

## Damage detection in steel beams by structural acceleration response data

Dariush Mirhaj<sup>1</sup>, Ramezan Ali Izadifard<sup>2\*</sup>

1- Ms.C Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

### ABSTRACT

Although the accuracy of operation during the construction of structures is important, monitoring the health of structures after construction is very important, so that timely identification of minor damages and planning to eliminate them and modify elements in places Damage can prevent general damages and human and financial consequences and increase the useful life of structures. In past researches, damage identification in structures has been done with the existence of a structural model. In this research, the damage has been identified with the help of the acceleration of the structure output (without the need for the initial model of the structure). Therefore, for this purpose, the simple double-ended steel beam is subjected to dynamic impact loading in one or more points in different scenarios. In the strategy governing this research, the damaged structure under a weak impact is assumed to be a healthy structure and the same structure under a strong impact is considered as a damaged structure. With the help of the output acceleration of 3 points of the structure, using the acceleration interpolation technique of other points of the structure, and also with the help of Newmark integration method, the deformation of the structure in healthy and damaged state was extracted and the damage position was accurately determined with the proposed index.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 October 2024

**Revise Date:** 18 January 2025

**Accept Date:** 05 February 2025

### Keywords:

Damage detection  
Structural health monitoring  
Structural damage index  
Steel beam  
Impact load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.478221.3523](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.478221.3523)

\*Corresponding author: Ramezan Ali Izadifard.

Email address: [izadifard@eng.ikiu.ac.ir](mailto:izadifard@eng.ikiu.ac.ir)

## تشخیص آسیب در تیرهای فولادی دوسر مفصل با داده‌های پاسخ شتاب سازه

داریوش میرحاج<sup>۱</sup>، رمضانعلی ایزدی فرد<sup>۲\*</sup>

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲ - دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### چکیده

اگرچه دقت عمل در حین ساخت سازه‌ها مهم است، نظارت بر سلامت سازه‌ها پس از ساخت، دارای اهمیت زیادی می‌باشد به طوری که شناسایی به موقع خرابی‌های جزئی و برنامه‌ریزی در خصوص برطرف کردن آنها و اصلاح المانها در مکان‌های آسیب، می‌تواند از وارد شدن خرابی‌های کلی و تبعات جانی و مالی جلوگیری نموده و باعث افزایش عمر مفید سازه‌ها گردد. در تحقیقات گذشته، شناسایی آسیب در سازه‌ها با وجود مدل سازه‌ای انجام شده است. در این تحقیق به کمک شتاب خروجی سازه (بدون نیاز به مدل اولیه سازه) اقدام به شناسایی آسیب شده است. لذا بدین منظور تیر فولادی دو سر ساده در سناریوهای متفاوت تحت بارگذاری دینامیکی ضربه در یک یا چند نقطه قرار گرفته است. در استراتژی حاکم بر این تحقیق سازه آسیب دیده تحت ضربه ضعیف را سازه سالم فرض کرده و همان سازه تحت ضربه قوی به عنوان سازه آسیب دیده در نظر گرفته شده است. به کمک شتاب خروجی ۳ نقطه از سازه با استفاده از تکنیک درونیابی شتاب دیگر نقاط سازه بدست آمده و همچنین به کمک روش انتگرال‌گیری نیومارک تغییر شکل سازه در حالت سالم و آسیب دیده استخراج گردیده و با شاخص پیشنهادی موقعیت آسیب با دقت تعیین گردیده است.

کلمات کلیدی: تشخیص آسیب، پایش سلامت سازه، شاخص آسیب سازه، تیر فولادی، بار ضربه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.478221.3523">10.22065/jsce.2025.478221.3523</a>	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۰/۲۹	۱۴۰۳/۰۷/۱۵
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.478221.3523">https://doi.org/10.22065/jsce.2025.478221.3523</a>	رمضانعلی ایزدی فرد izadifard@eng.ikiu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در سالیان اخیر، با پیشرفت تکنولوژی، ساخت ساختمان‌ها با سرعت زیاد توسعه یافته اند. در نتیجه این سرعت بالا اشتباهاتی در پروسه ساخت و ساز رخ می‌دهد و در زمان مشخصی به ساختمان آسیب می‌رساند. اساساً آسیب سازه تغییر در پارامترهای سازه‌ای است که بر عملکرد فعلی یا آتی آن تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، آسیب یا خرابی سازه به معنای انحراف از مصالح اولیه (اصلی) یا مشخصات سازه‌ای بدلیل ترک خوردگی، خستگی یا شکستگی جوش‌ها، شل شدگی پیچ و مهره که باعث لرزش‌ها، جابجایی‌ها و یا تنش‌های نامطلوب می‌گردد. به منظور ایجاد ایمنی مناسب، تعمیرات در سازه‌ها و نگهداری مستمر نیاز است. برای مدت زمان طولانی بازرسی‌های چشمی کاربردی‌ترین روش شناسایی آسیب بود. کاربرد روش بازرسی‌های چشمی بعنوان یک روش سنتی پایش سلامت سازه‌ها فقط برای سازه‌های نسبتاً ساده کاربردی می‌باشد و اگر این روش در سازه‌های پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد، احتمال بروز خطاهای بالایی را دارد. تعدادی از روشهای شناسایی آسیب ارتعاش محور از جمله روش سری زمانی، روش‌های تشخیص محلی، روش غیر احتمالی و آزمایش مودال بنیادی می‌باشند که برای تشخیص آسیب سازه پارامترهای مختلفی در هر کدام از این روشها بررسی می‌گردد. البته با در نظر گرفتن این مطلب که هر یک از این روشها دارای نقصهایی می‌باشد تلاش شده است تا بهترین روش تشخیص آسیب که دارای کمترین خطا باشد مورد استفاده قرار گیرد.

