

Multiple Simultaneous Damage Detection in large-span bridges

Mohammad Vahidi

PhD Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Armin Aziminejad*

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

Maryam Firoozi Nezamabadi

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

Mahmoud Heristchian

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
armin.aziminejad@gmail.com

Keywords:

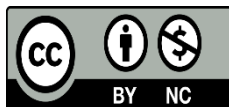
Multiple damage detection,
Micro and small damages,
Spectral finite element,
Modal strain energy damage index, Support vector regression,
Genetic algorithm .

Abstract

This paper presents a powerful two-step method for damage detection of large-span bridges with variable sections. Bridges are one of the basic infrastructures in the field of urban and suburban transportation, and timely detection of damage during its operation is important. Damage in this category of structures will cause service disruption during natural disasters. The presented method is based on the combination of spectral finite element and modal strain energy damage index, as well as the combination of genetic algorithm and support vector regression to detect and estimate the damage severity. One of the efficient methods in the field of wave propagation is the spectral finite element method, which is capable of modeling with high flexibility and detecting micro damage. Vibration-based methods are widely used to detect structural damage, while the modal strain energy damage index has a higher sensitivity in detecting damage among other vibration-based methods. The case study model is the Crowchild Bridge in Western Canada, which has special characteristics in terms of geometry and the characteristics of structural elements. In this research, the modal strain energy damage index has been modified due to the change of cross-section along the girders. Also, support vector regression has been used as a robust technique in estimation damage severity. In order to increase the accuracy and improve the damage severity estimation method, the genetic algorithm is used to optimize the effective parameters of the support vector regression. The combined method of genetic algorithm and support vector regression has been able to estimate the severity of damages in a favorable way.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



تشخیص خسارت در پل‌های بزرگ دهانه با وجود چند خسارت همزمان

محمد وحیدی

دکتری مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

آرمین عظیمی نژاد*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مریم فیروزی نظام آبادی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمود هریسچیان

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

armin.aziminejad@gmail.com

تاریخ پذیرش: 05 آذر 1402

تاریخ دریافت: 10 مرداد 1402

چکیده

مقاله حاضر یک روش دو مرحله‌ای قدرتمند برای تشخیص خسارت پل‌های بزرگ دهانه با مقاطع متغیر ارائه می‌نماید. پل‌ها یکی از زیرساخت‌های اساسی در حوزه حمل‌ونقل شهری و برون شهری بوده که تشخیص خسارت به موقع در طول بهره‌برداری آن حائز اهمیت می‌باشد. خسارت در این دسته از سازه‌ها سبب اختلال در خدمت‌رسانی در زمان بروز بلایای طبیعی خواهد شد. روش ارائه شده بر مبنای ترکیب المان محدود طیفی و شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال و همچنین ترکیب الگوریتم ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان برای تشخیص و تخمین میزان شدت خسارت می‌باشد. یکی از روش‌های کارآمد در حوزه انتشار امواج روش المان محدود طیفی بوده که از قابلیت مدل‌سازی با انعطاف‌پذیری بالا و تشخیص خسارات ریز می‌باشد. روش‌های مبتنی بر ارتعاش بطور گسترده برای تشخیص خسارت سازه‌ها استفاده می‌گردد درحالی‌که شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال از حساسیت بالاتری در تشخیص خسارت در میان دیگر روش‌های مبتنی بر ارتعاش برخوردار است. مدل مورد تحقیق، پل کروچاپلد در غرب کانادا می‌باشد که دارای ویژگی‌های خاصی از نظر هندسی و هم از مشخصات المان‌های سازه‌ای می‌باشد. در این تحقیق شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال به علت تغییر مقطع در طول شاه‌تیرها اصلاح گردیده است. همچنین از رگرسیون بردار پشتیبان به عنوان یک تکنیک قدرتمند در تخمین میزان شدت خسارت استفاده شده است. جهت افزایش دقت و بهبود روش تخمین میزان شدت خسارات از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر رگرسیون بردار پشتیبان استفاده می‌گردد. روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان توانسته است به نحو مطلوبی شدت خسارات را تخمین بزند.

کلید واژگان: تشخیص خسارت چندگانه، خسارات ریز و کوچک، المان محدود طیفی، شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال،

رگرسیون بردار پشتیبان، الگوریتم ژنتیک

1- مقدمه

پل‌ها به عنوان یک ارتباط دهنده مهم در شبکه حمل و نقل مدرن امروزی نقش بسزایی را ایفا می‌نمایند. عملکرد و ایمنی آنها در طول مدت بهره برداری باید مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. خستگی، زلزله، افزایش سن سازه و عواملی دیگر سبب ایجاد خسارت در این دسته از سازه‌ها می‌گردد. زلزله‌های دهه‌های اخیر در ایران و جهان سبب ایجاد خسارت به سازه‌های زیربنایی و ساختمانی نموده که اهمیت تشخیص خسارت را دوچندان می‌کند [1 و 2]. بررسی‌ها نشان داده است عدم تشخیص خسارت به موقع در پل‌ها سبب گسترش خسارت گشته و موجب خسارات جبران‌ناپذیری شده است. از این رو تشخیص و تخمین میزان خسارت یکی از موضوعات مورد توجه محققین در دهه‌های اخیر گردیده است. یکی از روش‌های پرکاربرد در تشخیص خسارت سازه‌ها استفاده از روش‌های مبتنی بر ارتعاش می‌باشد. این روش‌ها در طول دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین حوزه تشخیص خسارت قرار گرفته است. تغییر در مشخصات فیزیکی سازه مانند جرم، سختی و میرایی سبب تغییر در مشخصات دینامیکی سازه می‌گردد که نشان‌دهنده وجود خسارت در سازه می‌باشد. تغییر هر یک از پارامترها سبب تغییر در فرکانس و اشکال مودی سازه شده و این تغییرات در سازه واقعی به راحتی قابل اندازه‌گیری و محاسبه می‌باشد. این امر دلیل محبوبیت و استفاده گسترده از روش‌های مبتنی بر ارتعاش در تشخیص خسارت شده است. چون با داشتن اطلاعات مودال سازه سالم و آسیب دیده می‌توان به راحتی به تشخیص خسارت پرداخت. از روش‌های مبتنی بر فرکانس می‌توان به تغییرات انحنای اشکال مودی، انرژی کرنشی مودال، تغییرات فرکانسی، تغییرات اشکال مودی و شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال اشاره نمود [3-13].

شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال، یکی از روش‌های تشخیص خسارت غیر مخرب و مبتنی بر ارتعاش می‌باشد. این روش بر پایه تغییرات انرژی کرنشی سازه بین حالت سالم و خسارت دیده استوار می‌باشد. انحنای اشکال مودی نسبت به خود شکل مود از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد. از این رو در تحقیقات صورت گرفته شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال را در بین دیگر روش‌های مبتنی بر ارتعاش از دقت و حساسیت بالاتری در تشخیص خسارت گزارش داده اند. با توجه به مزایای روش‌های مبتنی بر ارتعاش می‌توان به یکی از مشکلات عمده این روش‌ها تاثیر زیاد خطای اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی و پرهزینه بودن ابزار اندازه‌گیری اشاره نمود. تحقیقات بسیاری در سال‌های اخیر بر روی روش‌های تشخیص خسارت مبتنی بر ارتعاش بر روی سازه‌هایی مانند تیرها [14 و 15] و پلها [16-22] صورت گرفته است. در بسیاری از موارد امکان وجود خسارات ریز در سازه می‌باشد که نه تنها با بازرسی‌های چشمی بلکه با ارتعاشات با دامنه هرتز نیز قابل تشخیص نمی‌باشند. از اینرو باید از روش‌های مبتنی بر انتشار امواج در این حوزه استفاده گردد. المان محدود در حل

مسائل فرکانس بالا و پدیده انتشار امواج دچار ناپایداری می‌گردد [26-23]. از این رو می‌توان جهت رفع مشکل گفته شده از روش المان محدود طیفی استفاده گردد. روش المان محدود طیفی دارای انعطاف پذیری در مدل‌سازی و دقت روش‌های شبه طیفی می‌باشد. المان محدود طیفی در علوم زیادی از جمله مهندسی عمران، مکانیک، خاک و پی، زلزله، سازه‌های هیدرولیکی، سیالات، هوا و فضا و دیگر علوم برای تجزیه و تحلیل رفتار سازه‌هایی مانند تیر، ورق، پوسته، لوله، لایه‌های خاک، خرپا و دیگر مسائل استفاده می‌شود. ایده اولیه المان محدود طیفی توسط پاترا در مکانیک سیالات مطرح گردید [27]. بعد از پاترا المان محدود طیفی توسط دوپل معرفی گردید، مبنای روش ارائه شده بسیار شبیه روش المان محدود معمولی می‌باشد. المان محدود طیفی این امکان را فراهم می‌نماید که وارد مسائل حوزه انتشار امواج گردد. یکی از مزیت‌های این روش بدست آوردن فرکانس‌های مودهای بالاتر سازه‌ها است. به طور کلی داشتن ماتریس جرم قطری در این روش سبب کاهش هزینه محاسباتی تا 50٪ و امکان حل مسائل با حجم عددی زیاد را فراهم می‌کند. المان محدود طیفی توسط محققین توسعه یافته و در تشخیص خسارت انواع سازه‌ها نیز استفاده گردیده است [28-42].

در این مقاله از یک روش دو مرحله‌ای برای تشخیص خسارت در پل‌ها استفاده شده است. مدل مورد بررسی پل کروچیاالد واقع در غرب کانادا است. پل کروچیاالد، یک پل فلزی سه دهانه پیوسته که دارای مقاطع متغیر در امتداد شاهتیرهایش می‌باشد. دوسناریوی تشخیص خسارت برای مدل تعریف گردیده است. در سناریو تک خسارت به تشخیص خسارت ریز و در سناریوی زوج خسارت همزمان به تشخیص خسارت کوچک پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی هر دو سناریوی خسارت از قابلیت‌های المان محدود طیفی استفاده گردیده است. یک المان تیر هشت گره‌ای با خصوصیات المان محدود طیفی که از تئوری تیر تیموشنکو پیروی می‌کند در نرم‌افزار OpenSees تعریف گردیده است. در گام اول با المان جدید پل مدل‌سازی می‌گردد و پاسخ‌های فرکانسی و اشکال مودی قبل و بعد خسارت برای هر دوسناریوی استخراج می‌شود. در گام دوم با توجه به حساسیت و دقت روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال به تشخیص خسارت پرداخته می‌شود. در مدل مورد بررسی با توجه به تغییر مقطع در طول شاهتیرها معادله شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال اصلاح می‌گردد. در گام سوم از روش یادگیری ماشین برای تخمین میزان شدت خسارت استفاده شده است. رگرسیون بردار پشتیبان یکی از روش‌های قدرتمند برآورد در حوزه یادگیری ماشین می‌باشد. در گام چهارم از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر رگرسیون بردار پشتیبان استفاده می‌گردد. کاربرد و اثر بخشی روش پیشنهادی تشخیص خسارت بر روی مدل



مورد بررسی نشان دهنده قدرت روش در تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک در پل‌های با شاهتیرهای فولادی با مقاطع متغیر می‌باشد.

2- متدولوژی

2-1- روش المان محدود طیفی

یکی از روش‌های مؤثر در حل مسائل انتشار امواج روش المان محدود طیفی می‌باشد. یکی از کاربردهای المان محدود طیفی در حوزه پایش سلامت سازه‌ها تشخیص خسارت ریز می‌باشد. با توجه به اینکه در حل مسائل فرکانس پایین از المان محدود و در مسائل فرکانس بالا و یا پدیده انتشار امواج از المان محدود طیفی استفاده می‌گردد. زمانیکه از امواج با دامنه کیلوهرتز در شناسایی خسارت استفاده می‌گردد می‌بایست از ابزار تشخیصی برای مدلسازی عددی نیز استفاده گردد. در همین راستا یک المان تیرشکل جدید که از تئوری تیر تیموشنکو پیروی می‌کند دارای مزیت‌های المان محدود طیفی [26-23 و 41] در نرم‌افزار OpenSees تعریف می‌گردد. المان دارای هشت گره بصورت متقارن ولی در فواصل غیریکسان از یکدیگر قرار دارند تعریف شده است. محل قرارگیری گره‌ها و درجات آزادی هر یک از آنها در شکل 1 نشان داده شده است. فاصله بین گره‌ها بر اساس نقاط گوس - لوباتو- لژاندر می‌باشد.



شکل 1- درجات آزادی هر گره در فضای دو بعدی

**Element beamvahidi \$eleTag \$Node1 ... \$Node8 \$A
\$E \$G \$Iz \$g \$p \$matTag transTag;**

المان جدید¹ یک المان تیرشکل دو بعدی می‌باشد [43]. هر گره از المان دارای 3 درجه آزادی می‌باشد. درجات آزادی المان شامل یک درجه آزادی انتقالی در جهت x ، یک درجه آزادی انتقالی در جهت y و یک درجه آزادی دورانی می‌باشد. در المان جدید نیاز به تعریف جرم بصورت دستی در گره‌ها نمی‌باشد. همچنین ماتریس جرم در این المان بصورت قطری بوده که این امر سبب کاهش هزینه محاسبات گردیده است.

