



Analytical Study on Effect of Loosening on Nonlinear Vibration Behavior of Bolted Joints

A. Pirdayr¹, M. Mohammadi^{1*}, M. J. Kazemzadeh-Parsi¹, M. Rajabi²

¹Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

²Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Bolt connections often loosen under environmental loading conditions and system vibrations, which can lead to disaster risks during its operation. In this study, the nonlinear vibration behavior of an aluminum single-lap joint has been studied analytically and experimentally. Accordingly, considering the effects of nonlinear behavior at the bolt joint, a nonlinear two-degree of freedom model for this type of connection is proposed. Then, in order to determine the unknown parameters of the proposed model, the vibrational and dynamic properties of this structure have been estimated using experimental modal analysis and model updating method. Finally, the effect of the amplitude of the excitation force and the preload force of the bolts on the dynamic behavior of these systems has been studied analytically. Examination of amplitude-frequency curves shows that reducing the preload force of the bolts reduces the natural frequency and also distorts the amplitude-frequency curve to the left side, which indicates the softening nonlinear behavior of the system with decreasing applied bolt preload force. In addition, the comparison of the theoretical and experimental natural frequencies shows that the proposed model predicts the vibrational characteristics of these systems with good accuracy, and using the proposed model can study the dynamic behavior of these systems for different parameters.

Review History:

Received: Apr. 14, 2021

Revised: Jul. 06, 2021

Accepted: Aug. 28, 2021

Available Online: Oct. 07, 2021

Keywords:

Bolted joint vibrations

Model updating method

Firewall algorithm

Frequency response curve

1. INTRODUCTION

The study of the vibration behavior of bolted joints has a special place due to their wide applications in various industries such as connecting different parts of aircraft fuselages, power plant towers, and missile tanks. Due to the fact that these structures are often under dynamic loads, so the probability of loosening and reduced quality of these connections is higher and if not detected in time, they can lead to breakdown and tragic damage [1]. Accordingly, the study of methods that can easily and accurately predict the dynamic behavior of bolted joints has been considered by many researchers. Accurate modeling to predict the dynamic behavior of structures is an essential tool in both design and operation [2].

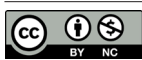
Ahmadian and Jalali [3] have proposed a more general connection model for this type of connection using stiffness matrices and damping coefficients. They have proposed a method for identifying the optimal values of stiffness and damping parameters of a linear connection using the measured modal parameters. Gant et al. [4] used simple springs to simulate connection surfaces in the early stages of design. Zhao et al. [5] have proposed a method for identifying the dynamic parameters of the spring-damper element in bolt joints using modal properties. Evang et al. [6] presented an experimental study on the dynamic behavior of a single-bolt connection that withstands slips at different levels of torsion preloads and excitations.

*Corresponding author's email: Mehr4457@gmail.com

In the present study, a new method has been proposed to investigate the nonlinear vibrations of bolt joints of two aluminum sheets. To model changes in stiffness and local nonlinear damping at the bolted joints, a two-degree-of-freedom mass-spring-damper model is introduced. The parameters of the presented analytical model are obtained by using the model updating method and by means of the Firefly algorithm. Finally, for the first time, the problem of minimizing the objective function is formulated to minimize the difference between the natural frequencies of the analytical model and the results of experimental tests in the presence of the input constraint as a nonlinear optimization problem. The optimization process is solved using the firewall algorithm as a meta-innovative method to obtain the unknown parameters of the proposed analytical model. After determining the dynamic characteristics, using the proposed analytical model, the effect of various parameters such as preload and amplitude of external excitation force on the vibration behavior of this system has been studied. In order to validate the results, the system frequency changes for different values of the preload were compared with the results of the experimental test.