باتوجه به گستردگی روشهای تعیین آسیب، متناسب با موضوع این نوشتار، صرفاً چند نمونه از مطالعات مبتنی بر خواص دینامیکی سازه‌ها که عمدتاً بر مودها و فرکانس متمرکز هستند ذیلاً ارائه میگردد. کاولی و آدامز فرمولی برای تشخیص آسیب در مواد کامپوزیت از تغییر فرکانس استفاده کردند [۱]. فریسول و همکاران نتایج تلاشی را برای تعیین خسارت بر اساس فهرستی از سناریوهای آسیب احتمالی شناخته شده ارائه کردند [۲]. جونجا و همکاران توانستند یک تکنیک رو به جلو به اسم حداکثر کنتراست را برای تطبیق پاسخ سازه آسیب دیده با پایگاه داده‌ای از پاسخ‌های سازه‌ای برای تعیین محل آسیب فراهم کنند [۳]. روتن و لیفشیتز اولین مقاله را در یک مجله ارائه کردند که تشخیص آسیب با اندازه‌گیری ارتعاش را پیشنهاد کرد [۴]. استابس و همکاران روشی را برای تشخیص آسیب بر اساس حساسیت تغییرات فرکانس مودال توسعه دادند [۵]. موراسی یک تکنیک معکوس برای به دست آوردن اثر ترک خوردگی فلز با استفاده از تبدیل فرکانسی ارائه کرد [۶]. راتکلیف با ارائه تکنیکی در خصوص مکان یابی آسیب در یک تیر نشان داد که می‌توان از تقریب تفاضل محدود یک عملگر لاپلاسی بر روی اطلاعات شکل حالت استفاده کرد [۷]. اسکجراک و همکاران موضوع محل قرارگیری سنسور بهینه شده را جهت تشخیص آسیب سازه‌ای بر پایه تغییرات ایجاد شده در شکل حالت و فرکانس‌های مودال توسط بکارگیری روش تکرار زیرساخت بررسی نمودند [۸]. پاندی و همکاران بررسی کردند وقتی انحنای شکل حالت دچار تغییرات مطلق گردد این موضوع می‌تواند نشان دهنده مناسبی برای آسیب سازه‌های تیر FEM باشد [۹]. استابس و همکاران با بررسی مقادیر کاهش انرژی کرنش مودال ما بین دو DOF سازه-ای، همانطور که توسط انحنای شکل‌های حالت اندازه‌گیری شده تعریف می‌شود، روش جدیدی را ارائه نمودند [۱۰]. توپول و استابز امکان استفاده از مجموعه محدودی از پارامترهای مودال را برای تشخیص آسیب سازه بررسی می‌کنند [۱۱]. استابز و کیم در یک انتشار جدیدتر، امکان تعیین محل آسیب را با استفاده از این تکنیک بدون پارامترهای مودال پایه بررسی کردند [۱۲]. شانس و همکاران از کرنش‌های اندازه‌گیری شده بابت اندازه‌گیری مستقیم انحنای اشکال حالت استفاده کردند [۱۳]. سیدپور، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی پزندگان مکانیابی آسیب‌های چندگانه سازه‌ایرا مطالعه و بررسی نمود [۱۴]. یان و همکاران، یک شاخص خرابی طبق مبحث انحنای شکل مودی برای تشخیص با دقت قابل قبول مکان آسیب در سیستمهای لوله‌کشی زیردریایی را ارائه دادند [۱۵]. خیانگ و لیانگ، در دو مرحله با بکارگیری تبدیل موجک به همراه الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات توانستند به نتایج خوبی در خصوص شناسایی محل خرابی‌های منفرد و چندگانه در سازه‌های صفحه‌ای و شدت آنها برسند [۱۶]. حسینی و نیکنام، توانستند با بهره‌گیری از میزان تغییرات در فرکانسهای طبیعی و اشکال مودی صفحه مورد آسیب واقع شده و همچنین استفاده از بهینه سازی به نام الگوریتم رقابت استعماری به نتایج خوبی برسند [۱۷]. ثمالی و همکاران، توابع پاسخ فرکانسی و شبکه عصبی مصنوعی توسط آنها برای ارزیابی آسیب مورد استفاده واقع شد [۱۸]. موهان و همکاران، با بهره‌گیری از تابع فرکانس طبیعی سازه به تشخیص محل خرابی در سازه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات رسیدند [19]. ژانگ و همکاران، با مطالعه بر روی انحنای تغییر فرکانسی سطح روش بهینه‌ای را برای تشخیص خرابی در سازه‌های

صفحه‌ای ارائه نمودند [۲۰]. سید پور و یزدان پناه توسط داده‌های مربوط به انرژی کرنشی استاتیکی شاخصی با عملکرد بالا در خصوص مکانیابی خرابی در سازه ارائه نمودند [۲۱]. علمداری و همکاران، با بررسی و مطالعه همزمان دو مبحث تابع‌های حاصل شده از پاسخ فرکانسی سازه و تبدیل موجک گسسته در دو بعد، شاخصی را در جهت تشخیص محل خرابی ارائه نمودند [۲۲]. یزدان پناه و ایزدی فرد، یک شاخص تشخیص خرابی با استفاده از مشتق‌های اول و دوم مود سازه‌ها بر پایه تفاضل محدود مرکزی فرمول بندی شاخص صورت داده‌اند [۲۳]. لو و همکاران، از کار مجازی برای فرمول بندی و ارائه معادله تشخیص محل و شدت خرابی استفاده کردند [۲۴]. یزدان پناه و همکاران، توانستند شاخصی را بر پایه داده‌های مودال برای مکانیابی آسیب در تیر-ستون‌ها با لحاظ کردن بار محوری ارائه نمایند [۲۵]. بینکای شی و همکاران توانستند، یک الگوریتم شناسایی آسیب مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته جهت‌دار دوبعدی با استفاده از موجک مورلت دوبعدی برای تشخیص آسیب نوع خط در ساختارهای صفحه ارائه کنند [۲۶]. در تحقیق زایچ و همکاران، طیف توان موجک دو بعدی و قابلیت انتقال زمان-فرکانس و تابع انسجام مربوطه برای تشخیص آسیب سازه در عناصر سازه‌ای در ساختمان‌ها استفاده شده است [۲۷]. در معدودی از مطالعات از ضربه به عنوان محرک دینامیکی استفاده شده است. از جمله آنتیمو و همکاران به منظور کمک به درک بهتر پدیده‌های فیزیکی درگیر در طراحی سازه‌های فولادی تحت ضربه، و رفتار تکیه‌گاه‌های ساده تیرها در آزمون‌های افت وزن که امکان مدل‌سازی عددی پاسخ را از طریق رویکرد FE تحلیل نمودند. این آزمایش‌های انجام شده توسط این گروه معیار مهمی برای مطالعه رفتار اعضای فولادی برای پیش‌بینی پاسخ تیرهای فولادی تحت بارهای ضربه‌ای هستند. از جمله مدل‌های در نظر گرفته شده، جانسون کوک است. قوانین کاوپر-سایموندز بهترین دقت را از نظر جابجایی اوج، نیروی پیک ارائه می‌کنند [۲۸]. همچنین در برخی از مطالعات به بهره‌گیری از داده‌های شتاب‌سنج برای تحلیل دینامیکی اشاره شده است. خوان کاساس و آنجل آپاریسیو با استفاده از سنسورهای شتاب به جای سنسورهای جابجایی روی پله‌های مورد آزمایشی که از روی رودخانه، دره مرتفع یا جاده ترافیکی عبور می‌کند. چندین نمونه شناسایی آسیب با گروه‌هایی از تیرهای بتن مسلح با الگوهای ترک‌خوردگی متفاوت و کاملاً مشخص انجام دادند. پاسخ دینامیکی توسط مبدل‌های شتاب اندازه‌گیری می‌شود. این راستی‌آزمایی تجربی به وضوح اثربخشی روش پیشنهادی را در شناسایی مکان، گسترش و میزان ترک‌خوردگی زمانی که برخی الزامات مهم مربوط به داده‌های دینامیکی ثبت شده در نظر گرفته می‌شود، نشان می‌دهد [۲۹].