2-2- شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال

تغییر در مشخصات فیزیکی سازه مانند جرم، سختی و میرایی سبب تغییر در مشخصات مودال سازه می‌گردد. به همین علت تغییر در سختی باعث تغییر در انرژی کرنشی مودال خواهد شد. در اغلب مواقع، در تشخیص خسارت سازه‌ها داده‌های سازه خسارت دیده در دسترس نمی‌باشد. بنابراین با استفاده از روش شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال می‌توان از اطلاعات سازه اولیه که بدون آسیب می‌باشد نیز استفاده نمود. شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال ارائه شده توسط

استابز و کیم [21] توسط محققان حوزه تشخیص خسارت چندین بار اصلاح و بهبود یافته است. از این رو در مطالعه حاضر با توجه به اینکه مقاطع در طول هر شاهتیر متغیر است شاخص خسارت ارائه شده توسط استابز و کیم با خطا همراه می‌باشد. در نتیجه شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال برای شاهتیرهایی که دارای مقاطع متغیر در طول خود می‌باشند اصلاح می‌گردد. از ایده دسته بندی برای اصلاح شاخص خسارت استفاده شده است. هر مقطع در یک کلاس دسته‌بندی می‌گردد. شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال به فرم معادلات 1 و 2 اصلاح می‌گردد.

$$\beta_{cij} = \frac{\left(\int_a^b [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx + \int_0^{LCj} [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx \right) * \left(\int_0^{LCj} [\varphi_j^{**}(x)]^2 dx \right)}{\left(\int_a^b [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx + \int_0^{LCj} [\varphi_i^{**}(x)]^2 dx \right) * \left(\int_0^{LCj} [\varphi_j^{**}(x)]^2 dx \right)} \quad (1)$$

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

مقادیر φ_i^{**} و φ_{ji}^{**} توابع انحنای شکل مودی برای مود i در فاصله x در طول المان z 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. C نیز نمایانگر هر دسته کلاس می‌باشد. در صورتیکه المان‌های سازه بدون خسارت باشد مقدار β یک خواهد بود در حالیکه خسارت در سازه رخ داده باشد مقدار آن بیش از یک خواهد شد.

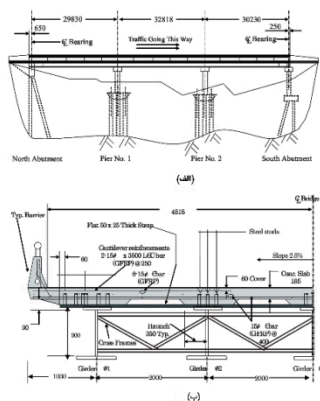
2-3- رگرسیون بردار پشتیبان² (SVR)

روش‌های یادگیری ماشین به سه دسته نظارت شده، نظارت نشده و تقویتی تقسیم‌بندی می‌شوند. کاربرد این روش‌ها در دسته بندی، تشخیص الگو، تقریب توابع، تخمین و بهینه‌سازی می‌باشد [44 و 45]. رگرسیون بردار پشتیبان یک تکنیک رگرسیون کارآمد در حوزه یادگیری ماشین نظارت شده می‌باشد که بعد از روش ماشین بردار پشتیبان توسعه یافته است. اساس توسعه این روش با در نظر گرفتن یک تابع تلفات در مدل ماشین بردار پشتیبان بوده است. ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون بردار پشتیبان هر دو مدل از تکنیک‌های قدرتمند حوزه یادگیری ماشین جهت طبقه‌بندی و رگرسیون داده محسوب می‌گردند. مهمترین تفاوت ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون بردار پشتیبان در نوع ارائه خروجی آنها می‌باشد. رگرسیون بردار پشتیبان مدلی از ماشین بردار پشتیبان است که منحنی با ضخامت ϵ را به داده‌ها برازش می‌دهد به نحوی که کمترین خطا در داده‌های آزمون صورت گیرد. خروجی‌های روش ماشین بردار پشتیبان فقط می‌تواند مقادیر مثبت و منفی یک را بپذیرند در حالیکه در روش رگرسیون بردار

² Support Vector Regression

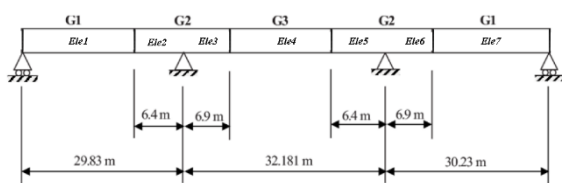
¹ Element beam vahidi

قرارگیری مقاطع شاهتیرها، ابعاد دهانه‌ها و شرایط تکیه‌گاهی در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2- مشخصات هندسی پل کروچایلد [47]

مدل ساده شده پل کروچایلد شامل یک شاهتیر فولادی می‌باشد که در شکل 3 نشان داده شده است. این مدل شامل سه مقطع و به سه دهانه تقسیم گردیده است. محل کوله‌ها با تکیه‌گاه‌های غلتکی و ستون‌ها با تکیه‌گاه‌های مفصلی مدل گردیده‌اند. مشخصات مقاطع و مصالح شاهتیرها در جدول 1 نشان داده شده است. شاهتیرهای پل با المان جدید تعریف شده مدلسازی گردیده است. مدل پل در حالت بدون وجود خسارت از 7 المان با 56 گره ساخته شده است. نتایج پاسخ‌های فرکانسی مدلسازی عددی به روش المان محدود طیفی و نتایج اندازه‌گیری شده در جدول 2 قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 3- مدل ساده شده پل کروچایلد

جدول 1- مشخصات هندسی و خصوصیات مقاطع پل کروچایلد

Section girder	A(m ²)	I(m ⁴)	ρ(Kg/m ³)	E(Gpa)
G1	0.450	0.145	20150	
G2	0.550	0.078	18050	200
G3	0.430	0.096	20650	

اختلاف فرکانس اندازه‌گیری شده در سال‌های 1997 و 2004 با 1998 با توجه به اینکه زمان برداشت از نظر شرایط آب و هوایی با یکدیگر یکسان می‌باشد وجود ترک در بتن را اعلام می‌دارد. مدل ساخته شده به روش المان محدود طیفی با آزمایش ارتعاشی انجام شده در سال 1997 توسط دانشگاه برتیش کلمبیا همبستگی دارد. در این

پشتیبان هر مقدار حقیقی را می‌پذیرند [46]. بطور خلاصه رگرسیون بردار پشتیبان با استفاده از هسته‌های خطی و غیر خطی سعی در یافتن یک ابر صفحه با ریسک کوچک در فضای ویژگی با ابعاد بالا دارد. انتخاب یک هسته مؤثر می‌تواند دقت رگرسیون بردار پشتیبان را افزایش دهد. آماده‌سازی داده‌ها بعنوان داده ورودی در حوزه یادگیری ماشین یکی از موضوعات بسیار با اهمیت می‌باشد. آماده‌سازی 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 به سه روش انجام می‌گردد: (1) روش min-max، (2) روش z-score، (3) نرمال‌سازی از طریق مقیاس دسیمال. داده‌های ورودی به روش min-max سبب یکدست شدن و هماهنگ شدن داده‌ها شده و تمامی داده‌ها در بازه [0,1] قرار می‌گیرند. جهت تربیت شبکه‌ها در دو سناریوی تک و زوج خسارت همزمان تمامی داده‌های ورودی ابتدا نرمال سازی شده تا کمترین خطا در تخمین میزان شدت خسارت را در پی داشته باشد.

2-4 الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک بهینه‌سازی و سازگار با روش‌های یادگیری ماشین می‌باشد. ایده الگوریتم ژنتیک بر مبنای مفاهیم بیولوژیکی و نظریه بقای بهترین‌های داروین می‌باشد. الگوریتم‌های ژنتیک بعنوان یکی از شاخه‌های هوش مصنوعی با شبیه‌سازی فرایند تکامل در طبیعت با هدف یافتن بهترین جواب ممکن برای یک مسئله به جستجو در فضای جواب‌های کاندید می‌پردازد. برای ایجاد یک شبکه رگرسیون بردار پشتیبان با دقت بالا باید پارامترهای مؤثر آن بدرستی انتخاب گردند. یکی از روش‌هایی که می‌شود به این موضوع دست پیدا کرد ترکیب الگوریتم ژنتیک و رگرسیون بردار پشتیبان می‌باشد.

