Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 2) (2021) 317-320
DOI: 10.22060/mej.2020.17014.6500

Experimental and Numerical Looseness Detection and Assessment in Flanged Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method

S. M. Yadavar Nikravesh* , M. Goudarzi

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Flanged joints' looseness is among the common causes for the failure of industrial structures with flanged joints the timely detection of which can prevent the imposition of heavy financial losses and in some cases injuries. There are conventional methods for detecting this fault and each of them has its drawbacks. For instance, torque control methods have a high error of measurement, impedance-based measurement methods; have high expenses, and vibration or ultrasonic methods lack accuracy due to the use of linear phenomena in fault detection. Vibro-Acoustic modulation method is one of the nonlinear fault detection methods that can detect and assess looseness of flanged joints with high precision through the measurement of the intensity of the vibrational and ultrasonic signals modulation applied to the structure. This paper was an attempt to investigate the efficiency of the Vibro-Acoustic modulation method in the detection and evaluation of flanged joints numerically and experimentally. For this, a laboratory sample composed of two pipes connected with flanged joints is employed. It is revealed that this method can detect bolt looseness with 12.5% precision. Besides, the effect of parameters such as ultrasonic and vibrational frequency, the amplitude of applied torque, sensors and actuators position, as well as excessive increase of torque have been examined and the method precision in the studied structure has been estimated.

Review History:

Received: Sep. 10, 2019
Revised: Nov. 21, 2019
Accepted: Dec. 29, 2019
Available Online: Jan. 04, 2020

Keywords:

Structural Health Monitoring
Smart Structures
Non-Destructive Test
Vibro-Acoustic Modulation
Bolted Joints

1. INTRODUCTION

According to the published articles in recent years, VAM method has often been used in the detection of defects such as cracks, delamination, and defects stemming from erosion, decay, or impact [1-4].

In this paper, the efficiency of VAM method in the diagnosis and evaluation of loose bolts are investigated numerically and experimentally.

2. METHODOLOGY

The flanged joint of the two pipes connected with eight M16 bolts and nuts to each other are modeled in ABAQUS according to the specifications of the laboratory sample, and the location and intensity of the loose bolt are detected by this method. Besides, the effect of parameters such as the frequency of ultrasonic and vibrational excitation, the location of the sensor and actuator, the intensity of torque applied to the bolts, excessive increase of torque increase, and method precision on the structure are estimated. The laboratory sample comprised of two pipes with 5 mm thickness, 250 mm diameter, and 1200 mm length connected with two flat flanges, eight bolts, and nuts to each other. A one-Hertz DC electric motor is used to create a mechanical to the structure by 3-blades with 250mm diameter. Given the sensitivity analysis of the parameters affecting the performance of VAM method requires that the vibrational frequency change, a DC driver has also been employed through which 0.5-1.5 Hz vibration frequencies can be applied. The sensors and actuators connected to the setup were of the PZT piezoelectric type. The piezoelectric elements, with the help of silver adhesive, are located on the sides of the flange and correctly between the bolts and the nuts. The upper and lower element played the role of the ultrasonic actuator and sensor respectively. According to 898-1 ISO, the torque applied to bolts and nuts in the setup bolts and nuts were regulated at the standard level by digital torque meter SK11060118. Low-frequency flaw detector acted as the sender of ultrasonic waves to the actuator and the structure subsequently. Owon-VDS2064, connected to a desktop computer, acted as the oscilloscope; additionally, it contributed to the storage of modulated signals on the computer. Afterward, these signals were processed by MATLAB.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Fig. 1, if the modulation index is plotted for different sensor-actuator locations for 50% looseness, it is quite considerably observed that the modulation index value is maximums for locations 45 and 56. This means that the loose bolt is located in location 5. In fact, as sensors and actuators are closer to the loose bolt, due to the short distance between two flange surfaces, the acoustic impedance between the two levels will cause vibrational and ultrasonic waves

*Corresponding author's email: m_yadavarnik@sbu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

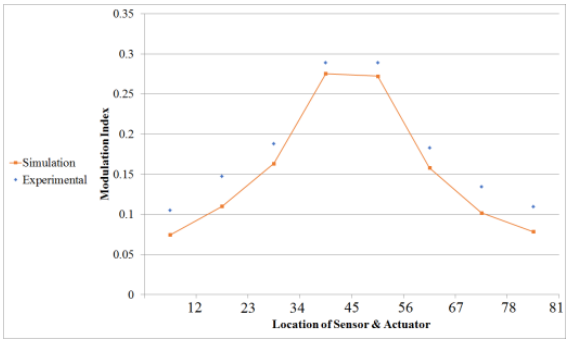

Fig. 1. Modulation index at different sensor-actuator positions at 50% looseness

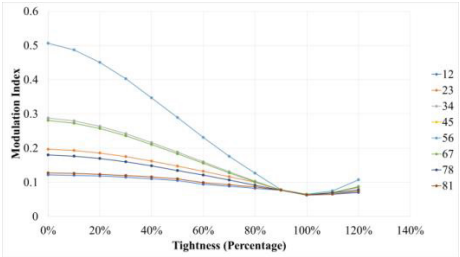

Fig. 2. The effect of excessive increase of torque on modulation indexes in different sensor-actuator locations (Experimental analysis)

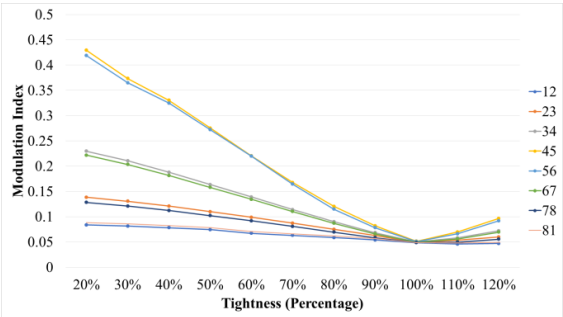

Fig. 3. The effect of excessive increase of torque on modulation indexes in different sensor-actuator locations (Numerical analysis)

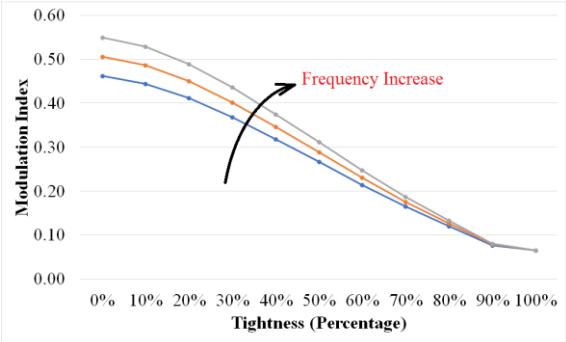

Fig.4 . The effect of the vibrational excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Experimental analysis)

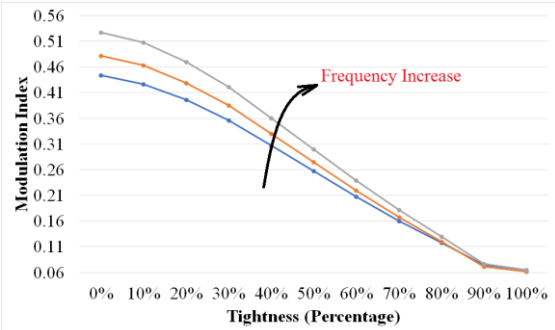

Fig. 5 The effect of the vibrational excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Numerical analysis)

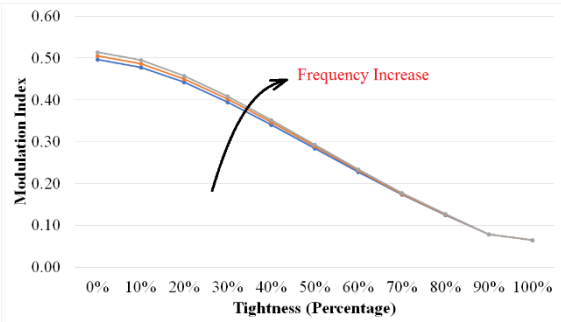

Fig. 6. The effect of ultrasonic frequency excitation on modulation indices at sensor-actuator location 45 (Experimental analysis)

passing the modulated surface, and the calculated modulation index value increases. Another point worth mentioning is the difference between the values obtained from the experimental and the numerical analyses. In general, all values obtained from numerical simulations are lower than those obtained from empirical experiments due to the nonlinearity of the actual samples used in the experiments. In other words, surface smoothness, support conditions, etc., are assumed to be ideal in the modulation of numerical analysis, whereas in the actual case, these parameters were not ideal and these differences led to an increase in the nonlinear wave behavior when passing through the flanged surfaces that is reflected in the form of signal modulation.

Another point to bear in mind is that increasing the applied torque does not always decrease the modulation index value. As shown in Figs. 2 and 3, excessive applied torque has had a negative effect leading to an increase in the modulation index value. In fact, when excessive torque is imposed on the bolt, the stress field is formed around the bolt which causes nonlinear behavior of the wave passing through the field due to the acoustoelastic effect. This behavior will be illustrated in the form of modulation.