به جز مطالعات بسیار نادر (همانند دو مرجع اخیر)، در تحقیقات گذشته برای تعیین آسیب، لزوماً باید مدل سازه سالم در دسترس باشد در حالیکه در مسایل واقعی و کاربردی، بدلیل گذشت زمان در بسیاری از موارد نقشه‌ها و جزئیات سازه اولیه سالم وجود ندارد و یا در صورت وجود، تغییرات زیادی در آنها در طول زمان بهره‌برداری ایجاد شده است. ضرورت و نوآوری تحقیق حاضر در عدم نیاز به سازه اولیه است و صرفاً با نصب شتاب نگاشت بر روی سازه موجود می‌توان به تعیین موقعیت آسیب پرداخت.

## ۲- شاخص ارائه شده به جهت تشخیص خرابی در نمونه‌های مدل شده

براساس مطالعه [۲۵] برای شناسایی و تعیین آسیب یک تیر منشوری با طول معین، در مرحله نخست تیر به تعدادی محدود از المانها تقسیم می‌گردد. در مرحله بعد جابجایی تیر سالم در مختصات گره‌ها  $(x_q, y_{h(q)} \quad q = 1, 2, \dots, n+1)$  مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در تحقیقات گذشته با داشتن اطلاعات سازه اولیه و کمک گرفتن از تکنیک‌هایی چون روش اجزای محدود، جابجایی نقاط گرهی تیر سالم محاسبه می‌شود. در این نوشتار مقادیر جابجایی گره‌ها  $(y_{h(q)}, q = 1, 2, \dots, n+1)$  در تیر سالم به فرضیه نوینی محاسبه خواهد شد. با کدنویسی در نرم افزار متلب در این مرحله، مختصات و جابجایی گرهی تیر سالم در رابطه ۱ شکل می‌گیرد:

$$[x_q, y_{h(q)}] = [(x_1, y_{h(1)}) \cdot (x_2, y_{h(2)}) \dots (x_i, y_{h(i)}) \dots (x_{n+1}, y_{h(n+1)})] \quad (1)$$

با مفروض بودن مقادیر جابجایی گره‌ها، مقادیر شیب (یعنی مشتق اول جابجایی‌ها)  $\frac{dx}{dy} = y'$  در تیر سالم از رابطه تقریب تفاضل

محدود مرکزی (رابطه ۲) قابل محاسبه است:

$$y'_{hq} = \frac{y_{h(q+1)} - y_{h(q-1)}}{2l_e} \quad (2)$$

پارامتر  $l_e$  فاصله طولی بین مختصات گره‌ها و به عبارتی همان طول المان می‌باشد. در این روابط مقدار پارامتر  $y_q$  بیانگر میزان جابجایی در مختصات اندازه‌گیری  $q$  است.

به همین ترتیب در خصوص انحنای جابجایی (مشتق دوم جابجایی) در رابطه با تیر سالم با کمک و بهره‌گیری از روابط تقریبی تفاضل محدود مرکزی به شکل زیر عمل می‌گردد:

$$y''_{hq} = \frac{y_{h(q-1)} - 2y_{hq} + y_{h(q+1)}}{l_e^2} \quad (3)$$

این فرآیند را می‌توان برای تیر آسیب دیده نیز تکرار کرد. فرض بر این است که آسیب باعث کاهش سختی در المان آسیب دیده می‌شود، لذا با کاهش ممان اینرسی ( $I$ ) در مکان آسیب، مورد شبیه سازی قرار می‌گیرد. در کدنویسی در برنامه متلب، مختصات و جابجایی گره نام  $(y_{d(q)} = q = 1, 2, \dots, n+1)$  در تیر آسیب دیده به شرح زیر نگاشته می‌شود:

$$[x_q, y_{d(q)}] = [(x_1, y_{d(1)}) \cdot (x_2, y_{d(2)}) \dots (x_i, y_{d(i)}) \dots (x_{n+1}, y_{d(n+1)})] \quad (4)$$

