



بررسی مدیریتی تأثیر سامانه‌های تشخیص خسارت سازه‌ای روی تخمین ارزش اطلاعات

علی بهکمال^۱، هاشم شریعتمدار^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران،
دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

shariatmadar@um.ac.ir

خلاصه

وقوع خسارت در طول عمر ساختمان‌ها و به‌طور کلی سامانه‌های سازه‌ای، امری اجتناب‌ناپذیر است. خسارت‌های سازه‌ای را می‌توان با بررسی‌های اولیه، اصلاح و ترمیم نمود و بدین ترتیب از گسترش آن و فروریختن سازه جلوگیری کرد. از سوی دیگر، تجهیز یا عدم تجهیز ساختمان‌ها به سامانه‌های نظارتی تشخیص خسارت و ارزیابی مدیریتی مزایای آن‌ها، همواره یکی از چالش‌های مهم بوده است. از اینرو، هدف از این پژوهش، پیشنهاد راهکاری کارآمد به منظور دستیابی به احتمال گسیختگی بر اساس روش‌های مبتنی بر داده با هدف ارزیابی مدیریتی پارامترهای تأثیرگذار سامانه‌های تشخیص خسارت سازه‌ای با بهره‌بردن از مفاهیم روش‌های ارزش اطلاعات می‌باشد. در این راستا، روش‌های آماری و داده‌کاوی به منظور تخمین احتمال گسیختگی سازه مجهز به سامانه‌های نظارتی تشخیص خسارت و بدون آن، پیشنهاد می‌شوند. در این رابطه‌سازی، عدم قطعیت‌های کاربردی، تأثیرات نطفه، خطاهای اندازه‌گیری، خطاهای مثبت کاذب و منفی کاذب وجود یا عدم وجود خسارت، به منظور تصمیم‌گیری بهتر برای مدیریت سازه و کاهش ریسک در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی چهارچوب پیشنهادی، از داده‌های یک تیر عددی بتنی بهره‌برده شده است. سرانجام با ارزیابی نتایج بدست آمده از دیدگاه مدیریت و مهندسی ساخت، مزایای سامانه‌های تشخیص خسارت با رویکرد کاهش هزینه و ریسک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: مدیریت ریسک، ارزش اطلاعات، سامانه‌های تشخیص خسارت، روش‌های آماری، عدم قطعیت

۱. مقدمه

امروزه سازه‌های پیچیده و بزرگی مانند پل‌ها، سازه‌های بلند مسکونی و تجاری، سدها و ساختمان‌هایی با اهمیت زیاد در سطح جهان ساخته شده و در حال بهره‌برداری هستند. این سازه‌ها از دارایی‌های با ارزش هر کشور به شمار می‌آیند. بنابراین، نگهداری و بررسی عملکرد مطلوب آن‌ها به منظور حفظ جان عمومی افراد و استفاده آبدگان از اهمیت بالایی برخوردار هستند [۱-۳]. در کشورهای پیشرفته و توسعه یافته، این سازه‌های زیربنایی، تسهیلاتی مانند شبکه خطوط حمل و نقل، فعالیت‌های صنعتی و زندگی روزمره افراد را فراهم می‌سازند. به همین دلیل در این کشورها با صرف هزینه‌های زیاد، فرآیندهای پایش سلامت و بهسازی این گونه سازه‌ها انجام می‌شود. بنابراین، نظارت بر سلامت و شناسایی آسیب‌های احتمالی در قالب پایش سلامت سازه، یکی از برنامه‌های کلان کشورهای توسعه یافته به شمار می‌آید. از سوی دیگر، زیاد شدن قدمت ساختمان‌ها و در نتیجه زوال و خرابی آن‌ها به همراه کاهش بازده سازه‌های موجود، سبب شد تا مهندسان عمران به بهبود عملکرد این گونه ساختمان‌ها روی بیاورند و با استفاده از امکانات موجود و خلق روش‌های جدید به پایش سلامت سازه‌ها و شناسایی خسارت در آن‌ها بپردازند [۴].

به‌طور کلی، تشخیص خسارت در فرآیند پایش سلامت سازه‌ها در چهار گام اصلی شامل صورت می‌پذیرد. این گام‌ها، هزینه‌های متفاوت مدیریتی و محاسباتی در بردارد و به‌طور کلی شامل تشخیص اولیه خسارت (گام ۱)، مکان‌یابی خسارت (گام ۲)، تعیین شدت خسارت (گام ۳) و پایش پینی عمر سازه بعد از وقوع خسارت (گام ۴) می‌باشند [۴]. در گام نخست، وضعیت کلی سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، بر اساس نتایج بدست آمده در این گام می‌توان به وقوع یا عدم وقوع خسارت در سازه پی برد. در گام دوم، پس از پی بردن از وقوع خسارت سازه‌ای، تلاش می‌شود تا مکان آن شناسایی شود. در ادامه، شدت خسارت در مکان شناسایی شده تخمین زده می‌شود [۵]. سرانجام، با اطلاعات بدست آمده از گام‌های پیشین می‌توان عمر باقیمانده سازه و چگونگی عملکرد آن را پیش‌بینی کرد [۶].