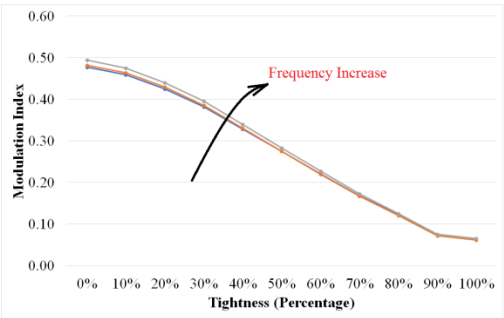

Fig. 7. The effect of ultrasonic frequency excitation on modulation indices at sensor-actuator location 45 (Numerical analysis)

As shown in Figs. 4 and 5, as vibration frequency increases, the index value for different looseness will also generally increase. In addition, the effect of increasing the vibrational excitation frequency is greater, and the modulation index value will have a greater increase when the bolt looseness intensity is higher. As shown in Figs. 6 and 7, the overall behavior of the indices in relation to the fluctuations of the ultrasonic frequency is the same as their behavior against the vibrational excitation frequency fluctuations. Compared to the sensitivity analysis of the vibration excitation frequency, this sensitivity analysis reveals that ultrasonic frequency fluctuations have a much smaller effect on the modulation index than vibrational excitation frequency fluctuations.

4. CONCLUSION

Compared to other looseness detection methods, Vibro-Acoustic vibration method is capable of having higher precision while being simple in implementation. It enables the supervisors to easily design and implement online condition monitoring of flanged joints. This paper investigates the detection and looseness of flanged joints numerically and experimentally. Based on the results, this method competent in looseness detection, intensity, and position in flanged joints. The results of experimental tests confirm that the VAM method is capable of detecting up to 12.5% of looseness. The closer the position of the sensor and actuator used in the experiment to the loose bolt, the higher the precision of the method will be. Increasing the amplitude and frequency of vibrational excitation has a positive effect on the ability of the method to detect and evaluate bolt looseness; consequently, the method will be more precise if there are unknown sources of vibration in the system. Although increasing ultrasonic frequency leads to a rise in the modulation index value at different looseness intensities, this effect is very slight and negligible. Increasing the torque applied to the bolt will decrease the acoustic impedance and the modulation index. However, excessive torque will, by itself, cause modulation and an increase of the index value due to the acoustoelastic effect.

REFERENCES

[1] S.M.Y. Nikravesh, Goudarzi M., Looseness Detection and Assessment of Flange Type Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method, Amirkabir Journal of Mechanical, (2019).

[2] D. Broda, W. Staszewski, A. Martowicz, T. Uhl, V. Silberschmidt, Modelling of nonlinear crack–wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review, Journal of Sound and Vibration, 333(4) (2014) 1097-1118.

[3] N.C. Yoder, D.E. Adams, Vibro-acoustic modulation utilizing a swept probing signal for robust crack detection, Structural Health Monitoring, 9(3) (2010) 257-267.

[4] S.M.Y. Nikravesh, M. Goudarzi, A review paper on looseness detection methods in bolted structures, Latin American Journal of Solids and Structures, 14(12) (2017) 2153-2176.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S.M. Yadavar Nikravesh, M. Goudarzi, Experimental and Numerical Looseness Detection and Assessment in Flanged Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 2) (2021) 317-320.

DOI: 10.22060/mej.2020.17014.6500

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۲ ، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۳۳۱ تا ۱۳۴۴
DOI: 10.22060/mej.2020.16853.6456

تشخیص تجربی و عددی شل‌شدگی اتصالات پیچی فلنجی به کمک روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

سید مجید یاداور نیک‌روش*، مسعود گودرزی

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: پیچ‌ها اتصالاتی موقتی و پرکاربرد هستند که اگرچه به واسطه ویژگی‌های مثبت فراوان، در اغلب سازه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما به واسطه ماهیت عملکردی‌شان همواره در معرض خرابی و متعاقباً، آسیب‌رسانی به سازه یا تجهیز می‌باشند. از علل رایج خرابی سازه‌های صنعتی دارای اتصالات پیچی، شل‌شدگی پیچ‌ها می‌باشد که تشخیص به‌موقع آن می‌تواند سبب پیشگیری از تحمیل هزینه‌های سنگین مالی و بعضاً جانی گردد. روش‌های مرسوم تشخیص این عیب، معایب مختلفی دارند، به عنوان مثال روش‌های کنترل گشتاور اغلب دارای خطای بالا بوده، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس هزینه‌هایی بالا به همراه داشته و روش‌های ارتعاشی یا اولتراسونیک نیز به واسطه استفاده از پدیده‌هایی خطی در تشخیص خرابی، از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشند. روش مدولاسیون ویبروآکوستیک یکی از روش‌هایی است که به کمک اندازه‌گیری شدت مدولاسیون سیگنال‌های ارتعاشی و اولتراسونیک اعمال‌شده به سازه، می‌تواند با دقت بسیار بالایی به تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی بپردازد. در این مقاله، با ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی یک پایه برج یک توربین بادی، کارایی روش در تحلیلی تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که این روش قادر به تشخیص وجود شل‌شدگی با دقتی ۱۲/۵ درصدی می‌باشد. علاوه بر این، تأثیر پارامترهایی همچون؛ فرکانس تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، محل قرارگیری حسگر و عملگر، شدت گشتاور اعمال‌شده به پیچ‌ها، تأثیر افزایش بیش از حد گشتاور بررسی‌شده و دقت روش در سازه‌ی مدنظر تخمین زده شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۳۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

کلمات کلیدی:
تشخیص خرابی
اتصالات پیچی
اتصالات فلنجی
تست‌های غیرمخرب
پایش وضعیت
روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

۱- مقدمه

تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی یا می‌تواند به کمک روش‌هایی سنتی همچون کنترل گشتاور صورت پذیرد؛ یا به کمک روش‌های نوینی همچون روش‌های مبتنی بر ارتعاشی، روش‌های مبتنی بر امواج اولتراسونیک، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس. معایب و مزایای هرکدام از این روش‌ها به تفکیک، در مقاله نیک‌روش و گودرزی ارائه گردیده است [۱]. دقت بالا، سهولت در نصب و راه‌اندازی، کاهش خطاهای انسانی و همچنین امکان به‌کارگیری در سیستم‌های پایش وضعیت آنلاین، از جمله مزیت‌های روش‌های نوین تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی در مقایسه با روش‌های سنتی است. لازم به ذکر است که اغلب روش‌های نوینی که بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند، مبتنی بر پایش پارامترهایی خطی بوده و در مقایسه با روش‌های غیرخطی از دقت کمتری برخوردار می‌باشند. یکی از روش‌های غیرخطی مرسوم در تشخیص و ارزیابی عیوب مختلف، روش مدولاسیون ویبروآکوستیک است که در مقاله یادآور نیک‌روش و گودرزی، در تشخیص و ارزیابی عددی شل‌شدگی اتصالات فلنجی مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. در این روش سیگنال اولتراسونیک (فرکانس بالا) و سیگنال ارتعاشی (فرکانس پایین) همزمان اتصال را تحریک کرده و در صورت وجود

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_yadavarnik@sbu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

شل‌شدگی در اتصال، سیگنال‌ها روی هم مدوله شده و در فضای فوریه خود را به صورت مؤلفه‌هایی جانبی، حول فرکانس اولتراسونیک نشان خواهند داد که با اندازه‌گیری آن می‌توان میزان شل‌شدگی را در اتصال، تخمین زد [۳-۹].

روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در سال‌های اخیر، در تشخیص و ارزیابی عیوبی مختلفی به کار برده شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مطالعات صورت‌گرفته روی تشخیص ترک در سازه‌های فلزی توسط زایتسف و همکاران [۳,۴]، دافور و همکاران [۱۰]، درینک‌واتر و همکاران [۱۱]، یودر و همکاران [۱۲]؛ تشخیص درجه ناهمگنی مواد و همچنین لایه‌لایه شدگی کامپوزیت‌ها توسط کلپکا و همکاران [۱۳]؛ تشخیص ترک‌های حاصل از لایه‌لایه‌شدگی صفحات کامپوزیتی توسط دانسکی و همکاران [۱۴]؛ تشخیص عیوب حاصل از ضربه در صفحات کامپوزیتی توسط کریسوکویدیس و همکاران [۱۵]؛ تشخیص ترک‌های موجود در پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی کایرال توسط کلپکا و همکاران [۱۶] و استازفسکی و همکاران [۱۷]؛ تشخیص ترک‌های حاصل از خستگی در صفحات کامپوزیتی کربن/اپوکسی توسط کریسوکویدیس و همکاران [۱۸]؛ و همچنین به تشخیص ترک توربین‌های بادی در حال کار به‌صورت آنلاین توسط آدامز و همکاران [۱۹] اشاره نمود. استفاده از روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی از موضوعاتی است که در سال‌های گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته و به جز معدود مقالاتی که کارایی روش را در تشخیص شل‌شدگی اتصالات پیچی استاتیکی ساده به اثبات رسانیدند [۲۰,۲۱]، تاکنون تحقیق دیگری در این زمینه منتشر نگردیده است. در این مقالات اغلب چنین بیان گردیده است که افزایش نیروی پیش‌بار اتصالات، همواره سبب کاهش شدت مدولاسیون در روش مدولاسیون ویبروآکوستیک خواهد شد؛ حال آنکه تحلیل‌های صورت گرفته در این مقاله، موید آن است که رابطه مقدار گشتاور اعمالی و متعاقباً نیروی پیش‌بار اتصال، با شدت مدولاسیون سیگنال‌ها رابطه‌ای خطی نخواهد داشت.