در این مرحله از مقادیر جابجایی حالت آسیب دیده در محاسبه شیب جابجایی تیر آسیب دیده با کمک گرفتن از تکنیک تفاضل محدود مرکزی استفاده می‌شود:

$$y'_{dq} = \frac{y_{d(q+1)} - y_{d(q-1)}}{2l_e} \quad (5)$$

و در ادامه طبق روش فوق الذکر می‌توان انحنای جابجایی ستون تیر آسیب دیده را طی رابطه زیر تخمین زد:

$$y''_{dq} = \frac{y_{d(q-1)} - 2y_{dq} + y_{d(q+1)}}{l_e^2} \quad (6)$$

در نهایت، با استفاده از پاسخ‌های دینامیکی سازه (جابجایی، شیب و انحنای جابه‌جایی) ناشی از اعمال ضربه، یک نشانگر مبتنی بر پاسخ استاتیک (SRBI) پیشنهاد می‌شود:

$$SRBI_q = \left[ |y''_{dq} - y''_{h(q)}| \times (y_{d(q)})^2 \right] - \left[ (|y'_{dq}| - |y'_{h(q)}|)^2 \times |y_{h(q)}| \right] \quad (7)$$

با فرض اینکه مجموعه  $SRBI$  از همه نقاط  $q = 1, 2, \dots, n+1$  یک جامعه نمونه از یک متغیر به طور معمول توزیع شده را نشان می‌دهد، شکل نرمال شده  $SRBI$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$nSRBI_q = \max \left[ 0, \left( \frac{SRBI_q - \text{mean}(SRBI)}{\text{Std}(SRBI)} \right) \right] \quad q = 1, 2, \dots, n+1 \quad (8)$$

$\text{mean}(SRBI)$  و  $\text{std}(SRBI)$  دو پارامتر میانگین و انحراف معیار سری  $SRBI_q, q = 1, 2, \dots, n+1$  را نشان می‌دهند.

### ۳- تحلیل آزمایشگاهی و راستی آزمایی نتایج تئوری

در این مرحله برای راستی آزمایی کارایی روش مذکور در شناسایی آسیب، یک تیر دوسر مفصل یک دهانه تحت بار دینامیکی ضربه‌ای قرار گرفته است. آسیب ایجاد شده روی تیر مورد آزمایش از طریق تقلیل ممان اینرسی ( $I$ ) در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از سه سنسور شتابسنج که در سه نقطه از تیر نصب گردیده‌اند پاسخ دینامیکی سازه به دست می‌آید. فرض مهم در این نوشتار این است که پاسخ دینامیکی ناشی از اعمال ضربه ضعیف به تیر معیوب را میتوان به عنوان پاسخ شتاب سازه سالم (خروجی سنسورهای شتاب نگاشت) در نظر گرفت. با اعمال ضربه قوی روی همان تیر معیوب خروجی شتاب نگاشتها به عنوان پاسخ سازه معیوب در نظر گرفته شده است. با انتگرالگیری از دو مجموعه داده های شتاب ناشی از اعمال ضربه ضعیف و قوی به سازه موجود، میتوان مقادیر جابجایی متناظر با سازه سالم و معیوب را در شاخص پیش گفته جایگذاری کرد.

### ۴- وسایل و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

تیر فولادی، سه عدد سنسور شتاب سنج، دیتالاگر، نرم افزار Lab view، قوطی فولادی برای تکیه گاه، چکش برای اعمال ضربه و تراز تنظیم افق ابزار بکارگرفته در آزمایش این نوشتار هستند.

تیر فولادی مورد استفاده در آزمایش به صورت دو سر ساده طبق شکل ۱ مدل گردیده است.

۲۳ ۲۲ ۲۱ ۲۰ ۱۹ ۱۸ ۱۷ ۱۶ ۱۵ ۱۴ ۱۳ ۱۲ ۱۱ ۱۰ ۹ ۸ ۷ ۶ ۵ ۴ ۳ ۲ ۱



شکل ۱: مدل تیر دو سر ساده فولادی.

تیر فولادی دوسر ساده طبق شکل ۲ در آزمایشگاه مونتاژ شده است.



شکل ۲: تیر فولادی دو سر ساده در آزمایشگاه.

در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات هندسی و فیزیکی تیر فولادی معرفی شده است.

جدول ۱: ابعاد تیر فولادی.

نوع	اندازه	واحد
عرض مقطع تیر	۴	سانتی متر
ارتفاع مقطع تیر	۱	سانتی متر
طول تیر	۶۸	سانتی متر
اندازه تکیه گاهها	۱	سانتی متر

جدول ۲: مشخصات فولاد.

نوع	اندازه	واحد
مدول الاستیسیته ( $E_s$ )	$2.1 \times 10^{11}$	نیوتن بر متر مربع
ضریب پواسون ( $\nu$ )	۰.۳	---
جرم حجمی ( $\rho$ )	۷۸۵۰	کیلوگرم بر متر مکعب

## ۵- ایجاد آسیب در تیر

در این مرحله دو ترک به عرض یک میلیمتر و عمق ۲ میلیمتر طبق شکل ۳ بر روی تیر در فواصل ۲۱ و ۵۱ سانتیمتر از ابتدای تیر معادل دو گره به شماره‌های ۷ و ۱۷ برای تقلیل سطح مقطع انجام شده است. انجام این مرحله توسط دستگاه سی ان سی<sup>۱</sup> انجام شده است.



شکل ۳: ایجاد آسیب در تیر.



شکل ۴: سنسور تک محوره ولتاژی ژئوفون.

<sup>۱</sup> CNC

سنسورهای شتاب از نوع ژئوفون که در شکل ۴ نشان داده شده است، از سه قسمت ۱- سوکت اتصال به دیتالاگر ۲- سیم رابط بین سوکت و سنسور ۳- سنسور تک محوره ولتاژی تشکیل شده‌اند. سنسور استفاده شده در این پژوهش از یک شرکت دانش بنیان داخلی تهیه شده است.

برداشت کننده داده (دیتالاگر) دارای ۸ کانال با رزولوشن ۲۴ بیتی و نمونه برداری همزمان کانالها و سرعت حداکثر ۴ kS/s/ch می‌باشد. این دیتالاگرها می‌توانند دریافت کننده اطلاعات ولتاژی، جریانی ۴-۲۰ mA، استرین گیجی، ترموکوپلی، PT100 و... باشند. این دیتالاگر نیز تولید شرکت دانش بنیان داخلی می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵: برداشت کننده داده (دیتالاگر).

