Journal of Marine Science and Technology

Summer 2024, Vol. 23, No.2, pp. 70-82.

Available Online: *http://jmst.kmsu.ac.ir*

Original Article

Proposing a novel modal strain energy-based method for damage localization in the access bridge of The marine platform.

Mehdi Alavinezhad [1], Madjid Ghodsi Hassanabad[*1], Mohammad Javad Ketabdari [2], Masoud Nekooei [3]

1. Department of Marine Industries, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Hydromechanics and Propulsion Systems Engineering Group,Faculty of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

[*] **Corresponding Author Email:** m.ghodsi@srbiau.ac.ir

Received: 31 January 2021 **Revise Date:** 25 December 2021 **Accepted:** 8 January 2022

DOI: 10.22113/JMST.2022.266984.2411

Abstract

The passage of personnel and the placement of facilities on the access stairs of offshore complexes have made it very important to identify damage to these components. The modal strain energy method is one of the non-destructive and practical methods that uses changes in the dynamic properties of the structure to identify the location and determine the severity of damage in the structure. In recent years, modifications have been made to the initial version of this method, one of which is to consider the natural frequencies in locating the damage. In this paper, using the improved modal strain energy method and considering natural frequencies, a new relationship is presented to more accurately identify the location of damage in the structure, and three different damage indices in the offshore platform access bridge structure are studied and compared. The results show that the average error to accurately identify the location of damage in the average Stubbs index, the improved method and the novel method are 3.55, 2.82, and 2.21 percent, respectively, so the novel method can more accurately identify the location of damage in the structure. Also, comparing the results of different cases shows that the average damage location error decreases with increasing damage severity. The accuracy of identifying the location of the damage also increases when moving away from the supports.

Keywords: Offshore platform, Access bridge, Damage detection, Improved modal strain energy, Stubbs index.

1. INTRODUCTION

One of the most important components of marine platforms is the access bridges between them. In addition to being used for the passage of personnel, these bridges are also the place for the passage of facilities. Due to the location in the corrosive environment of the sea and also the possibility of various damages to these

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons. org/licenses/ by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

members that cause huge financial and life losses, it is very important to check and control the health of these structures.

To monitor the health of structures, various methods are used. One of the methods used in this regard is visual inspection, which leads to obtaining important information about the health of the structure. In addition to its special advantages, this method requires a lot of time and money. Also, due to the unavailability of some sections of the structure, it is not possible to detect the damage in them using visual inspection, and it is not possible to detect the internal damage of the structure and its origin using visual inspection. For this reason, in recent years, a lot of attention has been paid to non-destructive damage identification methods to increase safety and ensure the existing condition of the structure. One of these methods is to use the vibration characteristics of the structure to evaluate the damage at the structure level, which is used as a complementary solution next to visual inspections. In all vibration-based damage detection methods, the structure's modal characteristics (natural frequency, mode shape, and modal damping) are a function of its physical characteristics. Therefore, by using the change in the static or dynamic response of the structures, the change in their physical characteristics and as a result the structural damage can be identified in the initial stages, the maintenance costs of the structure can be reduced and the failure of the structure can be prevented.

The studies conducted in the past show the high accuracy and ability of the modal strain energy method in detecting damage in marine structures. Considering the long operational life of the country's offshore platforms and the existence of possible damages in these platforms, as well as the importance of access bridges between offshore platforms, in this article a comparison between the accuracy of different damage detection methods, including the Stubbs index method, the improved strain energy method and the new recommended method has been done by the authors to use this method in the identification of real damages in marine platforms. In the Stubbs index method, as the primary method based on modal strain energy, only the shape of the structure's vibration modes has been used to identify damage. In the improved method, by using the natural frequencies of the structure, a more accurate estimate has been provided to identify the damage in the structures. This research tries to provide better results, especially for multiple damages in structures with a large number of members, by improving the improved method.

2. METHOD AND MATERIAL

When an elastic object is subjected to a force, tension is created in it, the object changes its shape and the state of its various points changes compared to the initial state. Changing the point of effect of forces applied to the body causes some work to be done when they are applied. The aforementioned work, which is accompanied by the change of shape of the object in the state of tension, causes the storage of some energy in the form of elastic energy in the object, which is called strain energy. Modal strain energy is a situation where no force is applied to the structure and the structure is in a state of free vibration, and the modal strain energy of each member can be obtained by dynamic analysis and solving the presented relationships. Damage in a structure usually causes a decrease in the stiffness of the structure and does not affect the mass matrix of the structure.

In this part, using the modal strain energy method, the damage in the structure has been identified. This damage is defined by reducing the stiffness (reduction of the elastic modulus) of the member and the finite element model of the structure is written in MATLAB software. So, for example, the presence of 20% damage in member number 15 causes the difficulty level of that member to reach 80% of the initial state. Validation of the results was done by comparing the assumed amount of damage and the amount of damage obtained from the written program.

The structure has 100 members and is modeled as a bending frame. The 4 connection points of the structure to the marine platform are modeled as girders. The rows and columns related to the supports have been removed from the mass and stiffness matrices of the structure. The elastic modulus (E) is equal to 210 GPa and the density of steel is equal to 7850 kg/m3.

3. DISCUSSION AND CONCLUSION

With the passing of the service life of marine structures, the need to monitor their health is felt to identify the place of damage under the structures. The communication bridge between marine platforms is of great importance considering that it is the place where personnel and pipelines pass. However, it has been less studied in previous studies. In this research, using the modal strain energy method, which is one of the most suitable methods for non-destructive damage identification in structures, single and multiple damages were identified in the communication bridge in a marine platform, and the results of the three Stubbs index methods, the strain energy method The improved modal and the new method presented by the authors were compared with each other. It was also tried to include different modes of damage; members whose failure causes more damage. The results obtained from this article are:

Considering that the average error for the accuracy of identifying the location of damage in the Stubbs index, the improved method and the new method are 3.55, 2.82 and 2.21% respectively, so the new method can identify the location of damage in the structure with more accuracy.

• Comparison of the results of different modes shows that the average damage location error decreases with increasing damage severity.

• In the case of minor and small injuries that are in the initial stages of formation and growth, as well as large and highly developed injuries, the new method can identify the location of the injury with a high ability.

• The accuracy of damage location using the modal strain energy method is higher in horizontal members than in restrained members.

