



ISAV2024

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



ارزیابی کارایی ویژگی‌های دینامیکی سرعت مطلق تجمعی و شدت آریاس در تشخیص آسیب سازه‌های تحت اثر باد: مطالعه موردی بر روی دکل فولادی

یاسمن راستی منش^۱، سیده معصومه میررزاقی^۱، فاطمه میرزاخانی^۱، مریم بیطرف^{۲*}

ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، ۱۴۱۷۶۱۴۴۱۱، دانشجوی
کارشناسی ارشد

ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، ۱۴۱۷۶۱۴۴۱۱، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: maryam.bitaraf@ut.ac.ir

چکیده

یکی از مهم ترین مسائل در علم پایش سلامت سازه^۱ تشخیص به موقع و پیشگیری وقوع حوادث احتمالی است. این مقاله به بررسی کارایی دو ویژگی دینامیکی ویژگی‌های شدت آریاس^۲ و سرعت مطلق تجمعی^۳ در تشخیص و مکان‌یابی آسیب سازه‌های تحت تأثیر عوامل محیطی می‌پردازد. مطالعه موردی بر روی یک دکل فولادی در معرض تغییرات دما و سرعت باد انجام شده است. برای تحلیل داده‌های ارتعاشی، ابتدا فرآیند پیش‌پردازش و نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد و با استفاده از روش نرمال‌سازی تغییرات ناشی از باد حذف شد. ویژگی‌های شدت آریاس و سرعت مطلق تجمعی به عنوان شاخص‌های حساس به تغییرات دینامیکی سازه در تشخیص آسیب با دقت بالایی عمل کرده و علاوه بر این، قابلیت مکان‌یابی نقاط آسیب‌دیده را نیز دارند. در مجموع این مطالعه نشان داد که ترکیب ویژگی‌های دینامیکی شدت آریاس و سرعت مطلق تجمعی همراه با نرمال‌سازی داده‌ها، می‌تواند روشی مؤثر و کارآمد برای تشخیص و مکان‌یابی آسیب در سازه‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی باشد و نقش مؤثری در پایش سلامت سازه‌ها در شرایط واقعی و متغیر ایفا کند.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه؛ تشخیص خرابی؛ سرعت مطلق تجمعی؛ شدت آریاس.

۱- مقدمه

سازه‌های مهم مهندسی عمران نظیر ساختمان‌های بلند، بزرگراه‌ها و پل‌ها اجزای ضروری در زندگی امروزه هر جامعه‌ای هستند. با گسترش روزافزون سازه‌ها، تشخیص زود هنگام آسیب از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر این امکان را می‌دهد که در صورت وقوع خرابی در سازه، بتوان آن را به موقع تعمیر کرده و از خرابی‌های ناگهانی و خسارت‌های جبران ناپذیر جانی و مالی جلوگیری کرد. سازه‌ها به دلایل مختلف از جمله زلزله، طوفان‌ها و استفاده نادرست آسیب‌پذیر هستند. بسیاری از این سازه‌ها نیز قدیمی بوده و عمر مفید آن‌ها

^۱ Structural health monitoring (SHM)

^۲ Arias Intensity (AI)

^۳ Cumulative Absolute Velocity (CAV)

رو به اتمام است و نیازمند تعمیرات و بازسازی‌های پرهزینه‌اند. به‌ویژه در کشور ما، بسیاری از زیرساخت‌های حیاتی به پایان عمر طراحی خود نزدیک می‌شوند. بنابراین، ارزیابی ویژگی‌های حساس به آسیب و پایش وضعیت سازه‌ها برای شناسایی سریع خرابی‌های بالقوه ضروری است [۱].

پژوهشگران در سراسر جهان در حال توسعه روش‌های نوین تشخیص آسیب‌های سازه‌ای هستند و پایش سلامت سازه^۱ به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم پیشرفت صنعت ساخت‌وساز در هر کشور شناخته شده است. آمار نشان می‌دهد که چین و ایالات متحده آمریکا به ترتیب ۲۰٪ و ۱۸٪ از تحقیقات جهانی، پیشرو در این زمینه هستند [۲]. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه عموماً در چهار محور متمرکز شده‌اند: بررسی کلی روش‌های تشخیص آسیب، شناسایی مکان‌های آسیب‌دیده، ارزیابی درجه آسیب و تخمین عمر باقیمانده سازه آسیب‌دیده [۳].

