

## بررسی اثر مکان لرزاننده در عملکرد شاخص های حساس به خرابی

مهراب نیکوفراز<sup>آ</sup>، معین خلیلی<sup>آ</sup>، امیر شهنازی<sup>آ</sup>، شهاب الدین درویش<sup>آ</sup>، مریم بیطرف<sup>ب\*</sup>

<sup>آ</sup> ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی، دانشکده مهندسی عمران، ۱۴۱۷۶۱۳۱۳۱، دانشجوی کارشناسی ارشد.

<sup>ب</sup> ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی، دانشکده مهندسی عمران، ۱۴۱۷۶۱۳۱۳۱، استادیار.

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [maryam.bitaraf@ut.ac.ir](mailto:maryam.bitaraf@ut.ac.ir)

### چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیر محل ورود بار در شاخص های حساس به خرابی سازه پرداخته شده است. بررسی گمراه کنندگی محل ورود بار با مقایسه خرابی گره های مختلف انجام شده است. همچنین نشان داده می شود که مکان یابی محل ورود بار به سازه در حالاتی خاص، ممکن است. این پژوهش بر روی مجموعه داده های سازه استادیوم قطر انجام شده است. شاخص های حساس به خرابی شامل شاخص های آماری و دینامیکی و ... روی این داده ها برای حالات مختلف محاسبه می شود و مقایسه ای برای پیدا کردن محل لرزاننده بین نقاط مختلف انجام شده است. نتایج نشان می دهد که وجود لرزاننده در زیر گره هشت باعث به وجود آمدن تفاوت هایی شده است که در بعضی شاخص های حساس به خرابی خود را نشان می دهند؛ به شکلی که در مواقعی باعث گمراه شدن تفسیر کننده در شناسایی آسیب می شوند. همچنین در بعضی شاخص ها این تفاوت کمتر دیده می شود و وجود لرزاننده تاثیر گمراه کننده ای ایجاد نمی کند؛ این بدین معنا نیست که این تفاوت دیده نمی شود. به عبارت دیگر، با دانش به حضور لرزاننده، می توان از تفسیرهای اشتباه جلوگیری کرد.

**کلمات کلیدی:** پایش سلامت؛ سازه دانشگاه قطر؛ تاثیر محل ورود بار؛ شاخص های حساس به آسیب.

### ۱- مقدمه

تحقیقاتی که به بررسی شاخص های حساس به خرابی در سازه ها می پردازد، از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از روش های نسبتا جدید برای پایش سلامت یک سازه، روش های مبتنی بر داده است [۱]. شناسایی، مکان یابی و تعیین کمیت آسیب های سازه ای در زیرساخت های عمرانی یک چالش همیشگی برای محققان و مهندسين بوده است. بنابراین حجم قابل توجهی از تحقیقات برای توسعه خودکار تکنیک های نظارت سلامت سازه ای به صورت محلی و کلی انجام شده است [۲]. در این مقاله به بررسی شاخص های حساس به خرابی بر روی سازه جایگاه تماشاچیان استادیوم قطر که برای بررسی های بیشتر در دانشگاه قطر قرار گرفته است پرداخته شده است.

نکته حائز اهمیت دیگر تاثیر آگاهی از محل آسیب سازه در عملکرد درست شاخص های حساس به خرابی و تفسیر درست آن ها است چرا که تفسیر اشتباه می تواند باعث تشخیص نادرست در سلامت سازه گردد. سازه مورد بررسی با ابعاد ۴,۲ متر در ۴,۲ متر برای استقرار ۳۰ صندلی طراحی شده [۳] و از کنار هم قرار گیری این صفحات جایگاه تماشاچیان شکل می گیرد. در این تحقیق، از شتاب‌سنج‌ها به عنوان ابزار اصلی برای نظارت بر رفتار سازه استفاده می‌شود. این شتاب‌سنج‌ها به هر گره مشبک سازه مطابق شکل (۱) [۴] متصل شده‌اند و در طی آزمون‌ها اطلاعات شتاب در این نقاط ثبت می‌شود.

تا به حال تحقیقات زیادی به صورت پارامتریک و غیر پارامتریک برای تشخیص آسیب سازه ای ارایه شده است که در این میان، رایج ترین روش طبقه بندی شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پیشخور هستند و هدف ما در این تحقیق بررسی تاثیر مکان لرزاننده در پاسخ شاخصه های حساس به خرابی است [۵,۶].



شکل ۱. سازه و محل گره‌ها [۴]

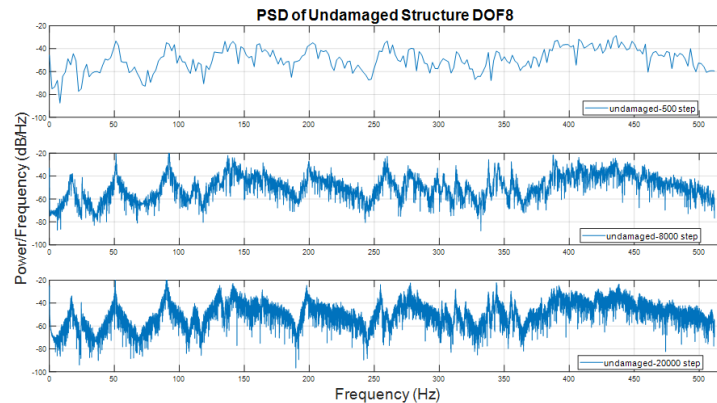
روش کسب داده برای این پژوهش، شبیه‌سازی لرزش‌های مختلف با استفاده از "White Noise" است. این نوع لرزش‌ها، معمولاً به عنوان یک سیگنال تصادفی با فرکانس‌های مختلف و شدت‌های متغیر تولید می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها به بررسی رفتار سازه در شرایط مختلف و مقایسه آن با شاخص‌های حساس به خرابی کمک می‌کنند. در هر آزمون پیچ‌های مربوط به یک گره شل شده‌اند و با ایجاد لرزش، داده برداری صورت پذیرفته است. در نهایت، با تحلیل داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، به بررسی شاخص‌های حساس به خرابی پرداخته شده است. این تحقیقات در توسعه و بهبود سازه‌های مهم مانند استادیوم‌ها بسیار ارزشمند هستند.