• The accuracy of this method is higher for members that are on a horizontal plane than for members that connect the upper and lower members.

• The accuracy of identifying the damage location increases by moving away from the supports.

• The new method identifies the location of the damage in the structure with higher accuracy and it is recommended to use this method instead of Stubbs index and improved modal strain energy methods.

4. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Iranian Offshore Oil Company (IOOC) for providing the drawings of the access bridge of the Foroozan Oil complex.

مجله علوم وفنون دریایی، فصل نامه ی علمی پژوهشی

دوره ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۷۰ تا ۸۲.

مقاله پژوهشی

Available Online: *http://jmst.kmsu.ac.ir*

ارائه یک روش نوین مبتنی بر انرژی کرنشی مودال به‌منظور مکان‌یابی آسیب سازه‌ای در پل دسترسی سکوی دریایی

مهدی علوی نژاد [۱]، مجید قدسی حسن آباد * [۱]، محمد جواد کتابداری [۲]، مسعود نکوئی [۳]

۱. گروه صنایع دریایی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی هیدرومکانیک و سیستم های رانش، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* **نویسنده مسئول، پست الکترونیک:** m.ghodsi@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2022.266984.2411

چکیده

عبور و مرور پرسنل و قرارگیری تاسیسات روی پل‌های دسترسی مجتمع‌های فراساحلی سبب شده است تا شناسایی آسیب در این اجزا از اهمیت زیادی برخوردار باشد. روش انرژی کرنشی مودال، یکی از روش‌های غیر مخرب و کاربردی است که در آن با استفاده از تغییر در خصوصیات دینامیکی سازه به شناسایی مکان و تعیین شدت آسیب در سازه پرداخته می‌شود. در سالیان اخیر، اصلاحاتی بر نسخه اولیه این روش صورت گرفته که یکی از آن‌ها، در نظر گرفتن فرکانس‌های طبیعی در تعیین مکان آسیب است. در این مقاله، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته و با در نظر گرفتن فرکانس‌های طبیعی، یک رابطه جدید برای شناسایی دقیق‌تر مکان آسیب در سازه ارائه شده و سه شاخص آسیب مختلف در سازه پل دسترسی سکوی دریایی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب به‌طور متوسط در شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۳,۵۵، ۲,۸۲ و ۲,۲۱ درصد است، بنابراین روش نوین با دقت بیشتری قادر به شناسایی مکان آسیب‌های موجود در سازه می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که میانگین خطای مکان‌یابی آسیب با افزایش شدت آسیب، کاهش می‌یابد. دقت شناسایی مکان آسیب نیز با دور شدن از تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سکوی دریایی، پل دسترسی، شناسایی آسیب، انرژی کرنشی مودال بهبود یافته ، شاخص Stubbs.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons. org/licenses/ by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین اجزای سکوهای دریایی، پل‌های دسترسی بین آن‌ها می‌باشد. این پل‌ها علاوه بر استفاده در عبور و مرور پرسنل، محل عبور تاسیسات نیز می‌باشند. به دلیل قرارگیری در محیط خورنده دریا و همچنین احتمال وارد آمدن آسیب‌های مختلف به این اعضا که سبب خسارات مالی و جانی هنگفتی می‌گردد، بررسی و کنترل سلامت این سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

به منظور پایش سلامت سازه‌ها، روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های مورد استفاده در این خصوص، بازرسی چشمی است که منجر به حصول اطلاعات مهمی در مورد سلامت سازه می‌گردد. این روش در کنار مزایای خاص خود، نیاز به زمان و هزینه زیادی دارد. همچنین به‌دلیل در دسترس نبودن برخی مقاطع سازه، امکان تشخیص خرابی در آن‌ها با استفاده از بازرسی چشمی میسر نبوده و تشخیص خرابی‌های داخلی سازه و منشأ آن‌ها با استفاده از بازرسی چشمی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به این دلیل برای افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه، در سالیان اخیر توجه زیادی به روش‌های شناسایی غیر مخرب آسیب شده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از خصوصیات ارتعاشی سازه برای ارزیابی خرابی در سطح سازه است که به‌عنوان یک راه‌حل تکمیلی در کنار بازرسی‌های چشمی به‌کار گرفته می‌شود (Doebling et al., 1996) در تمامی روش‌های شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش، خصوصیات مودال سازه (فرکانس طبیعی، شکل مودها و میرایی مودال) تابعی از خصوصیات فیزیکی آن است. بنابراین می‌توان با استفاده از تغییر در پاسخ استاتیکی یا دینامیکی سازه‌ها، تغییر در خصوصیات فیزیکی آن‌ها و در نتیجه آسیب‌های سازه‌ای را در مراحل ابتدایی شناسایی کرده، هزینه‌های نگهداری سازه را کاهش داده و از شکست سازه جلوگیری نمود.

به‌طور کلی، شناسایی آسیب در سازه‌ها در چهار سطح به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

سطح اول: تشخیص وجود و یا عدم وجود آسیب در سازه‌ها

سطح دوم: سطح اول+ تعیین موقعیت هندسی آسیب

سطح سوم: سطح دوم+ کمیت شدت آسیب

سطح چهارم: سطح سوم+ تخمین عمر باقی‌مانده (Doebling et al., 1995).