2. ANALYTICAL MODEL

Fig. 1 shows the geometric characteristics of the bolted joint sample. In order to study the dynamic behavior of the bolted joint presented in Fig. 1, the model is simulated using a nonlinear two-degree freedom system as shown in Fig. 2. Motion equations can be expressed in the form of the



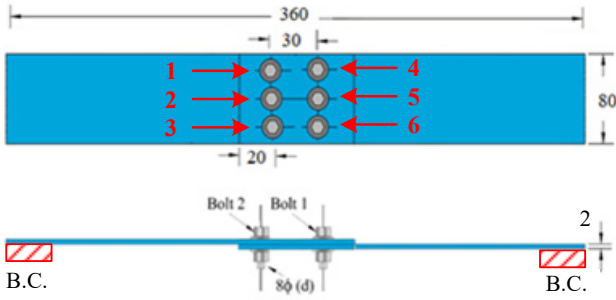


Fig. 1. Geometric characteristics of single-lap bolt joint

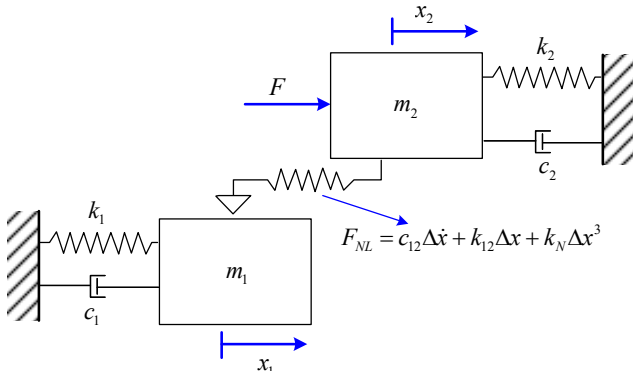


Fig. 2. Equivalent nonlinear two degrees of freedom model of the connection of single-lap bolt joint



Fig. 3. Configuration of experimental test analysis of single-lap bolt joint

following matrix:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c + c_{12} & -c_{12} \\ -c_{12} & c + c_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_{12} & -k_{12} \\ -k_{12} & k + k_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k_N (x_1 - x_2)^3 \\ k_N (x_1 - x_2)^3 + F_{ext} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3. EXPERIMENTAL TESTS

As shown in Fig. 3, the laboratory equipment includes a pulse data collection system, B&K 2051 accelerometer, laptop, B&K 1087 impact hammer, and anti-noise cables.

For the initial values of variables, the natural frequencies

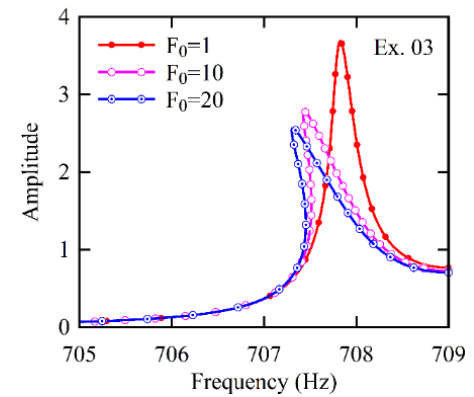
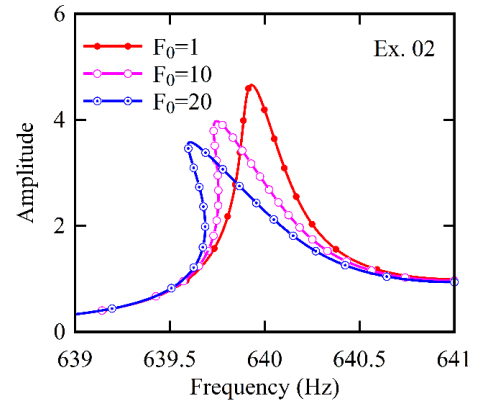
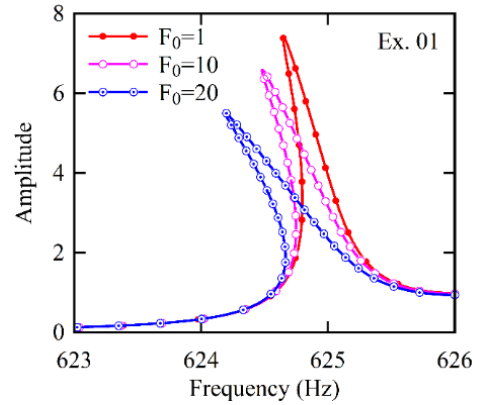


