



# ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات  
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



## پایش سلامت دکل های فولادی خرابایی جهت شناسایی شدت و مکان آسیب با استفاده از شاخص های انتگرالی و تفاضلی

مصطفی خادمی<sup>ا</sup>، پویا شهابی<sup>ب</sup>، مریم بیطرف<sup>پ\*</sup>

<sup>ا</sup> ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، دانشجوی کارشناسی ارشد  
مهندسی زلزله

<sup>ب</sup> ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، دانشجوی کارشناسی ارشد  
مهندسی سازه

<sup>پ</sup> ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، استادیار

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

### چکیده

در این پژوهش به بررسی موضوع پایش سلامت سازه‌ها جهت تشخیص، مکان‌یابی و تعیین شدت آسیب پرداخته شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق بکارگیری توابع انتقال پذیری در مطالعه موردی یک سازه خرابایی فولادی واقع در کشور آلمان بر اساس پاسخ‌های شتاب آن در زمان‌های مختلف است. توابع انتقال پذیری با استفاده از داده‌های شتاب ثبت شده در دو حالت سالم و آسیب دیده محاسبه می‌شوند. این توابع انتقال پذیری از طریق محاسبه تابع چگالی طیف توان متقاطع<sup>۱</sup> و تابع چگالی طیف توان<sup>۲</sup> داده‌های شتاب و سپس محاسبه نسبت آنها بدست می‌آیند. روش استفاده شده در این پژوهش امکان بررسی و مقایسه همزمان تمام خروجی‌های توابع انتقال پذیری و شاخص‌های خرابی حاصل از سنسورهای شتاب‌سنج را دارد. نتایج حاصل از مطالعه موردی به خوبی توانایی این روش را در تشخیص و جانمایی آسیب نشان می‌دهد. همچنین شاخص شدت آسیب کمک شایانی در تعیین شدت خرابی در سازه می‌کند.

**کلمات کلیدی:** پایش سلامت سازه؛ تابع انتقال‌پذیری؛ شناسایی آسیب؛ شاخص آسیب.

### ۱- مقدمه

در حیطه مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا سازه‌های زیرساختی و مهمی اعم از پل‌ها و ریل‌های راه‌آهن و لوله‌های هیدرولیک عموماً برای تحمل بارهای خارجی وارده به کار گرفته می‌شوند. با این حال، با توجه به اینکه این سازه‌ها در طول عمر خود معمولاً تحت

<sup>۱</sup> Cross Power Spectral Density (CPSD)

<sup>۲</sup> Power Spectral Density (PSD)

اثر بارهای دینامیکی و محیطی قرار دارند، بطور مداوم در معرض خرابی‌هایی هستند که توسط آسیب‌های خطی مانند ساییدگی و آسیب‌های غیرخطی همچون خستگی ایجاد می‌شوند [۵-۱].

در دهه‌های اخیر، پایش سلامت سازه<sup>۱</sup> توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است [۹-۶]. فرآیند SHM معمولاً شامل جمع‌آوری داده، استخراج ویژگی‌های حساس به آسیب و ارزیابی وضعیت می‌باشد. پیشرفت در زمینه سخت افزار، امکان استفاده از تعداد بالایی از حسگرها را با هزینه نسبتاً کم فراهم کرده است [۱۰]. در نتیجه، حجم زیادی از داده تولید می‌شود. بنابراین، روش‌های محاسباتی پیشرفته برای مدیریت حجم زیاد اطلاعات از اهمیت بالایی برخوردار هستند. تبدیل داده‌های خام به ویژگی‌های حساس به آسیب که نشان دهنده عملکرد فعلی و آتی سازه است، معمولاً نیازمند اتخاذ رویکردهای مناسب شناسایی سیستم<sup>۲</sup> است [۱۱]. به طور کلی SI تعریف کلی از استخراج اطلاعات مربوط به رفتار سازه مستقیماً از داده‌های تجربی می‌باشد که می‌تواند با ساخت مدل‌های دینامیکی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده یا بدون استفاده از مدل انجام شود. در زمینه پایش سلامت سازه، شناسایی سیستم عمدتاً شامل دو شاخه است: شناسایی پارامترهای مودال و شناسایی پارامترهای فیزیکی. شناسایی پارامترهای مودال به دنبال شناسایی پارامترهای مودال یک سیستم سازه‌ای، مانند فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و اشکال مودی است، در حالی که شناسایی پارامترهای فیزیکی شامل استخراج اطلاعات مفید مربوط به سختی، جرم و میرایی می‌باشد. انتظار می‌رود نتایج حاصل از SI برای ارزیابی وضعیت سلامت زیرساخت و اطلاعات آسیب بیشتر مورد استفاده قرار گیرد، که به مهندسان اجازه می‌دهد تا ایمنی و قابلیت سرویس دهی سازه‌های حیاتی را بهبود ببخشند [۱۴-۱۲].