به طور کلی روش‌های تشخیص آسیب به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های استاتیکی و دینامیکی. در روش‌های استاتیکی، با محاسبه کرنش و جابجایی ناشی از بارهای استاتیکی و استفاده از مدل المان محدود، تغییرات در شکل و سختی سازه شناسایی می‌شود. با این حال، این روش‌ها به دلیل حجم بالای داده‌های مورد نیاز و پیچیدگی ساخت مدل‌های المان محدود، محدودیت‌هایی دارند. از سوی دیگر، روش‌های دینامیکی که مبتنی بر تحلیل تغییرات در مشخصات ارتعاشی سازه هستند، به دلیل اثربخشی بالاتر در تشخیص خرابی، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند و به دو روش تقسیم می‌شوند: روش‌های برپایه سیگنال و روش‌های برپایه مودال [۴]. در میان شاخص‌های دینامیکی، سرعت مطلق تجمعی^۲ و شدت آریاس^۳ به‌عنوان ابزارهای قدرتمند برای تشخیص تغییرات دینامیکی و ارزیابی آسیب سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. CAV معیاری برای بررسی شدت کلی ارتعاشات در طول زمان است و از جمع مقادیر مطلق شتاب‌های ثبت‌شده محاسبه می‌شود. این ویژگی حساسیت بالایی به تغییرات کوچک در رفتار دینامیکی سازه دارد و می‌تواند نشانه‌ای از وجود آسیب باشد. از سوی دیگر، AI با استفاده از انتگرال مربع شتاب‌های ثبت‌شده در طول مدت رخداد دینامیکی به دست می‌آید و به‌عنوان نمایه‌ای از انرژی ارتعاشات سازه شناخته می‌شود. هردوی این ویژگی‌ها به‌ویژه در پایش سازه‌هایی که تحت اثر تحریک زلزله قرار دارند، کاربرد دارند [۵، ۶، ۷].

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که عوامل محیطی نظیر دما، رطوبت و سرعت باد می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها داشته باشند. به‌ویژه در مورد سازه‌های دکل فولادی که به دلیل ارتفاع و انعطاف‌پذیری بالا در معرض نیروهای باد قرار دارند، این نیروها می‌توانند تغییرات دینامیکی چشمگیری در رفتار سازه ایجاد کنند. باد می‌تواند اثرات قابل توجهی بر رفتار دینامیکی آن‌ها داشته باشد بیشتر مطالعات گذشته به بررسی سازه‌ها تحت بارهای مکانیکی داخلی یا در شرایط آزمایشگاهی پرداخته‌اند و داده‌های کمتری از عملکرد سازه‌های بزرگ در شرایط محیطی واقعی و به خصوص تحت اثر باد موجود است [۸، ۹]. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از ویژگی‌های دینامیکی برای تشخیص آسیب در سازه‌ها توانسته است نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه دهد. در سالهای اخیر تلاش‌هایی برای تشخیص آسیب با استفاده از دو ویژگی برای پایش سلامت سازه صورت گرفته است. اما بیشتر این تحقیقات در حیطه تحریک زلزله بوده است.

در این مقاله به ارزیابی کارایی دو ویژگی دینامیکی CAV و AI در تشخیص و مکان‌یابی آسیب سازه‌ای تحت تأثیر نیروی باد پرداخته می‌شود. با بکارگیری روش عددی برای سازه مورد نظر، مقادیر این دو ویژگی برای حالت‌های خرابی و حالت سالم استخراج شده است و به تفسیر آن‌ها پرداخته شده است.

۲- ویژگی‌های حساس به آسیب

۲-۱ شدت آریاس

میزان انرژی لرزه‌ای جذب‌شده توسط سازه را محاسبه می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Structural health monitoring (SHM)

^۲ Cumulative Absolute Velocity (CAV)

^۳ Arias Intensity (AI)

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} \dot{x}(t)^2 dt \quad (1)$$

این شاخصه طبق تحقیقات گذشته، عملکرد مطلوبی در شرایط نویزی و بدون نویز دارد. این ویژگی نسبت به تغییرات در کوتاه مدت حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهد و به همین علت توانایی شناسایی سریع آسیب‌های ناگهانی را دارد. به طور کلی می‌توان گفت این شاخصه برای تشخیص اثرات بارهای ناگهانی مناسب است [۵].