تاکنون مطالعات زیادی در مورد روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌ها صورت گرفته است. یکی از اولین مطالعات در این زمینه، مطالعه انجام شده توسط Cawley و Adams (1979) است که در آن فرکانس‌های طبیعی سازه به عنوان یک شاخص برای شناسایی محل آسیب معرفی شد. (Shahrivar and Bouwkamp, 1986) از اطلاعات ارتعاشی سازه به منظور شناسایی آسیب در یک سکوی دریایی هشت پایه فولادی استفاده کردند. Hansen و Vanderplaats (1990) برای تشخیص آسیب در سازه از فرکانس طبیعی و شکل مودهای سازه استفاده نموده و ضمن شناسایی موقعیت آسیب، شدت آن را نیز تعیین نمودند. Doebling et al. (1993) روشی را بر پایه انرژی کرنشی مودال برای انتخاب یک زیرمجموعه از مودهای ارتعاشی سازه‌ها را ارائه کرده و تشخیص آسیب سازه‌ای در آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. Kim و Stubbs (1995) الگوریتمی برای مکان‌یابی و تعیین میزان شدت آسیب در سکوهای شابلونی ارائه نموده، به تعیین مکان و تخمین شدت آسیب با استفاده از تغییرات در شکل مودها پرداخته و سپس روشی برای تعیین پارامترهای مودال سازه فرمول‌بندی نمودند. Farrar و Jauregui (1998) پنج روش از روش‌های شناسایی آسیب مبتنی بر مشخصات ارتعاشی، شامل روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال، روش انحنای شکل مودی، روش تغییر در انعطاف‌پذیری، روش تغییر در انحنای بار یکنواخت سطحی و روش تغییر در سختی را بر روی یک پل فولادی بررسی نموده و نتیجه گرفتند که روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده است. Kim و Stubbs (2002) شاخص خرابی بهبود یافته‌ای را به‌منظور بهبود دقت شناسایی آسیب در سازه‌های با اعضای زیاد ارتقاء داده و کارایی آن را بر روی یک تیر دو دهانه آزمایش نمودند. Ge و Lui (2005) روشی را بر پایه مدل اجزا محدود و با استفاده از خصوصیات دینامیکی که شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای سازه بود، به‌منظور شناسایی موقعیت و تعیین شدت آسیب ارائه دادند. Doebling et al. (2009) روش شاخص خرابی انرژی کرنشی مودال را برای تشخیص آسیب در تیر و صفحه مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که می‌توان از این روش در شناسایی آسیب در شاه‌تیر و عرشه پل‌ها که رفتاری نظیر تیر و صفحه دارند استفاده نمود. Seyedpoor و Yazdanpanah (2014) روشی را برای شناسایی مکان آسیب بر مبنای انرژی کرنشی ناشی از بارهای استاتیکی وارد بر سازه، در دو حالت سالم و آسیب دیده ارائه نمودند. آن‌ها کارایی این روش را بر روی یک خرپای سیزده عضوی، یک قاب سه دهانه‌ای و یک خرپای فضایی بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارگذاری در یک گره از خرپاهای مورد بررسی و محاسبه جابه‌جایی گره‌ها به راحتی شناسایی مکان آسیب امکان‌پذیر است. Liu et al. (2014) با استفاده از تفاضل انرژی کرنشی مودال سازه در حالت سالم و آسیب دیده، برای شناسایی مکان آسیب در پایه های توربین بادی، شاخصی بر مبنای انرژی کرنشی مودال ارائه نمودند که نسبت به سایر روشهای سنتی انرژی کرنشی حساسیت بالاتری داشت. Li et al. (2014) از یک روش بهبود یافته انرژی کرنشی مودال به‌منظور شناسایی آسیب در

سکوهای دریایی بر مبنای یک روش انرژی کرنشی مودال سنتی (شاخص استابس) استفاده کردند. تفاوت تحقیق آن‌ها با روش شاخص استابس، کاربرد فرکانس‌های مودال بود. هدف، بهبود دقت روش سنتی بود. به‌منظور نشان دادن تاثیر و قابلیت کاربرد روش پیشنهاد شده، مطالعات تجربی و عددی برای حالت‌های آسیب مختلف در یک سکوی دریایی از نوع جکت صورت گرفت. نتایج نشان دهنده تاثیر استفاده از روش پیشنهادی در مکان‌یابی آسیب، وقتی فقط داده‌های مودال محدود، ناقص و آلوده به نوفه وجود داشت، بود. مطالعات مقایسه‌ای نشان داد که شاخص روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته از شاخص استابس دارای عملکرد بهتری است. Xu et al. (2018) از یک روش تکراری دو مرحله‌ای به‌منظور شناسایی آسیب با ترکیب روش تجزیه انرژی کرنشی مودال و الگوریتم چند منظوره بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند. Ding et al. (2019) به‌صورت عملی به پایش سلامت فرآیند جداسازی داربست از یک پل شاه‌تیر فولادی با دهانه بزرگ در طی فرآیند ساخت پل پرداخته و تغییرات توزیع کرنش را در آن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین پل را برای شبیه‌سازی شرایط حذف داربست به روش اجزاء محدود مدل‌سازی نمودند و توزیع کرنش در شاه‌تیر را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه نمودند. Wu et al. (2019) با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال به مکان‌یابی آسیب در یک خرپای صفحه‌ای پرداختند. آن‌ها بیان کردند که روش‌های انرژی کرنشی مودال سنتی با در نظر گرفتن چندین شکل مود اول برای محاسبه شاخص مکان آسیب و بنابراین در نظر گرفتن شکل مودهای غیرحساس، به اندازه کافی دقیق نبوده و حتی گاهی اثر خود را از دست می‌دهند. بنابراین آن‌ها از یک شاخص جدید به‌نام شاخص تغییر انرژی کرنشی مودال که از شکل مودهای حساس استفاده می‌کند، بهره بردند.

مطالعات انجام گرفته در گذشته، نشان دهنده دقت و توانایی بالای روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی آسیب در سازه‌های دریایی است. با توجه به عمر عملیاتی بالای سکوهای دریایی کشور و وجود آسیب‌های احتمالی در این سکوها، همچنین اهمیت پل‌های دسترسی بین سکوهای دریایی، در این مقاله مقایسه‌ای میان دقت روش‌های مختلف شناسایی آسیب، شامل روش شاخص استابس، روش انرژی کرنشی بهبود یافته و روش نوین توصیه شده توسط نگارندگان به‌منظور امکان استفاده از این روش در شناسایی آسیب‌های واقعی در سکوهای دریایی صورت پذیرفته است. در روش شاخص استابس به‌عنوان روش اولیه مبتنی بر انرژی کرنشی مودال تنها از شکل مودهای ارتعاشی سازه برای شناسایی آسیب استفاده شده است. در روش بهبودیافته، با استفاده از فرکانس‌های طبیعی سازه، تخمین دقیق‌تری برای شناسایی آسیب در سازه‌ها ارائه گردیده است. این پژوهش سعی دارد با ارتقاء روش بهبود یافته، نتایج بهتری به‌خصوص برای آسیب‌های چندگانه در سازه‌های با تعداد عضو زیاد و ارائه دهد.