توابع پاسخ فرکانسی<sup>۳</sup> معمولاً برای شناسایی اساسی‌ترین روابط ورودی-خروجی وابسته به فرکانس یک سیستم دینامیکی استفاده می‌شوند. روش‌های مبتنی بر ورودی و خروجی به طور معمول دقیق‌تر هستند [۱۵]، اما داده‌های ورودی همیشه در دسترس نیستند. مشکل دسترسی به ورودی کنترل شده، منجر به توسعه رویکردهای جدید SHM با استفاده از صرفاً داده‌های خروجی شده است. بنابراین، در SI استفاده از فقط داده‌های خروجی، باعث ایجاد مشکلاتی شده است و منجر به استفاده از تکنیک‌های جدیدی برای حل این مشکلات شده است. توابع انتقال پذیری<sup>۴</sup> که می‌توانند از اندازه‌گیری ورودی و فرض مدل‌های خاص برای ورودی اجتناب کنند، ثابت کرده اند که یک ابزار جذاب برای حل این مشکل هستند.

در این مقاله از داده‌های شتاب یک سازه فولادی خرابی واقع در کشور آلمان، در سناریوهای مختلف شامل حالات سالم و آسیب-دیده در شرایط محیطی یکسان، اعم از دما و رطوبت، برای محاسبه تابع انتقال پذیری برای تشخیص وجود آسیب استفاده شده است. سپس دو شاخص آسیب برای بررسی شدت و محل آسیب در سازه مورد مطالعه به دو روش انتگرالی و تفاضلی، تعریف شده‌اند. برای صحت‌سنجی روش مورد استفاده، از تابع توزیع احتمال در توابع انتقال پذیری محاسبه شده قسمت قبلی برای دو حالت سالم سازه در شرایط تقریباً یکسان محیطی استفاده شده تا اثرات این شرایط محیطی بر سلامت سازه در محاسبات کمترین خطا و تغییرات را ایجاد نمایند. در قسمت بعد به بررسی نمودارهای شاخص خرابی تفاضلی حاصل از دو حالت سالم و آسیب‌دیده پرداخته می‌شود و نتایج در قسمت مربوطه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲- توابع انتقال (TF)

برای یک سیستم دینامیکی خطی پایدار، فرض می‌شود بردار نیروهای اعمال شده با  $f(t)$  و پاسخ مدل با  $x(t)$  نشان داده می‌شوند. در حوزه فرکانس، رابطه بردار پاسخ  $X(\omega)$  و نیروهای اعمال شده  $F(\omega)$  را می‌توان با رابطه ۱ نمایش داد:

<sup>۱</sup> Structural Health Monitoring (SHM)

<sup>۲</sup> System Identification (SI)

<sup>۳</sup> Frequency Response Function (FRF)

<sup>۴</sup> Transmissibility Function (TF)

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $F(\omega)$  و  $X(\omega)$  بردارهای  $n \times 1$  هستند که به ترتیب نشان‌گر نیرو اعمال شده و پاسخ سیستم هستند و در آخر  $H(\omega)$  را به صورت رابطه ۲ می‌توان نشان داد:

$$H(\omega) = [\omega^2 M + i\omega C + K] \quad (2)$$

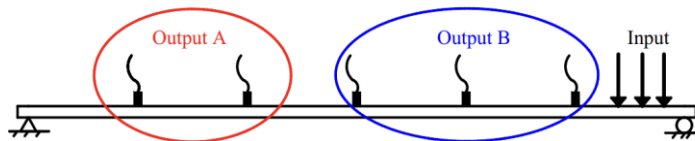
که در آن  $M$  و  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه را نشان می‌دهند و همچنین  $i^2 = -1$  می‌یابد بطور کلی توابع انتقال (TF) را می‌توان به دو دسته محلی<sup>۱</sup> و کلی<sup>۲</sup> تقسیم کرد. TF های محلی همچنین به عنوان TF اسکالر شناخته می‌شوند، در حالی که TF های کلی به عنوان انتقال چند متغیره یا ماتریس انتقال نامیده می‌شوند.