در این مقاله، با ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی پایه برج یک توربین بادی، کارایی روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در تحلیلی تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که این روش قادر به تشخیص وجود شل‌شدگی با دقتی ۱۲/۵ درصدی می‌باشد. اتصال فلنجی دو لوله که به کمک هشت پیچ و مهره به یکدیگر متصل شده‌اند، مطابق مشخصات نمونه آزمایشگاهی ساخته‌شده، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و وجود، موقعیت و شدت شل‌شدگی در اتصال به کمک این روش تشخیص داده شده است. علاوه بر این، تأثیر پارامترهایی همچون؛ فرکانس تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، محل قرارگیری حسگر و عملگر، شدت گشتاور اعمال‌شده به پیچ‌ها، تأثیر افزایش بیش از حد گشتاور بررسی‌شده و دقت روش تخمین زده شده است.

۲- روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

مکانیزم عملکرد روش مدولاسیون ویبروآکوستیک بدین صورت است که یک سیگنال ارتعاشی با فرکانس پایین و یک سیگنال اولتراسونیک با فرکانس بالا به طور هم‌زمان سیستم را تحریک می‌کنند. از آنجایی که عبور موج اولتراسونیک از سطوح تماسی هم‌زمان با ارتعاش اتصال است، دامنه موج اولتراسونیک به واسطه تغییرات ایجادشده در ویژگی‌های دینامیکی سازه دچار نوسان دامنه خواهد شد. به همین دلیل سیگنال‌های پاسخ در صورت وجود عیوب تماسی همچون شل‌شدگی اتصالات، یکدیگر را مدوله خواهند کرد. در این حالت، مؤلفه‌هایی با فاصله مضرب صحیحی از فرکانس ارتعاشی در اطراف فرکانس اولتراسونیک مشاهده خواهد شد. در حالت تئوری دامنه این مؤلفه‌ها با یکدیگر برابر است اما نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده چنین چیزی را تائید نمی‌کند. پس از دریافت سیگنال مدوله‌شده، پردازش سیگنال صورت پذیرفته و با تعریف شاخصی برای بررسی شدت مدولاسیون، مقدار شاخص برای مقادیر مختلف گشتاور اعمالی اندازه‌گیری گردیده و رابطه‌ای میان میزان شل‌شدگی اتصال و مقدار شاخص مشخص خواهد شد [۲۰-۲۲]

مزیت اصلی روش‌های مبتنی بر ظهور هارمونیک‌ها، همانند روش مدولاسیون ویبروآکوستیک و یا مدولاسیون ضربه، دقت بالای آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های اولتراسونیک می‌باشد. همان‌گونه که پیش از این بیان گردید روش‌های اولتراسونیک اغلب بر مبنای پدیده‌هایی خطی همچون انعکاس، پراکندگی و غیره هستند که در مقایسه با روش‌هایی همچون مؤلفه‌های جانبی که پایش پدیده‌هایی غیرخطی همچون مدولاسیون را مورد بررسی قرار می‌دهند، از دقت پایین‌تری برخوردار هستند. علاوه بر این در صورتی که در روش مؤلفه‌های جانبی از ارتعاشات عملکردی خود سازه به عنوان سیگنال

ارتعاشی استفاده گردد، امکان پایش وضعیت آنلاین نیز برای این روش وجود خواهد داشت. نکته قابل‌تأمل در مورد این روش این است که اگرچه از دقت بالایی برخوردار است و کارایی آن نه‌تنها در تشخیص شل‌شدگی اتصالات که در تشخیص و ارزیابی سایر عیوب سازه‌ها به اثبات رسیده است، هنوز علت کامل و جامعی برای بروز مدولاسیون ارائه نگردیده است [۲۳,۲۴]. لازم به ذکر است که نویسندگان این مقاله، در مقاله‌ای دیگر، مقایسه‌ای کامل و جامع میان روش‌های مختلف پایش وضعیت اتصالات پیچی انجام داده‌اند که در آن معایب و مزایای هرکدام به تفصیل بیان گردیده است [۱].

۳- تشریح ست‌آپ آزمایشگاهی و فرآیند انجام آزمایش‌ها

همان‌گونه که در شکل ۱ قابل‌مشاهده است، نمونه آزمایشگاهی ساخته‌شده متشکل از دو لوله فولادی به ضخامت ۵ میلی‌متر، قطر ۲۵۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به کمک دو فلنج صاف و هشت پیچ و هشت مهره‌ای به یکدیگر متصل شده‌اند. موتور الکتریکی جریان مستقیم ۱۲ آمپر با فرکانس ۱ هرتز، برای ایجاد ارتعاش مکانیکی، مشابه توربین بادی، مورد استفاده قرار گرفته و فرکانس ارتعاشی یک هرتز را به کمک سه پره به قطر ۲۵۰ میلی‌متر، به سازه اعمال خواهد نمود (شکل ۲). با توجه به اینکه در آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر عملکرد روش مدولاسیون ویبروآکوستیک نیاز است که فرکانس ارتعاشی تغییر یابد، از یک درایور دی سی براش ۱۰ آمپر نیز استفاده گردیده است که به کمک آن بتوان فرکانس‌های ارتعاشی نیم تا یک و نیم هرتز را اعمال نمود (شکل ۲).

حسگرها و عملگرهای متصل به ست‌آپ از نوع پیزوالکتریک با بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوهرتز بوده و همان‌گونه که در شکل ۳ نیز مشخص است، المان‌های پیزوالکتریک به کمک چسب نقره، روی طرفین اتصال فلنجی و درست بین پیچ‌ها و مهره‌ها قرار گرفته و المان بالایی نقش عملگر اولتراسونیک و المان پایینی نقش حسگر را ایفا می‌نمایند. البته لازم به ذکر است که مطابق اطلاعات در دسترس در مورد این المان‌های پیزوالکتریک، این پیزوالکتریک‌ها در فرکانس‌های ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز نیز می‌توانند مورداستفاده قرار گیرند، اما عملکرد بهینه‌ی آن بین فرکانس‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوهرتز می‌باشد. گشتاور اعمال‌شده به پیچ‌ها و مهره‌های ست‌آپ به

Fig. 1. An overview of the laboratory sample
شکل۱: شمای کلی نمونه آزمایشگاهی ساخته شده

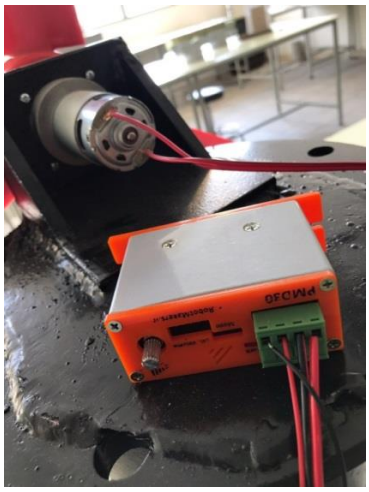

Fig. 2. Electric motor and driver used to apply vibratory force
شکل ۲: موتور الکتریکی و درایور استفاده شده برای اعمال نیروی ارتعاشی

Fig. 3. Sensors and actuators connection on the flange
شکل۳: نحوه اتصال حسگرها و عملگرها روی فلنج

کمک ترک‌متر دیجیتال (شکل ۴) و بر اساس استاندارد ایزو ۸۹۸-۱ روی مقدار استاندارد که در این حالت ۵۵.۱ نیوتن‌متر است تنظیم گردیده و دستگاه عیب‌یاب[1] اولتراسونیک فرکانس پایین (شکل ۵)، نقش ارسال‌کننده‌ی امواج اولتراسونیک به عملگر و متعاقباً به سازه را بر عهده دارد. دستگاه اوون[2] متصل به یک رایانه رومیزی (شکل ۶)، نقش دریافت‌کننده اطلاعات از حسگرها را داشته و به کمک آن، سیگنال مدوله‌شده در رایانه ذخیره شده و پس از آن به کمک نرم‌افزار متلب[3] موردپردازش قرار می‌گیرند.