در گذشته نیز پژوهشگران متعددی در زمینه‌ی پایش سلامت سازه‌ای به وسیله‌ی مجموعه داده‌ی سازه‌ی فوق مطالعه‌ی خود را انجام دادند. برای مثال در یک مطالعه عبدالجابر و همکاران [۷] بر روی داده‌های این سازه سیستم آسیب‌یابی دقیقی با استفاده از شبکه‌ی عصبی همگشتی یک‌بعدی طراحی کردند که در تشخیص خودکار شاخص‌ها و محل خرابی کارآمد واقع گردید. ترونک و همکاران [۸] با ترکیب شبکه‌ی همگشتی یک‌بعدی و واحد بازگشتی دروازه‌ای روشی را برای تشخیص آنی آسیب ارائه دادند. در پژوهشی دیگر از این مجموعه داده برای اعتبارسنجی یک آسیب‌یابی چندکلاسه با استفاده از روش شبکه‌های حافظه‌ی کوتاه-بلند مدت استفاده گردید [۹]. همچنین راستین و همکاران [۱۰] در یک پژوهش از یک روش نوین با استفاده از شبکه‌های همگشتی متخاصم مولد عمیق و شرطی برای تشخیص آسیب استفاده کردند که در این پژوهش نیز از داده‌های سازه جایگاه تماشاچیان دانشگاه قطر به منظور مجموعه داده‌های معیار استفاده شد.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش، مشخصه‌های دینامیکی در حوزه‌های زمان و فرکانس برای داده‌های این سازه محاسبه شده است و نمودار آن‌ها رسم شده است؛ نتایج در حالات آسیب دیده و سالم با هم مقایسه شده است. تلاش بر این بوده است که گره‌های متفاوت مقایسه شوند و اگر گره‌ی با تمام گره‌های دیگر تفاوت مشخصی داشته باشد، به این معنا است که آن لرزاننده به آن گره بار وارد می‌کند.

برای محاسبه تمام شاخص‌ها از ۸۰۰۰ گام زمانی اول استفاده شده است. داده به صورت خام دارای ۲۶۲۱۴۴ گام زمانی است که استفاده از آن‌ها بسیار زمانبر خواهد بود. از این‌رو ۸۰۰۰ گام انتخاب شد و با ۵۰۰ گام و ۲۰۰۰۰ گام مقایسه شد تا مشخص شود آیا ۸۰۰۰ گام نماینده‌ی کل داده است یا خیر. در شکل (۲) مقایسه‌ی ۵۰۰، ۸۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ گام آورده شده است. طبق نتایجی که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، ۵۰۰ گام کافی نخواهد بود و ۲۰۰۰۰ گام اطلاعات اضافه‌تری نسبت به ۸۰۰۰ گام فراهم نمی‌کند. به همین دلیل از ۸۰۰۰ گام برای تمام محاسبات استفاده شده است. در کل این مقاله شکل‌ها به صورت رنگی ارائه شده‌اند از این رو توصیه می‌شود برای کسب اطلاعات کامل هر نمودار از نسخه دیجیتال یا چاپ رنگی استفاده شود.



شکل ۲. مقایسه سیگنال شتاب در حوزه فرکانس بین حالات استفاده از ۵۰۰، ۸۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ گام زمانی

## ۲-۱- شاخصه خودهمبستگی<sup>۱</sup>

این شاخصه رابطه‌ی یک سیگنال با خودش در حالتی که یک تاخیر زمانی مانند  $\tau$  وجود داشته باشد محاسبه می‌کند. اگر یک سیگنال رفتار تناوبی داشته باشد، در حالتی که  $\tau$  ضربی از دوره تناوب باشد میزان این تابع زیاد می‌شود. از طرفی به دلیل ساختار تابع و رفتار سیگنال، هر چه  $\tau$  بزرگتر شود و به انتهای سیگنال نزدیک شود مقدار این تابع به صفر نزدیک می‌شود. در شکل (۳)، در یک مجموعه نمودار، خودهمبستگی سیگنال شتاب در یک حالت آسیب برای نقاط هشت و سیزده و همسایگان‌شان نمایش داده شده است. دلیل انتخاب این نقاط به عنوان مرجع بررسی این است که هر دو روی خط تقارن سازه قرار دارند؛ همچنین برای اینکه بتوان تفاوت گره هشت را متوجه شد باید آن را با گره دیگری مقایسه کرد که شبیه‌ترین رفتار را به گره هشت داشته باشد. نزدیک‌ترین گره‌ها به گره هشت که همچنان روی محور تقارن باشد گره سه و سیزده هستند. گره سه یک گره‌ی مرزی است که باعث می‌شود یک گره مناسب نباشد؛ از این رو، گره سیزده به عنوان مرجع مقایسه استفاده شده است. در دیگر شاخصه‌ها نیز این موضوع به عنوان فرض در نظر گرفته شده است. در شکل (۴) خودهمبستگی برای گره سیزده و همسایگان رسم شده است.

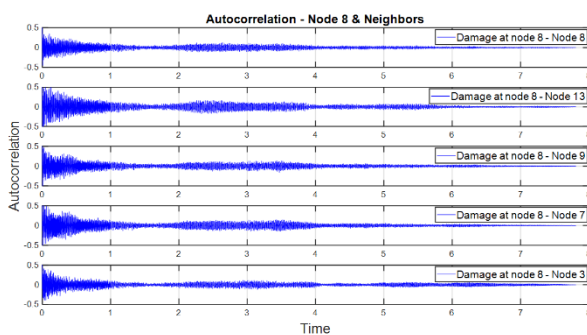
در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که خودهمبستگی در حالتی که آسیب در گره هشت ایجاد شده باشد، برای تمام گره‌های مجاور بین ۲ تا ۴ ثانیه، یک تغییر قابل مشاهده ایجاد کرده است. در حالتی که آسیب در سیزده اتفاق افتاده باشد، این رفتار در نقاط نزدیک به سیزده دیده نمی‌شود. معنای این تغییر در حالتی که آسیب در گره هشت وجود داشته باشد می‌تواند این باشد که وجود تحریک در گره هشت، تفاوت‌هایی ایجاد می‌کند که آن گره را از دیگر گره‌ها متمایز می‌سازد. از طرفی در زمانی که آسیب در سیزده اتفاق افتاده باشد، شاخصه خودهمبستگی نمی‌تواند در مورد وجود آسیب اطلاعاتی دهد. تنها در حالتی که آسیب در هشت اتفاق افتاده باشد، تفاوت بزرگی دیده می‌شود که با چشم قابل تشخیص است.