در زمینه‌ی بررسی ارزشمندی پایش سلامت سازه و تشخیص خسارت سازه‌ای، پژوهش‌های فراوانی از چند دهه‌ی گذشته با پیشرفت تجهیزات مورد نیاز و فرآیند پردازش سیگنال، صورت گرفته است. در زمینه شناسایی خسارت در سازه‌ها بر اساس پارامترهای مودال Stubbs و همکاران (۱۹۹۰ و ۱۹۹۹) پژوهش‌هایی در خصوص تشخیص و مکان‌یابی خسارت در سیستم‌های دینامیکی انجام دادند [۷] و [۸]. تشخیص خسارت در سازه توسط تغییر در فرکانس‌های طبیعی توسط مقاله پژوهشی Salawu (۱۹۹۷) به صورت مروری بر کارهای انجام گرفته، انجام شد [۹]. از پژوهش‌های نوین برای استخراج ویژگی‌های حساس به خسارت می‌توان به [۱۰-۱۲] اشاره کرد. در این مقاله‌ها، ضرایب الگوی کاهنده خودکار و مانده‌های الگو به عنوان ویژگی استخراج شدند. با پیشرفت و گسترش فناوری در تولید حسگرهای ارتعاشی، دستگاه‌های دریافت داده‌ها و تحلیلگرها، فرآیند ارزیابی ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه با بهره‌بردن از روش‌های احتمالاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. افزون بر این‌ها، با وجود این روش‌های توانمند در پایش سلامت سازه‌ای و نتایج کسب شده از پیاده‌سازی آنها، توجیه اجرا و مزایای این گونه سیستم‌ها نیز مورد توجه می‌باشد [۱۳-۱۷]. اخیراً بهره‌بردن از مزایای پایش سلامت سازه‌ای در طول عمر مفید سازه با استفاده از روش‌های احتمالاتی و ارزش اطلاعات، پیش از تجهیز سازه‌ها به سیستم‌های مورد نیاز، به صورت کمی و کیفی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶-۲۲]. از دیدگاه احتمالاتی، می‌توان ارزش سامانه پایش سلامت سازه را با در نظر گرفتن تفاوت بین سود یا فایده مورد انتظار از عملکرد سیستم سازه‌ای با وجود سیستم تشخیص

خسارت و سود یا فایده مورد انتظار از عملکرد همان سازه در حالی که فاقد سیستم تشخیص خسارت سازه ای است را محاسبه نمود. گفتنی است، دو حالت اشاره شده با استفاده از روابط بیزین، اطلاعات پیشین و پسین سازه و بهره بردن از احتمال گسیختگی در سازه مورد نظر قابل دستیابی می باشد. از سوی دیگر تحلیل و بدست آوردن ارزش اطلاعات سیستم تشخیص خسارت، این امکان را فراهم می سازد که در صورت دستیابی به مقدار ناچیز و یا صفر، تصمیم گیرنده یا مدیر، اجرا و پیاده سازی سیستم تشخیص خسارت سازه ای را در نظر نگیرد زیرا مقدار ناچیز ارزش اطلاعات هیچگونه اطلاعات مفیدی را فراهم نمی سازد و در مقابل سبب تحمیل هزینه اضافی تجهیزات و نیروی انسانی به پروژه مورد نظر می شود.

هدف از انجام این پژوهش، معرفی روشی کارآمد به منظور محاسبه احتمال گسیختگی سازه با روش های مبتنی بر داده می باشد. این احتمال با توجه به دانش پسین و پیشین از سازه مورد نظر یکی از مهمترین عوامل در ارزیابی ارزش اطلاعات سیستم تشخیص خسارت سازه ای می باشد. در این راستا، از روش های احتمالاتی و داده کاوی، یادگیری ماشینی و اساس داده های ارتعاشی بهره برده می شود. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در سازه های واقعی، حالت های مختلف خطای اندازه گیری و تاثیرات نوفه در نظر گرفته شده است. ابتدا، تشخیص خسارت سازه ای با روش های اساس داده های ارتعاشی و یادگیری ماشینی انجام می شود. شاخص خسارت در حالت های مختلف عدم قطعیت با بهره بردن از تحلیل مولفه های اصلی صورت تعیین می شود. به منظور دستیابی به عملکرد بهینه سیستم پایش سلامت، تاثیرات تعداد حسگر ها، به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش هزینه و ارزیابی ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه، بررسی می شود. در ادامه خط آستانه احتمالاتی به منظور تشخیص خطاهای مثبت کاذب و منفی کاذب با استفاده از مفاهیم یادگیری غیر نظارت شده محاسبه می شود. سپس، از الگوریتم خوشه بندی k-means که از روش های یادگیری غیر نظارت شده می باشد، بهره برده می شود. این روش با در نظر گرفتن شاخص های خسارت بدست آمده از حالت های مختلف سازه، احتمال گسیختگی سازه را به دست می آورد. به منظور بررسی درستی روش های پیشنهادی احتمال گسیختگی سازه در ارزیابی ارزش اطلاعات سیستم تشخیص خسارت، از یک تیر شبیه سازی شده بتنی بهره برده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که روش های پیشنهادی مبتنی بر داده و خوشه بندی به درستی احتمال های گسیختگی تیر شبیه سازی شده بتنی را با خطای قابل قبول تخمین زدند.