فرآیند انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که ابتدا مطابق استاندارد در نظر گرفته شده در ایزو ۸۹۸-۱، گشتاور استاندارد به تمامی پیچ‌ها و مهره‌ها اعمال گردیده و تمامی آن‌ها در حالت کاملاً سفت (گشتاور ۵۵.۱ نیوتن متر) قرار خواهند گرفت. به منظور ایجاد شرایطی مشابه شرایط وجود پیچ شل در سازه‌ی تحت بررسی، میزان شل‌شدگی یا همان گشتاور اعمالی به پیچ شل، روی مقدار جدید تنظیم گردیده؛ موقعیت حسگر و عملگر روی مکان موردنظر ثابت شده و آزمایش انجام می‌گردد. در هر حالت، فرکانس اولتراسونیک ۱۲۰ کیلوهرتزی به کمک المان پیزوالکتریک به سازه اعمال شده و هم‌زمان سیگنال ارتعاشی از طریق عملکرد موتور الکتریکی روی فرکانس یک هرتز، سازه را تحریک می‌نماید. ترکیب سیگنال‌های عبوریافته از اتصال فلنجی نمونه آزمایشگاهی، توسط حسگر پیزوالکتریک دریافت شده و به کمک دستگاه خوانش اوون فرکانس نمونه‌برداری ۱ مگاهرتز در رایانه متصل به ست‌آپ ذخیره می‌گردد. در هر حالت، با ثابت‌نگه‌داشتن کلیه پارامترهای کلیدی آزمایش، ده مرتبه آزمایش انجام شده و میانگین آن‌ها به عنوان خروجی آزمایش با آن پارامترهای ثابت، در نظر گرفته شده و بدین صورت، اثرات محیطی روی نتایج آزمایش به حداقل رسانده شده است. از ده سیگنال زمانی دریافت‌شده به کمک نرم‌افزار متلب، تبدیل فوریه گرفته شده و شاخص مدولاسیون برای هر یک از تبدیل‌های فوریه محاسبه گردیده و در نهایت از هر ده شاخص، میانگین‌گیری صورت گرفته و مقدار آن به عنوان شاخص مدولاسیون آن شرایط آزمایشی، ثبت می‌گردد.

بعد از ثبت مقدار شاخص مدولاسیون برای آزمایش، محل قرارگیری حسگر و عملگر تغییر یافته و روی موقعیت جدید تنظیم می‌گردد.

Fig. 4. Digital torque meter SK11060118

شکل ۴: ترک‌متر دیجیتال مدل SK11060118

Fig. 5. Low frequency ultrasonic troubleshooter (flaw detector)

شکل ۵: دستگاه عیب‌یاب اولتراسونیک فرکانس پایین

Fig. 6. Owon VDS-2064

شکل ۶: دستگاه Owon-VDS2064

1 Flaw Detector
2 Owon-VDS2064
3 MATLAB

جدول ۱: پارامترهای درنظرگرفته‌شده در تحلیل‌های عددی و تجربی

Table 1. Parameters considered in numerical and experimental Analyzes

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر لوله‌های برج	۲۵۰ میلی‌متر	فرکانس اولتراسونیک	۱۲۰ کیلوهرتز
جنس لوله‌ها	فولاد	فرکانس ارتعاشی ناشی از عملکرد توربین	۱ هرتز
ضخامت فلنج	۲۰ میلی‌متر	گشتاور استاندارد اعمالی به پیچ	۵۵.۱ نیوتن متر
تعداد پیچ‌ها و مهره‌ها	۸	نوع استاندارد به کار رفته	ایزو ۸۹۸-۱
جنس پیچ‌ها و مهره‌ها	فولاد	دستگاه خوانش داده‌های حسگرها	Owon-VDS2064
نوع پیچ	ام ۱۶	ترک‌متر دیجیتال	مدل SK۱۱۰۶۰۱۱۸
جنس المان‌های پیزوالکتریک	PZT	درایور تنظیم دور موتور	درایور DC براش ۱۰ آمپر

در این حالت نیز ابتدا ده سیگنال زمانی در رایانه ذخیره گردیده، ده تبدیل فوریه از این سیگنال‌های زمانی دریافت شده، استخراج گردیده؛ از هر تبدیل فوریه، همانند قبل، ده شاخص مدولاسیون به دست آورده و دست آخر از تمامی آن‌ها، میانگین‌گیری کرده و مقدار آن به عنوان شاخص مدولاسیون جدید برای آزمایش جدید، ثبت می‌گردد. همین فرآیند برای تمامی موقعیت‌های حسگرها و عملگرها صورت گرفته و در واقع برای هر مقدار گشتاور اعمالی، هشتاد آزمایش انجام شده و در نتیجه‌ی آن، هشت شاخص مدولاسیون محاسبه و ثبت می‌گردد.

بعد از انجام آزمایش در تمام موقعیت‌های ممکن برای قرارگیری حسگرها و عملگرها، لازم است که میزان شل‌شدگی یا همان گشتاور اعمالی به پیچ شل روی مقدار جدید تنظیم شده و تمامی مراحل فوق مجدداً تکرار گردد. در واقع پس از تنظیم مقدار گشتاور اعمالی، موقعیت حسگر و عملگر ثابت شده و ده سیگنال زمانی از آزمایش دریافت شده، ده تبدیل و فوریه و در نهایت یک مقدار میانگین از ده شاخص مدولاسیون محاسبه شده، به دست می‌آید؛ سپس موقعیت جدید حسگر و عملگر باز تنظیم شده و همین فرآیند تا وقتی که برای هر هشت موقعیت، یک شاخص مدولاسیون میانگین محاسبه گردد، صورت می‌پذیرد. پس از آن، دوباره میزان شل‌شدگی پیچ شل روی مقدار جدید باز تنظیم شده و همین فرآیند برای به دست آوردن هشت شاخص مدولاسیون جدید تکرار می‌گردد.

۴- شبیه‌سازی عددی در آباکوس

مشخصات درنظرگرفته‌شده برای شبیه‌سازی اتصال فلنجی در نرم‌افزار آباکوس، مطابق داده‌هایی است که در جدول ۱ ارائه گردیده است. در واقع شرایط مرزی درنظرگرفته‌شده به صورت یکسر گیردار بوده و سطوح فلنجی نیز بدون درنظرگرفتن فاصله در شرایط کاملاً سفر، صرفاً با درنظرگرفتن ضریب اصطکاک، روی هم قرار داده شده‌اند. در مدل‌سازی صورت‌گرفته روی پیچ‌ها و مهره‌ها، به منظور ساده‌سازی، رزوه‌ها مدل نشده و اتصال المان‌های پیزوالکتریک نیز به همین دلیل، بدون درنظرگرفتن چسب نقره‌ی به‌کاررفته در نمونه‌ی آزمایشگاهی مدل شده و روی سطوح فلنج چسبانده شده‌اند. نوع مش به‌کاررفته در مدل‌سازی، مش شش‌وجهی هشت‌گره بوده است که اردر هندسی آن خطی درنظرگرفته‌شده‌است. سایز مش‌های به‌کاررفته نیز، با توجه به سرعت انتشار موج و همچنین فرکانس تحریک، یک دهم طول موج سیگنال اولتراسونیک درنظرگرفته‌شده‌است. همان‌گونه که در تشریح تئوری روش مدولاسیون ویبروآکوستیک بیان گردید، سیگنال ارتعاشی و اولتراسونیک به صورت هم‌زمان سازه را تحریک کرده و پاسخ مدوله‌شده به کمک حسگرهای پیزوالکتریک تعریف‌شده روی مدل، با فرکانس ۱ مگاهرتز نمونه‌برداری، دریافت و تحلیل می‌گردد. سیگنال اولتراسونیک به کمک عملگر پیزوالکتریکی مدل شده و سیستم را با فرکانس ۱۲۰ کیلوهرتز تحریک نموده و برای شبیه‌سازی سیگنال ارتعاشی حاصل از عملکرد موتور، از یک نیروی هارمونیک

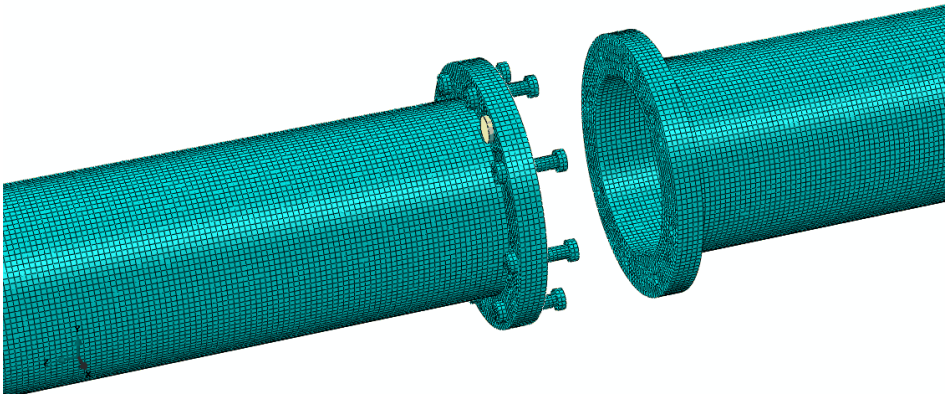

Fig. 7. Flange joint simulated in ABAQUS software and location of sensor and actuator

شکل ۷: اتصال فلنجی شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس و محل قرارگیری حسگر و عملگر

با فرکانس یک هرتز استفاده شده است که به یک نقطه[1] واقع در مرکز دایره‌ی بالای مدل وارد شده است. برای شبیه‌سازی گشتاور اعمال‌شده به هر پیچ، بجای اعمال گشتاور، به جهت ساده‌سازی، نیروی محوری آن به صورت نیروی فشاری یکنواخت اعمال شده است. برای تعیین مقدار نیروی فشاری به ازای هر گشتاور، از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود [۱]:

$$T = KPD \tag{۱}$$

که در این رابطه T گشتاور اعمالی بر حسب نیوتن متر، D قطر اسمی پیچ بر حسب متر، P نیروی فشاری برحسب نیوتن و K ضریب گشتاور (بی‌بعد) می‌باشد. مقدار ضریب گشتاور به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها اصطکاک بین سطوح است. مقدار ضریب گشتاور بین ۰/۱ برای اتصال روان‌کاری‌شده، تا ۰/۳ برای اتصال کثیف و زنگ‌زده متغیر می‌باشد؛ که در این مقاله از مقدار ۰/۲ استفاده شده است.