<sup>۱</sup>AutoCorrelation

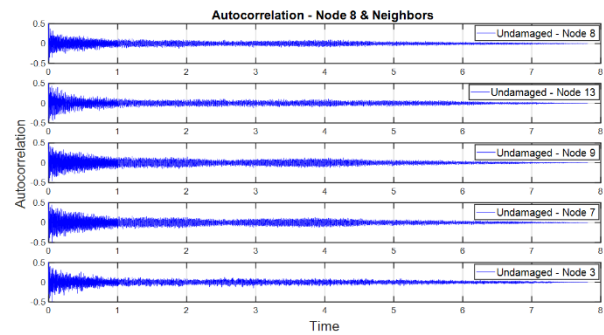
## ۲-۲- شاخصه میان‌همبستگی<sup>۱</sup>

این شاخصه شباهت زیادی با شاخصه قبلی دارد، این شاخصه رابطه‌ی یک سیگنال با یک سیگنال دیگر را به صورت تابعی از تاخیر زمانی بین دو سیگنال به دست می‌آورد. در شکل (۵) میان‌همبستگی برای گره‌ی ۱۳ که یکی از همسایگان گره ۸ می‌باشد در حالات خرابی در گره‌های ۸، ۱۳ و ۱۳ و حالت سالم نمایش داده شده است. باید اشاره شود که میان‌همبستگی بین دو سیگنال عمل می‌کند در نتیجه برای معنادارتر بودن نتایج، این تابع بین گره‌های مجاور محاسبه شده است. در شکل (۵) بین گره سیزده و همسایگانش که در شکل (۱) به آن اشاره شده است، محاسبه شده است.

افزایش مقدار تابع بین ۲ تا ۴ ثانیه در خودهمبستگی، در تابع میان‌همبستگی نیز مشاهده می‌شود. در واقع اینکه مشاهدات تنها در همسایگی گره هشت اتفاق نمی‌افتد نشان از این دارد که این رفتار مستقل از آسیب و گره است و تنها علت منطقی، وجود لرزاننده در زیر گره هشت هست. سیگنال شتاب در حوزه‌ی زمان، داده‌ی خام محسوب می‌شود و برای شناسایی آسیب کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا برای بررسی تفاوت گره ۸ با دیگر گره‌ها از آن‌ها استفاده شده است. سازه‌ی قطر دارای یک محور تقارن است که از نقاط بین ۳ تا ۲۸ می‌گذرد. این تقارن موجب می‌شود که رفتار نقاط متقارن نسبت به این محور مثل نقاط ۱۲ و ۱۴ مشابه باشند که این تشابه منوط به آن است که آسیب تنها روی محور تقارن باشد یا سازه سالم باشد.

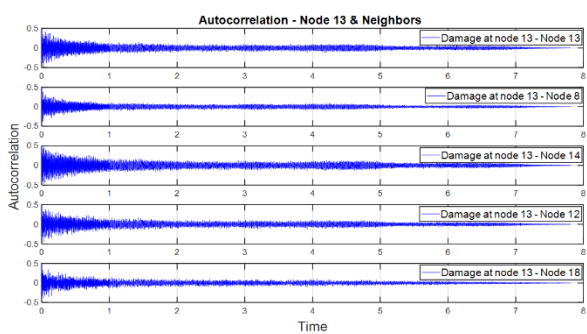


(ب)

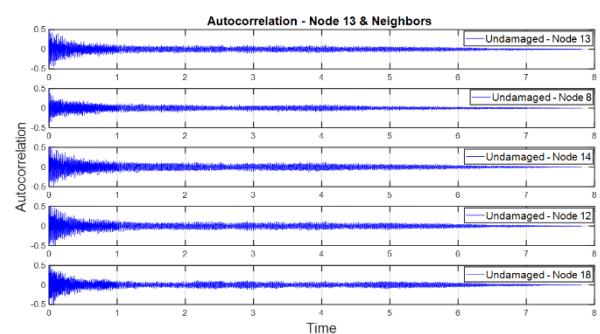


(الف)

شکل ۳. خودهمبستگی گره‌های هشت و همسایگان در حالات (الف) سالم و (ب) آسیب در گره هشت



(ب)

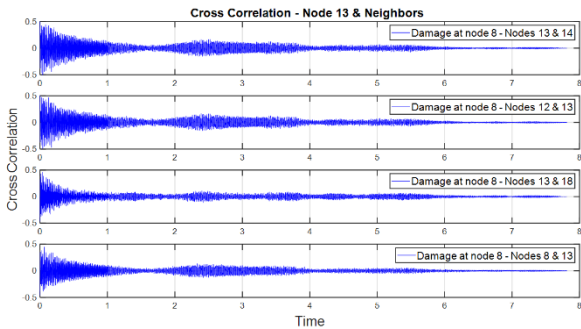


(الف)

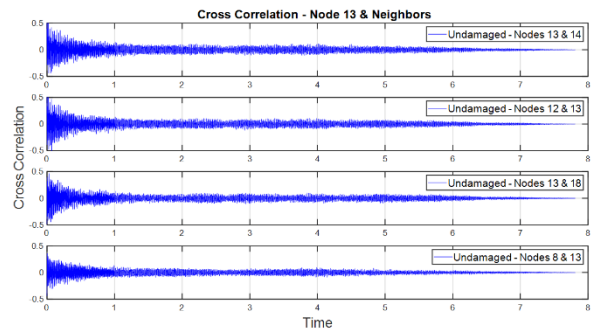
شکل ۴. خودهمبستگی گره‌های سیزده و همسایگان در حالات (الف) سالم و (ب) آسیب در گره سیزده

