

Damages detection of the micro and small scale in steel beams using spectral finite element methods, modal strain energy-based damage index, and support vector regression

Mohammad Vahidi ¹, Armin Aziminijad ^{2*}, Maryam Firoozi Nezamabadi ³, Mahmoud Heristchian ⁴

1- PhD candidate in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Structures such as bridges are exposed to a variety of micro and small damages during their service life. Due to the importance and role of these structures in the field of transportation, timely damage detection in them has a special place. Therefore, in this research, a new and efficient method for diagnosing and estimating micro and small damages in bridges has been presented. The proposed method is based on the combination of spectral finite element and modal strain energy index to determine the location of damage and the support vector regression technique is used to estimate the severity of damage. A new element eight-node that has spectral finite element characteristics was defined in OpenSees software for modeling. Then, to model the micro and small damages, respectively, a single-span beam and a double-span steel beam with elastic supports were used. In order to damage detection in the first step after modal analysis of structures, the modal strain energy index is calculated to determine the location of damage in the structure. In the second step, using the modal strain energy indexes calculated in the previous step, the support vector regression networks are trained to estimate the damage severity. The results of applying the proposed two-step method show its proper accuracy and optimal performance.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 June 2022

Revise Date: 18 February 2023

Accept Date: 02 July 2022

Keywords:

Damage detection,
Spectral finite element,
Modal strain energy index,
Steel beam,
Support vector regression

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.346306.2842>

*Corresponding author: Armin Aziminijad.
Email address: arminaziminejad@srbiau.ac.ir

تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک در تیرهای فولادی با استفاده از روش‌های شاخص انرژی کرنشی مودال و رگرسیون بردار پشتیبان المان محدود طیفی،

محمد وحیدی^۱، آرمین عظیمی نژاد^{۲*}، مریم فیروزی نظام آبادی^۳ و محمود هریسچیان^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران - زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

سازه‌هایی نظیر پل‌ها در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض انواع خسارات ریز و کوچک قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت و نقش این دسته از سازه‌ها در حوزه حمل و نقل، تشخیص به موقع خسارت در آنها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از این رو در این تحقیق یک روش نوین و کارآمد برای تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک در پل‌ها ارائه گردیده است. روش ارائه شده بر مبنای ترکیب المان محدود طیفی و شاخص انرژی کرنشی مودال برای تشخیص موقعیت خسارت بوده و از تکنیک رگرسیون بردار پشتیبان جهت تخمین میزان شدت خسارت استفاده شده است. برای مدل‌سازی یک المان هشت گره‌ای جدید که دارای ویژگی‌های المان محدود طیفی می‌باشد در نرم افزار OpenSees تعریف گردید. سپس جهت مدل‌سازی خسارات ریز و کوچک به ترتیب از یک تیریک دهانه و یک تیر دو دهانه فولادی با تکیه‌گاه‌های ارتجاعی استفاده شده است. جهت تشخیص خسارات در گام اول پس از تحلیل مودال سازه‌ها به محاسبه شاخص انرژی کرنشی مودال پرداخته تا موقعیت خسارات در سازه تشخیص داده شود. در گام دوم با استفاده از شاخص‌های انرژی کرنشی مودال محاسبه شده در گام قبل به آموزش شبکه‌های رگرسیون بردار پشتیبان برای تخمین میزان شدت خسارات پرداخته می‌شود. نتایج کاربرد روش دو مرحله‌ای ارائه شده نشان دهنده دقت مناسب و عملکرد مطلوب آن می‌باشد.

کلمات کلیدی: تشخیص خسارت، المان محدود طیفی، شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال، تیر فولادی، رگرسیون بردار پشتیبان

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.346306.2842	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.346306.2842	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۱۱	۱۴۰۱/۰۴/۱۱	۱۴۰۱/۱۱/۲۹	۱۴۰۱/۰۴/۰۲
*نویسنده مسئول: آرمین عظیمی نژاد arminaziminejad@srbiu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پل‌ها، ساختمان‌ها و انواع سازه‌های مهندسی در زمان بهره برداری دچار خسارات مختلف از جمله خسارات ریز و کوچک می‌گردند. در صورت تشخیص به موقع خسارت در مراحل اولیه و ترمیم آن در سازه‌ها می‌توان طول عمر سازه را افزایش داده و از خرابی کلی آنها جلوگیری نمود. پل‌ها یکی از مهمترین سازه‌های زیربنایی صنعت حمل و نقل محسوب می‌شوند. عدم توجه به موقع در تشخیص خسارت پل‌ها سبب بروز حوادث غیر قابل جبرانی از جمله فروریزش ناگهانی آنها گردیده که یک تهدید بسیار جدی و فاجعه بار برای جان انسان‌ها بشمار می‌رود. تشخیص خسارت در پل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و روش‌های متنوعی جهت افزایش دقت و سرعت تشخیص خسارت توسط محققین ارائه گردیده و همچنین رو به گسترش می‌باشد.

خسارت در سازه موجب تغییر جرم، سختی و میرایی مودال در ارتباط می‌باشد پس می‌توان از مشخصات دینامیکی برای تشخیص خسارت در سازه‌ها استفاده نمود [۱ و ۲]. روش انرژی کرنشی مودال یکی از روش‌های مبتنی بر مشخصات دینامیکی می‌باشد. این روش بر پایه مقایسه انرژی کرنشی مودال سازه قبل و بعد از خسارت استوار بوده، که با تعریف یک شاخص خسارت، اعضای آسیب دیده سازه را تشخیص می‌دهد. روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال دارای دقت بالاتر و حساسیت بیشتری در تشخیص محل و شدت خرابی می‌باشد.

شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال برای سازه‌های تیرشکل نخستین بار توسط استابز و همکاران ارائه گردید [۳ و ۴]. آنها با مطالعه بر روی شاهتیرهای پل I-40 به درستی موفق به تشخیص محل خسارت شدند. فرار و جاریگو [۵] با مطالعه بر روی پل I-40 و با بررسی پنج روش از روش‌های شناسایی خسارت مبتنی بر مشخصات ارتعاشی، شامل شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال، تغییر در انحنا شکل مودی، تغییر در انحنا نرمی، تغییر در نرمی و تغییر در سختی به این نتیجه دست یافتند، که روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده داشته و دارای عملکرد مناسبی در تشخیص خسارت در پل‌ها می‌باشد. شی و همکاران [۶] در یک پژوهش به بررسی دو روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال و انعطاف‌پذیری مودال برای شناسایی خسارت در تیرها و صفحه‌ها پرداختند. نتیجه حاصل از تحقیق آنها نشان دهنده عملکرد مطلوب‌تر روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال در مقایسه با روش انعطاف-پذیری مودال جهت تشخیص خسارت در شاهتیر و عرشه پل‌ها که رفتاری شبیه به تیر و صفحه دارند می‌باشد. یک روش کارآمد برای تعیین موقعیت خسارت توسط سیدپور ارائه گردید [۷]، محقق از یک شاخص خسارت بر مبنای انرژی کرنشی مودال قبل و بعد از خسارت برای تعیین موقعیت‌های خسارت احتمالی در سازه استفاده نموده است. تان و همکاران [۸] از روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تشخیص و تخمین خسارت در تیرهای فولادی پرداختند. درگام نخست، از شاخص خسارت انرژی-کرنشی مودال و رسم نمودار تغییر شاخص خسارت در طول تیر به تعیین موقعیت خسارت دست یافتند. درگام دوم، با شاخص‌های خسارت محاسبه شده از گام قبل بعنوان داده‌های ورودی جهت آموزش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین میزان شدت خسارت استفاده نمودند. نیک و همکاران در یک روش دو مرحله‌ای و در دو سناریوی تک خسارت و چند خسارت همزمان و با استفاده از روش شاخص انرژی کرنشی مودال و شبکه عصبی مصنوعی به تشخیص و تخمین میزان شدت خسارت در شاهتیرهای پل I-40 پرداختند. نتایج تحقیق نمایانگر آن است که در هر دو مرحله، تعیین موقعیت خسارت و تخمین میزان شدت خسارت دارای کمترین خطا می‌باشد [۹]. در یک مطالعه دیگر نیک و عظیمی نژاد [۱۰] به بررسی سه روش تشخیص خرابی شامل، شاخص خسارت مبتنی بر انرژی کرنشی مودال، انعطاف-پذیری مودال و انحنا مودال با و بدون وجود نوفه پرداختند. نتایج نشان داد در حالیکه هر سه روش قادر به تشخیص خسارت در غیاب نوفه هستند، تنها روش انعطاف‌پذیری مودال می‌تواند خسارات را در حضور نوفه با دقت بهتری تعیین نماید. همچنین تحقیقات بسیاری بر روی روش‌های تشخیص خسارت مبتنی بر ارتعاش در سازه‌های مختلف مانند تیرها [۱۱-۱۶]، پل‌ها [۱۷-۲۴]، خراباها [۲۵] و سازه‌های صفحه‌ای [۲۶-۲۸] صورت گرفته است.

مدلسازی اغلب سازه‌ها جهت تشخیص خسارت در آنها با استفاده از روش المان محدود بوده است. علت استفاده از روش المان محدود انعطاف‌پذیری آن در مدلسازی می‌باشد که تنها مزیت روش بشمار می‌رود. درگیری با دستگاه‌های معادلات خطی بزرگ مخصوصا در

مدل سه بعدی و بار محاسباتی زیاد [۲۹ و ۳۰]، پیچیده بودن اجرا بر روی کامپیوترهای موازی با حافظه تقسیم شده [۲۹]، وقوع مودهای موهومی درالمان‌های محدود مرتبه بالا [۳۱]، محدودیت در گام‌های زمانی برای منظور نمودن ملاحظات پایداری [۳۲] برخی از نقایص روش-المان محدود می‌باشد. همچنین یکی دیگر از ضعف‌های روش المان محدود، در پدیده انتشار امواج در سازه‌های در معرض فرکانس بالا است. مسائل دینامیکی را می‌توان به دو دسته مسائل دینامیکی با بارگذاری فرکانس پایین و با فرکانس بالا تقسیم بندی نمود. بررسی اثرات زودگذر و یا کوتاه مدت و همچنین در نظر گرفتن مودهای بالاتر نیاز به استفاده از روش انتشار امواج دارند. برای رفع مشکلات ذکر شده در روش المان محدود و در بین انواع روش‌های عددی در حل مسائل انتشار امواج می‌توان به روش المان محدود طیفی اشاره نمود. روش المان محدود طیفی، از ترکیب انعطاف‌پذیری روش المان محدود و دقت روش شبه طیفی ایجاد شده است. موارد زیر برخی از مزیت‌های روش المان محدود طیفی می‌باشد.