۲-۲ سرعت مطلق تجمعی

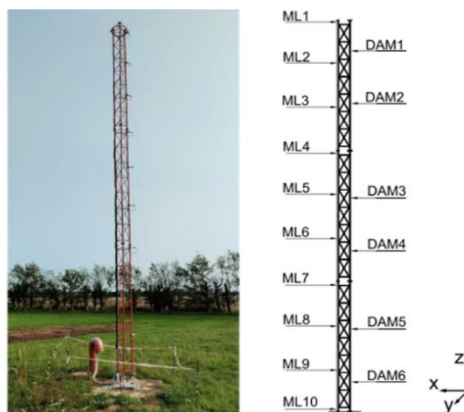
مقدار مطلق تجمعی سرعت را محاسبه می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CAV = \int_0^t |\dot{x}(t)| dt \quad (2)$$

این شاخصه طبق تحقیقات گذشته، عملکرد خوبی در شرایط نویزی دارد. این ویژگی نسبت به تغییرات ناگهانی از حساسیت کم‌تری برخوردار است و برای تشخیص تغییرات تدریجی و بلندمدت مناسب است. به طور کلی می‌توان گفت این شاخصه برای شناسایی اثرات بارهای تکراری یا شرایط محیطی مفید واقع می‌شود [۵].

۳- سازه مورد بررسی

سازه مورد مطالعه یک سازه دکل فولادی به ارتفاع تقریبی ۹ متر است که در معرض شرایط محیطی قرار دارد و دارای چندین مکانیزم آسیب برگشت‌پذیر در شش سطح می‌باشد. این سازه، در فضای باز در نزدیکی شهر هانوفر در شمال آلمان نصب شده و بر روی آن ۹ شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب در دو جهت مختلف، ۳ حسگر کرنش برای اندازه‌گیری تغییر شکل سازه و یک حسگر دما تعبیه شده است. هندسه سازه مورد بررسی مطابق شکل زیر در نظر گرفته شده است [۱۰].



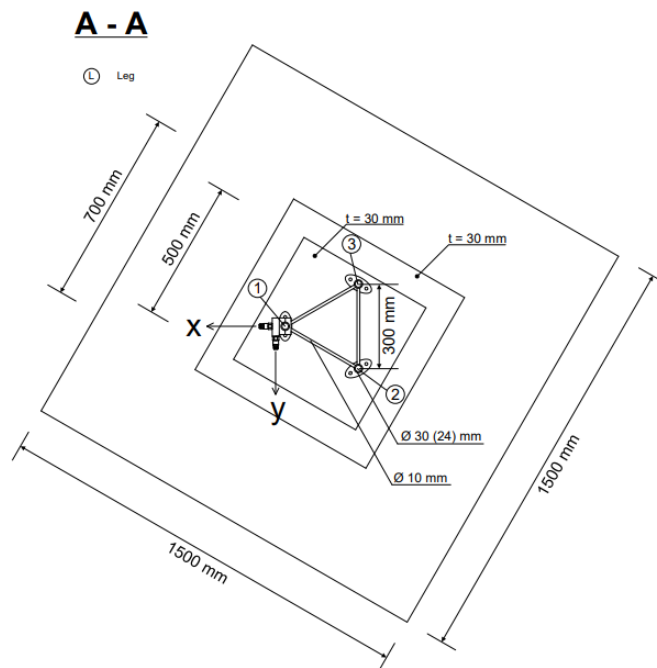
شکل ۱. نمای کلی سازه [۱۰].