<sup>۱</sup>CrossCorrelation

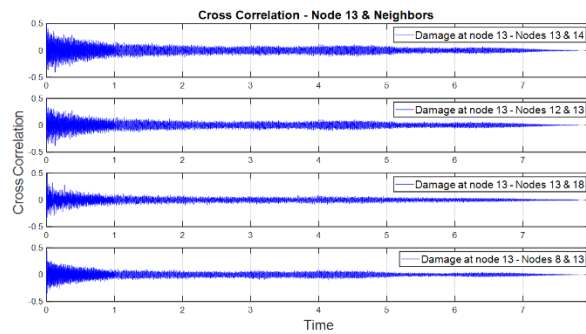
همچنین شکل (۵)، حکایت از شباهت رفتار نقاط ۱۲ و ۱۴ دارد و به علت وجود لرزاننده در زیر ۸، تفاوت فقط در گره فوق مشهود است. همچنین با بررسی انجام شده بر روی گره هشت استنتاج شد، گره هشت با کاهش سختی موضعی، نسبت به سازه مستقل‌تر و نسبت به لرزاننده وابسته‌تر می‌شود. به عبارت دیگر بعد از خرابی در گره هشت، سیگنال شتاب ضبط شده از گره هشت، به سیگنال شتاب لرزاننده نزدیک‌تر شده است. از طرفی با آسیب در گره هشت، رفتار گره‌های دیگر مثل ۱۳، ۱۴ و ۱۲ نیز دستخوش تغییر می‌شود که به علت تفاوت نحوه‌ی ورود بار دینامیکی به سازه است. با خرابی گره هشت، انرژی لرزاننده از فیلتر متفاوتی عبور می‌کند و به سازه وارد می‌شود.



(ب)



(الف)



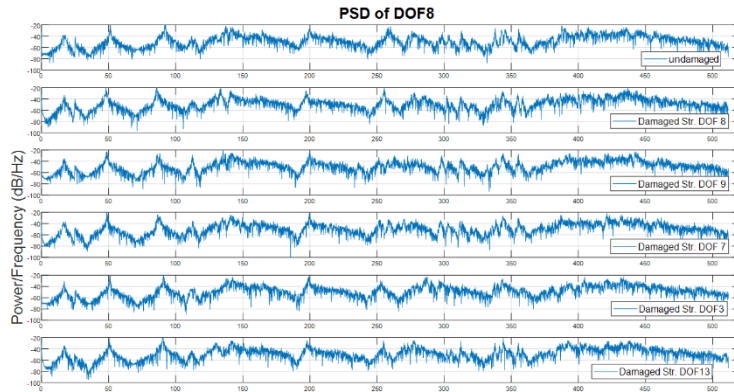
(ج)

شکل ۵. میان‌همبستگی بین گره سیزده و همسایگان در حالات (الف) سالم، (ب) آسیب در گره هشت و (ج) آسیب در گره سیزده

## ۳-۲ - شاخصه چگالی طیفی توان<sup>۱</sup>

این شاخصه با تبدیل فوریه، سیگنال شتاب که در حوزه زمان است را به حوزه فرکانس منتقل می‌کند. در شکل (۶) شاخصه PSD برای یک گره، در حالات متفاوت محاسبه شده است و نمودار آن‌ها رسم شده است. در هر یک از نمودارهای شکل (۶) تابع چگالی طیفی توان برای گره هشت در حالات آسیب متفاوت رسم شده است. در تمام نمودارها، بازه‌ی ۲۳۰ هرتز تا ۳۰۰ هرتز دستخوش بیشترین تغییر شده‌اند. همچنین، در بعضی حالات کل نمودار نسبت به حالت سالم به عقب‌تر رفته است. با علم بر فرمول  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ، می‌دانیم با کاهش سختی، فرکانس‌های طبیعی سازه نیز کاهش می‌یابند. قله‌ها در نمودار چگالی طیفی توان، فرکانس‌هایی را نشان می‌دهند که سازه در آن فرکانس‌ها فعال‌تر بوده است. در نتیجه این نقاط معنایی مشابه دارند. از عقب‌رفتگی این قله‌ها، این نتیجه قابل استخراج است که سختی سازه کاهش پیدا کرده است که نشان از آسیب است. شاخصه چگالی طیفی توان برای بررسی وجود آسیب شاخصه مناسبی است. با بررسی عقب‌رفتگی نمودار، همچنین تغییر شکل موضعی آن در فرکانس‌های متفاوت می‌توان به وجود آسیب پی برد.

<sup>۱</sup>Power Spectral Density (PSD)



شکل ۶. شاخصه چگالی طیفی توان برای همسایگان گره هشت

## ۲-۴ - شاخصه چگالی طیفی متقاطع<sup>۱</sup>

در شکل (۷) مشاهده شد که وقتی آسیب در گره هشت اتفاق می‌افتد تابع چگالی طیفی متقاطع با حالت سالم تفاوت معناداری نمی‌کند. از طرفی وقتی گره مقابل آسیب می‌بیند، مانند گره ۸ و هفت در شکل (۷) (ب) و (د) در بازه ۲۵۰ تا ۳۰۰ هرتز تفاوت‌هایی به وجود می‌آید که خود به معنای وجود تقارن در سازه است. آسیب در نقطه سیزده، نمایش داده شده در شکل (۷) (ج)، در فرکانس‌های بالاتر از ۳۰۰ هرتز خود را نشان می‌دهد.

عدم ایجاد تغییر در حالتی که آسیب به گره هشت وارد شده باشد، نسبت به حالت سالم به نظر می‌رسد به دلیل وجود لرزاننده زیر گره هشت باشد. با این علت که از ابتدا چگالی طیفی متقاطع ارتباطی بین شتاب ایجاد شده در لرزاننده و شتاب گره‌های مجاور است و بعد از آسیب در هشت، همچنان چگالی طیفی متقاطع ارتباط بین لرزاننده و گره‌های مجاور را نمایش می‌دهد. گویی سازه مستقل از گره هشت است و رفتار دینامیکی دیگر گره‌ها با آسیب در هشت تغییر نمی‌کند. این نکته به این معنا نیست شتاب نقاط وابسته به شتاب گره هشت نیست؛ بلکه شخصیت دینامیکی سازه نسبت به گره هشت وابستگی خود را تا حد زیادی از دست داده است.

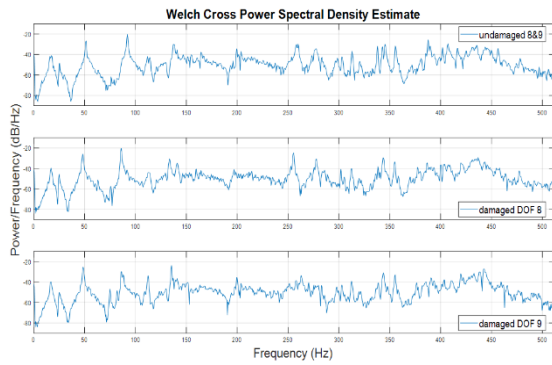
## ۲-۵ - ویژگی‌های آماری

ویژگی‌های آماری به توصیف رفتار داده‌های ساختاری کمک می‌کند. با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های آماری مانند میانگین، واریانس، چولگی و کشیدگی، می‌توان رفتار پایه سازه را درک کرد. این ویژگی‌ها یک نقطه مرجع برای مقایسه در هنگام ارزیابی تغییرات یا خرابی‌ها در آینده فراهم می‌کنند.