۲. مواد و روش‌ها

وقتی یک جسم الاستیک تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، در آن تنش ایجاد شده، جسم تغییر شکل داده و وضعیت نقاط مختلف آن نسبت به حالت اولیه تغییر پیدا می‌کند. تغییر نقطه اثر نیروهای اعمالی به جسم سبب می‌شود که در هنگام اعمال آن‌ها مقداری کار انجام شود. کار مزبور که همراه با تغییر شکل جسم در وضعیت تنش است، باعث ذخیره مقداری انرژی به‌صورت انرژی ارتجاعی در جسم شده که به آن انرژی کرنشی گفته می‌شود. انرژی کرنشی مودال وضعیتی است که نیرویی به سازه وارد نمی‌شود و سازه در حالت ارتعاش آزاد قرار دارد که با تحلیل دینامیکی و حل روابط ارائه شده می‌توان انرژی کرنشی مودال هر عضو را به‌دست آورد. خرابی در یک سازه معمولا سبب کاهش سختی سازه شده و بر ماتریس جرم سازه تاثیری نمی‌گذارد.

در یک سازه خطی بدون آسیب، با NE المان و N گره، iامین سختی مودال سازه از رابطه (۱) و (۲) به‌دست می‌آید (Kim and Stubbs, 2002)؛ که در آن K_i و K_i^* سختی مود iام، $\mathbf{C}$ و $\boldsymbol{C}^*$ ماتریس‌های سختی سازه و Φ_i و Φ_i^* iامین بردار شکل مود سازه به ترتیب در حالت سالم و آسیب دیده سازه هستند. به عبارت دیگر در روابط این تحقیق، علامت * نشان‌گر حالت آسیب دیده است.

براساس الگوریتم تشخیص خرابی Stubbs، شاخص خرابی از رابطه (۳) به‌دست می‌آید (Kim and Stubbs, 2002). در رابطه (۳) E_j و E_j^*، مدول الاستیسیته jامین المان به ترتیب در حالت سالم و آسیب دیده، C_{jo}، سهم مشخصات هندسی عضو jام در ماتریس سختی سیستم، و β_{ij}، شاخص شناسایی آسیب برای jامین عضو و iامین مود هستند. چنانچه $K_i^* \approx \phi_i^{*T} C \phi_i^*$ تنظیم شود، تمام کمیت‌ها در سمت راست (از جمله ϕ_i و ϕ_i^*)را می‌توان تعیین نموده و یا از پارامترهای مودال به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی و هندسه سازه (C_{jo}) تقریب زد. بر طبق معادله فوق، آسیب در j امین عضو و iامین شکل مود در صورتی تعیین می شود که $\beta_{jj} > 1$ باشد. هر چند، چنانچه jامین عضو در یا در نزدیکی گره iامین شکل مود باشد، مخرج معادله فوق به سمت صفر میل می‌نماید و یک پیش‌بینی غلط از نتایج آسیب رخ می‌دهد.

براساس مطالعه (Kim and Stubbs, 2002) با در نظر گرفتن برخی تقریب‌ها این محدودیت رفع شده و رابطه (۴) به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که به‌دلیل مشخص نبودن ماتریس سختی سازه و اعضا در حالت آسیب دیده، از ماتریس سختی سازه سالم برای هر دوحالت استفاده می‌شود. بنابراین در رابطه (۴) نیز از ماتریس سختی سازه سالم استفاده شده است.

بعد از بدست آوردن β_j برای هر عضو با استفاده از رابطه (۵) شاخص آسیب نرمالیزه می‌گردد (Kim and Stubbs, 2002).

$$K_i = \Phi_i^T C \Phi_i$$ رابطه (۱)

$$K_{ij} = \Phi_i^T C_j \Phi_i$$ رابطه (۲)

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{[\phi_i^{*T} C_{jo} \phi_i^*] K_i}{[\phi_i^T C_{jo} \phi_i] K_i^*}$$ رابطه (۳)

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^{*T} C_{jo} \Phi_i^* + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^{*T} C_{ko} \Phi_i^*) K_i}{\sum_{i=1}^{NM} (\Phi_i^T C_{jo} \Phi_i + \sum_{i=1}^{NE} \Phi_i^T C_{ko} \Phi_i) K_i^*}$$ رابطه (۴)

$$Z_j = \frac{\beta_j - \overline{\beta}}{\sigma_\beta}$$ رابطه (۵)

در تعیین شاخص خرابی Stubbs تنها از شکل مودها استفاده می‌شود و فرکانس‌های طبیعی در تعیین مکان آسیب در نظر گرفته نمی‌شوند. با این وجود، تحقیقات قبلی نشان داده است که فرکانس‌های مودال را می‌توان با دقت بسیار بیشتری نسبت به شکل مودها تعیین نمود. Li et al. (2016) به منظور بهبود روش Stubbs، از اطلاعات فرکانس در تعیین شاخص آسیب استفاده نمودند. تحلیل ویژه برای سازه های سالم و آسیب دیده را می توان به صورت رابطه (۶) و (۷) نوشت:

$$C \phi_i = \omega_i^2 M \phi_i$$ رابطه (۶)

$$C^* \phi_i^* = \omega_i^2 M^* \phi_i^*$$ رابطه (۷)

در این رابطه، M و M^* ماتریس‌های جرم سیستم در حالت‌های سالم و آسیب دیده بوده و ω_i و ω_i^*، iامین فرکانس مودال در حالات سالم و آسیب دیده هستند. شاخص خرابی بهبود یافته از رابطه (۸) دست می‌آید (Li et al., 2016):

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} (\phi_i^{*T} C_j \phi_i^* + \omega_i^{*2} \phi_i^{*T} M \phi_i^*) \omega_i^2 \phi_i^T M \phi_i}{\sum_{i=1}^{m} (\phi_i^T C_j \phi_i + \omega_i^2 \phi_i^T M \phi_i) \omega_i^{*2} \phi_i^{*T} M \phi_i^*}$$ رابطه (۸)

مجددا می‌توان با استفاده از رابطه (۵)، شاخص فوق را نرمالیزه نمود.

در روش Stubbs، به منظور شناسایی آسیب تنها از شکل مودهای ارتعاشی و ماتریس سختی استفاده می‌شود.

Li et al. (2016) از یک شاخص اصلاح شده به منظور شناسایی آسیب ارائه نمودند. بر مبنای مطالعه آن‌ها، به دلیل تخمین دقیق‌تر فرکانس‌های طبیعی، دقت شناسایی آسیب، به‌ویژه درحضور نویز بهبود داده شد. در شاخص آسیب اصلاح شده توسط ایشان، مدول الاستیسیته از ماتریس سختی فاکتورگیری نشده بود.