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در محدوده دمایی $12^{\circ}C$ - $9^{\circ}C$ قرار دارند. در امتداد دکل، ۶ سطح آسیب وجود دارد که هر یک شامل سه مهاربند مجهز به مکانیزم‌های آسیب برگشت‌پذیر هستند. شناسایی آسیب سازه‌ای براساس یک سیستم کدگذاری مبتنی بر شناسه باینری است که در این تحقیق از دو فایل حالت آسیب دیده و دو فایل حالت سالم استفاده شده است. طبق شکل (۲)، عدد ۳ در سمت چپ این شناسه نشان دهنده‌ی حذف کامل مکانیزم آسیب می‌باشد و فایل حالت آسیب دیده اول مربوط به تاریخ ۷ می و فایل آسیب دیده دوم مربوط به تاریخ ۱۸ مارس می‌باشد. طبق جهات مشخص شده در شکل (۳)، فایل حالت آسیب دیده اول دارای آسیب

سطح ۶ و بین پایه های ۲ و ۳ مهاربند و فایل حالت آسیب دیده دوم دارای سطح آسیب ۳ بین هر ۳ پایه مهاربند می‌باشد در نتیجه با توجه به جهات مشخص شده بر روی پلان انتظار می‌رود آسیب‌ها بیشتر در راستای ۷ باشد [۱۰].

Period of data acquisition	Structural state	Structural state label
Aug. 1st, 2020 - Oct. 13th, 2020	healthy	20000000000000000000
Oct. 13th, 2020 - Oct. 27th, 2020	DAM 6 (all damage mechanisms removed)	30000000000000000011
Oct. 27th, 2020 - Nov. 9th, 2020	healthy	20000000000000000000
Nov. 9th, 2020 - Nov. 24th, 2020	DAM 4 (all damage mechanisms removed)	30000000001110000000
Nov. 24th, 2020 - Mar. 18th, 2020	healthy	20000000000000000000
Mar. 18th, 2021 - Apr. 20th, 2020	DAM 3 (all damage mechanisms removed)	30000001110000000000
Apr. 20th, 2021 - May 4th, 2021	healthy	20000000000000000000
May 4th, 2021 - May 19th, 2021	DAM 6 (damage mechanisms removed at one strut)	30000000000000000010
May 19th, 2021 - May 28th, 2021	healthy	20000000000000000000
May 28th, 2021 - Jun. 14th, 2021	DAM 4 (damage mechanisms removed at one strut)	30000000000010000000
Jun. 14th, 2021 - Jun. 25th, 2021	healthy	20000000000000000000
Jun. 25th, 2021 - Jul. 12th, 2021	DAM 3 (damage mechanisms removed at one strut)	30000000100000000000
Jul. 12th, 2021 - Jul. 31st, 2021	healthy	20000000000000000000

شکل ۲. وضعیت ساختاری سازه و موقعیت‌های آسیب در بازه‌های زمانی مختلف [۱۰].



شکل ۳. مقطع دکل با جهت اندازه‌گیری شتاب سنجها [۱۰].

۴- آماده سازی داده‌ها

در این مطالعه داده‌های ارتعاشی سازه مورد نظر که تحت تاثیر شرایطی محیطی بود، جمع‌آوری شده‌اند. برای آماده‌سازی این داده‌ها جهت تحلیل و استخراج نتایج حاصل از دو ویژگی CAV و AI از نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

۱-۴ نرمالسازی

به منظور نرمال‌سازی برای حذف اثرات تحریک باد سیگنال‌های شتاب همه طبقات بر سیگنال شتاب طبقه اول در حوزه فرکانس تقسیم شده است این نسبت برای هر درجه آزادی (i ام) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_i^N = \frac{X_i(w)}{X_1(w)} \quad (3)$$

در این فرمول:

- $X_i(w)$ نمایانگر پاسخ (شتاب) در حوزه فرکانسی برای طبقه i است.

- $X_1(w)$ نشان‌دهنده پاسخ (شتاب) طبقه اول در حوزه فرکانسی است.

- X_i^N نسبت نرمال‌سازی شده بین پاسخ طبقه i به طبقه اول در حوزه فرکانسی است.

این روش به حذف تأثیرات تحریک محیطی باد کمک می‌کند، بنابراین، تحلیل‌هایی که پس از نرمال‌سازی انجام می‌شوند، بیشتر به تغییرات سازه‌ای داخلی حساس خواهند بود و کمتر تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرند. بعد از اعمال نرمال‌سازی بر روی داده‌ها مجدد داده‌ها به حوزه زمان برده می‌شود تا بتوان در تابع دو شاخصه CAV و AI استفاده کرد.