در شکل ۶ وضعیت تکیه گاهی تیرها و نصب سنسور شتاب روی تیر نشان داده شده است.



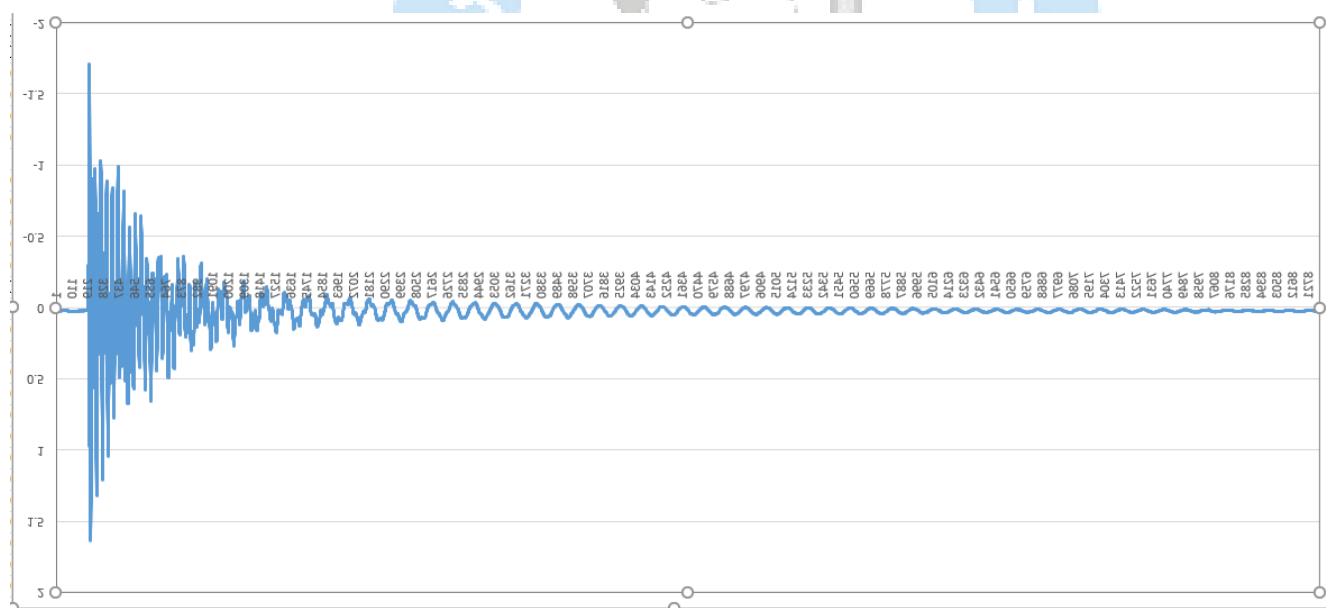
شکل ۶: نحوه نصب سنسورهای شتاب سنج.

وضعیت نهایی مونتاژ تیر در محیط آزمایشگاه که آماده اعمال بارهای ضربه‌ای و ثبت داده‌ها می‌باشد در شکل ۷ تصویر شده است.



شکل ۷: مونتاژ تیر فولادی دوسر ساده.

برای بکارگیری شاخص، باید شتاب در کلیه نقاط تیر ثبت گردد. از آنجا که چنین کاری نیاز به تعداد زیادی سنسور ژئوفون دارد و به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست در این تحقیق صرفاً با بکارگیری سه سنسور ژئوفون در سه نقطه، داده‌های شتاب حاصل از اعمال ضربات توسط نمونه‌بردار (دیتالاگر) برداشت و با نرم افزار لیبویو<sup>۲</sup> به فرمت فایل اکسل استخراج گردید. نمونه اولیه سیگنال شتاب استخراج شده یکی از نقاط مطابق شکل ۸ می‌باشد. برای بدست آوردن شتاب تمامی گره‌ها، در نرم افزار متلب روش درونیابی (اینترپوله) کد نویسی گردید و از داده‌های سیگنال شتاب معلوم در این سه سنسور و دو تکیه گاه، با یک تابع درونیابی چند جمله‌ای درجه ششم، شتاب تمامی ۲۳ گره استخراج گردید و با روش انتگرال‌گیری نیومارک در نرم افزار متلب جایجایی نقاط نیز محاسبه شده است.



شکل ۸: نمونه خام اولیه داده شتاب سازه تحت ضربه با گام زمانی ۰.۰۰۰۱۲۵ ثانیه.

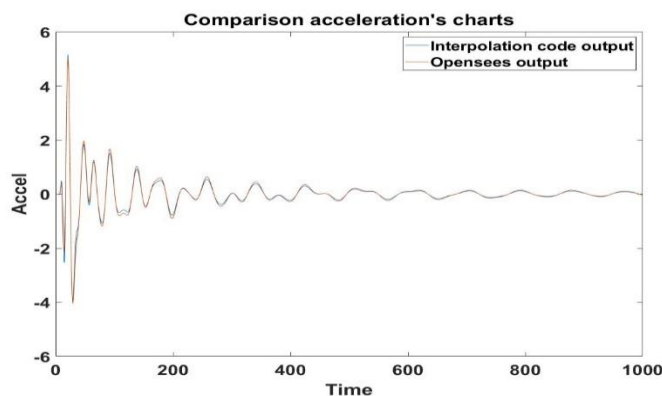
## ۶- مدل‌سازی تیر فولادی مورد آزمایش در نرم افزار اپنسیس

تیر دوسر ساده فولادی با استفاده از برنامه تحلیل سازه Opensees مدل گردید لازم به ذکر است که تیر به ۲۲ المان مساوی به طول ۳۱ میلیمتر متر تقسیم شده است. بار ضربه‌ای با استفاده از دستور Timeseries به صورت مثلثی کاهنده در مدت زمان ۰.۰۱ ثانیه

<sup>2</sup> Lab view

اعمال شده است. برای اعمال خرابی در تیر آسیب دیده از روش تقلیل مقطع به میزان عرض یک میلیمتر و عمق ۲ میلی متر استفاده شده است.