بنابراین، β_j نشان دهنده کسر مدول الاستیسیته در سازه های سالم و آسیب دیده نیست.

نویسندگان مقاله حاضر معتقدند که این مورد می‌تواند تا حدی دقت شناسایی آسیب را، به ویژه در موارد آسیب چندگانه کاهش دهد. به‌منظور افزایش دقت نتایج، با جایگزین کردن معادلات ۶ و ۷ در معادله ۸ یک رابطه جدید شاخص آسیب توسعه داده شده است. در این رابطه، هم از ماتریس سختی و هم از فرکانس‌های طبیعی استفاده شده و مدول الاستیسته از معادله فاکتور گرفته شده است. با محاسبه شاخص آسیب با این فرمول، در مقایسه با روابط موجود، می‌توان مکان آسیب را با دقت بالاتری شناسایی نمود.

$$\beta_j = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left(\emptyset_j^{*T} C_{jo} \emptyset_j^* + \sum_{j=1}^{ne} \emptyset_j^{*T} C_{jo} \emptyset_j^* \right) \omega_i^2 \emptyset_i^T M \emptyset_i}{\sum_{i=1}^{m} \left(\emptyset_j^T C_{jo} \emptyset_j + \sum_{j=1}^{ne} \emptyset_j^T C_{jo} \emptyset_j \right) \omega_i^{*2} \emptyset_i^{*T} M \emptyset_i^*}$$ رابطه (۹)

در روش جدید، بر خلاف شاخص استابس، فرکانس‌های طبیعی در شاخص آسیب مورد استفاده قرار گرفته است که به‌دلیل تخمین و محاسبه دقیق فرکانس‌های طبیعی، دقت بالاتری نسبت به شاخص استابس دارد. همچنین در روش جدید، علاوه بر ماتریس سختی، ماتریس جرم نیز نقش مهمی ایفا می‌کند و برخلاف روش بهبود یافته، تغییرات در ماتریس سختی نیز در نظر گرفته می شوند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل شده، روش جدید از هر دو روش بهبود یافته و شاخص استابس دقت و عملکرد بهتری در شناسایی مکان آسیب دارد.

در این قسمت با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، به شناسایی آسیب در سازه پرداخته شده است. این آسیب با کاهش سختی (کاهش مدول الاستیسته) عضو تعریف شده و مدل المان محدود سازه در نرم‌افزار متلب (MATLAB) نوشته شده است. به نحوی که به‌طور مثال، وجود ۲۰ درصد آسیب در عضو شماره ۱۵ سبب می‌شود که میزان سختی آن عضو به ۸۰ درصد حالت اولیه برسد. صحت‌سنجی نتایج نیز از طریق مقایسه میزان آسیب فرض شده و میزان آسیب به‌دست آمده از برنامه نوشته شده، صورت پذیرفته است.

سازه دارای ۱۰۰ عضو بوده و به صورت قاب خمشی مدل گردیده است. ۴ نقطه اتصال سازه به سکوی دریایی به‌صورت گیردار مدل شده است. سطر و ستون مربوط به تکیه گاه‌ها از ماتریس های جرم و سختی سازه حذف گردیده است. مدول الاستیسته (E) برابر با ۲۱۰ گیگاپاسکال و چگالی فولاد برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج

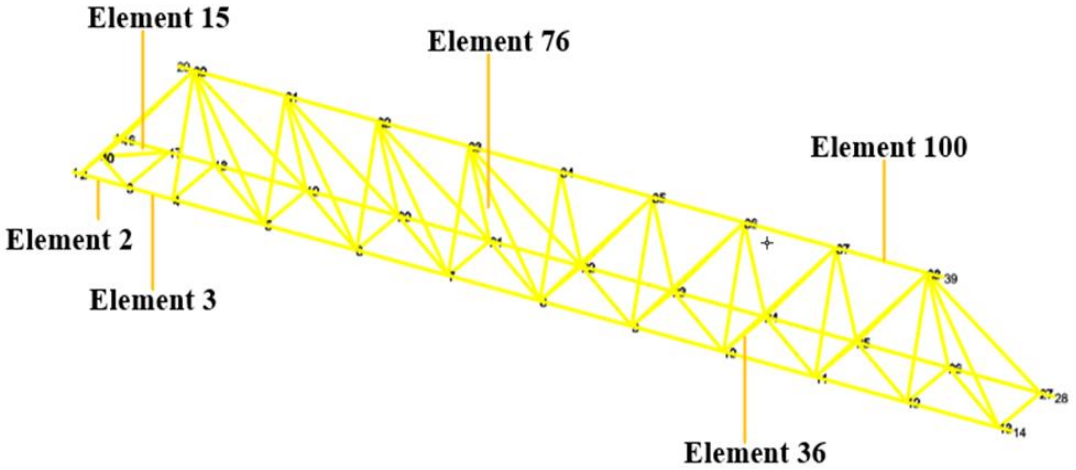
در این مقاله، آسیب فرضی با کاهش مدول الاستیسیته عضو در برنامه نوشته شده، اعمال گردیده است. به‌منظور نشان دادن دقت روش انرژی کرنشی مودال در شناسایی مکان آسیب، حالت‌های مختلف آسیب‌های تکی و چندگانه برای هر دو نوع سازه تعریف شده است. برای شناسایی آسیب به روش انرژی کرنشی مودال به اطلاعات مودال سازه در حالت قبل و بعد از آسیب نیاز است. بدین منظور بعد از مدل‌سازی سکو و تعریف ماتریس‌های سختی و جرم اعضا و برهم‌چینی آن‌ها جهت دست‌یابی به ماتریس سختی و جرم کل سازه، بردارهای ویژه و مقادیر ویژه که به‌ترتیب همان شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی سازه هستند، استخراج گردیده است. سپس فرکانس‌های طبیعی از کوچک به بزرگ مرتب شده به‌طوری‌که کوچک‌ترین فرکانس، اولین فرکانس طبیعی سازه و شکل مود متناظر با آن، اولین شکل مود سازه می‌باشد. سایر شکل مودهای سازه نیز به شیوه فوق مرتب شده است. در جدول(۱)، حالت‌های مختلف آسیب‌های وارده به زیرسازه در کنار سه فرکانس طبیعی اول سازه آسیب دیده در هر حالت ارائه شده است. مکان هندسی اعضای آسیب دیده در حالت‌های مختلف نیز در شکل (۱) مشخص گردیده است. لازم به ذکر است که تنها چند شکل مود اول سازه در محاسبات مربوط به شناسایی آسیب در نظر گرفته شده است.