زمانی که سیگنال مدوله‌شده دریافت می‌شود، از آن‌ها تبدیل فوریه گرفته شده و شاخصی تحت عنوان شاخص مدولاسیون که مطابق رابطه ۲ تعریف گردیده، برای آن‌ها محاسبه می‌گردد:

$$LI = \frac{A^{+} + A^{-}}{2A} \tag{۲}$$

که در این رابطه LI شاخص مدولاسیون، A^{+} دامنه اولین مؤلفه جانبی سمت راست فرکانس اولتراسونیک و A^{-} دامنه اولین مؤلفه جانبی سمت چپ فرکانس اولتراسونیک و A نیز دامنه فرکانس

1 Node

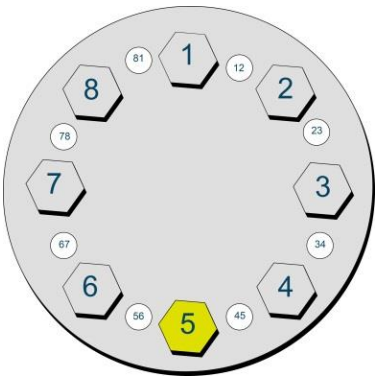

Fig. 8. The loose bolt position in numerical and experimental analysis

شکل ۸: موقعیت پیچ شل‌شده، در تحلیل‌های عددی و تجربی.

اولتراسونیک می‌باشد[۲]. مطابق این رابطه، هرچه شل‌شدگی اتصال کمتر باشد، مقدار شاخص نیز-که می‌بایست مقداری بین صفر و یک داشته باشد- بیشتر به سمت صفر میل خواهد کرد.

۵- تحلیل نتایج

همان‌گونه که پیش از این بیان گردید، برای رسیدن به نتایج شبیه‌سازی، مطابق فرآیندی که بیان شد، برای هشت موقعیت مختلف حسگر- عملگر و یازده میزان مختلف شل‌شدگی پیچ شماره‌ی ۵، شبیه‌سازی انجام شده (شکل ۸) و در نهایت ۸۸ شاخص شل‌شدگی محاسبه گردیده است. برای انجام آزمایش‌ها نیز- از آنجایی که برای رسیدن به پاسخ‌هایی با دقت بالاتر برای محاسبه از شاخص مدولاسیون، ده بار آزمایش گرفته شده و میانگین آن محاسبه گردیده است- مجموعا ۸۸۰ آزمایش برای رسیدن به ۸۸ شاخص مدولاسیون انجام پذیرفته است که نتایج تمامی آن‌ها در ادامه بیان خواهد شد.

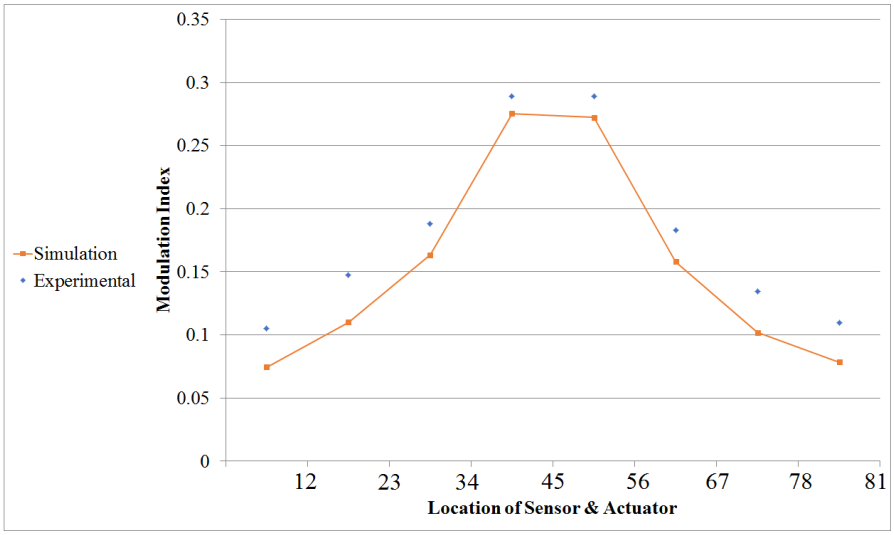

Fig. 9. Modulation index in different sensor-actuator positions at %50 looseness

شکل ۹: شاخص مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر در حالت پنجاه درصد شل‌شدگی

همان‌گونه که در شکل ۹ نیز قابل مشاهده است، در صورتی که شاخص مدولاسیون برای موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر در حالت ۵۰ درصد شل‌شدگی ترسیم گردد، کاملاً قابل‌مشاهده است که مقدار شاخص مدولاسیون برای موقعیت‌های ۴۵ و ۵۶ ماکزیمم بوده و این به معنای آن است که پیچ شل، در موقعیت شماره ۵ قرار دارد. در واقع هرچه موقعیت حسگر و عملگر، به پیچ شل نزدیک‌تر باشد، به واسطه وجود شل‌شدگی و فاصله‌ی اندکی که میان دو سطح فلنج ایجاد شده است، امپدانس آکوستیکی موجود میان دو سطح سبب خواهد شد که امواج ارتعاشی و اولتراسونیک هنگام عبور از سطح دچار مدولاسیون شده و مقدار شاخص مدولاسیون محاسبه‌شده برای آن‌ها بالاتر رود. نکته‌ی دیگری که از شکل به‌دست‌آمده قابل‌نتیجه‌گیری است، اختلاف میان مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی است. در حالت کلی قابل‌مشاهده است که تمامی مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی، کمتر از مقادیر مشابه به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی می‌باشند که این به دلیل وجود عوامل غیرخطی‌ساز در نمونه‌های واقعی به‌کاررفته در آزمایش‌ها است. به عبارت دیگر در مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته در تحلیل عددی، صافی سطوح، شرایط تکیه‌گاهی و غیره به صورت ایده آل فرض گردیده‌اند، حال آن که در حالت واقعی این پارامترها ایده آل نبوده و زبری سطوح فلنج‌ها، سبب می‌گردد که میزان امپدانس آکوستیکی بین سطوح در تحلیل‌های تجربی و عددی متفاوت باشد.

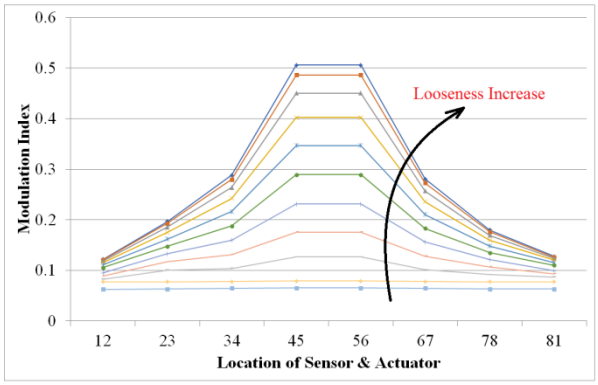

Fig. 10.Comparison of modulation indices in different sensor-actuator locations at different looseness percentages (Experimental analysis)

شکل ۱۰: مقایسه شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر، در درصد شل‌شدگی‌های مختلف (تحلیل تجربی)

این اختلاف مقادیر امپدانس آکوستیکی در محل تماس دو فلنج، سبب افزایش رفتار غیرخطی موج هنگام عبور از اتصال گردیده که این رفتار غیرخطی، خود را در فضای فوریه به صورت مدولاسیون سیگنال‌ها نشان خواهد داد.