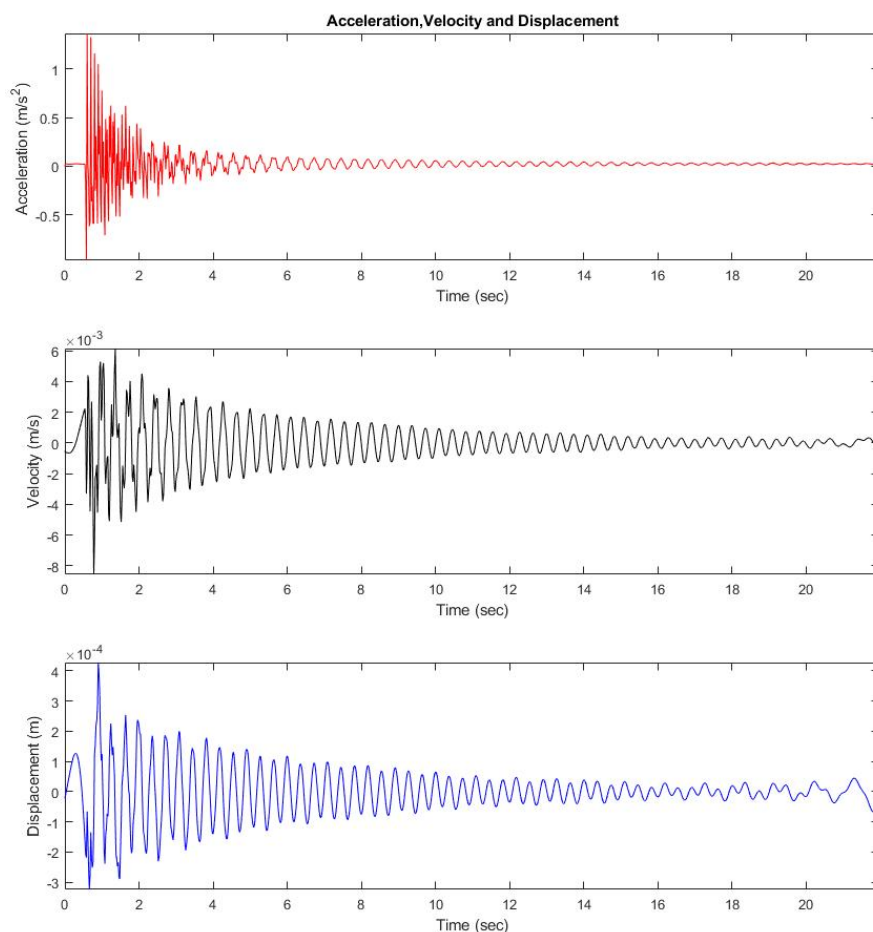
پاسخ سیستم سازه‌ای به صورت خروجی مقدار شتاب تمام گره‌های تیر از نرم افزار Opensees برداشت شده است، سپس به جهت راستی آزمایشی روش درونیابی اخذ شده در این تحقیق خروجی شتاب گره ۶ در نرم افزار اپنسیس با خروجی شتاب همان گره که از درونیابی شتاب ۵ گره تیر حاصل شده است مطابق شکل ۹ مقایسه گردید که تفاوت معناداری در مقادیر شتاب مشاهده نگردید.



شکل ۹: مقایسه سیگنال شتاب گره ۶ خروجی اپنسیس و کد درونیابی در متلب.

## ۷- استخراج مقادیر جابجایی گره‌ها از سیگنال شتاب

پس از محاسبه شتاب در همه گره‌ها از درونیابی داده‌های بدست آمده از شتابسنج‌ها، در این مرحله با بکارگیری تکنیک انتگرال‌گیری عددی نیومارک در نرم افزار متلب، جابجایی همه نقاط تیر فولادی می‌آید. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از تبدیل شتابهای یک نقطه به سرعت و جابجایی آن نقطه نشان داده شده است. با تعمیم این روش، جابجایی در همه نقاط تیر ناشی از اعمال ضربه‌ای ضعیف و سپس ضربه‌ای با شدت بالا محاسبه و به ترتیب به عنوان تغییرمکان نقاط گره‌های تیر متناظر با سازه سالم و معیوب در روابط شاخص آسیب جایگذاری میگردد.

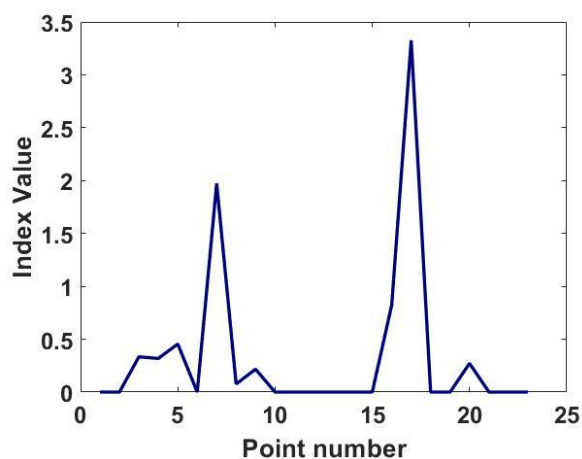


شکل ۱۰: نمودار تبدیل سیگنال شتاب به جابجایی.

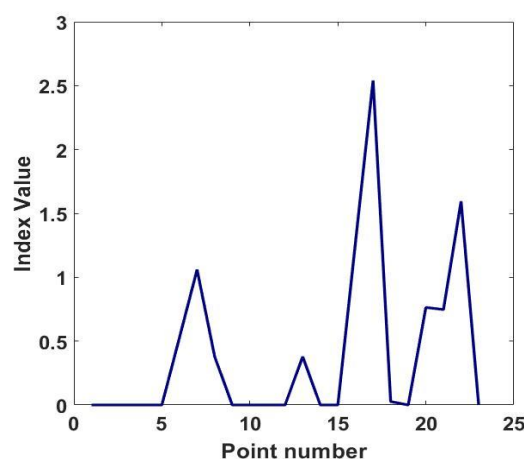
## ۸- گزارش حاصل از نتایج بدست آمده از تست ضربه در آزمایشگاه