در این مطالعه از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک، رگرسیون بردار پشتیبان به نام GA-SVR برای تخمین شدت خسارات استفاده شده است. در این روند پارامترهای مؤثر SVR با استفاده از الگوریتم ژنتیک سه هدفه به جستجوی مقادیر با ارزش واقعی پرداخته شده و سپس از این پارامترها برای ساخت مدل‌های SVR استفاده می‌شود.

3- مدل عددی

3-1 مطالعه موردی

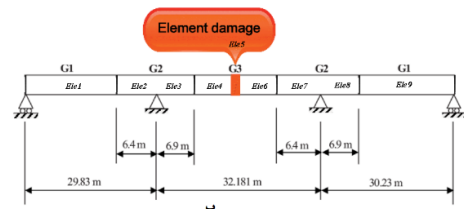
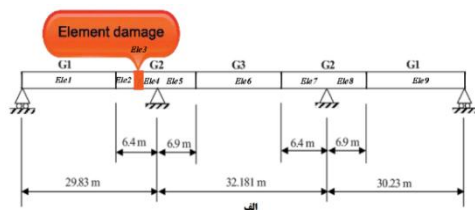
پل روگذر کروچایلد در یکی از راه‌های اصلی در کلگری کانادا احداث شده است که از نظر ترافیکی حائز اهمیت می‌باشد. این پل دارای سه دهانه به طول کلی 92.241 متر، عرض عرشه 9 متر و دارای 5 شاهتیر که به فاصله 2 متری از یکدیگر قرار دارند ساخته شده است [47]. از نکات مهم طراحی عدم استفاده از میلگرد در عرشه بتنی این پل می‌باشد که اولین بار در جهان اجرا شده است. موقعیت

³ Genetic Algorithm

با توجه به تعریف خسارت ریز از نظر سازه‌ای، المان خسارت در موقعیت‌های نزدیک به تکیه‌گاه و وسط دهانه با مقاطع مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. نحوه قرارگیری المان خسارت و شماره گذاری المان‌ها در شکل ۵ مشخص شده است. وجود خسارت سبب کاهش مقدار سختی در سازه می‌شود. بنابراین از ایده کاهش سختی برای شبیه‌سازی خسارت استفاده می‌گردد. جدول ۴ نشان‌دهنده پنج سطح خسارت با کاهش میزان مدول الاستیسیته می‌باشد.

جدول 4- پنج سطح خسارت در شایتهای فلزی پل کروچایلد

mode	المان محدود فرکانس اندازه گیری شده (هرتز)			اختلاف % طیفی (هرتز)
	سال			
	1997	1998	2004	
1	2.78	2.60	2.80	2.81
2	3.76	3.63	3.78	3.85
3	4.64	2.43	4.66	4.79



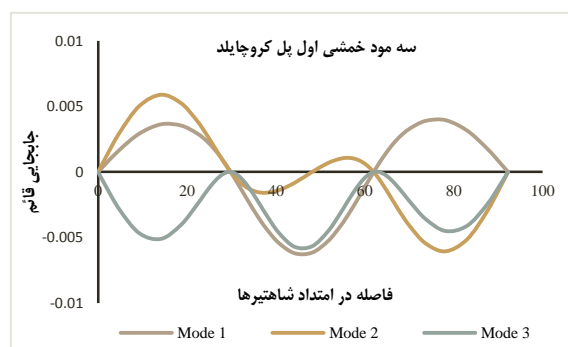
شکل 5- الف - موقعیت المان خسارت از مقطع دو در طول شایتهای دهانه اول و ب - موقعیت المان خسارت از مقطع 3 در دهانه دوم

طول المان خسارت و سناریو آسیب براساس جدول 3 می‌باشد و برای مدلسازی خسارت در پل از المان محدود طیفی استفاده شده است. سطوح خسارت اعمال شده برای شبیه‌سازی آسیب با در نظر گرفتن کاهش سختی بوده که از جدول ۴ استفاده می‌گردد. با تحلیل مودال سازه و استخراج اشکال مودی، ابتدا به محاسبه انحنای مودال پرداخته می‌شود و سپس با استفاده از معادله ۲ به محاسبه شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال پرداخته می‌شود. نتایج شناسایی محل خسارت با در نظر گرفتن سطوح آسیب در شکل ۶ نشان داده شده است.

روند از بروزسانی مدل با در نظر گرفتن روش ارائه شده در تحقیق Bagchi [48] صورت گرفته است. در شکل 4 اشکال مودی سه مود خمشی اول سازه نمایش داده شده است.

جدول 2- مقایسه فرکانس طبیعی پل کروچایلد و مدل المان محدود طیفی

مدول یانگ (پاسکال)	کاهش سختی	وضعیت خسارت
1.8×10^{11}	۱۰	۱
1.7×10^{11}	۱۵	۲
1.6×10^{11}	۲۰	۳
1.5×10^{11}	۲۵	۴
1.4×10^{11}	۳۰	۵



شکل 4- سه مود خمشی اول پل کروچایلد بدون خسارت

3-2- سناریوی تک خسارت

خسارت در سازه را می‌توان تغییر وارد شده در سیستم که بر عملکرد حاضر و یا آینده آن اثر سوء می‌گذارد تعریف نمود. به‌طور کلی خرابی سازه را از لحاظ اندازه می‌توان تقریباً به سه سطح تقسیم بندی نمود: (۱) خسارت ریز، اندازه خسارت کوچکتر از ۰.۱٪ اندازه سازه‌ای باشد. (۲) خسارت کوچک، اندازه خسارت حدود ۱٪ اندازه سازه‌ای باشد. (۳) خسارت بزرگ، اندازه خسارت بزرگتر از ۱۰٪ اندازه سازه‌ای باشد [45]. با توجه به تعریف انواع خسارت، در سناریوی تک خسارت به خسارت ریز پرداخته خواهد شد. جدول ۳ نمایانگر سناریوی تک خسارت با در نظر گرفتن خسارت ریز می‌باشد.