همان‌گونه که مشخص است در تمامی درصدهای مختلف شل‌شدگی، روش مدولاسیون ویبروآکوستیک به خوبی قادر به تشخیص وجود شل‌شدگی بوده و اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و تجربی نیز، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل‌مشاهده است. نکته‌ی دیگری که از بررسی این نمودارها می‌توان برداشت کرد این است در موقعیت‌های دورتر از پیچ شماره پنج یا همان پیچ شل، اثر

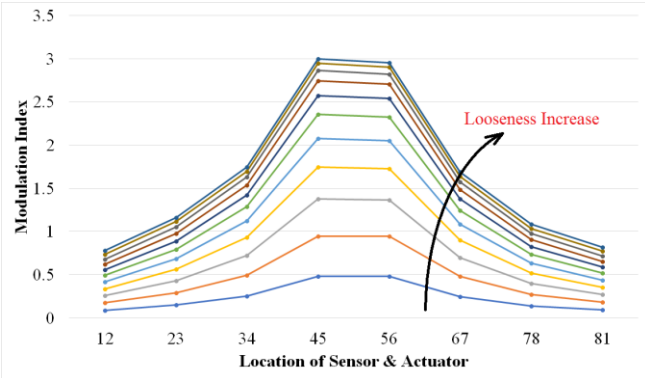

Fig. 11 .Comparison of modulation indices in different sensor-actuator locations at different looseness percentages (Numerical analysis)

شکل ۱۱: مقایسه شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر-عملگر، در درصد شل‌شدگی‌های مختلف (تحلیل عددی)

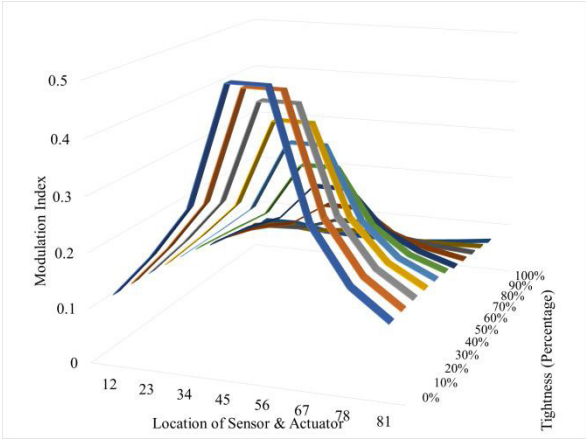

Fig. 12 .Comparison of modulation indices in different sensor-actuator locations at different looseness percentages (Experimental analysis)

شکل ۱۲: مقایسه شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر-عملگر، در درصد شل‌شدگی‌های مختلف (تحلیل تجربی)

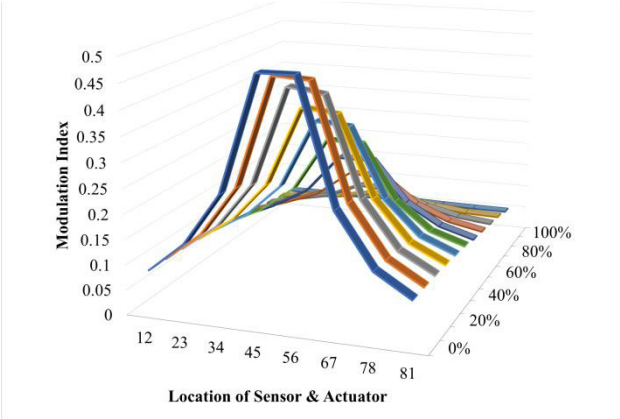

Fig. 13 .Comparison of modulation indices in different sensor-actuator locations at different looseness percentages (Numerical analysis)

شکل ۱۳: مقایسه شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر-عملگر، در درصد شل‌شدگی‌های مختلف (تحلیل عددی)

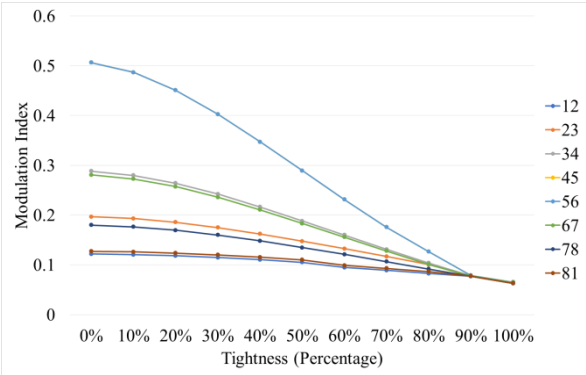

Fig. 14 .An investigation of the effect of looseness intensity on modulation indices at different sensor-actuator locations (Experimental Analysis)

شکل ۱۴: بررسی تأثیر شدت شل‌شدگی روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر (تحلیل تجربی)

افزایش گشتاور اعمال‌شده به پیچ و متناسب با آن، کاهش میزان امپدانس آکوستیکی سطوح فلنج در نزدیکی پیچ شل، کمتر خواهد بود.

ترسیم نمودارهای بالا به صورت سه‌بعدی، همان‌گونه که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل‌ملاحظه است، موید آن است که هر چه میزان گشتاور اعمال‌شده به پیچ شماره پنج افزایش یافته و به سمت مقدار استاندارد خود میل کند، اختلاف مقادیر شاخص در موقعیت‌های مختلف نیز کمتر خواهد شد.

حال در صورتی که مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقادیر مذکور از نمای XZ مشاهده شده و تمامی مقادیر به صورت دو بعدی ترسیم گردند، تأثیر افزایش گشتاور اعمال‌شده به پیچ شل و متناسب با آن نیروی محوری موجود در اتصال قابل‌مشاهده خواهد بود. واضح است که هر چه مقدار شل‌شدگی پیچ شماره پنج کمتر شود، امپدانس آکوستیکی سطح و متناسب با آن، مقدار شاخص مدولاسیون کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، متناظر با افزایش مقدار گشتاور اعمالی، اختلاف مقادیر شاخص‌های مدولاسیون محاسبه‌شده در موقعیت‌های

مختلف نیز کمتر خواهد شد. لازم به ذکر است که در شکل‌های نشان‌داده‌شده، هم‌رفتاربودن دو به دوی نمودارها به دلیل تقارن موجود در موقعیت حسگرها و عملگرها در سازه می‌باشد.

نکته‌ای دیگر که باید بدان توجه داشت این است که افزایش گشتاور اعمال‌شده، همواره سبب کاهش مقدار شاخص مدولاسیون نشده و همان‌گونه که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نیز قابل‌مشاهده است، اثر عکس داشته و سبب افزایش مقدار شاخص مدولاسیون خواهد شد. در واقع زمانی که گشتاوری بیش از حد استاندارد به پیچ اعمال می‌گردد، میدان تنشی حوالی پیچ شل ایجاد می‌شود که به واسطه اثر آکوستوالاستیک، سبب بروز رفتار غیرخطی از موج در حال عبور از این میدان خواهد شد که این رفتار، در فضای فوریه، خود را به صورت مدولاسیون امواج نشان خواهد داد. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی عددی صورت‌گرفته، همان‌گونه که پیش از این بیان گردیده است، گشتاور اعمالی به پیچ به کمک رابطه ۱ به نیروی محوری تبدیل شده و نیروی محوری به طرفین پیچ مدل شده در نرم‌افزار آباکوس اعمال گردیده است.

نکته قابل‌تأمل دیگر در مورد استفاده از روش مدولاسیون ویبروآکوستیک این است که دقت این روش چقدر بوده و با استفاده از آن، تا چند درصد شل‌شدگی را می‌توان تشخیص داد. بررسی مقادیر مختلف شاخص مدولاسیون در تحلیل‌های تجربی صورت‌گرفته روی سازه‌ی ساخته‌شده در این مقاله موید این قاعده کلی است که هرگاه مقدار شاخص مدولاسیون بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، حتماً یک پیچ شل در آن سازه وجود خواهد داشت. حال این مقدار ممکن است به عنوان مثال مربوط به دورترین موقعیت (حسگر-عملگر) از پیچی با پنجاه درصد شل‌شدگی باشد؛ یا ممکن است مربوط به نزدیک‌ترین موقعیت به پیچی با ۱۲/۵ درصد شل‌شدگی باشد. در واقع چنین می‌توان گفت که با انجام تنها یک تست و مشاهده تنها یک مقدار بالاتر از ۰/۱، تنها چیزی که با قطعیت می‌توان در مورد آن سازه گفت این است که حداقل یک پیچ شل در آن سازه وجود دارد. با درنظرگرفتن چنین قاعده‌ای می‌توان گفت که مطابق جدول ۲، روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در شرایطی آزمایشگاهی مطابق آنچه که در این مقاله بیان گردیده است، قادر است که تا ۱۲/۵ درصد شل‌شدگی را در سازه تشخیص دهد. لازم به ذکر است که عدد ۱۲/۵ درصد، دقت روش مدولاسیون نبوده و این عدد میزان شل شدگی‌ای

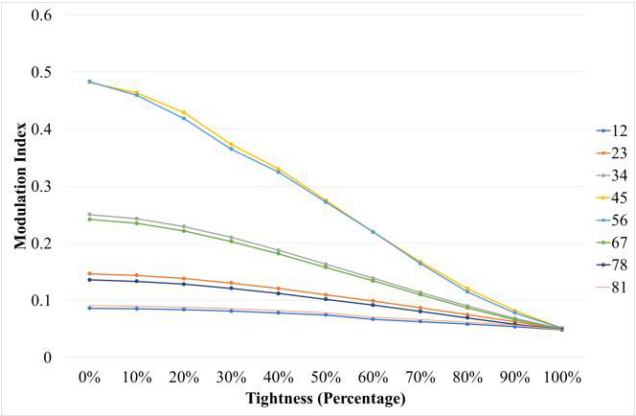

Fig. 15 .An investigation of the effect of looseness intensity on modulation indices at different sensor-actuator locations (Numerical Analysis)

شکل ۱۵: بررسی تأثیر شدت شل‌شدگی روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر (تحلیل عددی)