وقتی که آسیب‌های موضعی با شدت کم رخ می‌دهند می‌توان به صورت تقریبی از ماتریس سختی سازه سالم برای حالت آسیب دیده استفاده نمود، که منجر به ایجاد خطا می‌گردد. لذا در هر حالت میزان خطای روش‌های مختلف که از برنامه المان محدود نوشته شده در نرم‌افزار متلب (MATLAB) استخراج شده، مقایسه گردیده است.

جدول۱- حالت‌های مختلف آسیب‌های وارده به سازه پل دسترسی و سه فرکانس طبیعی اول سازه در هر حالت

Table 1- Different damage cases to access bridge structure and the first three natural frequencies of the structure in each case

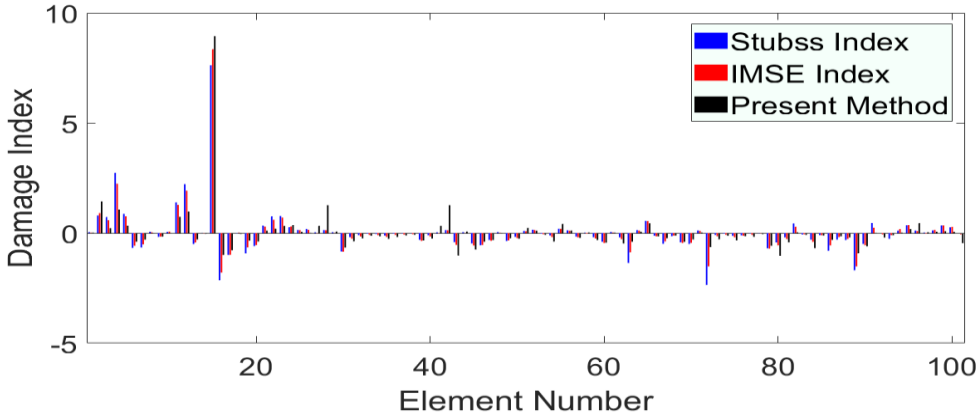
Damage Scenarios	Damage Element	Damage Severity (%)	Natural Frequency (Hz)		
			First mode	Second mode	Third mode
1	15	20	32.2999	34.0220	54.3965
2	36	40	32.3027	34.0449	54.3743
3	76	10	32.3021	34.0759	54.4091
4	100	10	32.2217	34.0781	54.4098
5	2 and 3	20 and 10	32.2945	33.8661	54.2630



شکل ۱- مدل اجزای محدود ایجاد شده پل دسترسی و نمایش اعضای آسیب دیده فرضی

Fig. 1- Created Finite Element model of the access bridge and displays hypothetical damaged elements

در حالت اول، عضو شماره ۱۵ به‌میزان ۲۰ درصد دچار آسیب شده است. شکل مودهای سازه در دو حالت سالم و آسیب دیده استخراج شده و با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال، نمودار محل آسیب در شکل (۲) رسم گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش انرژی کرنشی مودال با دقت بالایی قادر به تعیین مکان آسیب در سازه سکو می‌باشد. با این وجود، استفاده از روش نوین سبب شده تا شاخص شناسایی آسیب در عضو آسیب دیده مقدار بیشتری را نشان دهد که بیان کننده دقت بیشتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. همچنین میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب برای شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۵/۰۲ ٪ ، ۴/۲۰ ٪ و ۳/۵۵ ٪ است.

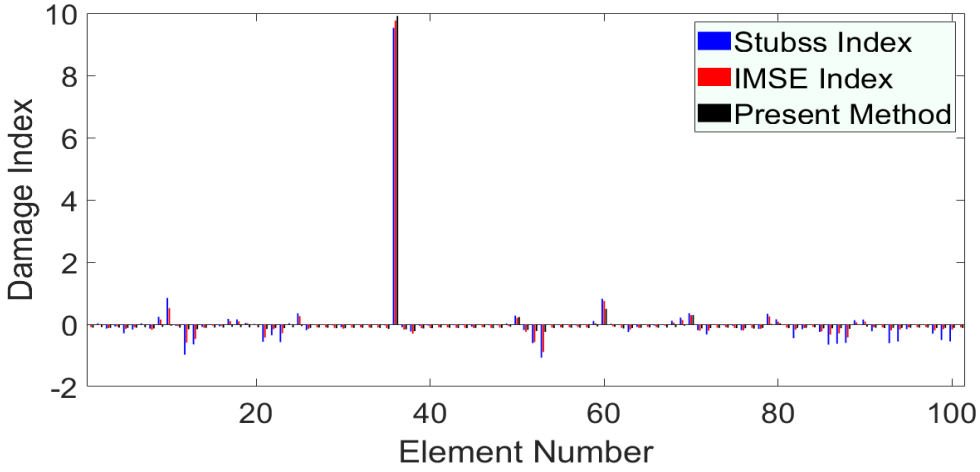


شکل ۲- تعیین مکان آسیب با استفاده از شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین در حالت اول

Fig. 2- Damage localization using the Stubbs index, the improved method, and the novel method in the first case

در حالت دوم، ۴۰ درصد آسیب به عضو شماره ۳۶ وارد شده است. این حالت، نشان دهنده دقت و توانایی روش انرژی کرنش مودال برای تشخیص آسیب‌های با شدت زیاد است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، روش انرژی کرنشی مودال به طور کلی از دقت خوبی برای شناسایی مکان آسیب در پل دسترسی برخوردار است. همچنین میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان

آسیب برای شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۱/۹۵ ٪، ۱/۶۳ ٪ و ۱/۲ ٪ است.