(۱) دارای پراکندگی عددی بسیار محدود [۳۰ و ۳۱ و ۳۳]، (۲) هنگامیکه از چند جمله‌ای گوس- لژاندر- لوباتو استفاده شود ماتریس جرم قطری شده و هزینه محاسبات به شدت کاهش می‌یابد [۳۰]، (۳) امکان درگیر شدن با سازه‌های بزرگ در سه بعد [۳۰]، (۴) قابلیت مدل سازی‌های پیچیده شامل ناهمسانگردی‌ها، هم‌مرزی‌های سیال و جامد [۲۹ و ۳۰]، (۵) میرایی را می‌توان به شکل طبیعی در روش مذکور مدلسازی نمود [۳۰]، (۶) کارایی در اجرا بر روی کامپیوترهای موازی با حافظه تقسیم شده [۲۹ و ۳۱ و ۳۲]، (۷) دقت در بیان انتشار امواج سطحی [۲۹]، (۸) با داشتن تعداد نقاط گرهی کمتر به ازای طول موج حداقل و در صورت وجود مسافت‌های انتشار بسیار بلند دارای دقت بالاتری می‌باشد [۳۰]. با توجه به دقت و سرعت همگرایی روش شبه طیفی و انعطاف‌پذیری المان محدود ایده ایجاد روش المان محدود طیفی شکل گرفته است و در ابتدا نرایان و بسکس از این روش در سال ۱۹۸۳ استفاده نمودند [۳۴]. دابلینگ و همکاران [۳۵] بررسی گسترده‌ای در مورد روش‌های تشخیص خسارت مبتنی بر ارتعاش به عمل آوردند. کراوزوک [۳۶] از کاربرد المان محدود طیفی و تکنیک گشتن تکرار شونده برای شناسایی خسارت تیر دارای ترک استفاده نمود. در این پژوهش از روش انتشار موج ترکیب شده با الگوریتم ژنتیک و روش گرادیان برای تعیین خسارت در سازه‌های تیر شکل استفاده شده است. روند شناسایی خسارت با استفاده از الگوریتم ژنتیک شروع می‌شود و هنگامی که تابع هدف به سطح مناسبی می‌رسد، روش گرادیان استفاده می‌گردد، این استراتژی باعث ایجاد افزایش دقت گردید. ویسلاو و اوتا کوپیز [۳۷] از روش المان محدود طیفی برای تشخیص خسارت در سازه‌ها در پژوهش خود استفاده نمودند. آنها خسارت و انتشار موج الاستیک را مدل کرده و در شبیه‌سازی خسارت از روش کاهش سختی استفاده کردند. در این تحقیق از امواج لمب و روش المان محدود طیفی در حوزه فرکانس استفاده شده است. آنها با این روش توانستند محل دقیق ترک و خسارت را که از قبل تعریف شده بود بدست آورند. کودلا و همکارانش [۳۸] با استفاده از المان محدود طیفی به مدلسازی انتشار موج در سازه‌های یک و دو بعدی پرداختند. همچنین آنها با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی دو روش المان محدود و المان محدود طیفی به برتری بالاتر روش المان محدود طیفی دست یافتند. با توجه به مزیت‌های روش المان محدود طیفی و دقت بسیار بالای آن در این پژوهش سعی شده است از این روش برای مدلسازی خسارت در سازه‌های تیر شکل استفاده شود. برای این منظور از ترکیب دو روش انرژی کرنشی مودال و المان محدود طیفی جهت تشخیص خسارت در سازه‌ها استفاده می‌شود و همچنین از روش یادگیری ماشین برای تخمین میزان شدت خسارت استفاده گردیده است.

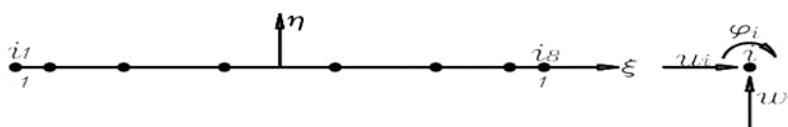
هدف از ارائه این تحقیق دستیابی به روشی بسیار کارآمد جهت تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک در پل‌ها می‌باشد. برای این منظور یک المان تیر هشت گرهی جدید با ویژگی‌های المان محدود طیفی در نرم افزار OpenSees تعریف گردید. سپس جهت تشخیص خسارت در گام اول با مدلسازی دو تیر یک دهانه و دو دهانه فلزی با تکیه‌گاه‌های ارتجاعی و با استفاده از روش شاخص خسارت انرژی-کرنشی مودال به تشخیص موقعیت خسارت‌های ریز و کوچک پرداخته می‌شود. در گام دوم برای تخمین شدت خسارات از قابلیت روش رگرسیون بردار پشتیبان که یک روش قدرتمند در تخمین مقادیر در حوزه یادگیری ماشین می‌باشد استفاده شده است. نتایج نمایانگر کارایی و سرعت مناسب روش ارائه شده در تشخیص و تخمین موقعیت و میزان شدت خسارات ریز و کوچک می‌باشد.

۲- رابطه سازی روش ارائه شده

۲-۱- روش المان محدود طیفی

از مزیت‌های مهم روش المان محدود طیفی می‌توان به ماتریس جرم قطری آن اشاره نمود، که با استفاده از چند جمله‌ای گوس-لژاندر-لوباتو نوشته می‌شود. اهمیت این روش در دستیابی به پاسخ‌های دقیق و سرعت بالا محاسبات و همچنین کاهش هزینه محاسبات می‌باشد [۳۸].

جهت استفاده از مزایای المان محدود طیفی، یک المان هشت گرهی به نام Element beamvahidi در نرم افزار OpenSees تعریف گردیده است. المان مذکور به صورت متقارن ولی با گره‌هایی با فواصل غیر یکسان می‌باشد. در تعریف المان مذکور ماتریس جرم، سختی، میرای و دیگر پارامترهای مؤثر بر آن از روابط حاکم بر المان محدود طیفی استفاده شده است [۳۸]. مختصات گره‌ها از مشتق معادله دیفرانسیل رودریگز حاصل می‌گردد. شکل ۱ نمایانگر موقعیت محلی قرارگیری گره‌ها از یکدیگر بر اساس نقاط گوس-لژاندر-لوباتو می‌باشد.



شکل ۱: درجات آزادی u_i درجه آزادی انتقالی در جهت x و w_i درجه آزادی انتقالی در جهت y و ϕ_i درجه آزادی دورانی.

ساختار تعریف المان Element beamvahidi در نرم افزار OpenSees به فرم زیر می‌باشد. جدول ۱ معرف پارامترهای المان جدید می‌باشد. یکی از خصوصیات المان Element beamvahidi ساخته شده در نرم افزار OpenSees عدم نیاز به تعریف دستی جرم در گره‌ها می‌باشد. با تغییرات داده شده در تعریف این المان با دریافت خصوصیات مقطع در ابتدای برنامه، به صورت خودکار جرم را محاسبه نموده و در گره‌ها اعمال می‌نماید.

Element beamvahidi \$eleTag \$Node1 ... \$Node8 \$A \$E \$G \$Iz \$g \$rho \$matTag \$transfTag;

جدول ۱: معرفی پارامترهای المان محدود طیفی Element beamvahidi

مساحت مقطع	A
مدول الاستیسیته	E
مدول برشی	G
ممان اینرسی	I_z
ثابت گرانش	g
چگالی جرمی	ρ

۲-۲- انرژی کرنشی مودال

روش انرژی کرنشی مودال، یکی از روش‌های دینامیکی تشخیص خسارت در سازه‌ها است که از مشخصات سازه در حوزه فرکانس برای تشخیص خسارت استفاده می‌نماید. در روش انرژی کرنشی مودال از شکل موده‌های سازه برای تشخیص خرابی استفاده می‌شود. در حالی که شکل‌های مودی اطلاعات محلی سازه را با خود به همراه دارند حساسیت این روش در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص خسارت بیشتر می‌باشد. به همین دلیل استفاده از این روش برای تشخیص خسارت‌های تک و همچنین چند خسارت همزمان، کاراتر است. از آنجایی

که خسارت‌های وارده به سازه و گسترش آن موجب بروز خسارات مالی سنگین می‌شود، مطالعه و بررسی روش‌های شناسایی خسارت نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. انرژی کرنشی در یک تیر با استفاده از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه می‌باشند [۸].

$$U = \int_0^l \frac{EI}{2} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \quad (1)$$

$$U_{ij} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \left(\frac{EI}{2} \right) \varphi_{ij}''^2 dx \quad (2)$$

مقدار x در رابطه (۱) فاصله در طول المان، y تغییر شکل در جهت قائم، EI سختی خمشی مقطع عرضی و $\frac{d^2 y}{dx^2}$ انحنا ی تیر تغییر شکل داده است. همچنین $\varphi_{ij}''^2$ در رابطه (۲) انحنا ی مودال می‌باشد. برای محاسبه انرژی کرنشی مودال ذخیره شده در یک المان می‌بایست مشتق دوم و یا همان انحنا ی مودال را در هر یک از گره‌های المان‌های جزء بندی شده طبق رابطه مشتق عددی زیر محاسبه نمود [۳۹].