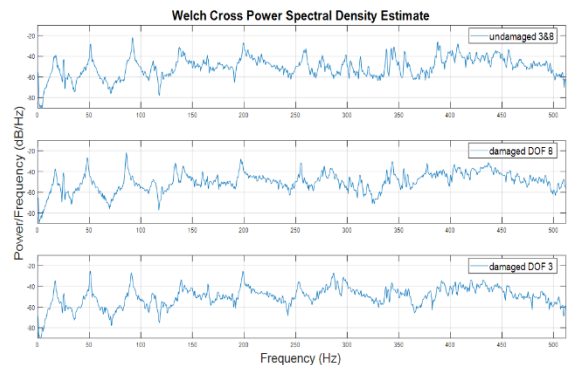
از شاخص‌های آماری می‌توان به چولگی (میزان تمایل منحنی نرمال داده‌ها)، کشیدگی (درجه اوج در یک نمودار آماری)، انحراف معیار، ریشه میانگین مربعات و پنج ممان زمانی<sup>۲</sup> (که هر یک از پنج عدد نشانگر یک شاخص مجزا می‌باشد) اشاره کرد. مهم‌ترین شاخص آماری که در این پژوهش از آن استفاده شده انحراف معیار است که در شکل (۸) به نمایش درآمده است. انحراف معیار میزان فاصله و پراکندگی داده‌های مورد بررسی از میانگین آن‌ها را نشان می‌دهد. در این حالت زمانی که آسیب در گره ۸ است نمودار تقریباً منطبق بر حالت سالم است که به علت وجود لرزاننده در آن است. در تمامی حالات به‌طور کلی حالت سالم از حالت آسیب دیده انحراف معیار بیشتری دارد که علت آن می‌تواند بیشتر شدن اتلاف در حالت آسیب دیده باشد. با وجود تحریک به طور مستقیم در زیر گره ۸، این گره شتاب‌های بیشتری را تجربه خواهد کرد. این شتاب بیشتر در گره‌های ۳ و ۱۳ و ۱۸ و ... (به طور کلی محور تقارن) نیز مشاهده می‌شود و در این شاخص نمود پیدا می‌کند. به طور کلی انتظار می‌رود رفتار سازه تحت آسیب ۷ و یا ۹ مشابه یکدیگر باشد اما این مهم محقق نشده و علت آن می‌تواند تفاوت نوع و شدت آسیب در دو گره ۷ و ۹ باشد.

<sup>۱</sup>Cross Spectral Density (CSD)

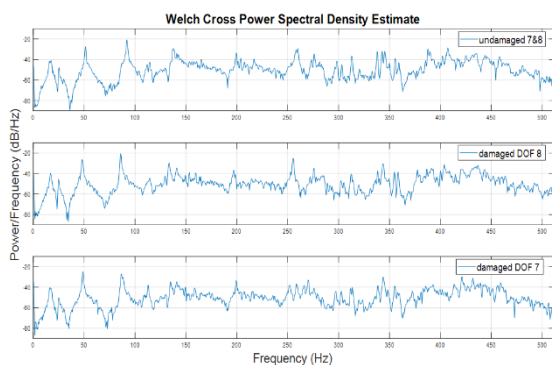
<sup>۲</sup>Temporal moments



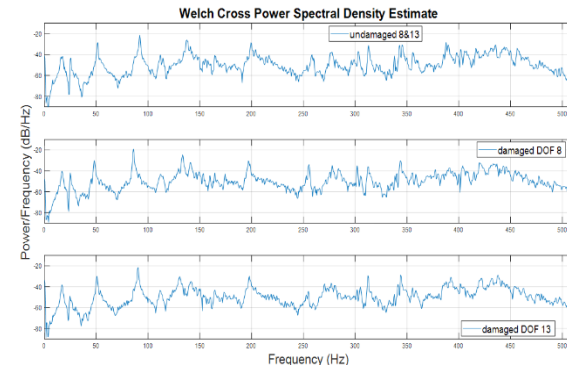
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷. شاخصه چگالی طیفی متقاطع بین گره هشت و همسایگان، در حالات سالم، آسیب در هشت و آسیب در گره مجاور گره مجاور در هر نمودار: (الف) گره سه، (ب) گره نه، (ج) گره سیزده و (د) گره هفت

## ۲-۶- شاخص نرمی مودال<sup>۱</sup>

این شاخص به نوعی معکوس ماتریس سختی تعریف می‌گردد. برای بدست آوردن آن شکل مودی مقیاس شده در ماتریس معکوس مجذور فرکانس‌ها و در ترانزاده شکل مودی ضرب می‌شود. بزرگترین درایه هر ستون ماتریس بدست آمده ذخیره می‌شود تا با تفاضل آن از حالت سالم، شاخص مورد نظر بدست آید. نمودار مربوط به این شاخص نیز برای هر ۳۰ گره و در تمام حالت آسیب مشخص شده است که در شکل (۹) آورده شده است.

در خصوص شاخص‌های مودال، در سازه ۳۰ گره وجود دارد که سختی کلی سازه از ترکیب سختی آن‌ها بدست می‌آید. در هر حالت آسیب یک گره از این ۳۰ گره آسیب می‌بیند که تاثیر بسیار کمی در سختی کل و تغییر اشکال مودی (علی‌الخصوص مود شیپ‌های اول) دارد. این شاخص نیز مانند شاخص‌های دیگر مودال این موضوع را تایید می‌کند. حتی با وجود امکان وجود اشتباه در انتخاب اشکال مودی که باید تغییر فاحشی ایجاد کند باز هم تغییرات این شاخص در مقیاس  $10^{-6}$  است و کمکی به تحلیل نخواهد کرد. امکان تغییر مود شیپ‌های بالاتر بیشتر است (که البته آن‌ها هم در همان مقیاس هستند) اما تعیین دقیق آن‌ها نیز کاملاً مقدور نیست.