از نظر تئوری، TF های محلی و TF های کلی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

TF محلی، همانطور که در رابطه (۳) نشان داده شده،  $T_{lm}(\omega)$  به عنوان نسبت بین تبدیل فوریه سریع<sup>۳</sup> یک پاسخ دلخواه  $x_l(t)$  و FFT یک پاسخ مرجع  $x_m(t)$  تعریف می‌شود:

$$T_{lm}(\omega) = \frac{x_l(\omega)}{x_m(\omega)} \quad (3)$$

که در آن  $x_l(\omega)$  و  $x_m(\omega)$  به ترتیب ضرایب FFT از  $x_l(t)$  و  $x_m(t)$  در فرکانس  $\omega$  را نشان می‌دهند. در حالی که TF کلی (Global TF) معمولاً برای فرموله کردن رابطه بین دو مجموعه بردار پاسخ در حوزه فرکانس  $x(t) = [x_A^T; x_B^T]^T$  استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است،  $X(A(t))$  و  $X(B(t))$  به ترتیب اندازه‌گیری‌های مربوط به قسمت‌های A و B را نشان می‌دهند، در حالی که  $X(A(\omega))$  و  $X(B(\omega))$  به ترتیب ضرایب FFT از  $X(A(t))$  و  $X(B(t))$  را نشان می‌دهند.



شکل ۱. تقسیم دو مجموعه پاسخ برای یک سازه

در روش‌های مبتنی بر TF کلی، نیروهای خارجی همزمان بر یک سیستم چند درجه آزادی<sup>۴</sup> عمل می‌کنند، اما این نیروی خارجی فقط بر برخی از درجات آزادی تأثیر می‌گذارد. پاسخ درجات آزادی بیشتر نسبت به تعداد نیروهای خارجی اندازه‌گیری می‌شود و از ماتریس معکوس عمومی برای شناسایی نیروی خارجی ناشناخته استفاده می‌شود. سپس تابع انتقال یا تابع پاسخ فرکانسی که اندازه‌گیری نشده است، تخمین زده می‌شود. در روش‌های مبتنی بر TF محلی، یک نیروی خارجی بر یک درجه آزادی واحد عمل می‌کند و توابع انتقال مختلف اندازه‌گیری می‌شوند. هنگامی که فرکانس نیروی خارجی به فرکانس طبیعی سیستم می‌رسد، آن فرکانس با استفاده از خاصیت ثابت بودن تابع انتقال بدون توجه به موقعیت نیروی خارجی شناسایی می‌شود. این روش را می‌توان به ماشین‌ها و سازه‌های چند درجه آزادی عمومی اعمال کرد. سپس با مقایسه TF به دست آمده در آزمایش و TF به دست آمده از مدل تحلیلی، پارامترهای مشخصه (یعنی جرم، ضریب میرایی، ثابت فنر و غیره) شناسایی می‌شوند.

در این پژوهش از ساده‌ترین روش تابع انتقال‌پذیری که از دقت خوبی نیز برخوردار است استفاده شده است، که بر اساس آن محاسبه توابع انتقال‌پذیری با استفاده از داده‌های شتاب ثبت شده در دو حالت سالم و آسیب دیده از طریق محاسبه تابع چگالی توان<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> Local

<sup>۲</sup> Global

<sup>۳</sup> Fast Fourier Transform (FFT)

<sup>۴</sup> Multi Degree Of Freedom (MDOF)

<sup>۵</sup> Power Spectral Density (PSD)

و تابع چگالی توان متقاطع<sup>۱</sup> این رکوردها بجای استفاده مستقیم از محاسبه FFT، سپس محاسبه نسبت آنها طبق روابط موجود می‌باشد. تابع CPSD برای محاسبه چگالی طیف توان متقاطع استفاده می‌شود. این تابع، میزان توان موجود در هر جزء طیفی بین دو سیگنال را نشان می‌دهد و برای تحلیل فرکانسی سیگنال‌ها کاربرد دارد. همچنین تابع چگالی طیف توان، میزان توان موجود در هر جزء طیفی یک سیگنال را نشان می‌دهد. PSD برای تحلیل فرکانسی و تعیین میزان توان سیگنال در فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شود. به عنوان مثال، برای یک موج سینوسی با فرکانس ثابت، شکل PSD فقط شامل یک جزء طیفی در فرکانس مشخص می‌شود. روش مورد بررسی امکان مشاهده و مقایسه تمام رکوردها و محاسبه شاخص خرابی نشان داده شده توسط تمامی سنسورها را امکان پذیر کرده است.