۲. پایش سلامت سازه با روش های مبتنی بر داده

۱.۲. تحلیل مولفه های اصلی^۱

هدف اصلی تحلیل مولفه های اصلی، توصیف تغییرات موجود در یک مجموعه از متغیرهای وابسته بردار X برحسب مجموعه های جدید از متغیرهای ناهمبسته Y ، که هر کدام ترکیبی خطی از متغیرهای بردار X هستند، می باشد. روش تحلیل مولفه های اصلی (PCA)، به عنوان روشی برای کاهش ابعاد و به عنوان یک روش کلاسیک در زمینه آمار چند متغیره مورد استفاده قرار می گیرد. این روش نحوه استفاده از آن در مراجع مورد نظر، به عنوان مثال در پژوهش Sharma (۱۹۹۶) مشاهده می شود [۲۳]، در نتیجه در اینجا به معرفی کوتاه این روش کاربردی بسنده خواهد شد. الگوریتم PCA می تواند به عنوان روشی کارآمد برای کاهش ابعاد داده ها با تصویر کردن آن ها از طریق یک تبدیل خطی و به دست دادن دستگاه مختصات کارترین جدید، مورد استفاده قرار گیرند. متغیرهای جدید حاصل از این روش، به عنوان اجزای اصلی و مقادیر این متغیرها به عنوان امتیازهای اجزای اصلی^۲ به حساب می آیند. بنابراین PCA، به عنوان روشی کاربردی در کاهش ابعاد داده ها، از طریق تبدیل خطی ورودی ها با نگاه داشتن حداکثر واریانس در اجزای اصلی و صرف نظر کردن از ترکیب داده هایی که حداقل مشارکت را در واریانس کلی داده ها دارند، رفتار می کند. لازم به ذکر است در تبدیل خطی اشاره شده، نکته ای مهم وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد؛ اجزای مربوط به واریانس حداقل ممکن است در عمل بیشتر از سایر اجزا، با شناسایی آسیب در ارتباط باشند و نباید از آن ها صرف نظر شود. در مورد کلی تر از کاهش ابعاد یا استخراج ویژگی، ممکن است روش های پیشرفته تری به منظور حفظ ویژگی های مورد نظر، به کار گرفته شود. بنابراین به عنوان روشی در کاهش ابعاد، PCA از طریق تبدیل خطی داده ها به منظور نگاه داشتن حداکثر واریانس در اجزای اصلی با صرف نظر کردن از ترکیب داده هایی که حداقل مشارکت را در واریانس کلی مجموعه داده ها دارند، عمل می کند. لازم به ذکر است در تبدیل خطی اشاره شده، نکته ای مهم وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد؛ اجزای مربوط به واریانس حداقل ممکن است در عمل بیشتر از سایر اجزا، با شناسایی آسیب در ارتباط باشند و نباید از آن ها صرف نظر شود. در مورد کلی تر از کاهش ابعاد یا استخراج ویژگی، ممکن است روش های پیشرفته تری به منظور حفظ ویژگی های حساس به خسارت سازه ای، به کار گرفته شود.

۳. احتمال گسیختگی و ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه

۱.۳. خوشه بندی (Clustering)

در این بخش از این طرح پژوهشی به معرفی کلی روش های خوشه بندی و کاربرد آن ها در روش پیشنهادی محاسبه احتمال گسیختگی سازه در ارزیابی ارزش اطلاعات در مساله تشخیص خسارت، پرداخته می شود. خوشه بندی نوعی سازماندهی داده ها و یک روش آماری مبتنی بر یادگیری بدون نظارت محسوب می شود. در یادگیری نظارت شده، از ابتدا ویژگی و طبقه داده ها مشخص هستند و هر یک از داده های آموزش در طبقه ای خاص قرار داده می شوند. به عبارت دیگر، ناظری وجود دارد که در هنگام فرایند آموزش، اطلاعاتی علاوه بر داده های آموزشی در اختیار الگوریتم یادگیرنده قرار می دهد و نحوه درست طبقه بندی را مشخص می کند. ولی در یادگیری نظارت نشده هیچ اطلاعاتی از ویژگی های مساله بجز داده های آموزشی در اختیار الگوریتم یادگیرنده قرار داده نمی شود. به عبارت دیگر، یادگیرنده بایستی در داده ها، ساختاری خاصی را بر اساس شباهت بین اعضای مجموعه جستجو کند. با توجه به اینکه الگوریتم های خوشه بندی، یک روش یادگیری نظارت نشده محسوب می شود، می تواند در طیف گسترده ای از مسائل به خصوص در موارد مربوط به پایش سلامت سازه ها کاربرد داشته باشد. یکی از موارد مهم کاربرد خوشه بندی در داده کاوی (data mining) می باشد که می توان با استفاده از آن به کشف اطلاعات و ساختارهای پنهان در گروهی از داده ها دست یافت [۲۴]. اشاره به این نکته ضروری است که اعمال خسارت در سازه های عمرانی با هدف استخراج داده و ویژگی های مورد نیاز از سازه در حالت خسارت دیده، به لحاظ هزینه های سنگین وارد شده و اهمیت اینگونه سازه ها هیچگونه توجهی ندارد. این مساله اهمیت کاربرد روش های خوشه بندی در مهندسی عمران را توجیه می کند و از سوی دیگر نشان می دهند این روش های کارآمد در ارزیابی ارزش اطلاعات سیستم های تشخیص خسارت سازه ای از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند.