## ۲-۷- شاخص تابع انتقال پذیری<sup>۲</sup>

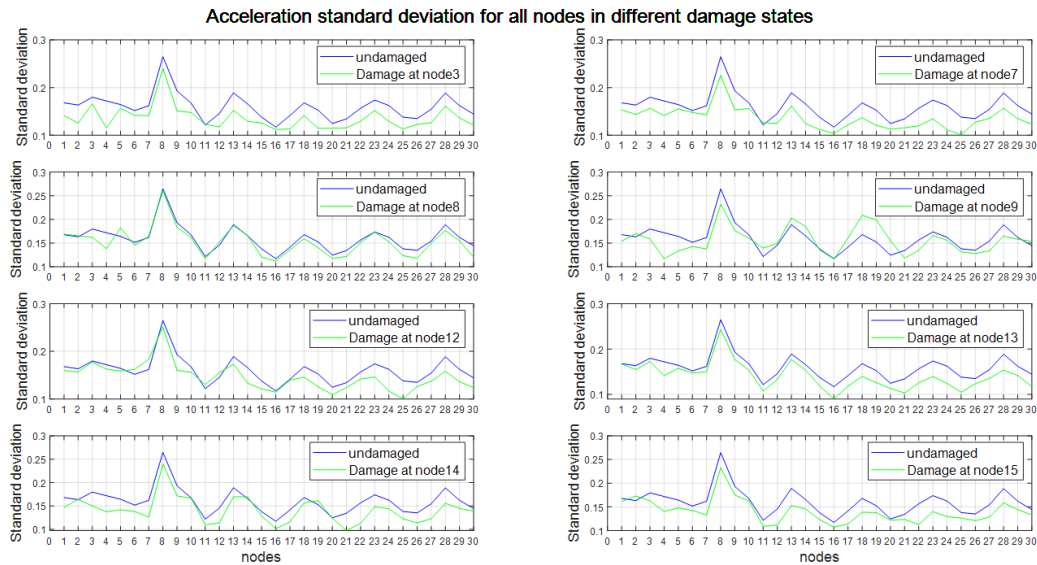
از دیگر شاخص‌های حساس به خرابی می‌توان به تابع پاسخ فرکانسی<sup>۳</sup> و تابع انتقال پذیری<sup>۴</sup> اشاره کرد. تابع پاسخ فرکانسی نسبت یک سیگنال را نسبت به سیگنال ورودی (نیرو یا شتاب) محاسبه می‌کند که در این مساله، سیگنال ورودی در دسترس نیست.

<sup>۱</sup>Modal flexibility

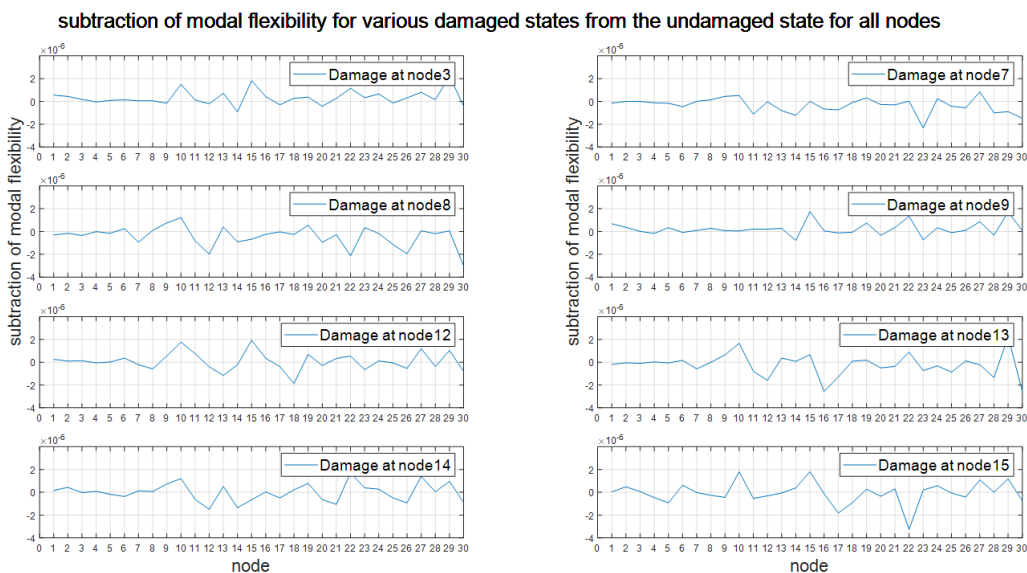
<sup>۲</sup>Frequency Response Function (FRF)

<sup>۳</sup>Transmissibility Function (TF)

در نتیجه از تابع انتقال پذیری که نسبت قدرت دو سیگنال به هم را محاسبه می‌کند استفاده شده است. در صورت برابر بودن قدرت سیگنال در یک فرکانس خاص، این تابع عدد یک را نشان خواهد داد. اگر قدرت یک فرکانس که در صورت تقسیم قرار گرفته است از مخرج بیشتر باشد این تابع مقداری بین یک تا بی‌نهایت می‌پذیرد. اگر عکس این موضوع برقرار باشد، مقدار تابع بین یک تا صفر خواهد بود. این مساله، باعث کاهش دقت در تفسیر و تصمیم‌گیری می‌شود. به همین دلیل برای بررسی تابع انتقال پذیری از دو مجموعه نمودار که به صورت قرینه در کنار هم قرار گرفته‌اند استفاده شده است که یک مجموعه مربوط به نسبت سیگنال اول به دوم و مجموعه دوم شامل نماینده معکوس است. در شکل (۱۰) نمودارهای مربوط به تابع انتقال پذیری به نمایش درآمده‌اند. در هر نمودار حالت سالم با یکی از حالات خرابی مقایسه شده است.