جدول 3- سناریوی تک خسارت در خسارت ریز

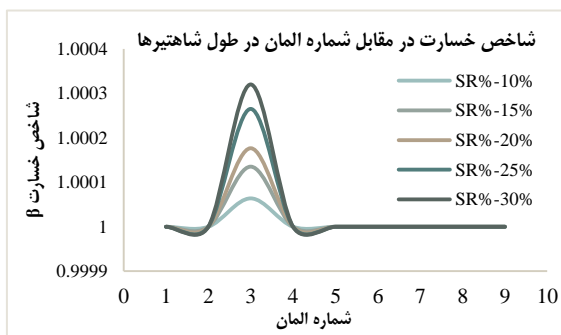
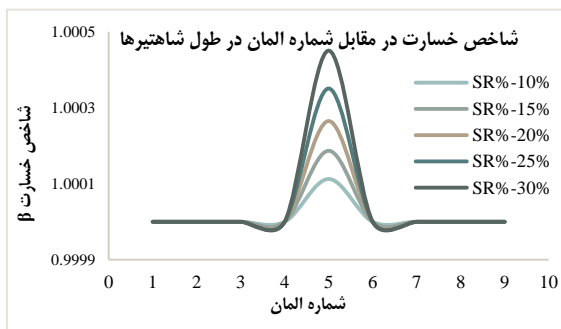
Damage case	Cross-Section	L_{damage} (m)	Damage severity (%)
S-Ele3	G2	0.0064	10,15,20,25,30
S-Ele5	G3	0.018881	10,15,20,25,30

جدول 5- درونیابی β المان 5 از مقطع 3 در دهانه دوم

Damage Severity	Actual β	Interpolated β	Diff%
10	1.000113	-	-
15	1.000187	1.000184684	-0.0002126
20	1.000265	-	-
25	1.000351	1.000353499	0.00029177
30	1.00045	-	-

نتایج حاصل از درونیابی در جدول 5 نشان داده شده است. مقادیر درونیابی شده نشان از دقت بالای روش و تفاوت بسیار کم بین مقدار درونیابی شده و B حاصل از رابطه 2 دارد که این مقدار کمتر از 0.0003% است. از این رو برای کاهش هزینه محاسباتی شاخص خسارت سطوح خسارت بین 10 تا 30% از اسپیلاین مکعبی استفاده می‌گردد تا مقادیر ورودی برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان افزایش یابد. نتایج شاخص‌های خسارت درونیابی شده برای المان 5 از مقطع 3 در جدول 6 نشان داده شده است.

برای شبیه‌سازی خسارت، هفت موقعیت در مقاطع مختلف در طول شاهتیرها بعنوان موقعیت‌های احتمالی خسارت ریز در نظر گرفته شده است. تمامی شاخص‌های خسارت باقیمانده بین 10 تا 30% با استفاده از اسپیلاین مکعبی درونیابی می‌گردند. جمعا 147 داده ورودی برای آموزش شبکه رگرسیون بردار پشتیبان تولید می‌گردد. برای اینکه مدل ساخته شده SVR عملکرد مؤثری داشته باشد، می‌بایستی پارامترهای SVR با دقت تنظیم گردند. قبل از اینکه داده‌ها در فرآیند آموزش قرار گیرند نرمالسازی شده تا حداقل خطا در میزان تخمین داشته باشند. همچنین در رگرسیون بردار پشتیبان از یک کرنل که دارای دقت بالاتری می‌باشد استفاده شده است. کرنل گوسی در بین دیگر کرنل‌های روش یادگیری ماشین عملکرد بسیار مطلوب تری به همراه دارد. جهت افزایش کارایی در تخمین میزان شدت خسارت از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شده است. جدول 7 نشان‌دهنده دقت و قدرت روش ترکیبی GA-SVR در تخمین شدت خسارت را نشان می‌دهد.

الف) نمودار β با شدت های 10-30% برای المان 3 از مقطع 2 دهانه اولب) نمودار β با شدت های 10-30% برای المان 5 از مقطع 3 دهانه دوم
شکل 6- نمودار شاخص خسارت در مقابل شماره المان

قله‌ها در گراف‌های شکل 6 نمایانگر محل خسارت در امتداد شاهتیرهای پل می‌باشند. معادله اصلاح شده شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال توانسته است به درستی محل خسارت را شناسایی نماید. مرحله اول تشخیص خسارت دو مرحله‌ای، شناسایی محل آسیب می‌باشد. نتایج نشان دهنده عملکرد دقیق در شناسایی محل خسارت می‌باشد. از طرفی با افزایش شدت خسارت مقادیر شاخص خسارت نیز بصورت خطی افزایش یافته است.

در مرحله دوم تشخیص خسارت، به تخمین میزان شدت خسارت پرداخته می‌شود. برای تخمین میزان شدت خسارت از رگرسیون بردار پشتیبان استفاده می‌گردد. از شاخص‌های خسارت بعنوان داده‌های ورودی برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. برای افزایش دقت SVR در تخمین شدت خسارت از اسپیلاین مکعبی در ایجاد شاخص‌های بین 10 تا 30% استفاده می‌گردد. در فرآیند درونیابی شاخص‌های شدت خسارت 15 و 25 درصد حذف می‌گردد تا دقت درونیابی مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول 6- درونبایی B المان 5 از مقطع 3 در دهانه دوم

DAMAGE SEVERITY	CALCULATED B FROM THE EQ.2	INTERPOLATED B
10	1.000113	1.000113
11	-	1.000126
12	-	1.000140
13	-	1.000154
14	-	1.000169
15	1.000187	1.000184
16	-	1.00020
17	-	1.000215
18	-	1.000231
19	-	1.000248
20	1.000265	1.000265
21	-	1.000282
22	-	1.000299
23	-	1.000317
24	-	1.000335
25	1.000351	1.000353
26	-	1.000372
27	-	1.000391
28	-	1.000410
29	-	1.000430
30	1.000450	1.000450

همانگونه که در جدول 7 مشاهده می‌گردد، روش GA-SVR توانسته است شدت خسارت ریزر در سناریوی تک خسارت با کمترین خطا تخمین بزند. با توجه به سناریوی تک خسارت در المان‌های ELE3, ELE5 سطوح خسارت 12، 17، 19 و 23٪ از فاز آموزش خارج شده و در فاز تست قرار می‌گیرند. در این فرایند از الگوریتم ژنتیک سه هدفه برای بهینه‌سازی پارامترهای SVR استفاده گردیده است. همزمان پارامترهای Σ و E واریانس کرنل گوسی، C ضریب پنالتی در SVR بهینه‌سازی می‌گردد.

جدول 7- نتایج تخمین شدت خسارت ریز برای دو المان 3 و 5 با رگرسیون بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک

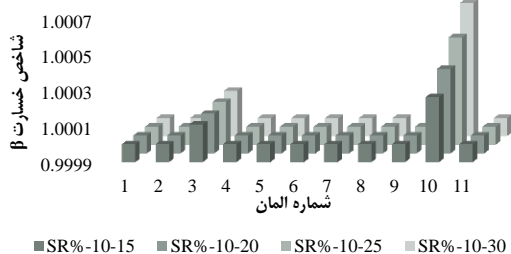
Damage case	Damage Severity (%)	Estimation with SVR-GA	Parameters SVR		
			ϵ	σ	C
Ele3	12	11.9988	0.0010	0.2537	6.6629
	17	16.9995	0.0010	0.2287	9.6098
	19	18.9997	0.0011	0.1115	1.0519
	23	22.9993	0.0036	0.2707	8.8740
Ele5	12	12.00012	0.0029	0.9871	8.8376
	17	16.9998	0.002	0.7024	5.4752
	19	18.99995	0.0026	1.5449	9.7854
	23	22.99998	0.0033	2.4047	8.8116

3-3- سناریوی زوج خسارت همزمان

طبق تعریف خسارت کوچک، اندازه خسارت حدود 1٪ اندازه سازه می‌باشد [45]. در این بخش به تشخیص و تخمین خسارت کوچک با سناریوی زوج خسارت همزمان پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه مقاطع در طول شاهتیرها متغیر می‌باشند تشخیص و تخمین خسارت در این گونه سازه از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. مدلسازی خسارت به گونه‌ای صورت گرفته است که المان‌های خسارت در مقاطع متفاوت و در دهانه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند. به همین علت طول المان‌های خسارت متفاوت می‌باشند

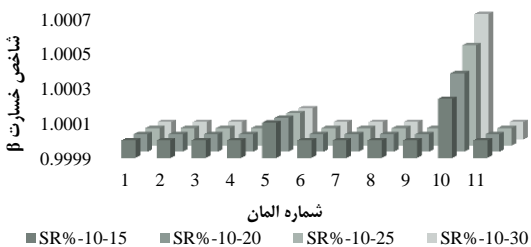
و از یک طول واحد برای تعریف المان خسارت استفاده نشده است. از ایده کاهش سختی برای شبیه‌سازی خسارت استفاده شده است. در جدول 8 سناریوی خسارت و محل آنها و همچنین مقدار کاهش سختی نشان داده شده است.