¹ Principle component analysis

² Principle component scores

بطور کلی می‌توان روش‌های خوشه‌بندی را در چهار گروه به شرح زیر بیان کرد [۲۴].

- (۱) روش‌های مبتنی بر تقسیم‌بندی (Partition Clustering)
- (۲) روش‌های سلسله‌مراتبی (Hierarchical Clustering)
- (۳) روش‌های مبتنی بر چگالی (Density-based Clustering)
- (۴) روش‌های جدولی (Grid-based Clustering)

در این طرح پژوهشی، از روش خوشه‌بندی مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-medoids) در مساله تشخیص خسارت به منظور محاسبه احتمال گسیختگی سازه و ارزیابی ارزش اطلاعات در سازه بهره برده شده است.

۲.۳. روش خوشه‌بندی مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-Means)

این روش خوشه‌بندی در واقع یکی از مرسوم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های مبتنی بر تقسیم‌بندی می‌باشد. در این روش، تعداد n نمونه به k خوشه اختصاص می‌یابد. این روش به دلیل نداشتن ارتباط سلسله‌مراتبی بین خوشه‌های اختصاص یافته، دارای عملکردی مطلوب‌تر در ارزیابی مجموعه‌هایی دارای داده‌های بزرگ می‌باشد. روش خوشه‌بندی مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-medoids)، در واقع حالتی بهبود یافته از روش خوشه‌بندی دیگری به نام (K-means) می‌باشد [۲۴]. به طور کلی، هر دوی این روش سعی می‌کنند که نمونه‌ها را به تعدادی خوشه تقسیم کنند به طوری که فاصله بین هر نمونه درون خوشه‌ای با مرکز خوشه کمینه شود. تفاوت این دو روش در این است که در روش مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-means)، مرکز خوشه از میانگین داده‌های درون خوشه انتخاب می‌شود و ممکن است این مرکز، عضوی از داده‌های خوشه نباشد و یک عدد ساختگی باشد. این در حالی است که در روش مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-medoids)، مرکز خوشه از داده‌های درون خوشه انتخاب می‌شود که میانه نامیده می‌شود. به عبارت دیگر عضوی از میان داده‌ها که به میانگین آن‌ها نزدیک‌تر می‌باشد به عنوان مرکز خوشه در نظر گرفته می‌شود. مهم‌ترین برتری روش مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-medoids) توانایی بیشتر این روش در صورت وجود نوفه در داده‌ها می‌باشد.

۳.۳. نحوه عملکرد روش (K-Means)

- ابتدا داده‌ها به k خوشه تقسیم بندی می‌شوند.
- میانگین داده‌ها به عنوان داده‌ای دلخواه از هر خوشه به عنوان مرکز آن خوشه انتخاب می‌شود.
- فاصله هر یک از داده‌ها با مرکز خوشه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$d(x, c) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_i - q_i)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} \quad (1)$$

$$c = (q_1, q_2, \dots, q_n) \quad , \quad x = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (2)$$

- مجموع فاصله‌های داده‌ها و مرکز خوشه محاسبه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^n d(x, c) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - c_i)^2} \quad (3)$$

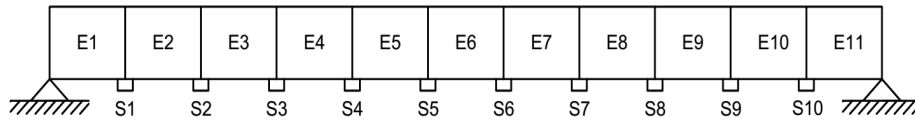
- سپس مجموع فاصله داده‌ها و مرکز خوشه برای تمامی خوشه‌ها محاسبه می‌شود.

$$\sum_{r=1}^k \sum_{i=1}^n d(x, c), r = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

مراحل اشاره شده ادامه می‌یابند تا کمترین مقدار برای مجموع فاصله داده‌ها با مرکز خوشه‌ها حاصل شود. هنگامی که این مقدار کمینه به دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌هایی که به عنوان میانگین انتخاب شده‌اند درست بوده و در نتیجه خوشه‌بندی مطلوب‌تری صورت گرفته است. به عبارت دیگر، داده‌ها در خوشه‌هایی قرار گرفته‌اند که کمترین فاصله را با مرکز خوشه دارا هستند. از اینرو، با استفاده از روش مبتنی بر تقسیم‌بندی (K-medoids) به صورتی که بیان شد، می‌توان داده‌ها را به خوشه‌هایی اختصاص داد که در این خوشه‌ها، داده‌ها دارای کمترین فاصله نسبت به یکدیگر می‌باشند.