Fig. 4. Frequency response function curve obtained from the analytical model

of the system are calculated using Eq. (1), and then in each iteration of the optimization process, specific values are calculated and the value of the objective function is determined. The calculated value of the objective function is compared with the previous values. This process is repeated to minimize the objective function using the Firefly algorithm.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In order to study the nonlinear behavior of bolted joints, the frequency response function curve for different values of the excitation force amplitude and around the first bending mode is shown in Fig. 4. The preload range of 1 N corresponds to the relatively linear response of the system. It can be seen that for example Ex.01 is generated for a

significant deviation in the peak of the curve, but for other examples, this amplitude of excitation force has an ignorable effect on the deviation of the frequency response function and the behavior of these connections at high pre-loads. According to Fig. 4, it can be seen that for larger amounts of preload, the nonlinear behavior of the system intensifies, which is due to the looseness created in the connection and the creation of micro-slips. As the force range increases, the peak resonance point loses its symmetry and shifts to the left, indicating softening nonlinear behavior. It is observed that as the force amplitude increases, the frequency curves become narrower, indicating a decrease in the equivalent damping of the system. In addition, according to the results shown in Fig. 4, it can be seen that by increasing the preload of the bolt, the vibration behavior of these joints almost tends to the behavior of linear systems. The reason for this can be explained by the reduction of the effects of looseness between the joints during vibrations, which eliminates the effect of nonlinear factors.

5. CONCLUSIONS

In the present study, in order to increase the accuracy of modeling and to consider the nonlinear effects of bolt joints, a nonlinear two degrees of freedom equivalent to these joints was presented. After determining the equivalent dynamic characteristics, the effect of different parameters on the vibration characteristics of this type of connection was studied theoretically and experimentally.

Using the model updating method, the model parameters are predicted with appropriate accuracy and the model provides two degrees of precise freedom by which the dynamic

behavior of the system can be studied with high accuracy. The model presented in this research with high accuracy and the need for the least computational time predicts nonlinear effects on the common surfaces of screw joints and can be easily applied to different types of joints in this field.

REFERENCES

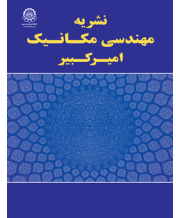
- [1] M. Rezaee, V. Maleki, A New Nonlinear Model for Flexural Vibration Analysis of a Cracked Beam with a Fatigue Crack, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 22(2) (2011) 35-52.
- [2] M. Ghaderi, H. Ghaffarzadeh, V.A. Maleki, Investigation of vibration and stability of cracked columns under axial load, *Earthquakes and Structures*, 9(6) (2015) 1181-1192.
- [3] H. Ahmadian, H. Jalali, Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2) (2007) 1041-1050.
- [4] F. Gant, P. Rouch, F. Louf, L. Champany, Definition and updating of simplified models of joint stiffness, *International Journal of Solids and Structures*, 48(5) (2011) 775-784.
- [5] T. Guo, L. Li, L. Cai, Y. Zhao, Alternative method for identification of the dynamic properties of bolted joints, *Journal of mechanical science and technology*, 26(10) (2012) 3017-3027.
- [6] H. Ouyang, M. Oldfield, J. Mottershead, Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(12) (2006) 1447-1455.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Pirdayr, M. Mohammadi, M. J. Kazemzadeh-Parsi, M. Rajabi, *Analytical Study on Effect of Loosening on Nonlinear Vibration Behavior of Bolted Joints*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 1435-1438.

DOI: [10.22060/mej.2021.19852.7132](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19852.7132)





مطالعه تحلیلی تأثیر شل شدگی بر رفتار ارتعاشات غیرخطی اتصالات پیچ و مهره‌ای

ابوذر پیردیر^۱، مهرداد محمدی^{۱*}، محمد جواد کاظم زاده پارسی^۱، مجید رجبی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵

کلمات کلیدی:

ارتعاشات اتصالات پیچی

مدل دو درجه آزادی

بروز رسانی مدل

الگوریتم کرم شب‌تاب

منحنی پاسخ فرکانسی

خلاصه: در این تحقیق رفتار ارتعاشات غیرخطی اتصال پیچی تک لبه به صورت تحلیلی و تجربی مطالعه شده است. بر این اساس، در ابتدا با در نظر قرار دادن اثرات رفتار غیرخطی در محل اتصال پیچ، یک مدل غیرخطی دو درجه آزادی برای این نوع اتصالات ارائه شده است. در ادامه، به منظور تعیین پارامترهای مجهول مدل ارائه شده، خصوصیات ارتعاشی این سازه با استفاده از آنالیز مودال تجربی و روش بروزرسانی مدل، تخمین زده شده است. از فرکانس‌های طبیعی برای تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی بروزرسانی مدل استفاده و الگوریتم کرم شب‌تاب برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، استفاده شده است. در نهایت، تأثیر دامنه نیروی تحریک و نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بر رفتار دینامیکی این سیستم‌ها مطالعه شده است. بررسی منحنی‌های دامنه-فرکانس نشان می‌دهد که کاهش نیروی پیش‌بار پیچ‌ها باعث کاهش فرکانس طبیعی و همچنین اعوجاج منحنی دامنه-فرکانس به سمت چپ می‌شود که نشان دهنده رفتار غیرخطی نرم‌شونده سیستم با کاهش نیروی اعمالی می‌باشد. علاوه بر این، مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی تئوری و تجربی نشان می‌دهد که مدل چند درجه آزادی ارائه شده با دقت بسیار مناسبی مشخصه‌های ارتعاشی این سیستم‌ها را پیش‌بینی می‌کند و با استفاده از این مدل می‌توان رفتار دینامیکی این سیستم‌ها را به ازای پارامترهای مختلف مطالعه کرد.

۱- مقدمه

مدل‌سازی دقیق برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها یک ابزار ضروری در هر دو مرحله طراحی و عملیات است [۲]. مدل‌سازی خواص اتصالات پیچی مشکل بزرگی در تحلیل‌های ارتعاشی بوده و یکی از موانع کلیدی برای پیش‌بینی دینامیک سازه‌ها می‌باشد. بنابراین، به منظور مدل‌سازی اتصالات پیچی، ابتدا باید مشخصه‌های دینامیکی آن مورد مطالعه قرار گیرد [۳]. مرحله دوم که چالش برانگیزترین مرحله می‌باشد، توسعه یک مدل ریاضی از رفتار اتصال است. مرحله نهایی، شناسایی پارامترها در مدل پیشنهادی است. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده، روش‌های مدل‌سازی اتصالات پیچی را می‌توان به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم نمود [۴]. مدل‌های خطی اغلب برای اتصالات محکم، سفت و تحت بارهای اندک با دقت مناسبی قابل استفاده هستند. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در

مطالعه رفتار ارتعاشی اتصالات پیچی به علت کاربردهای گسترده آنها در صنایع مختلف مانند اتصال قسمت‌های مختلف بدنه هواپیما، برج‌های نیروگاهی و مخازن موشک، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه این سازه‌ها اغلب تحت بارهای دینامیکی هستند، بنابراین احتمال شل‌شدگی و کاهش کیفیت این اتصالات بیشتر بوده و اگر به موقع تشخیص داده نشوند، می‌توانند منجر به خرابی و خسارات فاجعه‌باری شوند [۱]. بر این اساس، مطالعه و بررسی روش‌هایی که بتوانند به راحتی و با دقت مناسبی رفتار دینامیکی اتصالات پیچی را پیش‌بینی کنند مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mehr4457@gmail.com