شاخص خسارت در مقابل شماره المان در طول شاهتیرها



الف- خسارت 10% در المان 3 و خسارت 15، 20، 25، 30% در المان 10

شاخص خسارت در مقابل شماره المان در طول شاهتیرها



ب- خسارت 10% در المان 5 و خسارت 15، 20، 25، 30% در المان 10

شکل 8- شاخص خسارت در مقابل شماره المان در سناریوی زوج خسارت همزمان

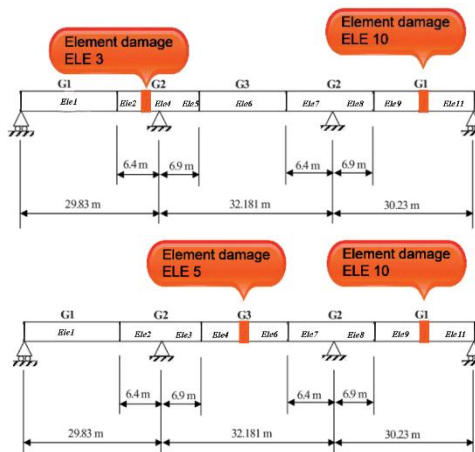
تغییرات β به ازای شماره المان در طول شاهتیرها در شکل 8 نشان داده شده است. قله‌های β در گراف‌ها نشان‌دهنده وجود خسارت می‌باشد. روش پیشنهادی توانسته است بدرستی محل خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان را شناسایی نماید. شدت خسارت بزرگتر که معادل کاهش سختی بیشتری می‌باشد سبب تغییر شکل سازه‌ای بزرگتری می‌گردد و این به راحتی در شکل 8 قابل مشاهده می‌باشد.

پس از اینکه محل خسارت به درستی شناسایی گردید، در مرحله دوم به تخمین میزان شدت خسارت پرداخته می‌شود. در این مرحله 42 مورد زوج خسارت همزمان شبیه‌سازی می‌گردد بطوریکه کمترین شدت خسارت به موقعیت اول و دیگر شدت‌های خسارت به موقعیت دوم اعمال می‌گردد. جهت استخراج اشکال مودی جمعاً 210 آنالیز مودال صورت گرفته است. این مقدار داده برای آموزش شبکه SVR که قادر به تخمین شدت خسارت با دقت بسیار بالاتری باشد اندک می‌باشد. از این رو با توجه به افزایش خطی شاخص‌های خسارت موقعیت دوم نسبت به شدت خسارت از اسپیلاین مکعبی برای درونیابی و محاسبه شاخص‌های خسارت میانی استفاده می‌گردد. بیشترین اختلاف بین مقادیر واقعی شاخص خسارت محاسبه شده از معادله 2 و مقدار درونیابی شده برای سناریوی تعریف شده در جدول 8، 0.0022% می‌باشد. باتوجه به اختلاف کم از این روش برای تولید شاخص‌های میانی برای تربیت شبکه رگرسیون بردار پشتیبان استفاده می‌گردد. مقدار داده‌ها

جدول 8- سناریوی زوج خسارت همزمان موقعیت و شدت خسارت و طول المان خسارت

Damage case	Cross-Section	L _{Damage} (m)	Damage severity(%)
Ele3-Ele10	G2-G1	0.064-0.2333	10-15,20,25,30
Ele5-Ele10	G3-G1	0.18881-0.2333	10-15,20,25,30

شکل 7 نمایانگر موقعیت‌های المان‌های خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان می‌باشد. در سناریوی زوج خسارت همزمان دو موقعیت در دهانه‌های مختلف با مقاطع متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در مورد خسارت اول، خسارت در المان‌های 3 و 10 به ترتیب در دهانه‌های اول و سوم که دارای مقاطع غیریکسان می‌باشند بعنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرند. طول المان‌های خسارت با توجه به طول مقطع متفاوت می‌باشد. در مورد خسارت دوم، خسارت در المان‌های 5 و 10 به ترتیب در دهانه‌های دوم و سوم در نظر گرفته شده است که دارای مشخصات و طول مقطع متفاوت می‌باشند.



شکل 7- موقعیت المان‌های خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان

کلیه شاهتیرهای پل و المان‌های خسارت با المان محدود طیفی جدید تعریف شده مدلسازی گردیده است. مدلسازی خسارت براساس جدول 8 صورت گرفته است. شبیه‌سازی خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان بدین نحو می‌باشد که کمترین شدت خسارت به موقعیت اول و شدت خسارت دیگر موقعیت دوم خسارت اعمال می‌گردد. پس از تحلیل مدل و با استفاده از معادله 2 در هر کلاس به محاسبه شاخص خسارت پرداخته می‌شود. نتایج تشخیص محل خسارت در گراف‌های شکل 8 نشان داده شده است.

برای تربیت شبکه SVR در سناریوی زوج خسارت همزمان 840 داده می‌باشد.

رگرسیون بردار پشتیبان بعنوان یک تخمین‌گر از قدرت و دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. تولید 840 داده برای تربیت شبکه SVR فقط برای افزایش دقت در تخمین شدت خسارات می‌باشد در حالیکه برای تخمین میزان شدت خسارت در SVR همان 210 داده ابتدایی دقت مطلوبی را در تخمین شدت خسارت را دارد. در سناریوی زوج خسارت همزمان یک تابع رندوم در شبکه SVR تعریف شده است تا شش سطح خسارت بصورت تصادفی از فاز آموزش خارج کرده و در فاز تست قرار گیرد. برای کاهش میزان خطا در تخمین شدت خسارت‌ها از الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده گردیده تا همزمان پارامترهای مؤثر در SVR را بهینه سازی نماید.

مقادیر تخمین شدت خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان به روش GA-SVR در جدول 9 نشان داده شده است. تابع رندوم شاخص خسارت منطبق با شدت‌های 1712 و 22٪ را در المان‌های (Ele3-Ele10) و 13.18 و 23٪ را برای المان‌های (Ele 5-Ele 10) از فاز آموزش خارج نموده و در فاز تست قرار داده است. همانطور که مشاهده می‌شود با اختلاف بسیار اندکی روش GA-SVR شدت‌های خسارت را تخمین زده است و در این مرحله توانسته است موفق عمل نماید.