۴. ارزیابی روش پیشنهادی بر روی تیر شبیه‌سازی شده عددی

به منظور نشان دادن توانمندی و عملکرد روش‌های پیشنهاد داده شده و بهبود یافته، مدل تیر بتنی عددی به کار می‌رود. این مدل یک شبیه‌سازی واقعی از تیر بتنی می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. تیر شبیه‌سازی شده مورد نظر دارای طول ۳ متر، ارتفاع ۰/۲۵ متر و عرض ۰/۲۵ متر می‌باشد و با المان‌های دوبعدی خطی چهار گرهی ساخته شده است. برای شبیه‌سازی، از برنامه المان محدود MATLAB بهره برده شده است. علاوه بر این، مدل عددی تیر بر اساس تئوری اولر-برنولی، با فرض اینکه صفحه‌ها در انتهای تیر به صورت صفحه باقی می‌مانند، ساخته شده است. در مجموع تعداد ۱۰ حسگر در پایین تیر به صورت کاملاً مشابه، جایگذاری شده‌اند. حسگرهای بالا را می‌توان در شکل (۱) مشاهده کرد.

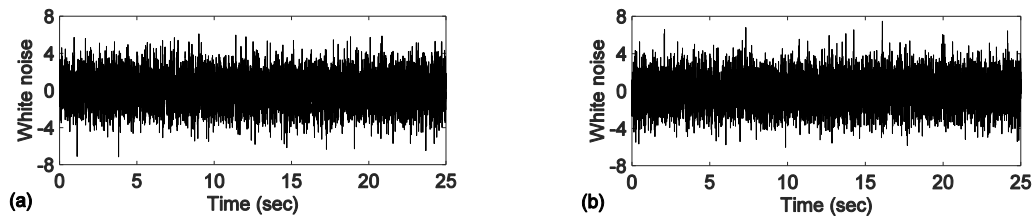


شکل (۱) - مدل عددی تیر بتنی [۲۵]

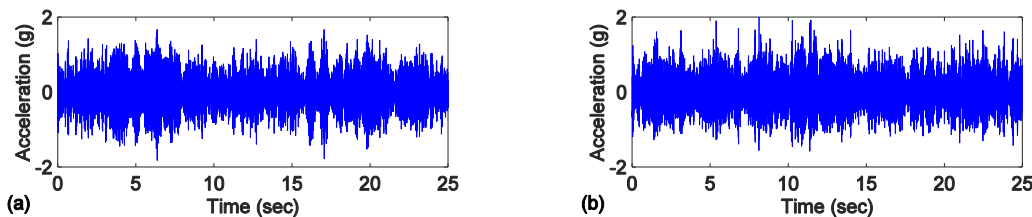
توجه به این نکته ضروریست که حسگرها در موقعیت‌های طولی یکسان بر روی ضلع پایین تیر جایگذاری شده‌اند. در هر مکان حسگر، تاریخچه زمانی شتاب در جهت عمودی و افقی اندازه‌گیری می‌شود. به منظور تحریک تیر، یک بار گذاری تصادفی عرضی یکنواخت به سطح بالایی تیر به کار گرفته می‌شود. تاریخچه بار گذاری به صورت پایین‌گذر با فرکانس کمتر از ۱۰۰۰ Hz فیلتر شده است که به پنج مود فعال سازه منجر می‌شود. علاوه بر این، تاریخچه زمانی شتاب در ۲۵ ثانیه با ۸۰۰۰ داده، نمونه برداری می‌شود. برای شبیه‌سازی خسارت، همانطور که در شکل شماره (۱) مشاهده می‌شود، یک خسارت یک‌گانه عمودی در میانه تیر، مدل‌سازی شده است. چنین الگوی خسارت، ترک تنفسی را به عنوان یک مورد خسارت دیده واقعی تری که در بسیاری از سازه‌های بتنی، منجر به رفتار غیر خطی می‌شود را شبیه‌سازی می‌کند. چندین الگوی خسارت همراه با حالت خسارت ندیده در مدل عددی تیر، معرفی شده است. جدول شماره (۱) مجموع حالت‌های سازه‌ای و الگوهای خسارت را در تیر بتنی معرفی می‌کند.