$$\varphi_i'' = \frac{(\varphi_{i-1} - 2\varphi_i + \varphi_{i+1})}{l^2} \quad (3)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\left(\int_a^b [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx + \int_0^L [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx \right) * \left(\int_0^L [\varphi_i''(x)]^2 dx \right)}{\left(\int_a^b [\varphi_i''(x)]^2 dx + \int_0^L [\varphi_i''(x)]^2 dx \right) * \left(\int_0^L [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx \right)} \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\left[(\varphi_{ji}^{**})^2 + \sum_{i=1}^{nm} (\varphi_{ji}^{**})^2 \right] * \left[\sum_{i=1}^{nm} ([\varphi_{ji}'']^2) \right]}{\left[(\varphi_{ji}'')^2 + \sum_{i=1}^{nm} ([\varphi_{ji}'']^2) \right] * \left[\sum_{i=1}^{nm} (\varphi_{ji}^{**})^2 \right]} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵) β_{ij} شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال، مقادیر φ_{ji}'' و φ_{ji}^{**} توابع انحنا ی شکل مودی برای مود i در فاصله x در طول المان و j نمایانگر شماره المان بوده و به ترتیب برای حالت سالم و آسیب دیده می‌باشد. L طول المان a و b محدوده جزئی از المان می‌باشد که آسیب روی آن ارزیابی می‌شود. در صورتی که بیش از یک مود ارتعاشی در محاسبه شاخص خسارت مورد استفاده قرار گیرد از رابطه (۶) استفاده می‌گردد.

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{nm} Num_{ji}}{\sum_{i=1}^{nm} Denom_{ji}} \quad (6)$$

۳-۲- رگرسیون بردار پشتیبان

یکی از تکنیک‌های قدرتمند برای طبقه‌بندی و رگرسیون داده‌ها روش ماشین‌های بردار پشتیبان می‌باشد. این روش اولین بار توسط ولادمیر وینیک ارائه گردید، یکی از راه‌ها در یادگیری ماشین، تشخیص الگو گسترش یافته است. مهم‌ترین تفاوت ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون بردار پشتیبان در نوع ارائه خروجی آنها می‌باشد. خروجی‌های روش ماشین بردار پشتیبان فقط می‌تواند مقادیر مثبت و منفی

یک را بپذیرند در حالیکه در روش رگرسیون بردار پشتیبان هر مقدار حقیقی را می‌پذیرند [۴۰]. آماده سازی داده‌ها در حوزه یادگیری ماشین یکی از موضوعات بسیار با اهمیت می‌باشد. آماده سازی داده‌ها به دو روش استانداردسازی و نرمال‌سازی صورت می‌گیرد. با نرمال‌سازی داده‌ها اثرات منفی در روند همگرایی، افزایش زمان و تعداد دفعات تکرار آموزش مرتفع می‌گردد. نرمال‌سازی داده‌های ورودی به روش min-max سبب یکدست شدن و هماهنگ شدن داده‌ها شده و تمامی داده‌ها در بازه [۰ و ۱] قرار می‌گیرند.

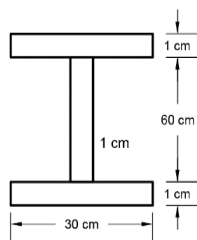
۳- مثال‌های عددی

جهت ارائه روش پیشنهادی و بررسی عملکرد ترکیب دو روش المان محدود طیفی و شاخص انرژی کرنشی مودال برای تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک اقدام به مدل‌سازی دو تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی ارتجاعی گردید.

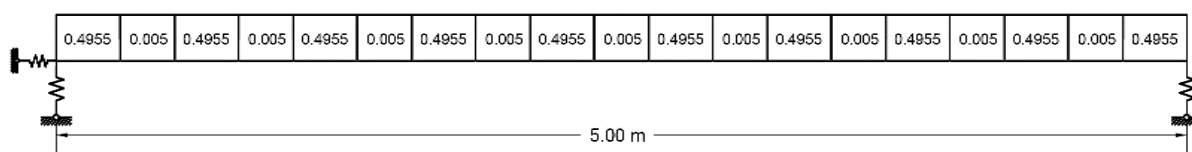
۳-۱- مدل‌سازی خسارت ریز

۳-۱-۱- تشخیص خسارت ریز

برای مدل‌سازی خسارت ریز از یک تیر فولادی یک دهانه به طول ۵ متر با شرایط تکیه‌گاهی ارتجاعی و از مقطع نشان داده شده در شکل ۲ استفاده گردیده است. بنا به تعریف خسارات ریز [۴۱]، اندازه خسارت کوچکتر از ۰/۱٪ اندازه عضو سازه‌ای می‌باشد. سپس با استفاده از المان Element beamvahidi اقدام به مدل‌سازی نمونه گردید. طول المان خسارت ریز بنا به تعریف گفته شده ۰/۰۵ متر می‌باشد. موقعیت ۹ المان خسارت در طول تیر در شکل ۳ نمایش داده شده است. مشخصات مصالح مصرفی در مدل‌سازی المان محدود طیفی شامل مدول الاستیسیته مقطع فولادی $2/1 \times 10^{11}$ نیوتن بر مترمربع، مدول الاستیسیته فنر ارتجاعی $6/67 \times 10^8$ نیوتن بر مترمربع و چگالی جرم 7850 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: مقطع بکار رفته در مدل‌سازی.

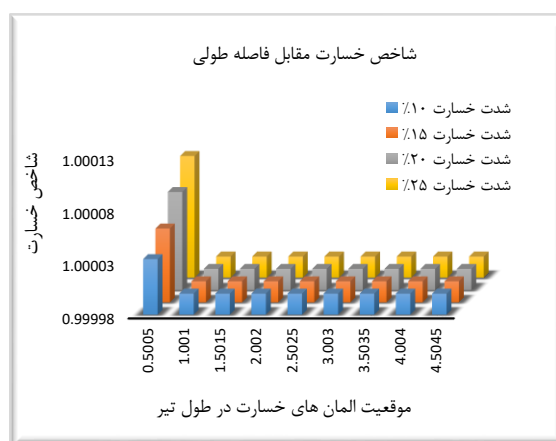
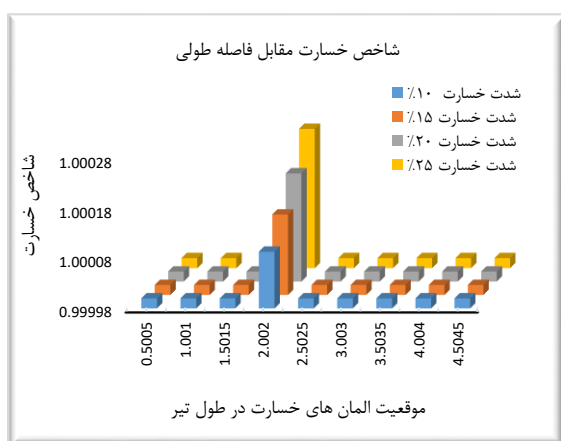


شکل ۳: محل شماتیک در نظرگیری المان‌های خسارت با طول ۰/۰۵ متر.

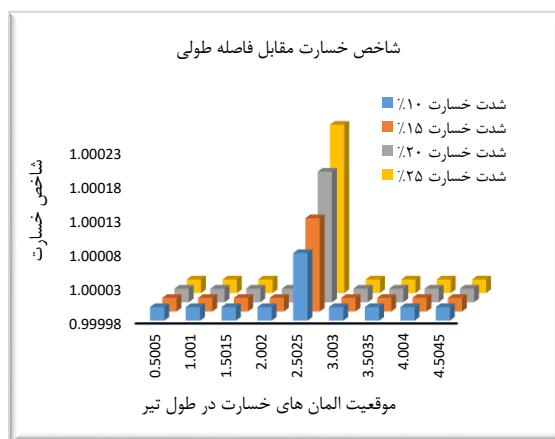
از ایده تغییر در سختی برای شبیه‌سازی خسارات استفاده گردیده است. چهار سطح خسارت‌های اعمال شده به تیر فولادی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: چهار سطح خسارت تیر فولادی

سطوح خسارت	کاهش سختی (%)	مدول الاستیسیته ($\frac{N}{m^2}$)
۱	۱۰	$1/89 \times 10^{11}$
۲	۱۵	$1/785 \times 10^{11}$
۳	۲۰	$1/68 \times 10^{11}$
۴	۲۵	$1/575 \times 10^{11}$



(الف) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۰/۵۰۰۵ متر). (ب) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۲/۰۰۲ متر).

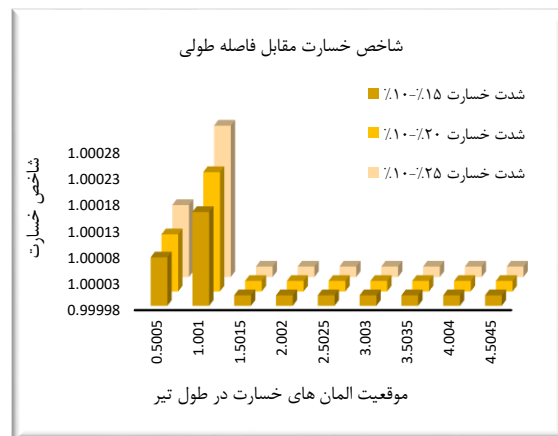
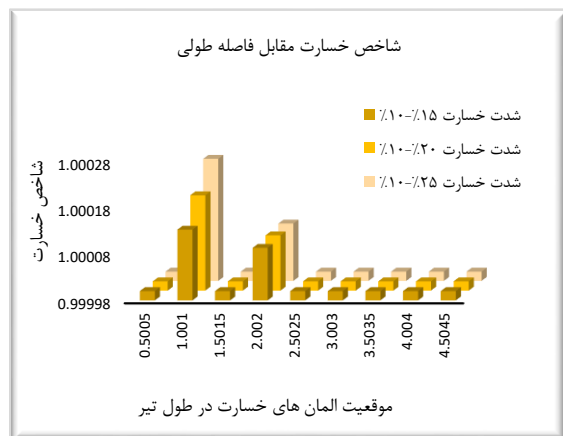


(ج) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۲/۵۰۲۵ متر).

