. and et al. "High-velocity ice impact damage quantification in composite laminates using a frequency domain-based correlation approach", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **147**, p.107124 (2021).
27. Shang, Z., Sun, L., Xia, Y. and et al. "Vibration-based damage detection for bridges by deep convolutional denoising autoencoder", *Structural Health Monitoring*, **20**(4), pp. 1880-1903 (2021).
28. Hoell, S. and Omenzetter, P. "Damage detection in wind turbine blades based on time series correlations", *In 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Torino, Italy, pp. 1-10 (2015).
29. Hua, J., Zhang, H., Miao, Y. and et al. "Modified minimum variance imaging of lamb waves for damage localization in aluminum plates and composite laminates", *NDT & E International*, **125**, p.102574 (2022).
30. Fang, S.E. and Chen, S. "Model-free damage localization of structures using wavelet based grey relational analysis", *Smart Materials and Structures*, **29**(8), p.085046 (2020).
31. Yang, Z., Yu, Z. and Sun, H. "On the cross-correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(7), pp. 2918-2932 (2007).
32. Khoa, N.L., Zhang, B., Wang, Y. and et al. "Robust dimensionality reduction and damage detection approaches in structural health monitoring", *Structural Health Monitoring*, **13**(4), pp. 406-417 (2014).
33. Pavlopoulou, S., Worden, K. and Soutis, C. "Novelty detection and dimension reduction via guided ultrasonic waves: damage monitoring of scarf repairs in composite laminates", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **27**(4), pp. 549-566 (2016).
34. Matilainen, M., Croux, C., Nordhausen, K. and et al. "Supervised dimension reduction for multivariate time series", *Econometrics and Statistics*, **4**, pp. 57-69 (2017).
35. Duran-Rosal, A.M., Gutierrez, P.A., Salcedo-Sanz, S. and et al. "A statistically-driven coral reef optimization algorithm for optimal size reduction of time series", *Applied Soft Computing*, **63**, pp. 139-153 (2018).
36. Entezami, A., Sarmadi, H., Salar, M. and et al. "A novel data-driven method for structural health monitoring under ambient vibration and high-dimensional features by robust multidimensional scaling", *Structural Health Monitoring* (2020).
37. Roveri, N. and Carcaterra, A. "Damage detection in structures under traveling loads by hilbert-huang transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 128-144 (2012).
38. Yue, N. and Aliabadi, M. "Hierarchical approach for uncertainty quantification and reliability assessment of guided wave-based structural health monitoring", *Structural Health Monitoring* (2020).
39. Döhler, M., Hille, F., Mevel, L. and et al. "Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 bridge", *Engineering Structures*, **69**, pp. 183-193 (2014).
40. Prawin, J. "Breathing crack damage diagnostic strategy using improved MFCC features", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **32**(20), pp. 2437-2462 (2021).
41. Ghosh, S. "Signals and systems", Pearson Education India (2005).
42. VCE. "Progressive damage test S101 flyover reibersdorf (draft)", Tech. Report 08/2308 (2009).
43. Hille, F., Döhler, M., Mevel, L. and et al. "Subspace based damage detection methods on a prestressed concrete bridge", *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*, EURO-DYN, pp. 2304-2310 (2011).