جدول (۱) حالت‌های سازه‌ای و الگوهای خسارت برای تیر بتنی

State	Condition	Location	Structural changes	Index (%)
1	Undamaged	-	Baseline	
2	Undamaged	E2		15
3	Undamaged	E5		30
4	Undamaged	E9	The increase in the material density (pc)	20
5	Undamaged	E2		30
6	Undamaged	E9		40
7	Damaged	E6		-5
8	Damaged	E6	The reduction of concrete flexural rigidity (EIc)	-15
9	Damaged	E6		-20
10	Damaged	E6		-30
				-40



شکل (۲) - نیروهای ارتعاشی در حسگر شماره ۵: (a) حالت ۱، (b) حالت ۸

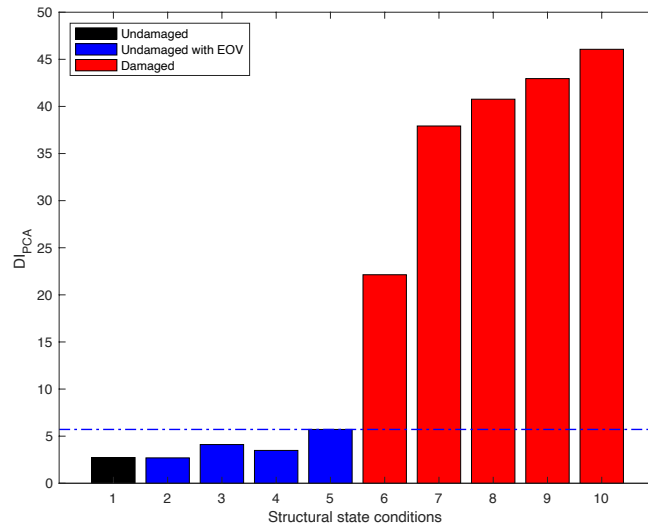


شکل (۳) - پاسخ‌های شتاب-زمان در حسگر شماره ۵: (a) حالت ۱، (b) حالت ۸

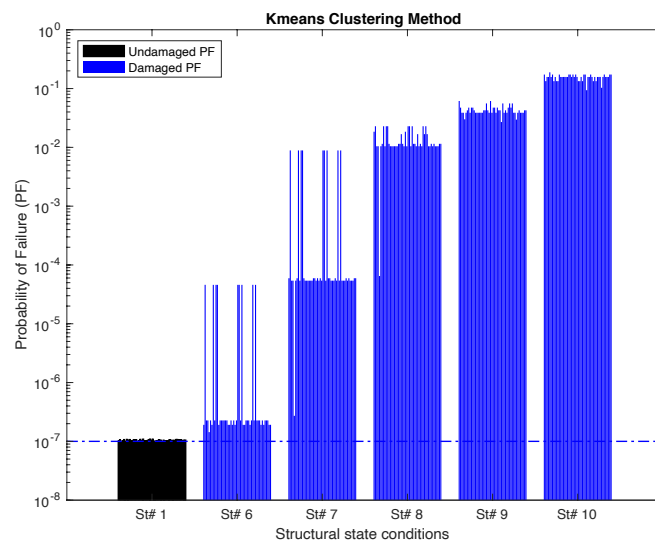
شکل‌های (۲) و (۳) به عنوان نمونه، نیروی ارتعاشی اندازه‌گیری شده در حسگر شماره ۵ و نیز پاسخ‌های شتاب-زمان در حسگر شماره ۵ را در حالت‌های ۱ و ۸ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد، ارزیابی وضعیت سازه (وقوع خسارت یا عدم وقوع خسارت) تنها با استفاده از داده‌های خام ارتعاشی امکان‌پذیر نیست. اگرچه تغییراتی در چگونگی توزیع پاسخ‌های شتاب-زمان در حالت‌های مختلف قابل مشاهده است، اما چنین تغییراتی به طور قابل اعتمادی به معنای وقوع خسارت نخواهد بود. بنابراین، ضرورت استخراج ویژگی‌های حساس به خسارت در تعیین سلامت سازه و همچنین تخمین احتمال گسیختگی با روش‌های مبتنی بر استفاده از داده‌های ارتعاشی یک اصل بسیار مهم و اساسی است. شکل (۴)، نتایج ارزیابی اولیه خسارت را در تیر عددی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خسارت‌های افزاینده در حالت‌ها ۶-۱۰ قابل تشخیص می‌باشند و همچنین این خسارت‌های غیر خطی از خط آستانه احتمالاتی محاسبه شده تجاوز کرده‌اند.