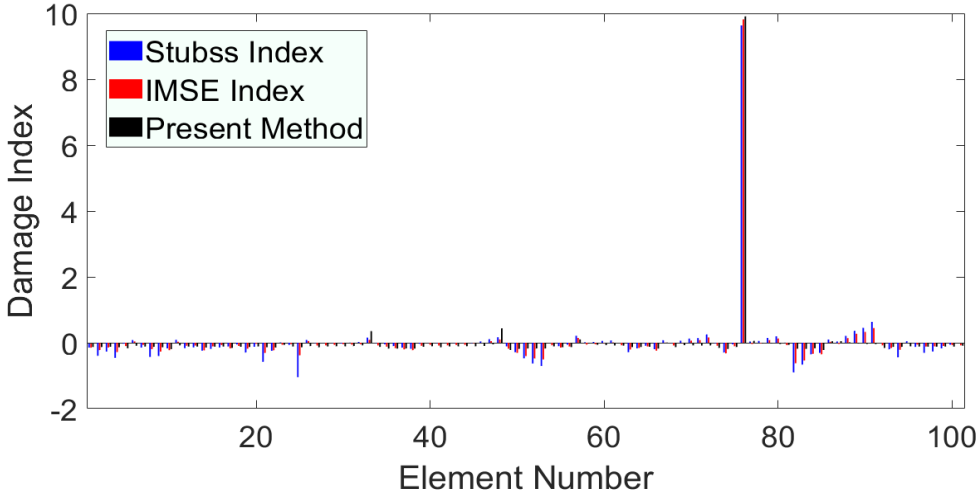


شکل ۳- تعیین مکان آسیب با استفاده از شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین در حالت دوم

Fig. 3- Damage localization using the Stubbs index, the improved method, and the novel method in the second case

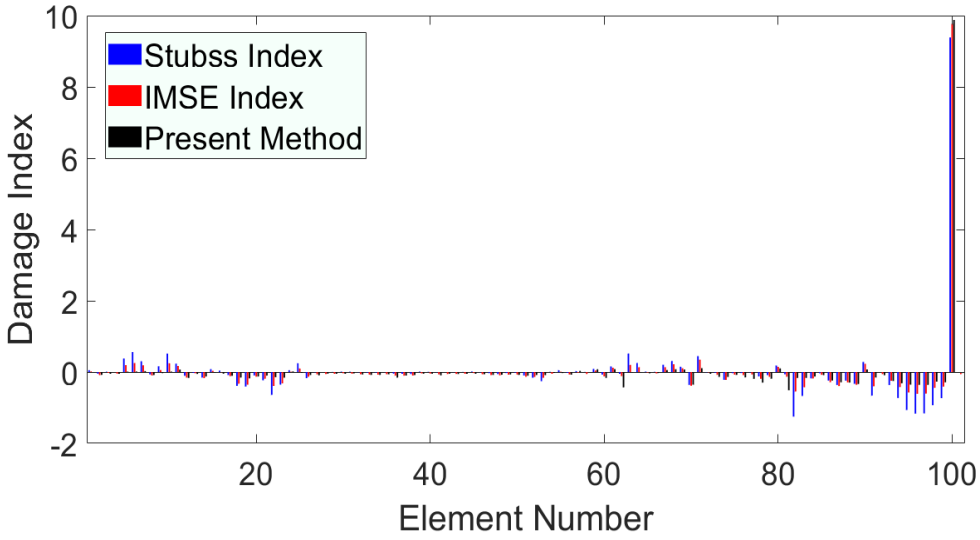
در حالت سوم، فرض می‌شود که عضو شماره ۷۶ به‌میزان ۱۰ درصد دچار آسیب شده است. نمودار محل آسیب در شکل ۱۴ و نمودار شدت آسیب در شکل ۱۵ ترسیم گردیده است. شکل (۴) نشان‌دهنده دقت بیشتر روش نوین نسبت به سایر روش‌ها در تشخیص مکان آسیب می‌باشد. همچنین میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب برای شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۲/۹۲ ٪ ، ۲/۰۸ ٪ و ۱/۰۷ ٪ است.

در حالت چهارم، به عضو شماره ۱۰۰، ۱۰ درصد آسیب اعمال شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، استفاده از روش نوین منجر به بهبود دقت در تشخیص مکان آسیب گردیده است. همچنین میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب برای شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۲/۱۳ ٪، ۱/۵۹ ٪ و ۱/۱۶ ٪ است.



شکل ٤- تعیین مکان آسیب با استفاده از شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین در حالت سوم

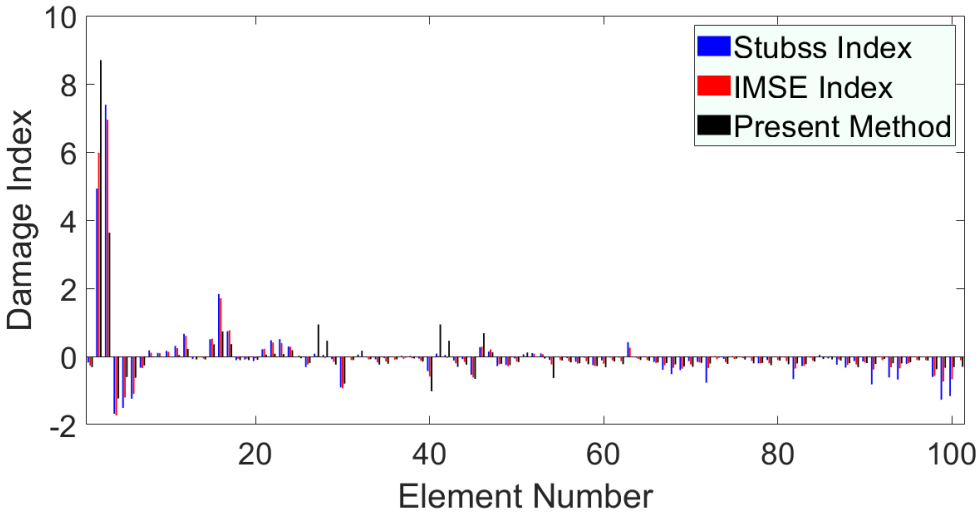
Fig. 4- Damage localization using the Stubbs index, the improved method, and the novel method in the third case



شکل ۵- تعیین مکان آسیب با استفاده از شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین در حالت چهارم

Fig. 5- Damage localization using the Stubbs index, the improved method, and the novel method in the fourth case

در حالت پنجم، اعضای شماره ۲ و ۳ به‌ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۰ درصد دچار آسیب شده‌اند. نتایج شاخص آسیب در شکل (۶) نشان می‌دهد که روش انرژی کرنشی مودال با دقت مناسبی قادر به پیش‌بینی محل آسیب‌های چندگانه بوده و استفاده از روش نوین منجر به بهبود نتایج مکان‌یابی آسیب شده است. همچنین میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب برای شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۵/۷۳ ٪، ۴/۵۸ ٪ و ۴/۱۰ ٪ است.