جدول 9- نتایج تخمین شدت خسارات کوچک در سناریوی زوج خسارت همزمان با رگرسیون بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک

Scenario damage	Damage Severity Loction 1(%)	Damage Severity Loction 2(%)	Estimation with SVR-GA	Estimation with SVR-GA	Parameters SVR		
					ϵ	σ	C
	10	12	10.005	12	0.0017	1.0896	10
Ele3-Ele10	10	17	9.999	17.01			
	10	22	10.003	22.01			
	10	13	10.004	13.01			
Ele5-Ele10	10	18	10.001	17.99			
	10	23	9.9998	23.01			

4- نتیجه گیری

در این تحقیق یک روش اجرایی و مناسب برای تشخیص خسارت پلهای بزرگراهی ارائه گردید. در این روش جدید تشخیص خسارت، از ترکیب روش المان محدود طیفی، شاخص خسارت انرژی کرنشی و روش‌های یادگیری ماشین برای تشخیص و تخمین میزان شدت خسارت استفاده شده‌است. با این روش به تشخیص خسارات در دو سناریو تک و زوج خسارت همزمان پرداخته می‌شود.

1- از قابلیت‌های المان محدود طیفی تعریف شده استفاده گردید تا با دقت بالاتر و در زمان کم‌تر به تشخیص خسارت پرداخته شود. روش المان محدود طیفی با تشکیل ماتریس جرم قطری سبب کاهش هزینه‌های محاسباتی تا حدود 50٪ شد. همچنین خسارت‌های ریز و کوچک را بدرستی مدلسازی و شناسایی نمود. از ویژگی‌های المان جدید تعریف شده انعطاف‌پذیری در مدلسازی است. با توجه به متغیر بودن مقاطع در طول شاهتیرها بدرستی توانسته است مدل مورد بررسی را صحت‌سنجی نماید.

2- در شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال از انحنای مودی استفاده شده است. به دلیل اینکه حساسیت آن نسبت به شکل مود بیشتر است در نتیجه دقت بالاتری در شناسایی محل خسارت دارد. شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال برای شاهتیرهایی که دارای مقاطع متغیر در طول دهانه آنها بوده با خطا همراه می‌باشد. با اصلاح شاخص خسارت انرژی کرنشی مودال در این دسته از سازه‌ها، معادله اصلاح شده توانسته است با دقت مناسبی محل خسارت‌ها را شناسایی نماید. نتایج نشان داد در صورتیکه خسارت در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و یا وسط دهانه باشد و همچنین المان‌ها، مقاطع و دهانه‌ها مختلف باشند معادله اصلاح شده محل‌های خسارت را با کمترین خطا شناسایی نماید.

3- در سناریوی تک خسارت، خسارت ریز در دو موقعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. موقعیت اول در نزدیکی تکیه‌گاه و موقعیت دوم در وسط دهانه در نظر گرفته شد. علاوه بر اینکه دهانه‌ها و مقاطع مختلف می‌باشند معادله اصلاح شده توانست موقعیت خسارت را بدرستی شناسایی نماید. برای تخمین میزان شدت خسارت از ترکیب رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. برای اینکه یک SVR درست ساخته شود باید پارامترهای آن بدرستی انتخاب شوند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک سه هدفه پارامترهای مؤثر SVR بهینه‌سازی شد تا شدت خسارت را با دقت بالاتری تخمین بزند. استفاده از روش ترکیبی GA-SVR بدرستی عمل نموده و تخمین شدت خسارت با کمترین خطا همراه بود. بطوریکه همزمان 4 سطح خسارت بطور تصادفی از فاز آموزش خارج شده و در فاز تست قرار گرفته است بیشترین خطای تخمین به 0.01٪ محدود می‌گردد.

- [5] Pandey AK, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration* 1994; 169(1):3-17.
- [6] Shi ZY, Law SS, Zhang LM. Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of Sound and Vibration* 1998; 218(5):825-844.
- [7] Zhao J, DeWolf JT. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection. *Journal of Structural Engineering* 1999; 125(4):410-416.
- [8] Duan ZD, Yan GR, Ou JP, Spencer BF. Damage detection in ambient vibration using proportional flexibility matrix with incomplete measured DOFs. *Structural Control and Health Monitoring* 2007; 14(2):186-196.
- [9] Mahmood SMF, Haritos N, Gad E, Zhang LH. A multi-reference-based mode selection approach for the implementation of NExT-ERA in modal-based damage detection. *Structural Control and Health Monitoring* 2014; 21(8):1137-1153.
- [10] Mukhopadhyay S, Lus H, Betti R. Structural identification with incomplete instrumentation and global identifiability requirements under base excitation. *Structural Control and Health Monitoring* 2015; 22(7):1024-1047.
- [11] Fan W, Qiao P. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural health monitoring*. 2011;10(1):83-111.
- [12] Rucevskis S, Janeliukstis R, Akishin P, Chate A. Mode shape-based damage detection in plate structure without baseline data. *Structural Control and Health Monitoring*. 2016;23(9):1180-1193.
- [13] Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*. Los Alamos National Lab., NM (United States);1996.
- [14] Kim J-T, Ryu Y-S, Cho H-M, Stubbs N. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engineering structures*. 2003;25(1):57-67.
- [15] Ooijevaar T, Loendersloot R, Warnet L, de Boer A, Akkerman R. Vibration based Structural Health

4- در سناریوی زوج خسارت همزمان، خسارت کوچک در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی دقت معادله اصلاح شده انتخاب موقعیت‌ها و مقاطع در طول شایسته‌ها به گونه‌ای است که حالات مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. حالت اول موقعیت خسارت در نزدیک تکیه‌گاه و حالت دوم در وسط دهانه بوده که در هر دو حالت مقاطع غیریکسان می‌باشد. برای شبیه‌سازی خسارت در سناریو زوج خسارت همزمان از ایده کاهش سختی استفاده شد. بطوریکه در موقعیت اول کمترین شدت خسارت و موقعیت دوم با شدت خسارت بین 11 تا 25٪ می‌باشد. معادله اصلاح شده توانسته است محل خسارت را بدرستی شناسایی نماید. در خصوص تخمین میزان شدت خسارت در سناریوی زوج خسارت همزمان از روش GA-SVR استفاده شده است. برای تولید شاخص‌های خسارت بین 11 تا 25٪ از اسپیلاین مکعبی استفاده شد. دقت روش پیشنهادی با توجه به اختلاف اندک بین مقادیر درونیابی و مقدار محاسباتی از معادله شاخص خسارت انرژی کرنشی اصلاح شده به نحوی بود که به جای تحلیل و حجم زیاد محاسبات از این روش استفاده شود. سپس جهت آموزش و تست شبکه از یک تابع رندوم در شبکه SVR استفاده شد تا کاملاً تصادفی سه سطح خسارت از شاخص‌های خسارت را از فاز آموزش خارج نموده و در فاز تست قرار دهد. با توجه به اینکه از مقدار داده‌های فاز آموزش کاهش یافته و همزمان سه سطح خسارت مختلف را شبکه با کمترین خطا تخمین بزند بطوریکه حداکثر اختلاف در تخمین میزان شدت خسارت 0.05٪ می‌باشد. نتایج نمایانگر دقت و قدرت روش ارائه شده برای تخمین میزان شدت خسارت را می‌رساند. روش دو مرحله‌ای ارائه شده توانسته است با کمترین خطا در هر یک از مراحل تشخیص محل خسارت و تخمین میزان شدت خسارت بدرستی عمل نماید.