### ۳- شاخص‌های آسیب<sup>۲</sup>

#### ۱-۳ شاخص آسیب انتگرالی

به دلیل مزایای توابع انتقال محلی (TF) از جمله عدم نیاز به شناسایی مودال و مدل تحلیلی یا عددی سازه، گروه‌های تحقیقاتی مختلفی به طور گسترده از آن‌ها برای تشخیص آسیب استفاده کرده‌اند. شاخص آسیب بر اساس انتگرال روی یک باند فرکانسی از اختلاف بین TF های مربوط به حالت سالم و آسیب دیده در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$DI = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |T_{lm}^h(\omega) - T_{lm}^d(\omega)| d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} T_{lm}^h(\omega) d\omega} \quad (۴)$$

که در آن  $Th_{lm}(x)$  تابع انتقال بدون آسیب و  $Td_{lm}(x)$  تابع انتقال با آسیب احتمالی است. در اینجا TF به عنوان نسبت بین چگالی طیفی متقابل پاسخ بین حسگرهای ۱ و  $m$  روی سازه یعنی  $G_{hm}(x)$  و چگالی طیفی خود توان پاسخ در نقطه  $m$  یعنی  $G_{hmm}(x)$  تعریف می‌شود.

#### ۲-۳ شاخص آسیب تفاضلی

اگر TF بین مکان‌های متوالی تعریف شده روی سازه آسیب دیده، برای نیروی یکسان محاسبه شود و TF سازه بدون آسیب از TF محاسبه شده کم شود، این اختلاف محل آسیب را نشان می‌دهد. شاخص زیر برای تشخیص آسیب تعریف می‌شود:

$$DI = \sum_{\omega} |T_{lm}^h(\omega) - T_{lm}^d(\omega)| \quad (۵)$$

روند تشخیص آسیب با استفاده از شاخص آسیب تفاضلی TF مشابه روش شاخص آسیب انتگرال TF است.

### ۴- مشخصات سازه مورد بررسی

سازه مورد بررسی در میدانی به فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب هانوفر (ایالت سفنن آلمان) واقع شده است [۱۶]. این تاسیسات شامل یک دکل مهاربندی فولادی که روی یک فونداسیون بلوکی بتنی سوار شده است و یک سیستم جمع آوری داده می‌باشد. به منظور

<sup>۱</sup> Cross Power Spectral Density (CPSD)

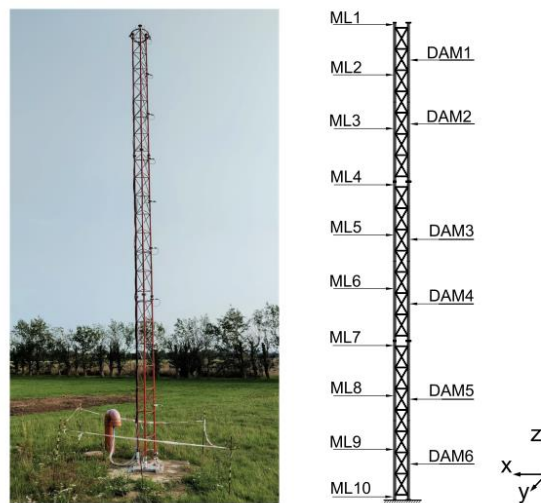
<sup>۲</sup> Damage Indicator (DI)

تست سناریوهای مختلف آسیب، دکل مجهز به مکانیزم های آسیب قابل برگشت در شش سطح از ارتفاع خود می‌باشد. فونداسیون بلوکی در اکتبر ۲۰۱۹ ساخته شده، برج در ژوئن ۲۰۲۰ برپا شده و اندازه گیری های مداوم از آگوست ۲۰۲۰ آغاز گردیده است.