شکل ۴: نمودار شاخص خسارت ریز در طول تیر در سناریوی تک به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت.

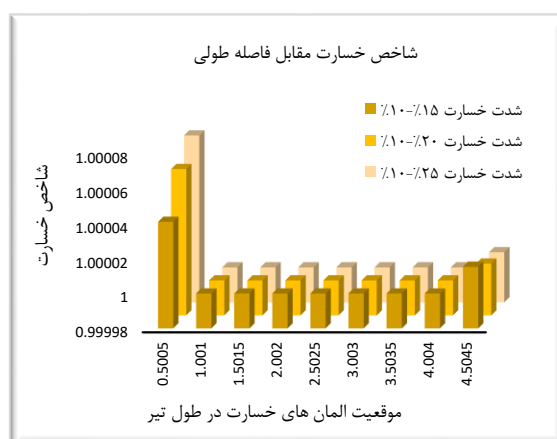
برای بررسی سناریوی تک خسارت و با توجه به اینکه تیر مورد بررسی متقارن می‌باشد، سطوح خسارت مندرج در جدول ۲ به المان‌هایی که در فواصل ۰/۵۰۰۵ متر، ۱/۰۰۱ متر، ۱/۵۰۱۵ متر، ۲/۰۰۲ متر و ۲/۵۰۲۵ متر قرار دارند خسارت زده شده است. در این مرحله ۲۰ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین در سناریوی زوج خسارت همزمان به ۹ المان خسارت که از پیش تعریف گردیده است خسارات مندرج در جدول ۲ زده شده است. در تمام نمونه‌ها خسارت ۱۰٪ در موقعیت اول و در موقعیت دوم خسارات ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ اعمال شده است. در این مرحله جمعاً ۲۱۶ آنالیز مودال صورت گرفته است.



(ب) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در موقعیت ۲/۰۰۲ متر و خسارات ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۱/۰۰۱ متر).

(الف) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در موقعیت ۰/۵۰۰۵ متر و خسارات ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۱/۰۰۱ متر).



(ج) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در موقعیت ۴/۵۰۴۵ متر و خسارات ۲۰، ۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۰/۵۰۰۵ متر).

شکل ۵: نمودار شاخص خسارت ریز در طول تیر در سناریوی زوج خسارت همزمان به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت.

نمودارهای شکل ۴-الف تا ۴-ج نمایانگر سناریوی تک خسارت در طول تیر و نمودارهای شکل ۵-الف تا ۵-ج نشان دهنده سناریوی زوج خسارت همزمان در طول تیر فولادی می‌باشند. مقادیر حداکثر شاخص خسارت در طول تیر در نمودارها نمایانگر محل خرابی در تیر مورد بررسی می‌باشد. نتایج، دقت روش المان محدود طیفی را دریافتن محل خسارت می‌رساند. همچنین در سناریوی تک خسارت رابطه خطی بین افزایش شدت خسارات و شاخص خسارت وجود دارد.

۳-۱-۲- تخمین شدت خسارت ریز

از روش رگرسیون بردار پشتیبان برای تخمین میزان شدت خسارات ریز در دو حالت تک و زوج خسارت همزمان در مدل تعریف شده استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه مقادیر ورودی به شبکه محدود می‌باشد و همچنین زمان زیادی لازم است که شاخص‌های خسارت سطوح دیگر محاسبه شوند. برای رفع مشکل موجود و افزایش دقت شبکه جهت تخمین شدت‌های خسارت از روش درون‌یابی اسپیلاین درجه سوم استفاده گردیده است. چهار شاخص خسارت (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵٪) محاسبه شده توسط روابط (۵) و (۶) در موقعیت ۱/۵۰۱۵ متری برای بررسی روش پیشنهاد شده استفاده گردیده است. بدین نحو که از سطوح خسارت ۱۰ و ۲۵٪ برای درون‌یابی خسارت ۱۵ و ۲۰٪ استفاده می‌گردد.

جدول ۳: شاخص خسارت درون‌یابی شده به روش اسپیلاین درجه سوم برای موقعیت ۱/۵۰۱۵ متر

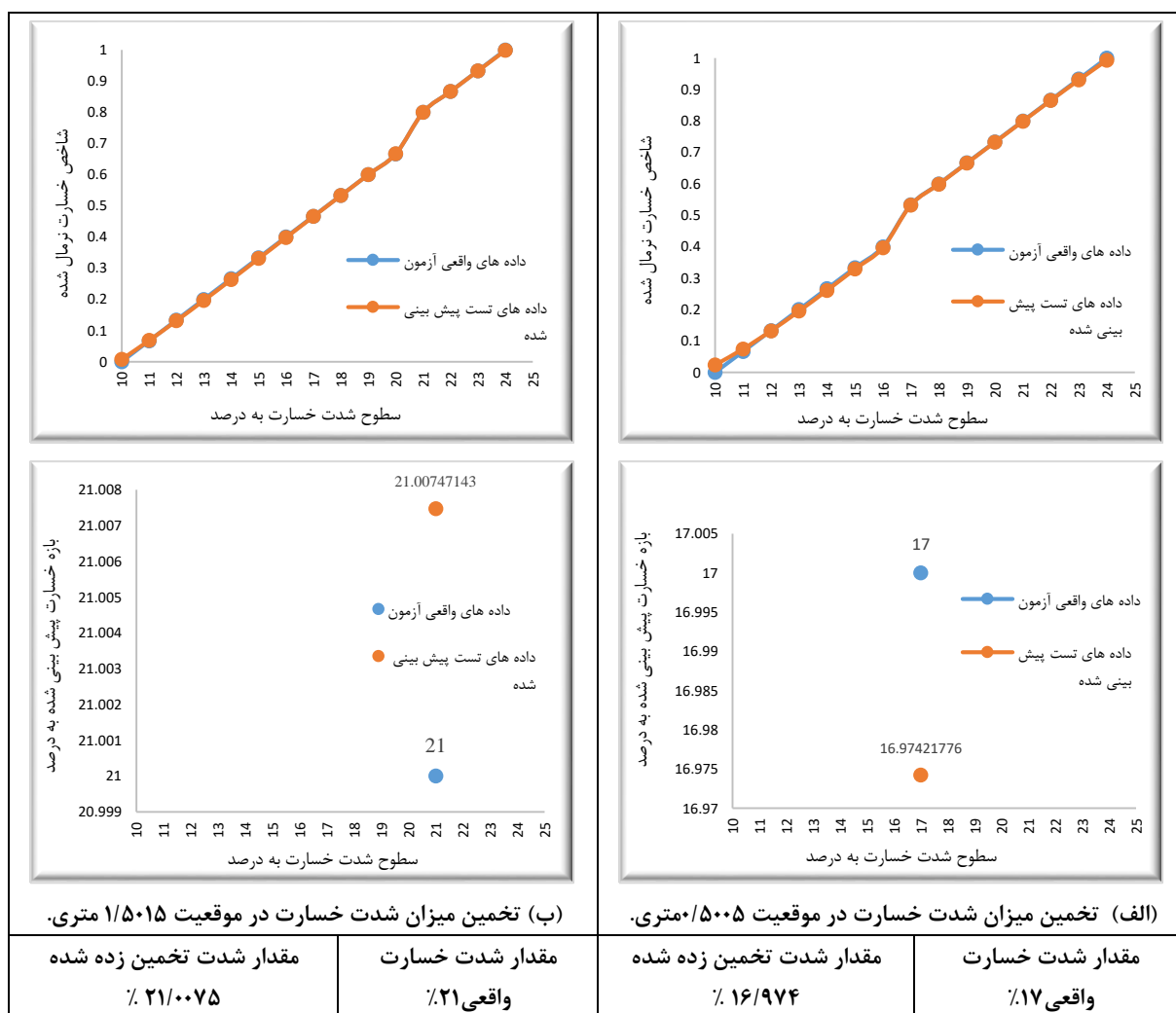
شدت خسارت	شاخص خرابی محاسبه شده با روابط ۵ و ۶	شاخص خرابی درون‌یابی شده	اختلاف (%)
۱۰	۱/۰۰۰۱۰۰۷	-	-
۱۵	۱/۰۰۰۱۵۳۰۸۴	۱/۰۰۰۱۶۱۲۲	۰/۰۰۰۸۱
۲۰	۱/۰۰۰۲۱۴۹۹۵	۱/۰۰۰۲۲۱۷	۰/۰۰۰۶۷
۲۵	۱/۰۰۰۲۸۲۱۸۶	-	-

حداکثر اختلاف بین شاخص‌های خسارت محاسبه شده از روابط (۵) و (۶) و مقادیر درون‌یابی شده طبق جدول ۳، ۰/۰۰۰۸۱ درصد می‌باشد. نتایج نمایانگر دقت روش پیشنهادی برای ایجاد شدت خسارات بین ۱۰ تا ۲۵ درصد می‌باشد. در جدول ۴ یک نمونه از نتایج درون‌یابی شده شاخص خسارات بین سطوح خسارت ۱۰ تا ۲۵٪ برای موقعیت ۱/۵۰۱۵ متر نمایش داده شده است.