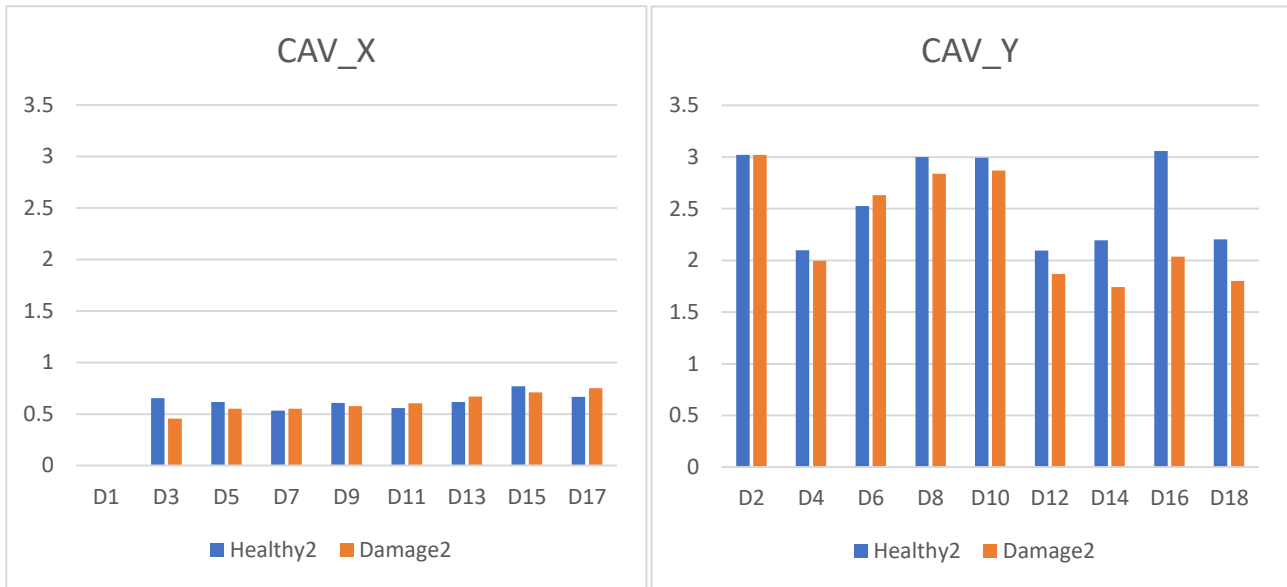
۲-۴ پیش پردازش

فیلترهای پیش‌پردازش بر روی داده‌ها به حذف نویزها، حذف تغییرات ناخواسته و استخراج ویژگی‌های مهم از سیگنال‌ها کمک می‌کند. یکی از معروف‌ترین فیلترهای پیش‌پردازش، فیلتر Butterworth است. به همین منظور در این تحقیق از این فیلتر استفاده شده است.