دکل مهاربندی فولادی از سه بخش یکسان هرکدام به طول ۳ متر تشکیل شده است که در نتیجه ارتفاع کلی آن به ۹ متر می‌رسد. وزن کلی بدون سنسور تقریباً ۹۰ کیلوگرم است. هر بخش دارای سه پایه لوله ای است که مقطعی شبیه به یک مثلث قائم الزاویه متساوی الساقین تشکیل می‌دهد و از هفت سطح مهاربند و همچنین مقاطع اتصال کوتاه در انتها تشکیل شده است. مقاطع به یک لبه بیضوی شکل ختم می‌شوند که امکان اتصال بخش ها به ترتیب دلخواه با استفاده از پیچ و مهره های فولادی معمولی M1۰ را فراهم می‌آورد.

#### ۱-۴ ویژگی‌های آسیب قابل برگشت و شرایط محیطی

ویژگی‌های کلیدی سازه تست، آسیب‌های موضعی قابل برگشت است که به صورت تغییر در سختی و جرم خود را نشان می‌دهد. بدین منظور، در شش سطح سازه که در شکل (۲) نشان داده شده است (DAM)، مکانیزم های آسیب قابل برگشت امکان قطع شدن مهاربندهای جداگانه را فراهم می‌کند. در هر سطح آسیب احتمالی، هر سه مهاربند به مکانیزم آسیب مجهز شده اند که در نتیجه ۱۸ موقعیت مختلف برای معرفی تغییرات سختی موضعی ایجاد می‌شود. مکانیزم های آسیب با شل کردن سوکت های پیچ و حذف قطعات اتصال که منجر به قطع کامل مهاربندهای مربوطه می‌شود، فعال می‌شوند. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده (ML)، محل نصب حسگرهای شتاب‌سنج بر روی این سازه مشخص شده است.

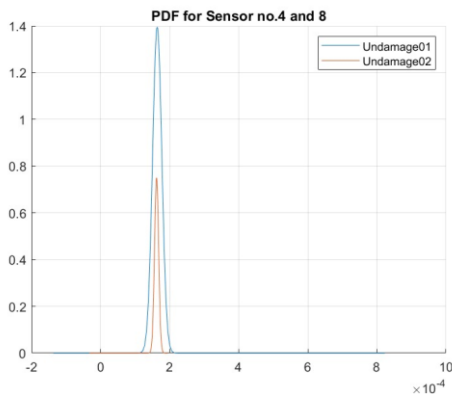


شکل ۲ تصویر آزمایشگاهی سازه آزمایش شده (سمت چپ)، و طرح شماتیک شامل سطوح اندازه‌گیری و محل نصب حسگرها (ML) و موقعیت‌های آسیب (DAM) (سمت راست) [۱۶]

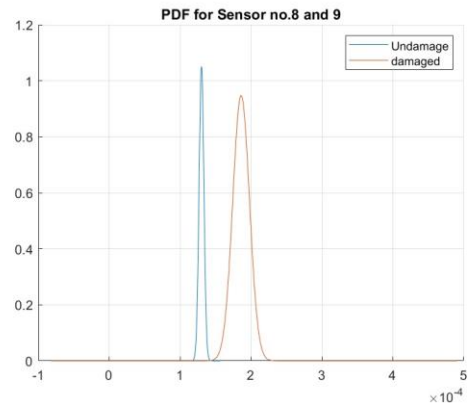
## ۵- نتایج

### ۱-۵ مقایسه تابع توزیع احتمال<sup>۱</sup> دو حالت سالم و حالت‌های سالم و آسیب دیده

ابتدا برای صحت‌سنجی، روش آماری تابع توزیع احتمال روی توابع TF برای دو حالت سالم، که تا حد ممکن شرایط دمایی و رطوبت نزدیک به هم داشتند بررسی شدند که نتایج حاصل در شکل (۳-الف) نمایش داده شده است.



(الف)

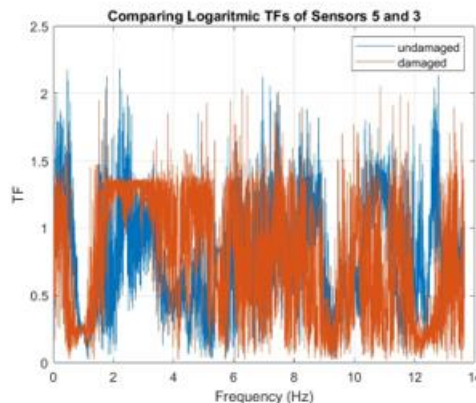
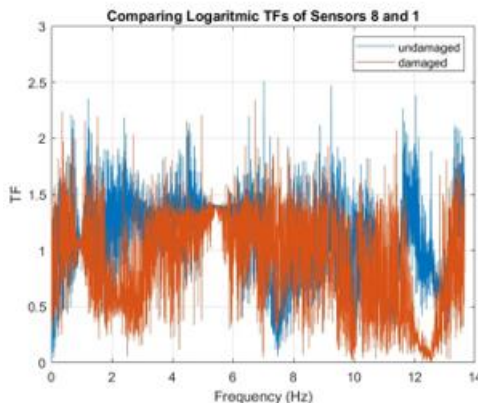