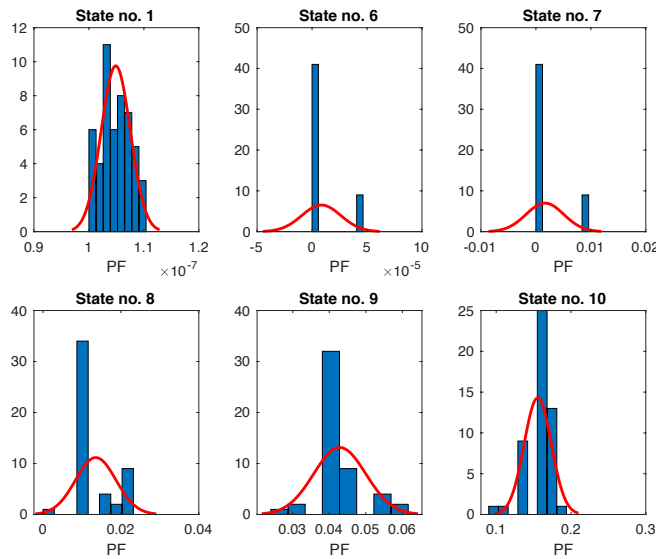
دوازدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰
 دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



شکل (۴) - ارزیابی اولیه خسارت تیر عددی توسط روش تحلیل مولفه های اصلی



شکل (۵) - احتمال گسیختگی تیر عددی توسط روش خوشه بندی (K-Means)



شکل (۶) - تابع توزیع احتمال بر اساس احتمال گسیختگی تیر عددی توسط روش خوشه بندی (K-Means)

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب احتمال گسیختگی بدست آمده از روش‌های پیشنهادی و همچنین تابع‌های توزیع احتمال را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌هایی شامل ۵۰ حالت‌های مختلف خطای اندازه‌گیری و تأثیرات نوفه در تیر عددی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند. گفتنی است در شکل (۵)، در حالت شماره ۱ سازه، تأثیرات حالت‌های خسارت ندیده برای محاسبه احتمال گسیختگی به عنوان حالت کلی و بهینه در محاسبه ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه در نظر گرفته شده است. این نتیجه با توجه به عدم تجاوز احتمال‌های گسیختگی در عدم قطعیت‌های مختلف نشان‌دهنده قابلیت اطمینان روش پیشنهادی می‌باشد. لازم به ذکر است، دستیابی به این نتایج فقط با در نظر گرفتن پاسخ سازه در حالت‌ها مختلف و بدون نیاز به الگوی فیزیکی از سازه مورد نظر کسب شده است.

۵. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این طرح پژوهش، پیشنهاد روشی کارآمد برای تعیین احتمال گسیختگی سازه با روش‌های مبتنی بر داده و اساس داده‌های ارتعاشی بود. این مقدار با بررسی پاسخ سازه و با توجه به دانش پسین و پیشین که به عنوان یکی از مهمترین عوامل در ارزیابی ارزش اطلاعات سیستم تشخیص خسارت سازه ای می‌باشد، تعیین شد. در این راستا، از روش‌های مختلف آماری و مفاهیم یادگیری ماشینی و داده‌کاوی بهره‌برده شد. عدم قطعیت‌های گوناگونی با هدف شبیه‌سازی واقعی مانند بررسی حالت‌های مختلف خطای اندازه‌گیری و تأثیرات نوفه در نظر گرفته شد. در گام نخست روش‌های پیشنهادی، تشخیص خسارت سازه ای با روش‌های اساس داده‌های ارتعاشی و یادگیری ماشینی انجام گرفت و شاخص خسارت در حالت‌های مختلف عدم قطعیت با بهره‌بردن از تحلیل مولفه‌های اصلی صورت‌تعیین شدند. سپس، به منظور دستیابی به عملکرد بهینه سیستم تشخیص خسارت، تأثیرات تعداد حسگرها، به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش هزینه و ارزیابی ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه، بررسی شد. در ادامه، خط آستانه احتمالاتی به منظور تشخیص خطاهای مثبت کاذب و منفی کاذب با استفاده از مفاهیم یادگیری غیر نظارت شده محاسبه شد. سپس، از

الگوریتم خوشه‌بندی k-means بهره‌برده شد. با بهره‌بردن از این روش، احتمال گسیختگی سازه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود به دست آمد. به منظور بررسی درستی روش‌های پیشنهادی احتمال گسیختگی سازه در ارزیابی ارزش اطلاعات سیستم تشخیص خسارت، از یک تیر شبیه‌سازی شده بتنی بهره‌برده شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده روش‌های پیشنهادی مبتنی بر داده و خوشه‌بندی به درستی احتمال‌های گسیختگی تیر شبیه‌سازی شده بتنی را با خطای قابل قبول تخمین زدند. در حالت شماره ۱ تیر بتنی مورد مطالعه، تأثیرات حالت‌های خسارت ندیده برای محاسبه احتمال گسیختگی به عنوان حالت کلی و بهینه در تخمین ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه در نظر گرفته شد. این نتیجه با توجه به عدم تجاوز احتمال‌های گسیختگی با وجود عدم قطعیت‌های مختلف در سازه، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان روش پیشنهادی می‌باشد. افزون بر اینها، در حالت‌های خسارت غیر خطی، احتمال‌های گسیختگی بدست آمده با شرایط سلامت سازه ارتباط کاملاً معناداری دارند که در تحلیل فایده و ارزش اطلاعات پایش سلامت سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لازم به ذکر است، دستیابی به این نتایج فقط با در نظر گرفتن پاسخ سازه در حالت‌های مختلف و بدون نیاز به الگوی فیزیکی از سازه مورد نظر کسب شد. این مساله، برتری روش‌های پیشنهادی و همچنین کاربردی بودن آن را به وضوح نشان داد.