شکل ٦- تعیین مکان آسیب با استفاده از شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین در حالت پنجم

Fig. 6 – Damage localization using the Stubbs index, the improved method, and the novel method in the fifth case

٤- بحث و نتیجه‌گیری

با سپری شدن عمر سرویس سازه‌های دریایی، نیاز به پایش سلامت آن‌ها به منظور شناسایی مکان آسیب در زیر سازه‌ها احساس می‌شود. پل ارتباطی بین سکوهای دریایی با توجه به اینکه محل عبور پرسنل و همچنین خطوط لوله می‌باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. با این وجود در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال که یکی از مناسب‌ترین روش‌های شناسایی غیر مخرب آسیب در سازه‌ها است، به شناسایی آسیب‌های تکی و چندگانه در پل ارتباطی موجود در یک سکوی دریایی پرداخته شد و نتایج سه روش شاخص Stubbs، روش انرژی کرنشی مودال بهبود یافته و روش نوین ارائه شده توسط نگارندگان با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین سعی شد حالت‌های مختلف آسیب، اعضایی را شامل شود که خرابی آن‌ها سبب خسارات بیشتری می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از این مقاله عبارت است از:

- با توجه به اینکه میانگین خطا برای دقت شناسایی مکان آسیب به‌طور متوسط در شاخص Stubbs، روش بهبود یافته و روش نوین به‌ترتیب ۳,۵۵، ۲,۸۲ و ۲,۲۱ درصد است، بنابراین روش نوین با دقت بیشتری قادر به شناسایی مکان آسیب‌های موجود در سازه می‌باشد.
- مقایسه نتایج حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که میانگین خطای مکان‌یابی آسیب با افزایش شدت آسیب، کاهش می‌یابد.
- در مورد آسیب‌های جزئی و کوچک که در مراحل ابتدایی شکل‌گیری و رشد هستند، همچنین آسیب‌های بزرگ و با شدت زیاد که توسعه یافته‌اند، روش نوین با توانایی بالایی قادر به شناسایی مکان آسیب است.
- دقت مکان‌یابی آسیب با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال در اعضای افقی نسبت به اعضای مهاری بیشتر است.
- دقت این روش برای اعضایی که در یک سطح افقی قرار دارند، بیشتر از اعضایی است که اعضای بالا و پایین را به‌هم متصل می‌کنند.
- دقت شناسایی مکان آسیب با دور شدن از تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد.
- روش نوین با دقت بالاتری، مکان آسیب را در سازه شناسایی نموده و استفاده از این روش به‌جای روش‌های شاخص Stubbs و انرژی کرنشی مودال بهبود یافته توصیه می‌گردد.

References:

Cawley, P. and Adams, R. D., 1979. The location of defects in structures from measurement of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14, pp. 49-57. DOI:10.1243/03093247V142049.

Ding, Y., Xiao, F., Zhu, W. and Xia, T. 2019. Structural health monitoring of the scaffolding dismantling process of a long-span steel box girder viaduct based on BOTDA technology. *Advances in Civil Engineering*, 2019, pp. 1-8. DOI:10.1155/2019/5942717.

Doebling, S.W., Hemez, F., Barlow, M., Peterson, L. and Farhat C. 1993. Selection of experimental modal data sets for damage detection via model update. *In 34th Structures. Structural Dynamics and Materials Conference*. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993ssdm.conf.1506D/abstract.

Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. and Shevitz, D. W. 1995. A summary review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties. *Journal of Shock Vibration*, 30. pp. 91-105. https://www.researchgate.net/publication/243767264_A_Review_of_Damage_Identification_Methods_that_Examine_Changes_in_Dynamic_Properties.

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*. DOI:10.2172/249299.

Farrar, C. R. and Jauregui, D. A. 1998. Comparative study of damage identification algorithms applied to a brdige: II. Numerical study. *Smart Materials and Structures*, 7, pp. 720-731. DOI: 10.1088/0964-1726/7/5/014.

Ge, M. and Lui, E. M. 2005. Structural damage identification using system dynamic properties. *Computers & Structures*, 83, pp. 2185-2196. DOI:10.1016/j.compstruc.2005.05.002.

Hansen, S. R. and Vanderplaats, G. N. 1990. Approximation method for configuration optimization of trusses. *AIAAJ*, 28, pp. 161-168. DOI:10.2514/3.10367.

Kim, J. T. and Stubbs, N. 1995. Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 5, pp. 58-66. https://www.researchgate.n

et/publication/241782906_Damage_Detection_In_Offshore_Jacket_Structures_From_Limited_Modal_Information.

Kim, J. T. and Stubbs, N. 2002. Improved damage identification method based on modal information. *Journal of Sound and Vibration*, 252, pp. 223-238. https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3749.

Li, Y., Wang, S., Zhang, M. and Zheng, C. 2016. An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures. *Journal of Marine Science and Application*. 15, pp. 182-192. DOI:10.1007/s11804-016-1350-1.

Liu, F., Li, H., and Wang, B. 2014. Experimental study of improved modal strain energy method for damage localization in jacket-type offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 72, pp. 174-181. DOI:10.1016/j.renene.2014.07.007.

Seyedpoor, S. M. and Yazdanpanah, O. 2014. An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data. *Applied Mathematical Modeling*, 38, pp. 2661-2672. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13007403.

Shahrivar, F. and Bouwkamp, G. 1986. Damage detection in offshore platforms using vibration information. *Journal of Energy Resources Technology*, 108, pp. 97-106. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.09.014

Wu, X., Xia, J., and Zhu, X. 2019. Finding damage localizations of a planar truss using modal strain energy change. *Advances in Civil Engineering*, 2019, pp. 1-13. DOI:10.1155/2019/3040682.

Xu, M., Wang, S., and Jiang, Y. 2018. Iterative two-stage approach for identifying structural damage by combining the modal strain energy decomposition method with the multi objective particle swarm optimization algorithm. *Structural Control Health Monitoring*, 26. pp. 1-14. DOI:10.1002/stc.2301.