(ب)

شکل ۳. (الف) بررسی PDF های دو حالت سالم با شرایط محیطی یکسان (ب) بررسی PDF های دو حالت سالم و آسیب‌دیده با شرایط محیطی یکسان

با توجه به نمودارهای PDF در شکل (۳-الف)، نتایج نزدیک به هم هستند و تغییری در شرایط سلامت سازه به وجود نیامده است. همانطور که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است، با توجه به استفاده از داده‌های سازه آسیب دیده (DAM3) تفاوت‌هایی در داده‌های PDF مشاهده می‌شوند اما داده‌هایی از سنسورها نیز وجود داشتند که مانند حالت سالم، آسیبی نمایش نمی‌دادند. بنابراین صرفاً ترسیم و مقایسه PDF ها معیار قابل اعتمادی نیست.

### ۲-۵ نتایج حاصل از محاسبه تابع انتقال‌پذیری دو حالت آسیب‌دیده و سالم

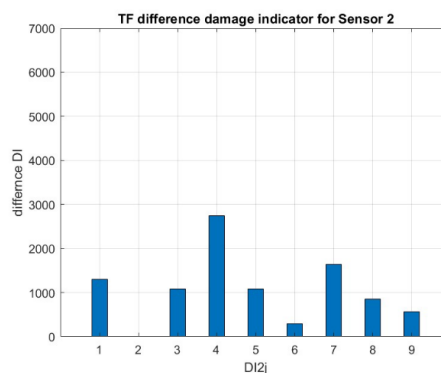
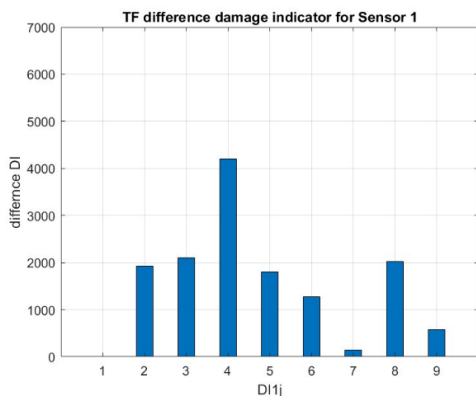


شکل ۴. نمودار TF های رسم شده دو حالت سالم و آسیب‌دیده (DAM3) برای داده‌های حاصل از سنسورهای نامبرده

<sup>۱</sup> Probability Density Function (PDF)

همانطور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، تابع انتقال به خوبی توانسته است وجود آسیب در سازه را شناسایی کند. اختلاف تابع انتقال محاسبه شده در فرکانس ثات، بین دو حالت مورد بررسی که با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده اند، بیانگر وجود آسیب می‌باشند.

### ۳-۵ شاخص آسیب و ترسیم نمودار میله‌ای مربوط به آن



شکل ۵. نمودارهای میله ای شاخص آسیب حاصل از سنسورهای نامبرده

در شکل (۵)، شاخص های آسیب تفاضلی محاسبه شده برای هر سنسور مشخص شده و هر میله شماره گذاری در نمودار، شاخص آسیب حاصل از تفاضل آن حسگر و حسگر به شماره اشاره شده در عنوان نمودار می‌باشد. تمامی محاسبات انجام شده در نمودارهای شکل (۵)، حاصل داده‌های شتاب در راستای محور X شتاب‌سنج‌ها می‌باشد. در میان سنسورهایی که از آسیب دور بوده‌اند، مانند سنسورهای ۱ تا ۳ و ۸ و ۹، بیشترین اختلاف با سنسور ۴ و بعد از آن سنسور ۷ مشاهده شده است. می‌توان تا حدود خوبی شدت و مکان آسیب را با استفاده از روش‌های استفاده شده در این پژوهش تشخیص داد. نتایج تحلیل نظری، شبیه‌سازی و موارد تجربی نشان می‌دهد که این روش‌ها علی‌رغم داشتن روندی ساده، می‌توانند وجود آسیب را با دقت خوبی تشخیص دهند، ولی نمی‌توانند شدت آن و موقعیت‌های احتمالی را نمایش دهند [۱۷].