مقادیر جابجایی استخراج شده تمامی گره‌های تیر فولادی تحت ضربه ضعیف و قوی در شاخص پیشنهادی این تحقیق گذاشته شد که نتایج آن مطابق با اشکال ۱۱ تا ۱۴ ارائه میگردد. لازم به ذکر است که در این اشکال محور عمودی نشان دهنده‌ی مقدار شاخص آسیب پیش آمده در سازه با متد شاخص پیشنهادی در این مطالعه بوده و شماره‌ی گره‌ها در محور افقی برای بیان محل آسیب عنوان شده است. در یک نمونه، دو ضربه ضعیف و شدید در گره ۲۲ اعمال و نتایج حاصل از شاخص پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه میشود که علاوه بر محل اعمال ضربه، در گره‌های ۷ و ۱۷ سیگنال وجود اغتشاش نمایان شده است. علاوه بر آن در گره ۱۳ نیز اغتشاش هرچند کوچکتر مشاهده میشود. همینطور با اعمال ضربه در گره اختیاری ۱۶، اغتشاش شدید در نقاط ۷ و ۱۷ و نیز سیگنالهای ضعیف تر در گره‌های ۳، ۵، ۹ و ۲۰ مشاهده میشود (شکل ۱۲). در شکل ۱۳ علاوه بر گره‌های ۷ و ۱۷ در گره ۱۴ بدلیل محل اعمال ضربه و گره ۲۰ به دلیل وجود اغتشاش، ناپیوستگی وجود دارد. در شکل ۱۴ در علاوه بر گره ۱۰ که محل اعمال ضربه است در گره‌های ۳، ۷، ۱۱، ۱۷، ۱۹ و ۲۲ عدم پیوستگی وجود دارد که مجدداً شاخص در گره‌های ۷ و ۱۷ بصورت پیکهای برجسته و بزرگ خودنمایی می‌کند. پس از حذف نقاط ضربه‌ای، به بررسی بقیه پیک‌ها در نمودارها پرداخته می‌شود. پیکهایی که در همه اشکال مشترک نمی‌باشند احتمالاً ناشی از اغتشاش‌های موضعی است و معمولاً ارتفاع کمتری نسبت به پیک‌های اصلی دارند. این نقاط نیز از اینکه نقاط آسیب باشند حذف میگردند.

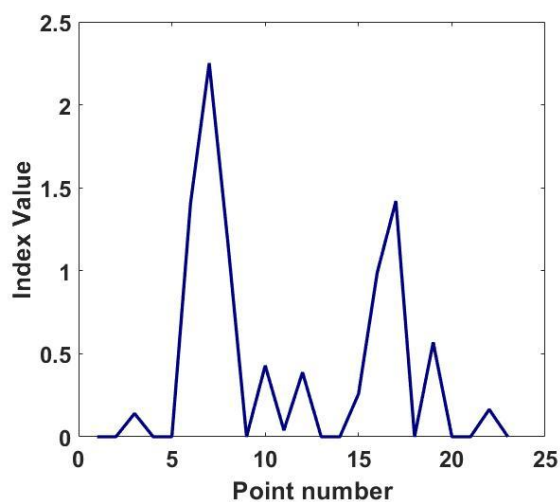
واضح است که وجه اشتراک در تمامی نمودارها که به صورت قله‌های پیک در گره‌های ۷ و ۱۷ نمایان شده است را میتوان به عنوان نقاط آسیب پیشنهادی شاخص در سازه معرفی نماییم. این نقاط کاملاً بر محل‌های آسیب واقعی تیرها منطبق و نمایانگر دقت روش پیشنهادی این تحقیق در شناسایی محل آسیب میباشد.



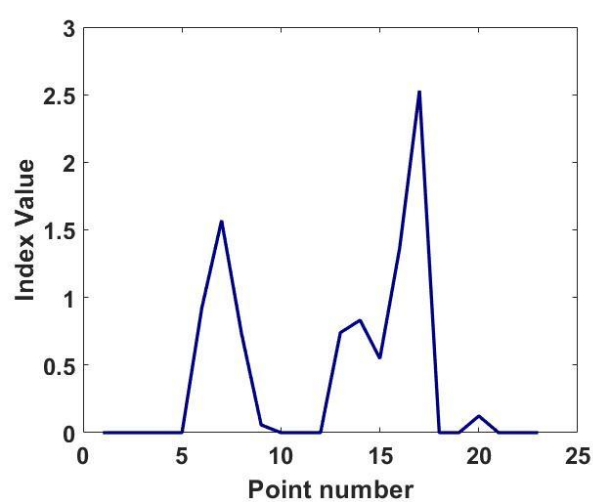
شکل ۱۲: نمودار تعیین آسیب المان ۷ و ۱۷ با ضربه در گره ۱۶.



شکل ۱۱: نمودار تعیین آسیب المان ۱۷ و ۷ با ضربه در گره ۲۲



شکل ۱۳: نمودار تعیین آسیب المان ۷ و ۱۷ با ضربه در گره ۱۰.



شکل ۱۴: نمودار تعیین آسیب گره ۷ و ۱۷ با ضربه در گره ۱۴.

## ۹- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، کارایی روشی مبتنی بر اعمال نیروی ضربه بر روی تیر فولادی دو سر ساده معیوب در تشخیص محل آسیب بررسی شده است. ضربه در نقاط مختلف اعم از ابتدا، انتها و میانه تیر معیوب اعمال گردیده و فرض براین است که

اطلاعات سازه سالم در دسترس نمیباشد. همچنین در این تحقیق از داده‌های شتاب وضعیت موجود سازه فقط در سه نقطه از تیر استفاده شده است. نتایج این تحقیق با تاکید بر یافته‌های زیر به خوبی صحت و کارایی روش پیشنهادی را نشان داده است:

- ۱- تشخیص آسیب مستقل از داده‌های سازه سالم اولیه ممکن می‌باشد.
- ۲- در بهره برداری از شاخص پیشنهادی میتوان به داده‌های تعداد محدودی از نقاط اکتفا نمود و با استفاده از تکنیک درونیابی، شتاب همه نقاط سازه را تقریبی محاسبه نمود. در این راستا نتایج آزمایشگاهی تیر فولادی مورد آزمایش عینا در نرم افزار اپنسیس نیز مدل گردید و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت.
- ۳- در تمامی حالتها از اطلاعات تیر معیوب تحت ضربه ضعیف بعنوان تیر سالم استفاده شده است. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که استفاده از این فرض در روابط شاخص *SRBI* میتواند آسیبهای موجود در تیر را با دقت شناسایی کند.
- ۴- علاوه بر محل اعمال ضربه در سناریوهای مختلف، شاهد پیک شاخص در نقاط آسیب تیر میباشیم. به دلیل احتمال وجود اغتشاش در نقاط سالم تیر که معمولا با سیگنالهای کوتاه دیده میشود لازم است ضربه در نقاط مختلف تیر اعمال گردد و با مقایسه نتایج، حذف نقاط اعمال ضربه و پیکهای غیرمشترک، با اشتراک‌گیری از نتایج، محل‌های واقعی آسیب تعیین میگردد.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از آزمایشگاه دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) که امکان انجام آزمایشات را فراهم نمودند کمال سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

1. Cawley, P. and R.D. Adams, *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979. **14**(2): p. 49-57.
2. Penny, J., M. Friswell, and S. Garvey, *Automatic choice of measurement locations for dynamic testing*. AIAA journal, 1994. **32**(2): p. 407-414.
3. Juneja, V., R. Haftka, and H. Cudney, *Damage detection and damage detectability—analysis and experiments*. Journal of Aerospace Engineering, 1997. **10**(4): p. 135-142.
4. Lifshitz, J.M. and A. Rotem, *Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique*. Journal of Composite Materials, 1969. **3**(3): p. 412-423.
5. Stubbs, N., T.H. Broome, and R. Osegueda, *Nondestructive construction error detection in large space structures*. AIAA journal, 1990. **28**(1): p. 146-152.
6. Morassi, A. and N. Rovere, *Localizing a notch in a steel frame from frequency measurements*. Journal of engineering mechanics, 1997. **123**(5): p. 422-432.
7. Ratcliffe, C.P., *Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data*. Journal of sound and vibration, 1997. **204**(3): p. 505-517.
8. Skjaerbaek, P., S.R. Nielsen, and A. Çakmak, *Identification of damage in reinforced concrete structures from earthquake records—optimal location of sensors*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996. **15**(6): p. 347-358.
9. Pandey, A., M. Biswas, and M. Samman, *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Journal of sound and vibration, 1991. **145**(2): p. 321-332.
10. Sanders, D., Y. Kim, and N. Stubbs, *Nondestructive evaluation of damage in composite structures using modal parameters*. Experimental mechanics, 1992. **32**: p. 240-251.

11. Topole, K.G. and N. Stubbs, *Non-destructive damage evaluation of a structure from limited modal parameters*. Earthquake engineering & structural dynamics, 1995. **24**(11): p. 1427-1436.
12. Stubbs, N. and J.-T. Kim, *Damage localization in structures without baseline modal parameters*. AIAA journal, 1996. **34**(8): p. 1644-1649.
13. Chance, J., G.R. Tomlinson, and K. Worden. *A simplified approach to the numerical and experimental modelling of the dynamics of a cracked beam*. in *Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering*. 1994. Citeseer.
14. Seyedpoor, S., *Structural damage detection using a multi-stage particle swarm optimization*. Advances in Structural Engineering, 2011. **14**(3): p. 533-549.
15. Yan, G., X. Peng, and H. Hao. *Localization of free-spanning damage using mode shape curvature*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2011. IOP Publishing.
16. Xiang, J. and M. Liang, *A two-step approach to multi-damage detection for plate structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2012. **91**: p. 73-86.
17. Nicknam, A. and M. Hosseini, *Structural damage localization and evaluation based on modal data via a new evolutionary algorithm*. Archive of Applied Mechanics, 2012. **82**: p. 191-203.
18. Samali, B., U. Dackermann, and J. Li, *Location and severity identification of notch-type damage in a two-storey steel framed structure utilising frequency response functions and artificial neural network*. Advances in Structural Engineering, 2012. **15**(5): p. 743-757.
19. Mohan, S., D.K. Maiti, and D. Maity, *Structural damage assessment using FRF employing particle swarm optimization*. Applied Mathematics and Computation, 2013. **219**(20): p. 10387-10400.
20. Zhang, Y., et al., *Damage detection in plates structures based on frequency shift surface curvature*. Journal of Sound and Vibration, 2013. **332**(25): p. 6665-6684.
21. Seyedpoor, S. and O. Yazdanpanah, *An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data*. Applied Mathematical Modelling, 2014. **38**(9-10): p. 2661-2672.
22. Makki Alamdari, M., J. Li, and B. Samali, *Damage identification using 2-D discrete wavelet transform on extended operational mode shapes*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015. **15**(3): p. 698-710.
23. Yazdanpanah, O., R.A. Izadifard, and M. Abdi Moghadam, *Embedded Crack Identification in Beam-Column Structures under Axial Load Using an Efficient Static Data Based Indicator*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 2016. **4**(2): p. 67-78.
24. Le, N.T., et al., *A new method for locating and quantifying damage in beams from static deflection changes*. Engineering Structures, 2019. **180**: p. 779-792.
25. Yazdanpanah, O., R.A. Izadifard, and M. Dehestani, *Static data based damage localization of beam-column structures considering axial load*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020. **27**(16): p. 1433-1450.
26. Shi, B., et al., *A directional continuous wavelet transform of mode shape for line-type damage detection in plate-type structures*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022. **167**: p. 108510.
27. Dziejciech, K., et al., *Wavelet-Based Transmissibility for Structural Damage Detection*. Materials, 2022. **15**(8): p. 2722.
28. D'Antimo, M., et al., *Experimental and numerical assessment of steel beams under impact loadings*. Journal of Constructional Steel Research, 2019. **158**: p. 230-247.
29. Casas, J.R. and A.C. Aparicio, *Structural damage identification from dynamic-test data*. Journal of Structural Engineering, 1994. **120**(8): p. 2437-2450.