جدول ۴: شاخص‌های خسارات درون‌یابی شده برای موقعیت ۱/۵۰۱۵ متر

شدت خسارت	شاخص خرابی محاسبه شده	شاخص خرابی درون‌یابی شده
۱۰	۱/۰۰۰۱۰۰۷	۱/۰۰۰۱۰۰۷
۱۱		۱/۰۰۰۱۱۲۸۴
۱۲		۱/۰۰۰۱۲۴۹۳
۱۳		۱/۰۰۰۱۳۷۰۳
۱۴		۱/۰۰۰۱۴۹۳۱۳
۱۵	۱/۰۰۰۱۵۳۰۸۴	۱/۰۰۰۱۶۱۲۲
۱۶		۱/۰۰۰۱۷۳۳۲
۱۷		۱/۰۰۰۱۸۵۴۱
۱۸		۱/۰۰۰۱۹۷۵۱
۱۹		۱/۰۰۰۲۰۹۶۱
۲۰	۱/۰۰۰۲۱۴۹۹۵	۱/۰۰۰۲۲۱۷
۲۱		۱/۰۰۰۲۳۳۸
۲۲		۱/۰۰۰۲۴۵۸۹
۲۳		۱/۰۰۰۲۵۷۹۹
۲۴		۱/۰۰۰۲۷۰۰۹
۲۵	۱/۰۰۰۲۸۲۱۸۶	۱/۰۰۰۲۸۲۱۸۶

با توجه به دقت بالا و اختلاف بسیار اندک بین نتایج حاصل از درون‌یابی و روابط (۵) و (۶) برای دیگر موقعیت‌های المان‌های خسارت سطوح خسارت بین ۱۰ تا ۲۵٪ درون‌یابی گردید. برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان در سناریوی تک خسارت ۱۴۴ داده ورودی ایجاد گردیده است. در فاز تست شبکه به دلخواه هر سطح از خسارت و در هر موقعیت را می‌توان از فاز آموزش خارج و در فاز تست قرار داد تا آنالیزهای لازم صورت گیرد.

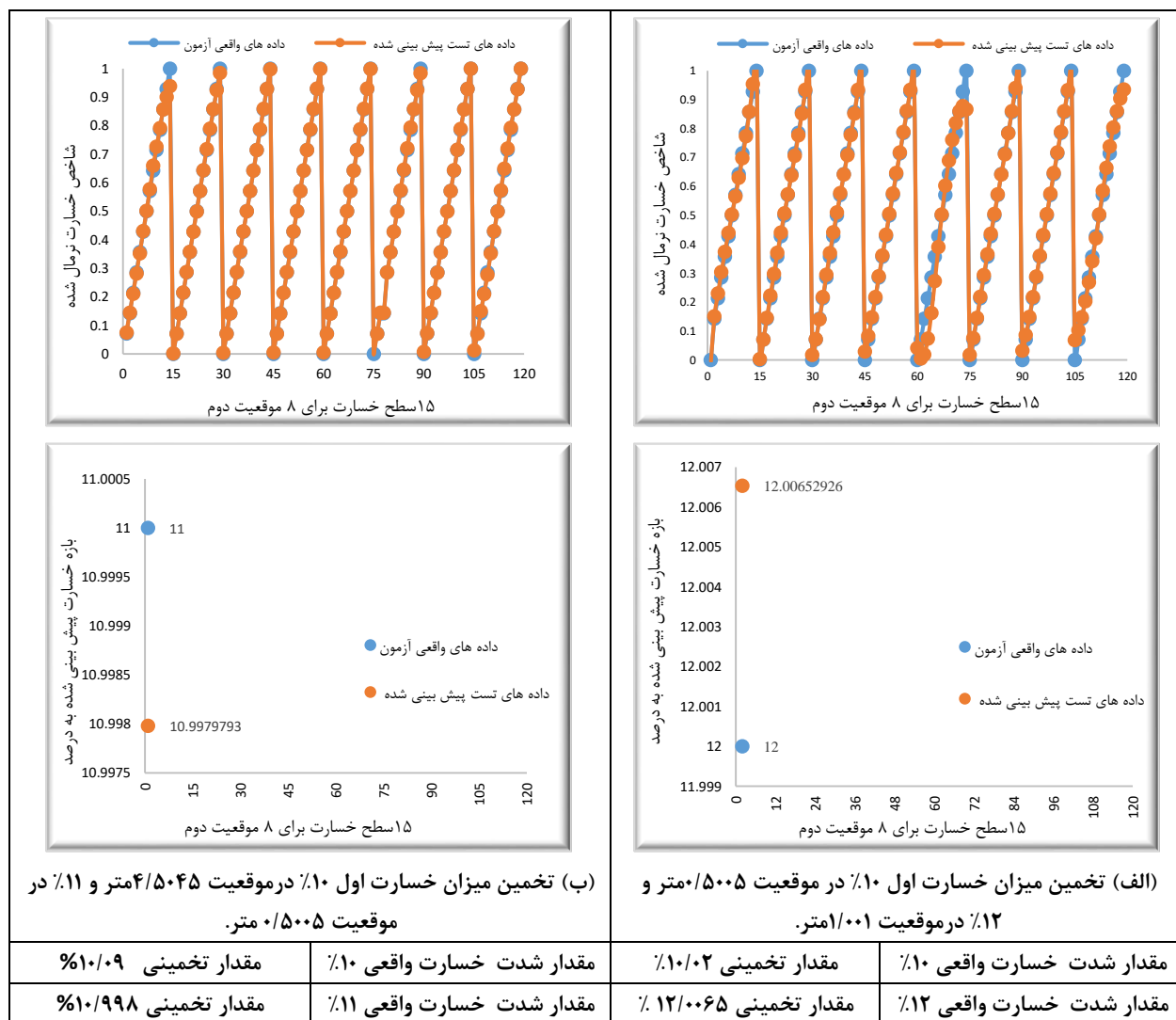


شکل ۶: تخمین مقادیر شدت خسارات ریز در سناریوی تک خسارت توسط رگرسیون بردار پشتیبان.

همچنین ۱۰۸۰ داده ورودی برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان در سناریوی زوج خسارت همزمان ایجاد شده است. در این قسمت سعی شده است تا از قدرت روش رگرسیون بردار پشتیبان برای تخمین مقادیر استفاده شود. بدین نحو که انتخاب داده‌ها در فاز تست به صورت کاملاً تصادفی و بدون هرگونه نظمی می‌باشد. داده‌های تصادفی از فاز آموزش خارج و در فاز تست قرار می‌گیرند. نتایج میزان تخمین شدت خسارات به تفکیک در شکل ۶ نمایش داده شده است. همچنین به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر تمامی شاخص‌های خسارت محاسبه شده توسط روابط (۵) و (۶) برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان نرمال‌سازی شده اند تا شاخص‌های خسارت با مقیاس بزرگ‌تر سبب انحراف نتیجه به سمت خود نگردند.

شکل ۶ نشان دهنده میزان دقت روش رگرسیون بردار پشتیبان جهت تخمین میزان شدت خسارات ریز در سناریوی تک خسارت می باشد. شکل ۶-الف به بررسی المان نزدیک تکیه گاه ارتجاعی می پردازد که شبکه رگرسیون بردار پشتیبان توانسته است میزان کاهش خسارت ۱۷٪ را $۱۶/۹۷۴٪$ تخمین بزند. در شکل ۶-ب المان موقعیت $۱/۵۰۱۵$ متر را با کاهش سختی ۲۱٪ را $۲۱/۰۰۷۵٪$ تخمین زده است.

در سناریوی زوج خسارت همزمان برای تخمین میزان شدت خسارت در موقعیت اول کاهش ۱۰٪ سختی و در موقعیت دوم کاهش سختی بین (۱۱-۲۵)٪ اعمال گردیده است. شکل ۷ نشان دهنده میزان تخمین شدت خسارات در سناریوی زوج خسارت همزمان می باشد.



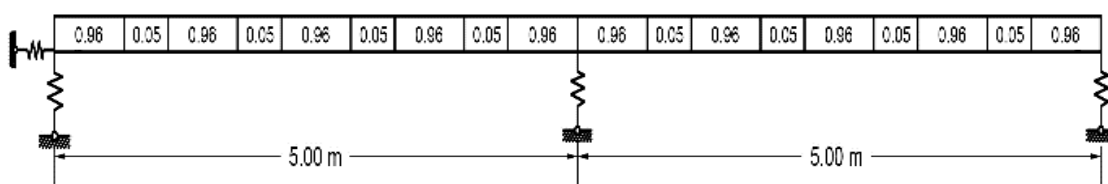
شکل ۷: تخمین مقادیر شدت خسارات ریز در سناریوی زوج خسارت همزمان توسط رگرسیون بردار پشتیبان.

شکل ۷- الفوب نمایانگر شدت خسارات تخمین زده شده توسط شبکه رگرسیون بردار پشتیبان بوده که توانسته با دقت مناسبی شدت خسارات در موقعیت $1/0.01$ متر با کاهش سختی 12% را با اختلاف $0.054/0$ و خسارت در موقعیت $0.5/0.5$ متر به میزان 11% کاهش سختی را با اختلاف $0.0181/0$ تخمین بزند.

۳-۲ - مدلسازی خسارت کوچک

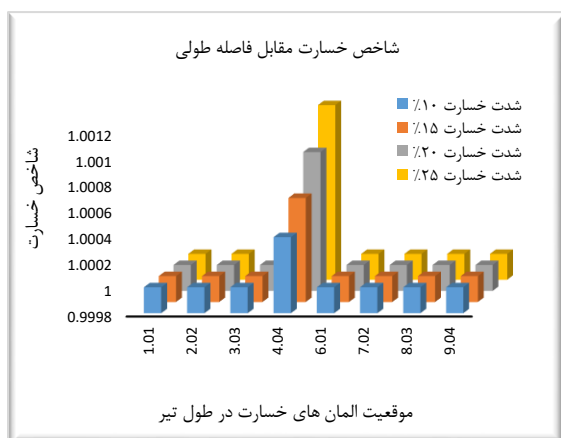
۳-۲-۱ - تشخیص خسارت کوچک

برای مدلسازی خسارت کوچک از یک تیر فولادی دو دهانه به طول 10 متر با شرایط تکیه‌گاهی ارتجاعی و از مقطع نشان داده شده در شکل ۲ استفاده گردیده است. با در نظر گرفتن تعریف خسارات کوچک [۴۱]، که اندازه خسارت حدود 1% اندازه عضو سازه‌ای می‌باشد، و با استفاده از المان Element beamvahidi اقدام به مدلسازی نمونه گردید. طول المان خسارت کوچک در این مرحله $0.5/0$ متر می‌باشد. در شکل ۸ موقعیت هشت المان خسارت کوچک در طول تیر نمایش داده شده است. همچنین مشخصات مصالح در مدلسازی المان محدود طیفی مانند مدل قبل در نظر گرفته شده است.