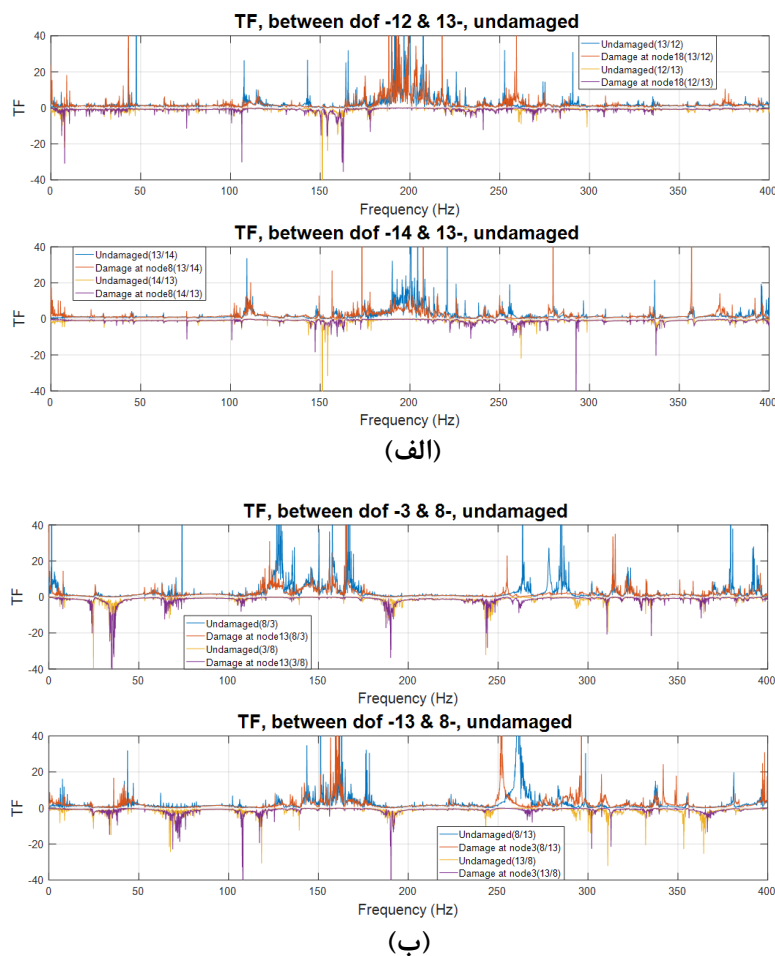
شکل ۸. مقایسه انحراف معیار شتاب گره‌های مختلف در حالات آسیب مختلف



شکل ۹. شاخصه نرمی مودال



قدرت سیگنال شتاب گره ۱۳ نسبت به گره‌های ۱۲ و ۱۴ در اکثر فرکانس‌های تحریک، در حالت سالم و آسیب دیده (دو مثال در شکل (۱۰) (ب) نمایش داده شده است) بیشتر است، این موضوع نشان از آن دارد که انتقال انرژی از گره ۱۳ به گره‌های ۱۲ و ۱۴ انجام می‌شود. گره ۱۳ جزو خط تقارن سازه است و موضوع مطرح شده به این معناست که خط انتقال انرژی از خط تقارن به بقیه گره‌های سازه است. شکل (۱۰) (الف) نسبت قدرت سیگنال گره ۸ به ۳ و ۱۳ را نشان می‌دهد. این شکل نیز نمایش می‌دهد که قدرت سیگنال شتاب گره ۸ از گره ۳ و ۱۳ بیشتر است. از نتایجی که حاصل شد می‌توان به این اشاره کرد که گره ۱۳ نسبت به هر دو گره مجاور در راستی افقی (عمود بر خط تقارن سازه) انرژی بیشتری دارد. همچنین گره ۸ نسبت به گره ۱۳ و ۳ که روی خط تقارن سازه اند دارای انرژی بیشتری می‌باشد. نتیجه اول این موضوع را روشن می‌سازد که لرزاننده در زیر یکی از گره‌های خط تقارن سازه است. همچنین با مقایسه گره‌های ۳، ۸ و ۱۳ که هر سه روی خط تقارن هستند، مشخص می‌شود که گره ۸ با بیشترین قدرت سیگنال گرهی است که لرزاننده زیر آن قرار دارد.



شکل ۱۰. شاخص تابع انتقال پذیری

## ۲-۱- مدل اتورگرسیو<sup>۱</sup>

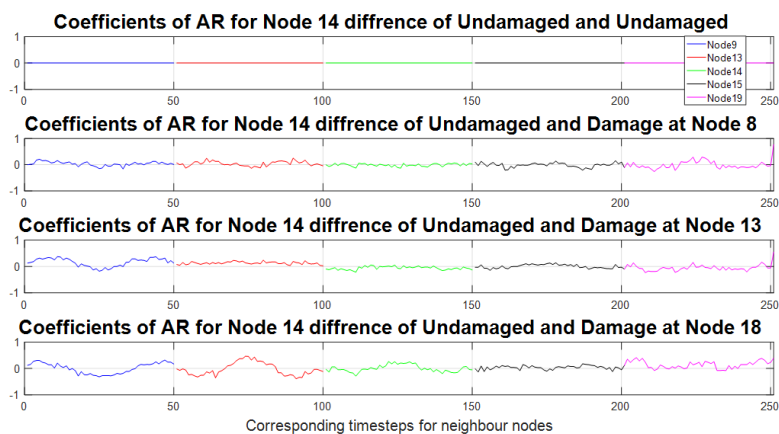
در ادامه مسیر پیدا کردن مکان لرزاننده، از مدل اتورگرسیو استفاده شد. به صورت عادی، این مدل، برای یک داده که یک سری زمانی است استفاده می‌شود. هدف آن پیشبینی هر گام زمانی با استفاده از یک ترکیب خطی از چندین گام زمانی قبل خود است. این روش با تعریف یک تابع هزینه به عنوان خطا و تلاش برای کمینه کردن آن انجام می‌گیرد. ضرایبی که در هر یک از گام‌های زمانی

<sup>۱</sup>Autoregressive (AR)

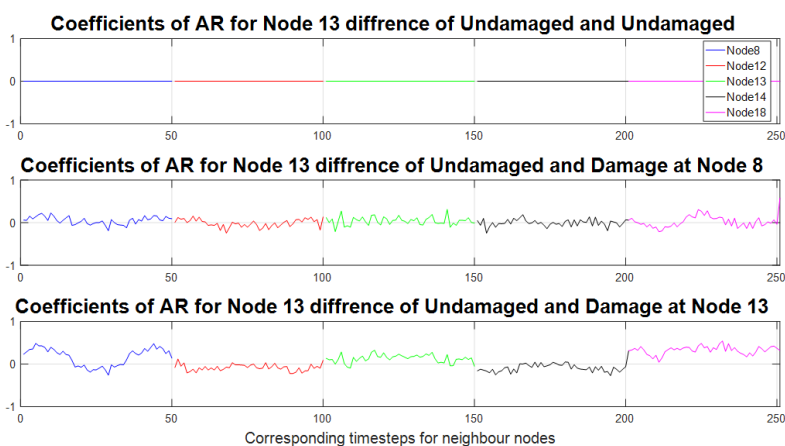
گذشته ضرب می‌شوند باید به شکلی محاسبه شوند که تابع هزینه را کمینه کنند. در یک نوآوری برای پیشبینی کردن مقدار تابع شتاب یک گره در یک گام زمانی، از ترکیب خطی گام‌های زمانی گذشته خود آن گره و چهار گره همسایه آن استفاده شد.