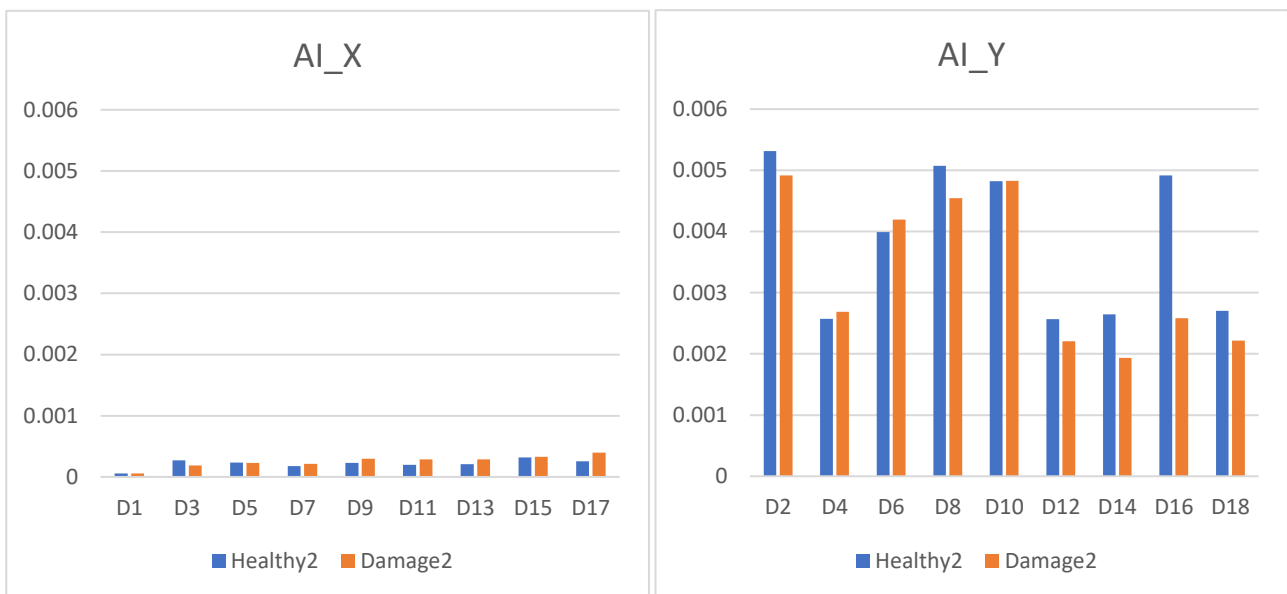
۵- بررسی و تحلیل داده‌ها

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌های نرمال‌سازی‌شده به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج هر بخش از تحقیق با استفاده از نمودارهای مرتبط تحلیل می‌شوند. این نتایج به ما کمک می‌کند تا تأثیرات مختلف متغیرهای مورد بررسی را به وضوح مشاهده کنیم.

در شکل (۴ و ۵) مقادیر CAV و AI برای دو حالت سالم و آسیب دیده در ۱۸ درجه آزادی مشاهده می‌شود. فایل حالت آسیب دیده دوم که دارای سطح آسیب ۳ بین هر ۳ پایه مهاربند می‌باشد همان طور که انتظار می‌رفت تغییرات مقادیر CAV و AI در راستای γ که در شکل همان درجات آزادی زوج است، بیش‌تر می‌باشد که نشان دهنده آسیب در این راستا است.