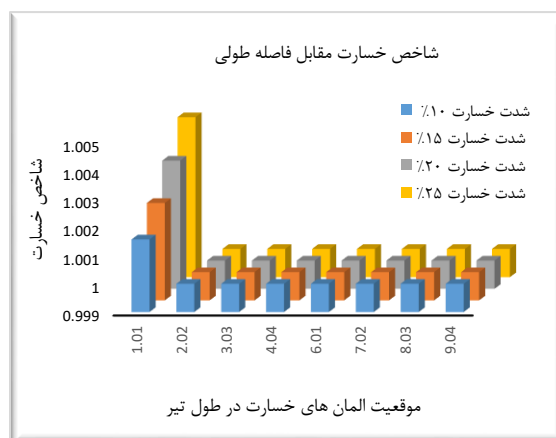


شکل ۸: نحوه تقسیم بندی تیر مورد مطالعه.

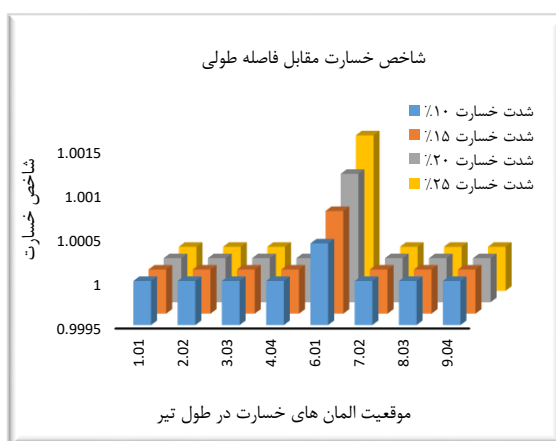
با استفاده از سطوح خسارت تعریف شده در جدول ۲ به تشخیص خسارت در دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان در طول تیر فولادی پرداخته می‌شود. در سناریوی تک خسارت ۳۲ نمونه و در سناریوی زوج خسارت همزمان ۱۶۸ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. جمعاً برای بررسی خسارت کوچک ۲۰۰ آنالیز مودال انجام شده است. شکل ۹ نمودار شاخص خسارت کوچک در طول تیر در سناریوی تک خسارت به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. مقادیر حداکثر نمودارها نمایانگر موقعیت خسارت در طول تیر می‌باشد.



(ب) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۴/۰۴ متر).



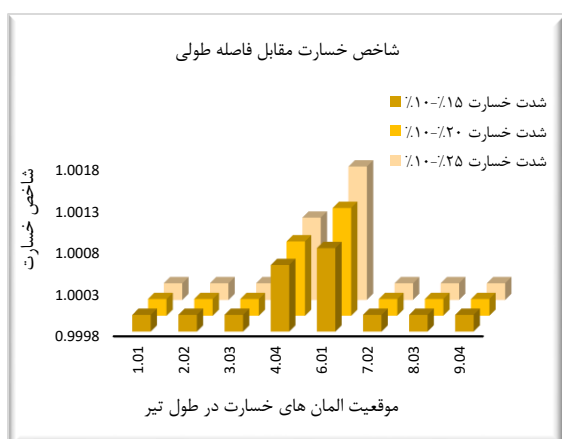
(الف) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۱/۰۱ متر).



(ج) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت در ۶/۰۱ متر).

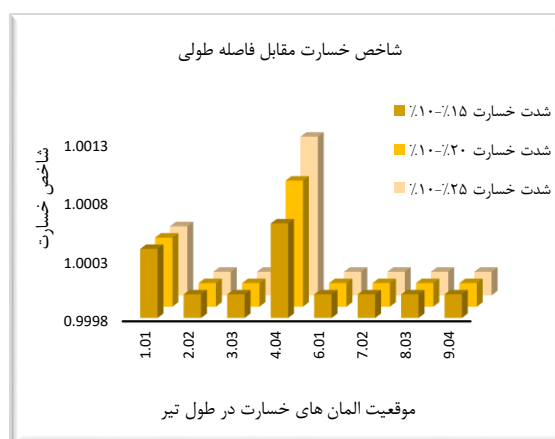
شکل ۹: نمودار شاخص خسارت کوچک در طول تیر در سناریوی تک خسارت به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت.

تشخیص وجود خسارت در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها دارای حساسیت بیشتری می‌باشد. از این رو جهت بررسی عملکرد و دقت روش ارائه شده برای تشخیص موقعیت زوج خسارت همزمان در نزدیکی تکیه‌گاه‌های ارتجاعی دو نمونه از نتایج در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل ۱۰ نمودارهای شاخص خسارت کوچک در طول تیر در سناریوی زوج خسارت همزمان به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. مقادیر حداکثر نمودارها نمایانگر موقعیت خسارت در طول تیر می‌باشد.



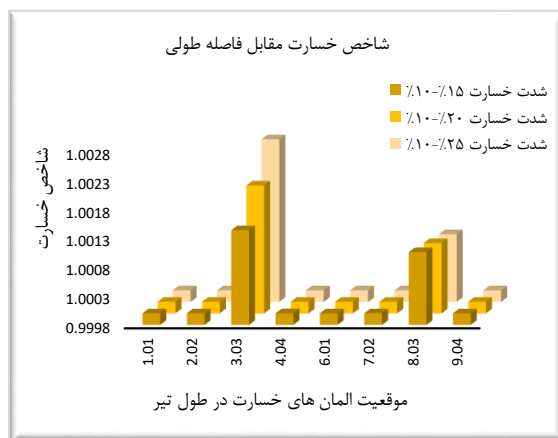
(ب) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در موقعیت

۴/۰۴ متر و خسارت ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۶/۰۱ متر).



(الف) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در

موقعیت ۱/۰۱ متر و خسارت ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۴/۰۴ متر).



(ج) نمودار شاخص خسارت در طول تیر (خسارت ۱۰٪ در موقعیت ۸/۰۳ متر و خسارت ۲۰،۱۵ و ۲۵٪ در موقعیت ۳/۰۳ متر).

شکل ۱۰: نمودار شاخص خسارت کوچک در طول تیر در سناریوی زوج خسارت همزمان به ازای شدت‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت.

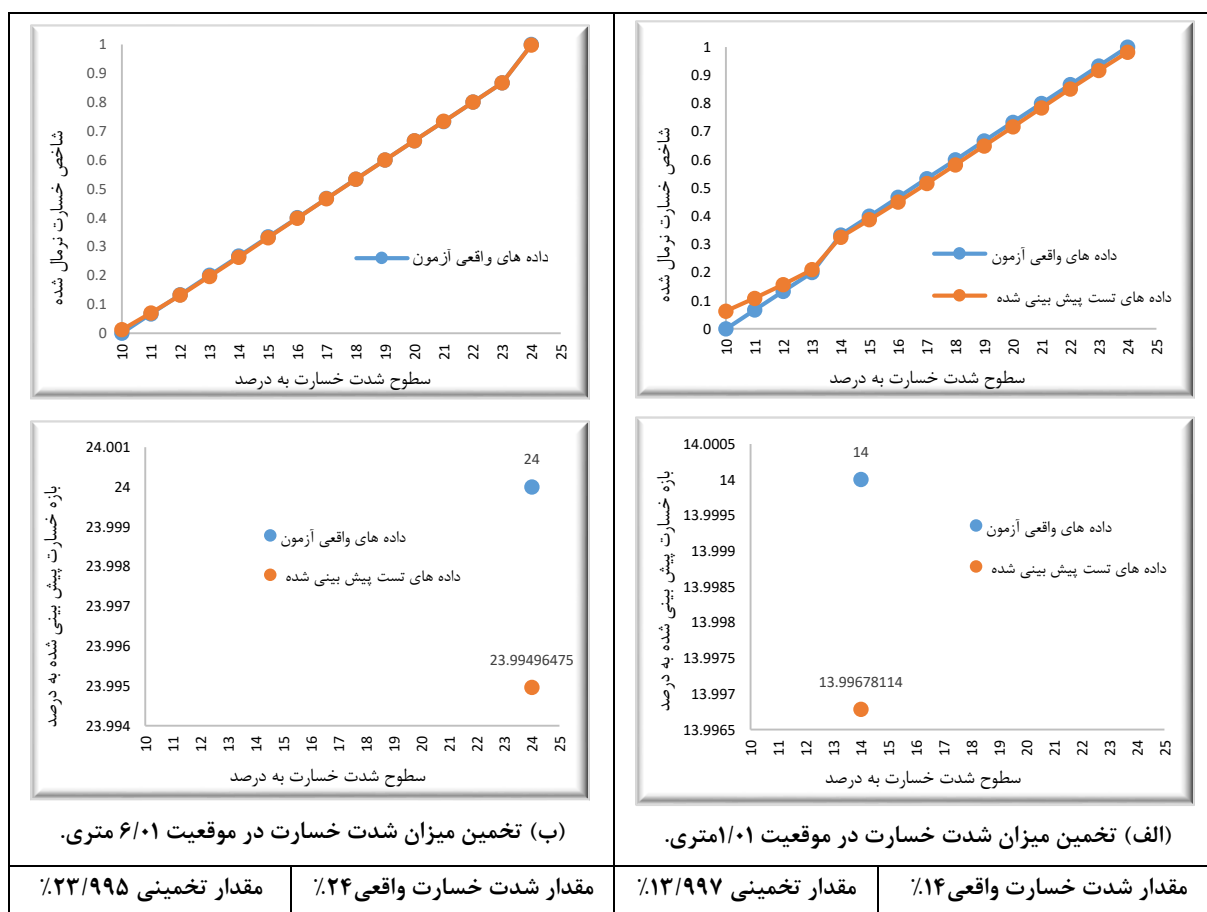
۲-۲-۳- تخمین خسارت کوچک

با توجه به اینکه مقدار داده‌های ورودی برای آموزش شبکه اندک می‌باشد. و همچنین برای افزایش دقت شبکه رگرسیون بردار پشتیبان در این بخش نیز از اسپیلاین درجه سوم برای ایجاد ۱۵ خسارت میانی بین ۱۰ تا ۲۵٪ استفاده گردیده است.