منابع

- [1] Eshghi, Sassan, and Mehran Seyed Razzaghi. "The behavior of special structures during the Bam earthquake of 26 December 2003." (2004): 197-207.
- [2] Mosleh, Araliya, et al. "Stochastic collocation-based nonlinear analysis of concrete bridges with uncertain parameters." *Structure and Infrastructure Engineering* 14.10 (2018): 1324-1338.
- [3] Cawley P, Adams RD. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 1979; 14(2):49-57.
- [4] Parloo E, Guillaume P, Overmeire MV. Damage assessment using mode shape sensitivities. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2003; 17(3):499-518.

- Monitoring of a composite T-beam. *Composite Structures*. 2010;92(9):2007-2015.
- [16] Magalhães F, Cunha A, Caetano E. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012;28:212-228.
- [17] Kim J-T, Park J-H, Lee B-J. Vibration-based damage monitoring in model plate-girder bridges under uncertain temperature conditions. *Engineering Structures*. 2007;29(7):1354-1365.
- [18] Teughels A, De Roeck G. Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. *Journal of Sound and Vibration*. 2004;278(3):589-610.
- [19] Koto Y, Konishi T, Sekiya H, Miki C. Monitoring local damage due to fatigue in plate girder bridge. *Journal of Sound and Vibration*. 2019;438:238-250.
- [20] Huth O, Feltrin G, Maeck J, Kilic N, Motavalli M. Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge. *Journal of Structural Engineering*. 2005;131(12):1898-1910.
- [21] Caicedo JM, Dyke SJ. Experimental validation of structural health monitoring for flexible bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*. 2005;12(3-4):425-443.
- [22] Xiong W, Kong B, Tang P, Ye J. Vibration-based identification for the presence of scouring of cable-stayed bridges. *Journal of Aerospace Engineering*. 2018;31(2):04018007.
- [23] Komatitsch, D., Vilotte, J-P., Vai, R., Castillo-Covarrubias, J.M. and Sanchez-Sesma, F.J. The spectral element method for elastic wave equation-Application to 2-D and 3-D seismic problems. *International journal for numerical methods in engineering*, 1999; Vol.45, pp.1139-1164.
- [24] Komatitsch, Dimitri, and Jeroen Tromp. "Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation." *Geophysical journal international* 139.3 (1999): 806-822.
- [25] Dauksher, W., and A. F. Emery. "The solution of elastostatic and elastodynamic problems with Chebyshev spectral finite elements." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 188.1-3 (2000): 217-233.
- [26] Komatitsch, Dimitri, et al. "Wave propagation in 2-D elastic media using a spectral element method with triangles and quadrangles." *Journal of Computational Acoustics* 9.02 (2001): 703-718.
- [27] A. T. Patera, A spectral element method for fluid dynamics: Laminar flow in a channel expansion, *Computational Physics*, 1984; Vol.54, No. 3, pp. 468-488.
- [28] Beskos, D. E., and G. V. Narayanan. "Dynamic response of frameworks by numerical Laplace transform." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 37.3 (1983): 289-307.
- [29] Maday, Yvon, and Anthony T. Patera. "Spectral element methods for the incompressible Navier-Stokes equations." *IN: State-of-the-art surveys on computational mechanics (A90-47176 21-64)*. New York (1989): 71-143.
- [30] Priolo, Enrico, José M. Carcione, and Géza Seriani. "Numerical simulation of interface waves by high-order spectral modeling techniques." *The Journal of the Acoustical Society of America* 95.2 (1994): 681-693.
- [31] Doebling, Scott W., et al. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review." (1996).
- [32] Komatitsch, Dimitri, and Jean-Pierre Vilotte. "The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures." *Bulletin of the seismological society of America* 88.2 (1998): 368-392.
- [33] Doyle, James F., and James F. Doyle. *Wave propagation in structures*. Springer US, 1989.
- [34] Dauksher, W., and A. F. Emery. "The solution of elastostatic and elastodynamic problems with Chebyshev spectral finite elements." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 188.1-3 (2000): 217-233.
- [35] Krawczuk, Marek. "Application of spectral beam finite element with a crack and iterative search technique for damage detection." *Finite Elements in Analysis and Design* 38.6 (2002): 537-548.
- [36] Mahapatra, D. Roy, and S. Gopalakrishnan. "A spectral finite element model for analysis of axial-flexural-shear coupled wave propagation in laminated composite beams." *Composite Structures* 59.1 (2003): 67-88.

[37] Nag, A., et al. "A spectral finite element with embedded delamination for modeling of wave scattering in composite beams." *Composites science and Technology* 63.15 (2003): 2187-2200.

[38] Kumar, D. Sreekanth, D. Roy Mahapatra, and S. Gopalakrishnan. "A spectral finite element for wave propagation and structural diagnostic analysis of composite beam with transverse crack." *Finite Elements in Analysis and Design* 40.13-14 (2004): 1729-1751.

[39] Kudela, Paweł, et al. "Modelling of wave propagation in composite plates using the time domain spectral element method." *Journal of Sound and vibration* 302.4-5 (2007): 728-745.

[40] Xu, Zhao-Dong, and Zhishen Wu. "Energy damage detection strategy based on acceleration responses for long-span bridge structures." *Engineering Structures* 29.4 (2007): 609-617.

[41] Kudela, Paweł, Marek Krawczuk, and Wiesław Ostachowicz. "Wave propagation modelling in 1D structures using spectral finite elements." *Journal of sound and vibration* 300.1-2 (2007): 88-100.

[42] Ostachowicz, Wieslaw M. "Damage detection of structures using spectral finite element method." *Computers & structures* 86.3-5 (2008): 454-462.

[43] محمد وحیدی؛ آرمین عظیمی‌نژاد؛ مریم فیروزی نظام‌آبادی؛ محمود هریس‌چیان. "تشخیص و تخمین خسارات ریز و کوچک در تیرهای فولادی با استفاده از روش‌های المان محدود طیفی، شاخص انرژی کرنشی مودال و رگرسیون بردار پشتیبان." *مهندسی سازه و ساخت*. 10, 1, 1402, 5-24.

[44] Razzaghi, Mehran S., et al. "Fragility assessment of RC bridges using numerical analysis and artificial neural networks." *Earthquakes and Structures* 15.4 (2018): 431-441.

[45] Razzaghi, Mehran S., and Alireza Mohebbi. "Predicting the seismic performance of cylindrical steel tanks using artificial neural networks (ann)." *Acta Polytechnica Hungarica* 8.2 (2011): 129-140.

[46] Drucker, Harris, et al. "Support vector regression machines." *Advances in neural information processing systems* 9 (1996).

[47] Bagchi, Ashutosh, et al. "Model-based damage identification in a continuous bridge using vibration data." *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24.2 (2010): 148-158.

[48] Bagchi, Ashutosh. Updating the mathematical model of a structure using vibration data. *Journal of Vibration and Control* 11.12 (2005): 1469-1486.