برای مقایسه، ضرایب به دست آمده از ضرایب حالت سالم تفریق شده است و در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در لجن نمودار، هر رنگ معرفی شده است. هر رنگ مربوط به یکی از گره‌های مجاور و خود گره مورد بررسی است. از ۵۰ گام زمانی گذشته برای رگرسیون استفاده شده است. محور افقی گام‌های زمانی را به صورت نسبی نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) (الف) رنگ قرمز مربوط به سیگنال شتاب گره ۱۳ است و محور افقی اعداد ۵۱ تا ۱۰۰ را برای آن نشان می‌دهند که متناظر است با گام‌های زمانی ۱ تا ۵۰ گام قبل برای دومین گره. محور عمودی نشان دهنده مقدار تفاضل هر یک از ضرایب (مربوط به ترکیب خطی) بین حالات آسیب دیده و حالت سالم است.

در شکل (۱۱) (الف) و (ب) مشاهده شد که در حالتی که آسیب در گره هشت وجود داشته باشد، تفاضل ضرایب به صفر نزدیک‌تر است و این نشان از آن دارد که خرابی در هشت تاثیر کمتری در رفتار سازه دارد و دلیل آن وجود لرزاننده زیر آن گره است. خرابی در هر گره موجب ایجاد یک اختلال در خط انتقال انرژی بین لرزاننده و دیگر گره‌ها ایجاد خواهد کرد و توزیع بار را تغییر خواهد داد. با این حال با خرابی گره هشت کمترین اختلال مشاهده می‌شود که به معنای آن است که انرژی‌ای که به چهار تیر متصل به گره هشت وارد می‌شود در حالت بدون آسیب و آسیب در هشت به هم نزدیک هستند. شل شدن پیچ‌های گره هشت مانع انتقال انرژی نشده زیرا که لرزاننده زیر آن قرار دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. مدل اتورگرسیو

## ۳- نتیجه گیری

طبق شاخصه‌هایی که بررسی شد، این اطمینان حاصل شد که لرزاننده در زیر گره هشت واقع شده است. از آنجایی که سازه از نظر هندسی تقارن دارد و محور تقارن آن از نقاط ۳، ۸ و ... تا ۲۸ می‌گذرد. انتظار می‌رفت که در صورت آسیب روی محور تقارن، تقارن باید حفظ شود. این موضوع با دیدن شاخصه‌هایی مثل چگالی طیفی توان و چگالی طیفی مقاطع اثبات شد.

وجود لرزاننده زیر گره هشت، باعث ایجاد تغییراتی در بعضی شاخصه‌ها شد. در صورت آسیب در گره هشت، شاخصه‌های خودهمبستگی و میان‌همبستگی، این آسیب را نمایش می‌دهند و در مورد دیگر آسیب‌ها نمی‌توانند اظهار نظر کنند. دیگر شاخصه‌ها مانند چگالی طیفی توان، چگالی طیفی مقاطع، تابع انتقال پذیری و ... آسیب در گره هشت کمتر دیده می‌شود. به این معنا که آسیب هشت با حالت سالم بسیار مشابه است و قابل مقایسه نیست.

در این سازه، انرژی از گره هشت به سازه وارد می‌شود و سپس توزیع می‌شود. خط انتقال انرژی از گره هشت به روی محور تقارن است و سپس از هر کدام به گره‌های کناری. به همین دلیل شتاب گره‌های روی محور تقارن از دیگر گره‌ها بیشتر است. همچنین با آسیب روی این محور، سازه تغییرات بیشتری را تجربه می‌کند.

## مراجع

1. Farrar CR, Worden K. Machine Learning and Statistical Pattern Recognition. *Structural Health Monitoring*. 2012. 295–320 p.
2. Anton SR, Inman DJ, Park G. Reference-Free Damage Detection Using Instantaneous Baseline Measurements. *AIAA J* . 2009 Aug;47(8):1952–64. Available from: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.43252>
3. Abdeljaber O, Younis A, Avci O, Catbas N, Gul M, Celik O, et al. Dynamic Testing of a Laboratory Stadium Structure. In: *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016* . Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2016. p. 1719–28. Available from: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479742.147>
4. Damage Scenarios | Structural Dynamics Team [Internet]. [cited 2023 Sep 11]. Available from: <http://www.structuralvibration.com/benchmark/damage/>
5. Goh LD, Bakhary N, Rahman AA, Ahmad BH. Prediction of unmeasured mode shape using artificial neural network for damage detection. *J Teknol (Sciences Eng)* . 2013 Feb 15;61(1):57–66. Available from: <https://journals.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/1624>
6. Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing-Tutorial paper. *Automatica* . 1993 Jul;29(4):815–35. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000510989390088B>
7. Abdeljaber O, Avci O, Kiranyaz S, Gabbouj M, Inman DJ. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. *J Sound Vib*. 2017;388:154–70.
8. Truong TT, Lee J, Nguyen-Thoi T. An effective framework for real-time structural damage detection using one-dimensional convolutional gated recurrent unit neural network and high performance computing. *Ocean Eng* . 2022 Jun;253:111202. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801822006035>
9. Sony S, Gamage S, Sadhu A, Samarabandu J. Vibration-based multiclass damage detection and localization using long short-term memory networks. *Structures* . 2022 Jan;35:436–51. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012421010493>
10. Rastin Z, Ghodrati Amiri G, Darvishan E. Generative Adversarial Network for Damage Identification in Civil Structures. Rainieri C, editor. *Shock Vib* . 2021 Sep 3;2021:1–12. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2021/3987835/>