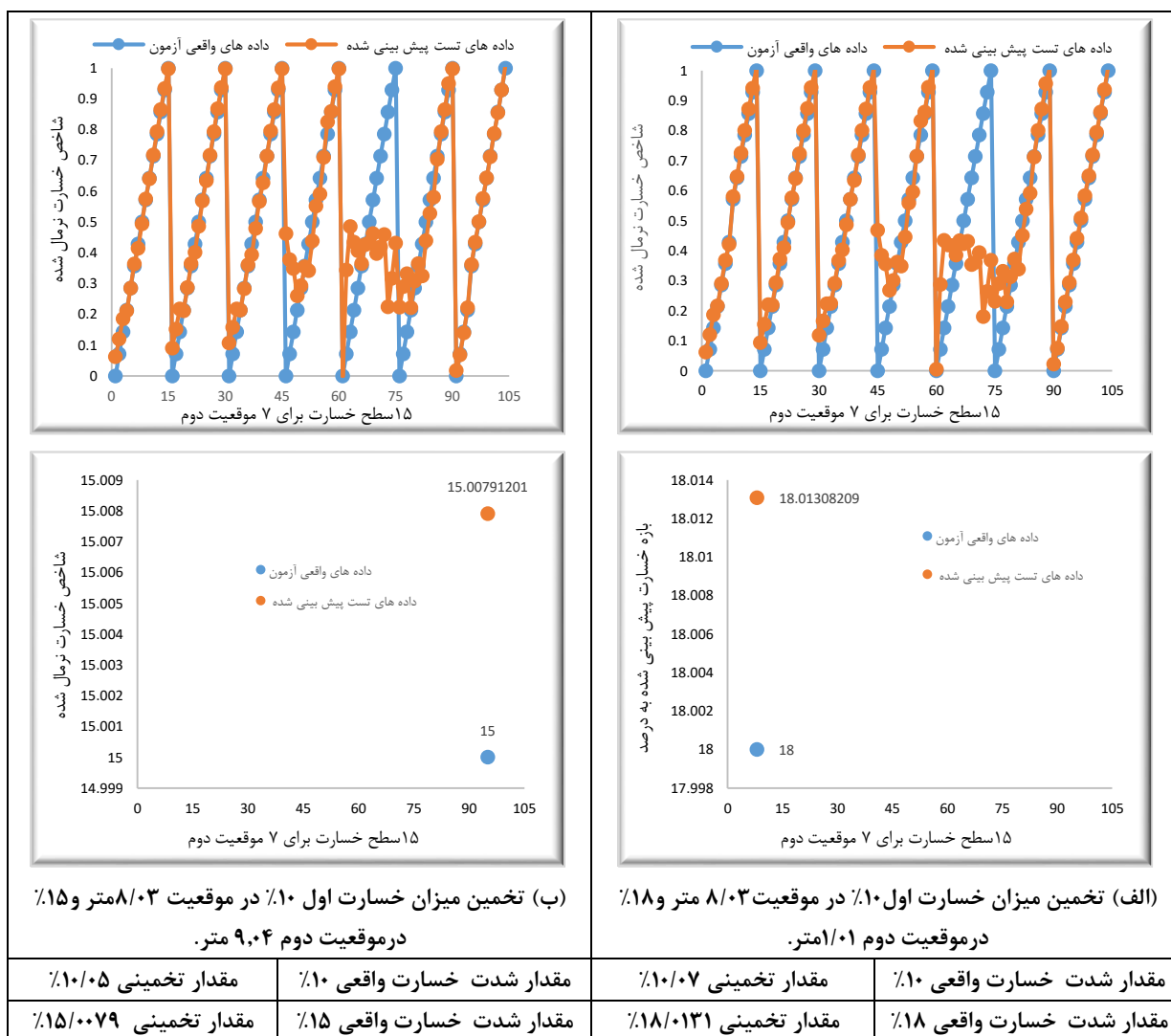
جدول ۵: شاخص درون یابی شده به روش اسپیلاین درجه سوم

شدت خسارت	شاخص خرابی محاسبه شده با روابط ۶ و ۵	شاخص خرابی درون یابی شده	اختلاف (درصد)
۱۰	۱/۰۰۱۱۵۸	-	-
۱۵	۱/۰۰۱۸۰۱	۱/۰۰۱۸۵۱۹	۰/۰۰۵۱
۲۰	۱/۰۰۲۵۹۹	۱/۰۰۲۶۵۳	۰/۰۰۵۳
۲۵	۱/۰۰۳۴	-	-

مقادیر مندرج در جدول ۵ براساس داده‌های شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال المان آسیب دیده که در موقعیت ۲/۰۲ متر قرار دارد درون یابی شده است. حداکثر مقدار اختلاف بین مقادیر محاسبه شده توسط روابط (۵) و (۶) و درون یابی شده از روش اسپیلاین درجه سوم ۰/۰۰۵۳ درصد می‌باشد. با توجه به اختلاف بسیار اندک به بین مقادیر واقعی و درون یابی شده برای تولید شاخص‌های خسارت میانی بعنوان داده‌های ورودی آموزش به شبکه رگرسیون بردار پشتیبان از اسپیلاین درجه سوم استفاده گردید. در سناریوی تک خسارت ۱۲۸ داده به روش گفته شده تولید گردید. در برآورد شدت خسارت می‌توان در فاز تست مانند قبل هر یک از داده‌ها را از فاز آموزش خارج نموده و در فاز تست قرار داد. در سناریوی زوج خسارت همزمان تعداد داده‌های ورودی برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان ۸۴۰ داده می‌باشد. در این بخش نیز در فاز تست ورودی‌ها به صورت تصادفی از فاز آموزش خارج گردیده و در فاز تست قرار خواهند گرفت. نتایج میزان تخمین شدت خسارت کوچک به تفکیک در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: تخمین مقادیر شدت خسارت کوچک در سناریوی تک خسارت توسط رگرسیون بردار پشتیبان.



شکل ۱۲: تخمین مقادیر شدت خسارت کوچک در سناریوی زوج خسارت همزمان توسط رگرسیون بردار پشتیبان.

با توجه به اشکال ۱۱ و ۱۲ میزان اختلاف بین مقادیر واقعی شدت خسارت و مقادیر تخمین زده شده در رگرسیون بردار پشتیبان در سناریوی تک خسارت در مدل خسارت کوچک به ترتیب ۰/۰۲۱۴٪، ۰/۰۲۰۸٪ و در سناریوی زوج خسارت همزمان و برای سطوح میانی خسارت در مدل خسارت کوچک به ترتیب ۰/۰۷۲۷٪، ۰/۰۵۲۶٪ می باشد. نتایج حاصل شده از خروجی های رگرسیون بردار پشتیبان نمایانگر دقت بسیار بالای روش جهت تخمین میزان شدت خسارت می باشد.

۴- نتیجه گیری

به علت اهمیت شناسایی خسارت در تیرهای فولادی به عنوان یکی از مهمترین اعضای تشکیل دهنده پل ها و سازه های فلزی تحقیق حاضر ارائه گردید. در این مطالعه یک روش نوین جهت تشخیص موقعیت و تخمین میزان شدت خسارت ریز و کوچک برای پل های با تیر فولادی ارائه گردیده است. این روش بر پایه ویژگی های منحصر به فرد المان محدود طیفی و شاخص انرژی کرنشی مودال برای تعیین موقعیت خسارت و تکنیک رگرسیون بردار پشتیبان جهت تخمین شدت خسارت می باشد.