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی امکان تشخیص وجود، شدت و محل آسیب با استفاده از تابع انتقال‌پذیری و شاخص‌های آسیب‌انگیزی و تفاضلی پرداخته شد. برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از داده‌های شتاب حسگرهای سازه خرابی فولادی واقع در کشور آلمان استفاده شد. پس از انجام محاسبات و مقایسه‌های لازم، مشاهده شد با اینکه روش‌های بررسی شده در این پژوهش نتایج قابل قبولی در تشخیص آسیب داشتند اما به صورت مستقیم از توابع انتقال‌پذیری استفاده می‌کنند، بنابراین بیشتر تمرکز بر روی صرفاً تشخیص آسیب بوده و اطلاعات کاملی درباره محل دقیق آسیب و شدت آن نشان نمی‌دهد. علت این موضوع می‌تواند اثرگذاری توابع نزدیک و کنار هم بر روی یکدیگر باشد، همین‌طور علت می‌تواند رفتار یکسان تابع انتقال با آسیب‌های خطی و غیرخطی نیز باشد.

### مراجع

1. Bickford, J.H., Nassar, S.: Handbook of Bolts and Bolted Joints. Marcel Dekker Inc., New York (1998)
2. Bickford, J.H.: Introduction to the Design and Behaviour of Bolted Joints: Nongasketed Joints. CRC Press, New York (2007)
3. Kakirde, A., Dravid, S.: Study of vibration loosening of bolted joints: a review. Int. J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Special (6), (2017)

4. disasters caused by material fatigue and what we learned from them. Element, 2016. <https://www.element.com/nucleus/2016/06/10/5-disasters-caused-by-materialfatigue-and-what-we-learned-from-them>. Accessed July 2021
5. McLaren, N.: Undetected stress fatigue crack caused wing to break off in water bombing plane crash that killed pilot David Black. ABC Illawarra, 2016. <https://www.abc.net.au/news/2016-02-16/south-coast-dromader-crashfinalreportrelease/7170920>. Accessed July 2021
6. H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, et al, A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001, Los Alamos National Laboratory, 2003.
7. J.M.W. Brownjohn, Structural health monitoring of civil infrastructure, Philos. Trans. R. Soc. London A: Math., Phys. Eng. Sci. 365 (1851) (2007) 589–622.
8. J.P. Ou, H. Li, Structural health monitoring in mainland China: review and future trends, Struct. Health Monitor. 9 (3) (2010) 219–231.
9. W.J. Staszewski, B.C. Lee, L. Mallet, F. Scarpa, Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing, Smart Mater. Struct. 13 (2) (2004) 251.
10. E.N. Chatzi, C. Papadimitriou, Identification Methods for Structural Health Monitoring, Springer, 2016.
11. E.N. Chatzi, A.W. Smyth, the unscented Kalman filter and particle filter methods for non-linear structural system identification with non-collocated heterogeneous sensing, Struct. Control Health Monit. 16 (1) (2009) 99–123.
12. O.S. Salawu, Detection of structural damage through changes in frequency: a review, Eng. Struct. 19 (9) (1997) 718–723.
13. W.M. Ostachowicz, Damage detection of structures using spectral finite element method, Comput. Struct. 86 (3) (2008) 454–462.
14. T.H. Yi, H.N. Li, X.D. Zhang, A modified monkey algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring, Smart Mater. Struct. 21 (10) (2012) 52–53.
15. M. Imregun, W.J. Visser, D.J. Ewins, Finite element model updating using frequency response function data-Part I: Theory and initial investigation, Mech. Syst. Sig. Process. 9 (2) (1995) 187–202.
16. Wernitz S, Hofmeister B, Jonscher C, Griebmann T, Rolfes R. A new open-database benchmark structure for vibration-based Structural Health Monitoring. Structural Control and Health Monitoring. 2022 Nov;29(11):e3077.
17. Li Q, Liao M, Jing X. Transmissibility function-based fault diagnosis methods for beam-like engineering structures: a review of theory and properties. Nonlinear Dynamics. 2021 Nov 1:1-33.