۶. مراجع‌ها

- [۱] C. R. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring : A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [۲] K. Worden, E. J. Cross, N. Dervilis, E. Papatheou, and I. Antoniadou, "Structural health monitoring: from structures to systems-of-systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 1-17, 2015.



- [۳] F. Magalhães, A. Cunha, and E. Caetano, "Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 28, pp. 212-228, 2012.
- [۴] A. Rytter, "Vibrational based inspection of civil engineering structures," Ph.D. Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Aalborg, Denmark, 1993 .
- [۵] C. R. Farrar, S .W. Doebling, and D. A. Nix, "Vibration-based structural damage identification," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 259, pp. 131–149, 2001.
- [۶] C. R. Farrar and N. A. Lieven, "Damage prognosis: the future of structural health monitoring," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 623-632, 2007.
- [۷] N. Stubbs, Broome, T.H. and Osegueda, R., "Nondestructive construction error detection in large space structures," *AIAA Journal*, vol. 28, pp. 146-152, 1990.
- [۸] N. Stubbs, Sikorsky, C., Park, S., Choi, S. and Bolton, R. , "A methodology to nondestructively evaluate the structural properties of bridges ",*Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conferences, Kissimmee, Fl, USA*, pp. 1260-1268, 1999.
- [۹] O. S. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering Structures* vol. 19, pp. 718-723, 1997.
- [۱۰] M. Gul and F. N. Catbas, "Damage assessment with ambient vibration data using a novel time series analysis methodology," *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, no. 12, pp. 1518-1526, 2010.
- [۱۱] M. Gul and F. N. Catbas, "Structural health monitoring and damage assessment using a novel time series analysis methodology with sensor clustering," *Journal of Sound and vibration*, vol. 330, no. 6, pp. 1196-1210, 2011.
- [۱۲] D. Bernal, D. Zonta, and M. Pozzi, "ARX residuals in damage detection," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 19, no. 4, pp. 535-547, 2012, doi: 10.1002/stc.452.
- [۱۳] A. VERZOBIO, D. BOLOGNANI, D. ZONTA, and J. QUIGLEY, "Quantifying the Benefit of Structural Health Monitoring: Can the Value of Information be Negative?," *Structural Health Monitoring 2019*, 2019.
- [۱۴] H. Brüske and S. Thöns, "Fact sheet on the domains of the Value of Information in Structural Health Monitoring".
- [۱۵] D. Straub *et al.*, "Value of information: A roadmap to quantifying the benefit of structural health monitoring," 2017 .
- [۱۶] W. J. Klerk, T. Schweckendiek, F. den Heijer, and M. Kok, "Value of Information of Structural Health Monitoring in Asset Management of Flood Defences," *Infrastructures*, vol. 4, no. 3, p. 56, 2019.
- [۱۷] L. Iannacone, P. Gardoni, P .F. Giordano, and M. P. Limongelli, "Decision making based on the value of information of different inspection methods," in *12th International Workshop on Structural Health Monitoring: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT), IWSHM 2019*, 2019: DEStech Publications Inc., pp. 1479-1486 .
- [۱۸] S. Thöns, "On the value of monitoring information for the structural integrity and risk management," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 33, no. 1 ,pp. 79-94, 2018.
- [۱۹] L. Long, M. Döhler, and S. Thöns, "Determination of structural and damage detection system influencing parameters on the value of information," *Structural Health Monitoring*, 2020, doi: 10.1177/1475921719900918.
- [۲۰] M. Pozzi and A .Der Kiureghian, "Assessing the value of information for long-term structural health monitoring," in *Health monitoring of structural and biological systems 2011*, 2011, vol. 7984: International Society for Optics and Photonics, p. 79842W .
- [۲۱] D. Zonta, B .Glisic, and S. Adriaenssens, "Value of information: impact of monitoring on decision-making," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 21, no. 7, pp. 1043-1056, 2014.



دوازدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



- [۲۲] C. Andriotis, K. Papakonstantinou, and E. Chatzi, "Value of structural health monitoring quantification in partially observable stochastic environments," *arXiv preprint arXiv:1912.12534*, 2019.
- [۲۳] S. S. Sharma, *Applied multivariate techniques*. John Wiley & Sons, 1996.
- [۲۴] A. J. Izenman, *Modern multivariate statistical techniques*. Springer, 2008.
- [۲۵] J. Kullaa, K. Santaoja, and A. Eymery, "Vibration-Based Structural Health Monitoring of a Simulated Beam with a Breathing Crack," *Key Engineering Materials*, vol. 569-570, pp. 1093-1100, 2013/07 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.569-570.1093.