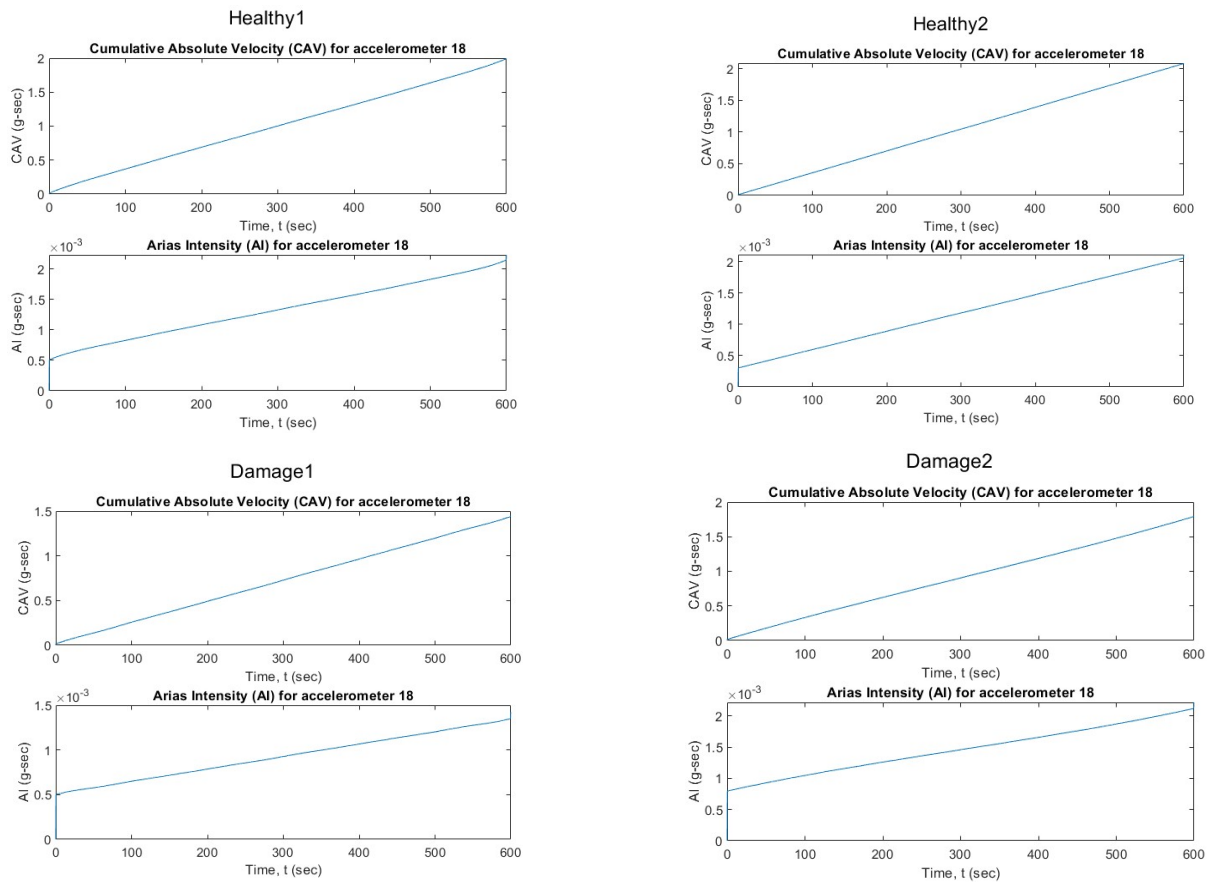


شکل ۴. مقایسه مقادیر CAV برای دو حالت سالم و آسیب دیده.



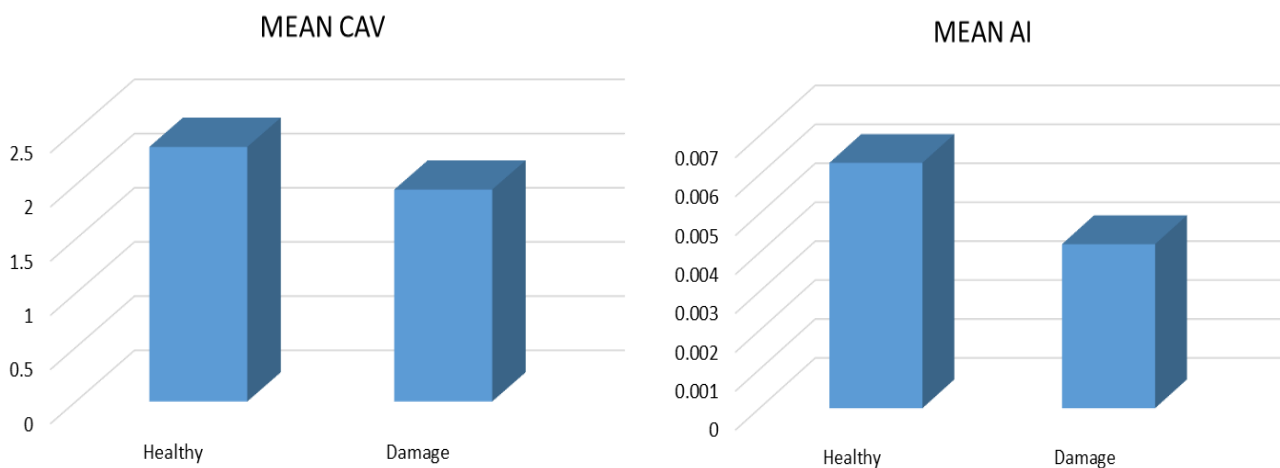
شکل ۵. مقایسه مقادیر AI برای دو حالت سالم و آسیب دیده.

همان طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود حداکثر مقدار CAV و AI در تمام حالات سالم (دو نمونه برای ۶۰۰ ثانیه ارائه شده است) یکسان است و در هر یک از حالات آسیب دیده متفاوت است که نشان دهنده صحت نتایج بدست آمده می‌باشد. اینکه CAV بیشتر است در راستای Y نسبت به X، احتمالاً به علت جهت باد است.



شکل ۶. نمودار CAV و AI در دو حالت سالم و دو حالت آسیب دیده در درجه آزادی ۱۸.