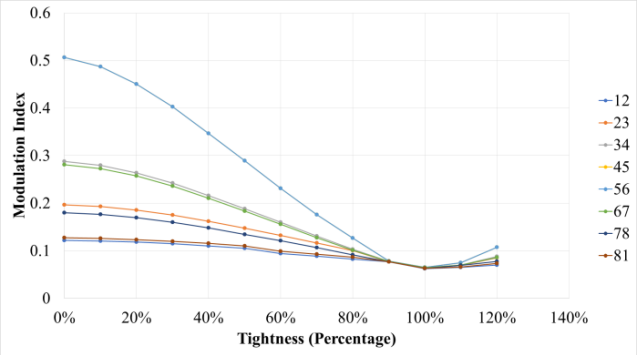

Fig. 16 . The effect of excessive increase of torque on modulation indexes in different sensor-actuator positions (Experimental Analysis)

شکل ۱۶ .تأثیر افزایش بیش از حد گشتاور روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر (تحلیل تجربی)

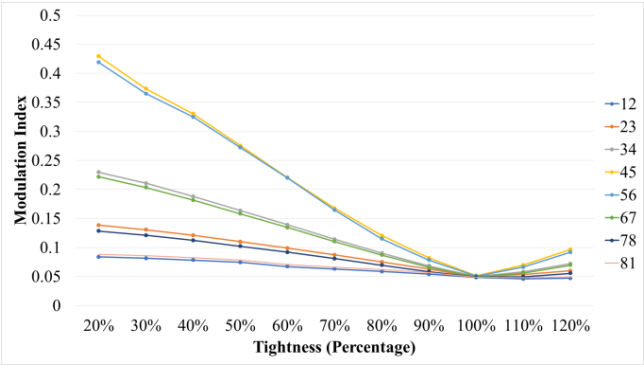

Fig. 17 .The effect of excessive increase of torque on modulation indexes in different sensor-actuator positions (Numerical Analysis)

شکل ۱۷: تأثیر افزایش بیش از حد گشتاور روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت‌های مختلف حسگر- عملگر (تحلیل عددی)

جدول ۲: مقادیر شاخص مدولاسیون برای سنجش دقت در تشخیص شل‌شدگی

Table 2. Modulation index values for measuring accuracy in looseness detection

درصد شل‌شدگی		٪۲۰	٪۱۷/۵	٪۱۵	٪۱۲/۵	٪۱۰
گشتاور (نیوتن متر)		۴۴/۰۸	۴۵/۴۵۷۵	۴۶/۸۳۵	۴۸/۲۱۲۵	۴۹/۵۹
محل قرارگیری حسگر و عملگر	۱۲	۰/۰۸۲۶۴۴	۰/۰۸۰۵۱۶	۰/۰۷۹۸۷۶	۰/۰۷۸۵۶۲	۰/۰۷۷۰۳۲
	۲۳	۰/۱۰۰۳۱۱	۰/۰۹۶۷۸۲	۰/۰۹۳۷۳۸	۰/۰۸۵۷۸۱	۰/۰۷۷۲۶۱
	۳۴	۰/۱۰۳۴۷۵	۰/۰۹۷۵۶۲	۰/۰۹۴۷۶۲	۰/۰۸۷۷۶۳	۰/۰۷۷۶۴۱
	۴۵	۰/۱۲۶۵۳۸	۰/۱۱۶۴۳۴	۰/۱۰۸۲۳۷	۰/۱۰۳۸۹۳	۰/۰۸۸۵۳۱
	۵۶	۰/۱۲۶۵۳۸	۰/۱۱۶۴۵۴	۰/۱۰۷۹۶۷	۰/۱۰۲۸۹۳	۰/۰۸۸۵۰۵
	۶۷	۰/۱۰۰۸۴۷	۰/۰۹۸۱۲۷	۰/۰۹۶۸۲۳	۰/۰۸۶۵۲۸	۰/۰۷۷۶۴۴
	۷۸	۰/۰۹۱۶۲۷	۰/۰۹۴۷۸۲	۰/۰۹۲۷۸۳	۰/۰۸۴۸۷۲	۰/۰۷۷۲۶۷
	۸۱	۰/۰۸۶۴۲۲	۰/۰۸۱۶۲۷	۰/۰۸۰۶۷۳	۰/۰۷۹۵۶۲	۰/۰۷۷۱۰۸

است که این روش قادر است آن را در سازه تشخیص دهد.

یکی دیگر از پارامترهای تنظیمی مؤثر در به‌کارگیری روش مدولاسیون ویبروآکوستیک، تأثیر فرکانس اولتراسونیک و فرکانس ارتعاشی است که در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل حساسیت نسبت به فرکانس تحریک ارتعاشی، فرض شده است که موقعیت حسگر- عملگر، در موقعیت ۴۵ ثابت نگه داشته شده و شاخص مدولاسیون مربوط به آن برای صفر تا صد درصد شل‌شدگی در فرکانس‌های ۰/۵، 1 و ۱/۵ هرتز محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است، همان‌گونه که پیش از این نیز بیان گردید، محدودیت درایور به‌کاررفته در تحلیل تجربی سبب گردیده است که امکان بیشترکردن این بازه نوسانات فرکانس ارتعاشی، به صورت عملی وجود نداشته باشد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ قابل‌مشاهده است، هرچه فرکانس ارتعاشی افزایش می‌یابد، مقادیر شاخص‌ها به ازای شل‌شدگی‌های مختلف نیز به طور کلی افزایش خواهد یافت. علاوه بر این قابل‌مشاهده است که زمانی که شدت شل‌شدگی پیچ بیشتر است، تأثیر افزایش فرکانس تحریک ارتعاشی نیز بیشتر بوده و مقدار شاخص مدولاسیون، افزایش بیشتری را تجربه خواهد کرد.

پارامتر تنظیمی دیگری که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است، فرکانس تحریک اولتراسونیک است. اگرچه به واسطه دستگاه تحریک‌کننده اولتراسونیک به‌کاررفته در تحلیل تجربی، محدودیتی در انتخاب بازه نوسانات فرکانس اولتراسونیک وجود ندارد، اما به منظور امکان مقایسه بین تحلیل حساسیت فرکانس اولتراسونیک و ارتعاشی، از سه مقدار ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ کیلوهرتز برای فرکانس

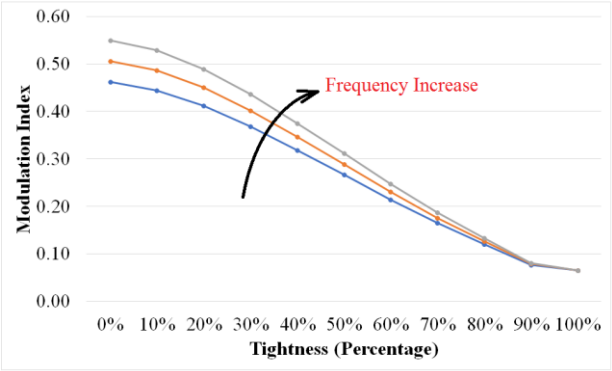

Fig.18. The effect of the vibrational excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Experimental Analysis)

شکل ۱۸: اثر فرکانس تحریک ارتعاشی روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت حسگر- عملگر ۴۵ (تحلیل تجربی)

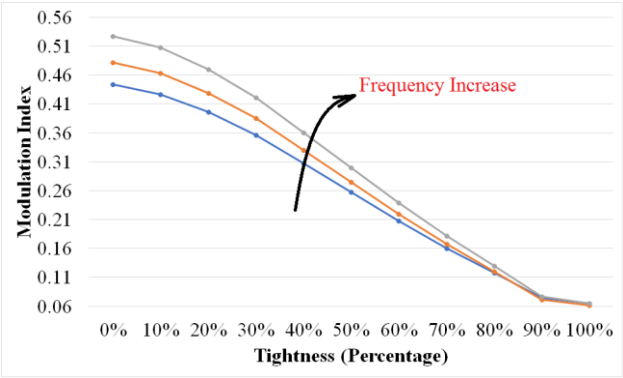

Fig.19. The effect of the vibrational excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Numerical Analysis)

شکل ۱۹: اثر فرکانس تحریک ارتعاشی روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت حسگر- عملگر ۴۵ (تحلیل عددی)