- (۱) به دلیل عدم وجود المان‌هایی با ویژگی المان محدود طیفی در نرم افزارهای محاسباتی، یک المان جدید هشت گره‌ای با خصوصیات المان محدود طیفی در نرم افزار OpenSees تعریف گردید. با استفاده از المان تعریف شده دو نمونه در دو خسارت ریز و کوچک مدلسازی گردید. نتایج حاصل از آنالیز مودال روش المان محدود طیفی دارای دقت بالاتری بود.
- (۲) جهت بررسی عملکرد روش ارائه شده برای تشخیص موقعیت خسارات ریز در دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان یک تیر فولادی یک دهانه با تکیه‌گاه‌های ارتجاعی و با استفاده از المان تعریف شده مدلسازی گردید. در سناریوی تک خسارت ۲۰ مدل و در سناریوی زوج خسارت همزمان ۲۱۶ مدل در موقعیت‌های مختلف با سطوح خسارات متفاوت آنالیز مودال صورت گرفته است. سپس با استفاده از نتایج تحلیل مودال و روش شاخص انرژی کرنشی مودال به محاسبه شاخص خسارت در هر دو سناریو پرداخته شد. نشان داده شد که شاخص خسارت مبتنی بر انرژی کرنشی مودال توانسته است با موفقیت، موقعیت تمام خسارات شبیه‌سازی شده را تشخیص دهد.
- (۳) در بررسی برآورد میزان شدت خسارت ریز از روش رگرسیون بردار پشتیبان استفاده گردید. روش پیشنهادی برای دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان مورد ارزیابی قرار گرفت. در سناریوی تک خسارت، ۲۱٪ کاهش سختی در موقعیت ۱/۵۰۱۵ متر مدلسازی صورت گرفته است. رگرسیون بردار پشتیبان میزان شدت خسارت را ۲۱/۰۰۷۵٪ برآورد نموده است. در سناریوی زوج خسارت همزمان، در دو المان خسارت تعریف شده در مجاورت تکیه‌گاه ۱۰٪ کاهش سختی در موقعیت ۴/۵۰۴۵ متر و ۱۱٪ کاهش سختی در موقعیت ۰/۵۰۰۵ متر مدلسازی صورت گرفته است. رگرسیون بردار پشتیبان تخمین میزان شدت خسارت را در موقعیت اول ۱۰/۰۹٪ و برای موقعیت دوم ۱۰/۹۹۸٪ تخمین زده است.
- (۴) برای تشخیص موقعیت خسارات کوچک در دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان یک تیر فولادی دو دهانه با تکیه‌گاه‌های ارتجاعی و با استفاده از المان تعریف شده مدلسازی گردید. در سناریوی تک خسارت ۳۲ مدل و در سناریوی زوج خسارت همزمان ۱۶۸ مدل در موقعیت‌های مختلف با سطوح خسارات متفاوت آنالیز مودال صورت گرفته است. سپس با استفاده از نتایج تحلیل مودال و روش شاخص انرژی کرنشی مودال به محاسبه شاخص خسارت در هر دو سناریو پرداخته شد. نشان داده شد که شاخص خسارت مبتنی بر انرژی کرنشی مودال توانسته است با موفقیت تمام خسارات مدلسازی شده را تشخیص دهد.
- (۵) برای تخمین میزان شدت خسارت کوچک از روش رگرسیون بردار پشتیبان استفاده گردید. روش پیشنهادی برای دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان مورد ارزیابی قرار گرفت. در سناریوی تک خسارت، ۲۴٪ کاهش سختی در موقعیت ۶/۰۱ متر مدلسازی صورت گرفته است. رگرسیون بردار پشتیبان میزان شدت خسارت را ۲۳/۹۹۵٪ برآورد نموده است. در سناریوی زوج خسارت همزمان، ۱۰٪ کاهش سختی در موقعیت ۸/۰۳ متر و ۱۵٪ کاهش سختی در موقعیت ۹/۰۴ متر مدلسازی صورت گرفته است. رگرسیون بردار پشتیبان تخمین میزان شدت خسارت را در موقعیت اول ۱۰/۰۵٪ و برای موقعیت دوم ۱۵/۰۰۷۹٪ تخمین زده است.
- (۶) در پایان لازم به ذکر است که در دو مدل خسارات ریز و کوچک در صورتی که تکیه‌گاه‌های ارتجاعی نیز دچار خسارت شوند. خسارت در اولین و نزدیکترین المان محدود طیفی تعریف شده بیشترین شاخص خسارت را به خود اختصاص داده که نشان دهنده توانایی روش در تشخیص خسارت در تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.

مراجع:

- [1] Le, N. T., Thambiratnam, D. P., Nguyen, A., Chan, T. H. T. (2019). A new method for locating and quantifying damage in beams from static deflection changes. *Engineering Structures*, Vol. 180, pp. 779-792.
- [2] Nguyen, K-D., Chan, T. H. T., Thambiratnam, D. P. (2016). Structural damage identification based on change in geometric modal strain energy-eigenvalue ratio. *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, (7):075032.

- [3] Stubbs, N., Kim, J.T. and Farrar, C.R. (1995). Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. *Proceedings of 13th International Modal Analysis Conference*, Vol.1, pp. 210–218.
- [4] Stubbs, N. and Kim, J.T. (1996). Damage localization in structures without baseline modal parameters. *AIAA Journal*, Vol. 34, pp. 1644–1649.
- [5] Farrar, C.R. and Jauregui, D.A. (1998). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study. *Smart Materials & Structures*, Vol. 7, pp. 720–731.
- [6] Shih, HW., Thambiratnam, DP., Chan, THT. (2009). Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, pp. 645-661.
- [7] Seyedpoor, SM. (2012). A two-stage method for structural damage detection using a modal strain energy-based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 47, pp. 1-8.
- [8] Tan, Z., Thambiratnam, D., Chan, T., Razak, HA. (2017). Detecting damage in steel beams using modal strain energy-based damage index and Artificial Neural Network. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 79, pp.253-262.
- [9] Nick, H., Aziminejad, A., Hamid, Hosseini M., Laknejadi, K. (2021). Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 119, 105010.
- [10] Nick, H., Aziminejad, A. (2021). Vibration - Based Damage Identification in Steel Girder Bridges Using Artificial Neural Network Under Noisy Conditions. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.40, pp.1–22.
- [11] Eraky, A., Anwar, AM., Saad, A., Abdo, A. (2015). Damage detection of flexural structural systems using damage index method–Experimental approach. *Alexandria Engineering Journal*, Vol.54, pp.497-507.
- [12] Kim, J-T., Ryu, Y-S., Cho, H-M., Stubbs, N. (2003). Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engineering structures*, Vol.25, pp.57-67.
- [13] Ooijevaar, T., Loendersloot, R., Warnet, L., de Boer, A., Akkerman, R. (2010). Vibration based Structural Health Monitoring of a composite T-beam. *Composite Structures*, Vol.92, pp.2007-2015.
- [14] Entezami, A., Shariatmadar, H. (2014). Damage detection in structural systems by improved sensitivity of modal strain energy and Tikhonov regularization method. *Int J Dynam Control*, Vol.2, pp.509-20.
- [15] Radziński, M., Krawczuk, M., Palacz, M. (2011). Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, pp.2169-90.
- [16] Wahalathantri, BL., Thambiratnam, DP., Chan, THT., Fawzia, S. (2015). Vibration based baseline updating method to localize crack formation and propagation in reinforced concrete members. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 344, pp. 258-76.
- [17] Niu, J., Zong, Z., Chu, F. (2015). Damage identification method of girder bridges based on finite element model updating and modal strain energy. *Sci China Technol Sci*, Vol.58, pp.701-11.
- [18] Magalhães, F., Cunha, A., Caetano, E. (2012). 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.
- [19] Kim, J-T., Park, J-H., Lee, B-J. (2007). Vibration-based damage monitoring in model plate-girder bridges under uncertain temperature conditions. *Engineering Structures*, Vol.29, pp.1354-1365.
- [20] Teughels, A., De, Roeck G. (2004). Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.278, pp.589-610.
- [21] Koto, Y., Konishi, T., Sekiya, H., Miki, C. (2019). Monitoring local damage due to fatigue in plate girder bridge. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 438, pp.238-250.
- [22] Huth, O., Feltrin, G., Maeck, J., Kilic, N., Motavalli, M. (2005). Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge. *Journal of Structural Engineering*, Vol.131, pp.1898-1910.
- [23] Caicedo, JM., Dyke, SJ. (2005). Experimental validation of structural health monitoring for flexible bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*. Vol.12, pp.425–43.
- [24] Xiong, W., Kong, B., Tang, P., Ye, J. (2018). Vibration-based identification for the presence of scouring of cable-stayed bridges. *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.31, pp.04018007.
- [25] Kopsaftopoulos, F., Fassois, S. (2010). Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: experimental assessment of several statistical time series methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.24, pp.1977-1997.

- [26] Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Dang-Trung, H., Nguyen-Thoi, T. (2016). A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm. *Composite Structures*, Vol.147, pp.42-53.
- [27] Fan, W., Qiao, P. (2012). A strain energy-based damage severity correction factor method for damage identification in plate-type structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 28, pp.660-78.
- [28] Cornwell, P., Doebling, S.W., Farrar, C.R. (1992). Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures. *Journal of sound and vibration*, Vol.224, pp.359-374.
- [29] Komatitsh, D. and Tromp, J. (1999). Introduction to the spectral element method for three dimensional seismic wave propagation. *Geophys. J. Int.*, Vol.139, pp.806-822.
- [30] Komatitsch, D., Martin, R., Tromp, J., Taylor, M.A. and Wingate, B. (2001). Wave propagation in 2-D elastic media using a spectral element method with triangles and quadrangles. *Journal of computational acoustics*, Vol.9, pp. 703-718.
- [31] Komatitsch, D., Vilotte, J-P., Vai, R., Castillo-Covarrubias, J.M. and Sanchez-Sesma, F.J. (1999). The spectral element method for elastic wave equation – Application to 2-D and 3-D seismic problems. *International journal for numerical methods in engineering*, Vol.45, pp.1139-1164.
- [32] Dauksher, W. and Emery, A.F. (2001). The solution of elastostatic and elastodynamic problems with Chebyshev spectral finite elements. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.188, pp.217-233.
- [33] Seriani, G. (2004). Double-grid Chebyshev spectral elements for acoustic wave modeling. *Wave motion*, Vol.39, pp.351-360.
- [34] Beskos, D., Narayanan, G. (1983). Dynamic response of frameworks by numerical laplace transform. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol.37, pp.289-307.
- [35] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., and Shevitz, D. W. (1996). Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. *Los Alamos National Laboratory report*, LA-13070-MS.
- [36] Krawczuk, Marek. (2002). Application of spectral beam finite element with a crack and iterative search technique for damage detection. *Finite Element in Analysis and Design*, Vol.38, pp.537-548.
- [37] Wieslaw M, Ostachowicz W. (2008). Damage detection of structures using Spectral finite element method. *Computers and structures*. Vol.86, pp.454-462.
- [38] Kudela, P., Krawczuk, M., Ostachowicz, W. (2007). Wave propagation modelling in 1D structures using spectral finite elements. *SOUND AND VIBRATION*, Vol.300, pp. 88-100.
- [39] Pandey, A. K., Biswas, M., Samman, M. M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145(2), pp. 321-332.
- [40] Drucker, H., Burges, C., Kaufman, L., Smola, A., Vapnik, V.N. (1996). Support vector regression machines, *Advances in Neural Information Processing Systems*. MIT Press, Cambridge, MA, Vol. 9, pp. 155–161.
- [41] Y. J. Yan, L. H. Yam, L. Cheng, and L. Yu. (2006). FEM modeling method of damage structures for structural damage detection. *Composite Structures*, Vol.72, pp. 193-199.