برای تعمیم نتایج بدست آمده از ۱۰ فایل حالت سالم و آسیب دیده استفاده شده است و میانگین مقادیر CAV و AI بدست آمده است. مطابق شکل (۷) مقدار میانگین این دو شاخصه برای حالت‌های آسیب دیده کمتر از حالت‌های سالم می‌باشد که می‌توان علت آن را افزایش میرایی و کاهش پاسخ در حالات آسیب دیده دانست.



شکل ۷. میانگین مقادیر CAV و AI ۱۰ فایل آسیب دیده و سالم.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تشخیص و مکان‌یابی آسیب وارده به سازه با بهره‌گیری از روش‌های آماری و مقایسه‌ای از دو ویژگی دینامیکی AI (شدت آریاس) و CAV (سرعت مطلق تجمعی) استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد تحریک‌های سازه‌ای در این مطالعه ناشی از زلزله نبوده و دکل فولادی ذکر شده تحت بارهای باد و تحریکات محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با انجام فرایند نرمال‌سازی داده‌ها و بکار بردن فیلتر پیش پردازش، تاثیرات ناشی از تحریک باد و نویزهای محیطی موثر بر داده‌های ارتعاشی به حداقل رسیده است، این فرایندها باعث بهبود دقت نتایج شده و امکان تحلیل داده‌ها را با کیفیت بالاتر فراهم می‌سازد.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که دو ویژگی CAV و AI که در تحقیقات گذشته تحت تحریک زلزله مورد بررسی قرار گرفته بودند در این تحقیق توانسته‌اند در تشخیص آسیب سازه‌ها با استفاده از نرمال‌سازی تا حد زیادی موثر واقع شوند. این مسئله نشان می‌دهد که این دو معیار نه تنها در زمینه لرزه‌شناسی بلکه در تحلیل‌های مرتبط با دینامیک سازه و ارزیابی آسیب‌پذیری تحت انواع مختلف تحریکات محیطی نیز کاربرد دارند.

مراجع

- [1] C. R. . Farrar and K. . Worden, *Structural health monitoring : a machine learning perspective*. Wiley, 2013.
- [2] A. S. Azhar, S. A. Kudus, A. Jamadin, N. K. Mustaffa, and K. Sugiura, "Recent vibration-based structural health monitoring on steel bridges: Systematic literature review," Mar. 01, 2024, *Ain Shams University*. doi: 10.1016/j.asej.2023.102501.
- [3] C. Karakostas *et al.*, "Seismic assessment of bridges through structural health monitoring: a state-of-the-art review," Feb. 01, 2024, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s10518-023-01819-3.
- [4] G. Cardinale and M. Orlando, "Structural Evaluation and Strengthening of a Reinforced Concrete Bridge", doi: 10.1061/ASCE1084-070220049:135.
- [5] R. Rahgozar and M. Bitaraf, "A summary evaluation of output-only damage-sensitive features for structural health monitoring of offshore platforms subjected to ambient loads," *Ocean Engineering*, vol. 266, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112892.
- [6] X. Jiening, C. Zhigao, H. Jun, Y. Jiang, Y. Jian, and W. Peng, "Comparison of the cumulative absolute velocity and acceleration peak value based on Wenchuan earthquake data," vol. 5, no. 3, pp. 46–54, 2014, doi: 10.3724/SP.
- [7] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia, "A comparison of ground motion prediction equations for arias intensity and cumulative absolute velocity developed using a consistent database and functional form," *Earthquake Spectra*, vol. 28, no. 3, pp. 931–941, 2012, doi: 10.1193/1.4000067.
- [8] J. Luo, M. Huang, and Y. Lei, "Temperature Effect on Vibration Properties and Vibration-Based Damage Identification of Bridge Structures: A Literature Review," Aug. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/buildings12081209.
- [9] A. Keshmiry, S. Hassani, M. Mousavi, and U. Dackermann, "Effects of Environmental and Operational Conditions on Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing: A Systematic Review," Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/buildings13040918.
- [10] S. Wernitz, B. Hofmeister, C. Jonscher, T. Griebmann, and R. Rolfes, "A new open-database benchmark structure for vibration-based Structural Health Monitoring," *Struct Control Health Monit*, vol. 29, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.1002/stc.3077.