تحریک اولتراسونیک استفاده گردیده است و همانند تحلیل حساسیت فرکانس تحریک ارتعاشی، فرض شده است که موقعیت حسگر- عملگر، در موقعیت ۴۵ ثابت نگه داشته شده و شاخص مدولاسیون مربوط به آن برای صفر تا صد درصد شل‌شدگی در فرکانس‌های مختلف اولتراسونیک محاسبه گردیده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ قابل‌مشاهده است، رفتار کلی شاخص‌ها در برابر نوسانات فرکانس تحریک اولتراسونیک، همانند رفتار آن‌ها در مقابل نوسانات فرکانس تحریک ارتعاشی است. بدین معنا که مقادیر شاخص‌ها با افزایش فرکانس تحریک اولتراسونیک افزایش یافته و اثر این افزایش در شدت شل‌شدگی‌های بالا، بیشتر می‌باشد. اما چیزی که از مقایسه این تحلیل حساسیت با تحلیل حساسیت نسبت به فرکانس تحریک ارتعاشی قابل‌توجه است، این است که نوسانات فرکانس اولتراسونیک، در مقایسه با نوسانات فرکانس تحریک ارتعاشی، تأثیر به مراتب کمتری روی شاخص مدولاسیون خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص شل‌شدگی این مزیت را دارد که در عین سادگی در پیاده‌سازی، دقت بالاتری داشته و این امکان را به بازرسین خواهد داد که فرآیند پایش وضعیت اتصالات پیچی را به راحتی به صورت آنلاین طراحی و پیاده‌سازی نمایند. در این مقاله توانایی این روش در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی فلنجی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است و مطابق آنچه که در بخش نتایج ارائه گردید، این روش به خوبی قادر به تشخیص وجود، شدت و موقعیت پیچ شل در اتصالات فلنجی می‌باشد. نتایج تست‌های تجربی موید آن است که روش مدولاسیون ویبروآکوستیک قادر است تا ۱۲/۵ درصد شل‌شدگی را به خوبی تشخیص دهد. هرچه موقعیت حسگر و عملگر به‌کاررفته در آزمایش، به پیچ شل نزدیک‌تر باشد، دقت روش نیز افزایش خواهد یافت. افزایش دامنه و فرکانس تحریک ارتعاشی، اثری مثبت روی توانایی روش در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی داشته و در نتیجه در حالاتی که منابع ناشناخته ارتعاشی نیز در سیستم وجود داشته باشد. این روش دقتی بالاتر را از خود بروز خواهد داد. افزایش فرکانس اولتراسونیک اگرچه سبب افزایش مقدار شاخص مدولاسیون در شدت شل‌شدگی‌های مختلف خواهد شد، اما

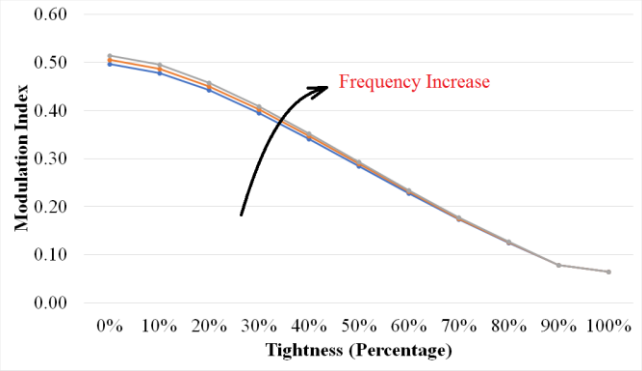

Fig.20. The effect of the ultrasonic excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Experimental Analysis)

شکل ۲۰: اثر فرکانس تحریک اولتراسونیک روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت حسگر- عملگر ۴۵ (تحلیل تجربی)

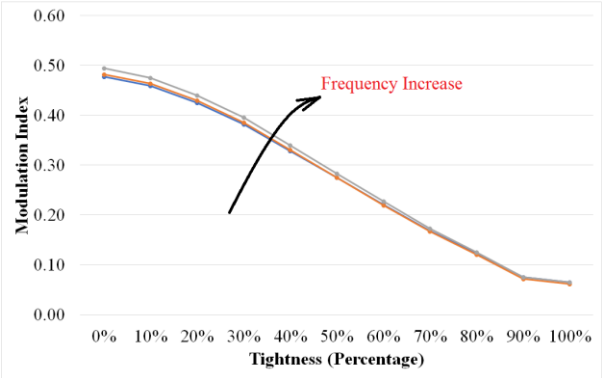

Fig.21. The effect of the ultrasonic excitation frequency on modulation indexes in sensor-actuator position 45 (Numerical Analysis)

شکل ۲۱: اثر فرکانس تحریک اولتراسونیک روی شاخص‌های مدولاسیون در موقعیت حسگر- عملگر ۴۵ (تحلیل عددی)

این تأثیر بسیار اندک و قابل اغماض می‌باشد. افزایش گشتاور اعمالی به پیچ شل سبب کاهش امپدانس آکوستیکی و متعاقباً، شاخص مدولاسیون خواهد شد؛ هرچند اعمال گشتاور بیش از حد، خود به واسطه اثر آکوستوالاستیک، سبب بروز مدولاسیون و افزایش مقدار شاخص خواهد شد.

منابع

[1] S.M.Y. Nikravesh, M. Goudarzi, A review paper on looseness detection methods in bolted structures, Latin American Journal of Solids and Structures, 14(12) (2017) 2153-2176.

[2] S.M.Y. Nikravesh, Goudarzi M., Looseness Detection and

Assessment of Flange Type Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method, Amirkabir Journal of Mechanical, (2019).

[3] V.Y. Zaitsev, A. Sutin, I.Y. Belyaeva, V. Nazarov, Nonlinear interaction of acoustical waves due to cracks and its possible usage for cracks detection, Modal Analysis, 1(3) (1995) 335-344.

[4] V. Zaitsev, P. Sas, M. Wevers, Nonlinear modulation methods of structural damage detection based on dissipative nonlinear effects, in: Proceedings of the International Seminar on Modal Analysis, KU Leuven; 1998, 2001, pp. 233-242.

[5] V. Kazakov, A modulation crack-detection technique: I. Instrumental method of implementation, Russian Journal of Nondestructive Testing, 42(11) (2006) 709-716.

[6] J.H. Bickford, Introduction to the design and behavior of bolted joints: non-gasketed joints, CRC press, 2007.

[7] V. Caccese, R. Mewer, S.S. Vel, Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections, Engineering Structures, 26(7) (2004) 895-906.

[8] T. Wang, G. Song, Z. Wang, Y. Li, Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method, Smart Materials and Structures, 22(8) (2013) 087001.

[9] J. Bickford, Handbook of bolts and bolted joints, CRC press, 1998.

[10] P. Duffour, M. Morbidini, P. Cawley, A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals, The Journal of the Acoustical Society of America, 119(3) (2006) 1463-1475.

[11] C.R. Courtney, B.W. Drinkwater, S.A. Neild, P.D. Wilcox, Factors affecting the ultrasonic intermodulation crack detection technique using bispectral analysis, NDT & E International, 41(3) (2008) 223-234.

[12] N.C. Yoder, D.E. Adams, Vibro-acoustic modulation utilizing a swept probing signal for robust crack detection, Structural Health Monitoring, 9(3) (2010) 257-267.

[13] A. Klepka, W.J. Staszewski, R. Jenal, M. Szwedo, J. Iwaniec, T. Uhl, Nonlinear acoustics for fatigue crack detection–experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations, Structural Health Monitoring, 11(2) (2012) 197-211.

[14] D. Donskoy, A. Sutin, A. Ekimov, Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing, Ndt & E International, 34(4) (2001) 231-238.

[15] N.A. Chrysochoidis, A.K. Barouni, D.A. Saravanos, Delamination detection in composites using wave modulation spectroscopy with a novel active nonlinear acousto-ultrasonic piezoelectric sensor, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 22(18) (2011) 2193-2206.

[16] F.A. A. Klepka, W. J. Staszewski, T. Uhl, , Nonlinear vibro-Acoustic wave modulation for impact damage detection in composites, Structural Health Monitoring, 11(1) (2012) 197-211.

[17] A. Klepka, W.J. Staszewski, D. Di Maio, F. Scarpa, Impact damage detection in composite chiral sandwich panels using nonlinear vibro-acoustic modulations, Smart Materials and Structures, 22(8) (2013) 084011.

[18] N.A. Chrysochoidis, T.T. Assimakopoulou, D.A. Saravanos, Nonlinear wave structural health monitoring method using an active nonlinear piezoceramic sensor for matrix cracking detection in composites, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 26(15) (2015) 2108-2120.

[19] S. Kim, D. Adams, H. Sohn, G. Rodriguez-Rivera, J. Vitek, S. Carr, A. Grama, Validation of vibroacoustic modulation of wind turbine blades for structural health monitoring using operational vibration as a pumping signal, in: 9th International Workshop on Structural Heath Monitoring, 2013.

[20] F. Amerini, M. Meo, Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ ultrasound methods, Structural health monitoring, 10(6) (2011) 659-672.

[21] F. Amerini, E. Barbieri, M. Meo, U. Polimeno, Detecting loosening/tightening of clamped structures using nonlinear vibration techniques, Smart materials and

structures, 19(8) (2010) 085013.

[22] T.H. Ooijevaar, Vibration based structural health monitoring of composite skin-stiffener structures, (2014).

[23] M. Meo, G. Zumpano, Nonlinear elastic wave spectroscopy identification of impact damage on a sandwich plate, Composite structures, 71(3-4) (2005) 469-474.

[24] D. Broda, W. Staszewski, A. Martowicz, T. Uhl, V. Silberschmidt, Modelling of nonlinear crack–wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review, Journal of Sound and Vibration, 333(4) (2014) 1097-1118.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.M. Yadavar Nikravesh, M. Goudarzi, Experimental and Numerical Looseness Detection and Assessment in Flanged Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method. AmirKabir J. Mech Eng., 53(special issue 2) (2021) 1333-1346.

DOI: 10.22060/mej.2020.17014.6500

این صفحه عمداً خالی است