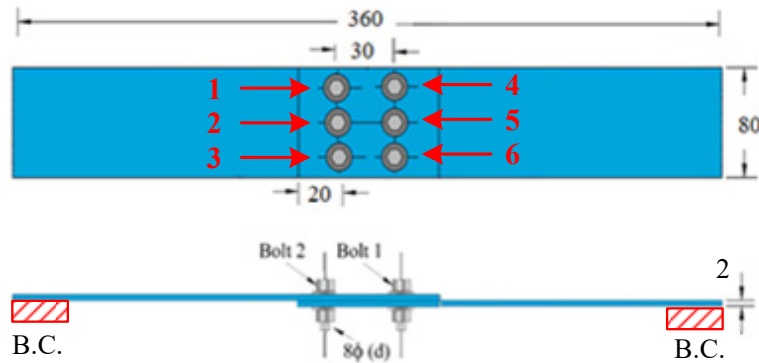


در طیف فرکانس وجود دارد. هارمونیک‌های غالب در طیف فرکانس نشان دهنده وجود یک ترم سختی توان سوم در مدل سازی است. برخی تحقیقات بر روی رفتار استاتیکی اتصالات پیچی تمرکز کرده‌اند [۱۴]. در حالی که دیگر تحقیقات اثرات اتصالات پیچی در پاسخ دینامیکی سازه را در نظر گرفته‌اند. در رفتار دینامیکی، پدیده غیرخطی اصطکاک اتصالات پیچی بر پاسخ‌ها تأثیر می‌گذارد. اصطکاک باعث اتلاف انرژی در سازه می‌شود و در نتیجه باعث میرایی بیشتر در پاسخ دینامیکی شود. لی و همکاران [۱۵] اصطکاک مماسی را به عنوان یک نیروی غیرخطی در مدل المان محدود معرفی کرده‌اند تا میرایی ناشی از اتصالات پیچی و یا پرچی را تخمین بزنند و پاسخ دینامیکی این نوع اتصالات را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. شیگیو و همکاران [۱۶] با استفاده از آنالیز المان محدود غیرخطی و تست‌های تجربی مشخصه‌های دینامیکی اتصالات پیچی را در سیستم روتور موتور هواپیما مورد مطالعه قرار دادند. مایر و گائول [۱۷] در مقاله خود رفتار غیرخطی اتصالات پیچی با استفاده از یک لایه نازک از مواد کشسان پلاستیکی را مدل سازی کرده و پارامترهای آن را با بروزسانی مدل المان محدود غیرخطی تعیین نموده‌اند. سونگ و همکاران [۱۸] با استفاده از روش آکوستیک خطی مبتنی بر اتلاف انرژی موج و یک روش غیرخطی مبتنی بر مدولاسیون وایبرواکوستیک برای تشخیص پیچ‌های شل در اتصالات پیچی پرداخته و سپس به بررسی گشتاور باقی مانده در پیچ‌های شل پرداختند. بان و همکاران [۱۹] یک چارچوب بازرسی برای تشخیص زود هنگام شل شدن پیچ در یک اتصال را ارائه نموده، و ارزیابی کمی از گشتاور باقی مانده یک پیچ شل را مطالعه کردند. یوان و همکاران [۲۰] با استفاده از تست‌های دینامیکی و بروزسانی مدل، به بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی تیرهای دارای اتصال پیچی پرداختند. گیون [۲۱] با استفاده از مدل ریاضی به آنالیز مودال سازه‌های دارای اتصال پیچی پرداخت. پارک و همکاران [۲۲] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به ارائه روش بروزسانی مدل به منظور مطالعه رفتار مکانیکی سازه‌های مختلف با استفاده از روش المان محدود پرداختند. عادل و همکاران [۲۳] بر مبنای استفاده از الگوریتم ژنتیک به ارائه روش بروزسانی مدل برای اتصالات پیچی ورق‌های آلومینیومی/کامپوزیتی پرداختند. در مطالعه آنها از المان ژنریک^۱ به منظور شبیه‌سازی اتصال استفاده شده است. بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون تأثیر نیروی

مدل سازی غیرخطی اتصال، این نوع شبیه‌سازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از دلایل این امر سختی‌ها و تنگناهای موجود در فهم مکانیزم‌های مؤثر در آنهاست و دیگری نیاز کمتر به چنین دقتی در کاربردهای عملی است. لوان و همکاران [۵] به ارائه مدل دینامیکی غیرخطی ساده‌ای برای بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های استوانه‌ای شکل متصل شده پیچی پرداختند. محققین مختلفی نشان داده‌اند که اتصالات پیچی را می‌توان با روشی مشابه سایر قطعات سازه‌ای به شکل جرم-فنر-میراگر مدل نمود [۶]. نخستین بار در دهه ۷۰ میلادی یک مدل تحلیلی ساده فنر-میراگر موازی برای اتصالات پیچی پیشنهاد گردید [۷]. سفتی فنرها و ضریب میرایی میراگرها به عنوان سفتی و میرایی معادل اتصال در نظر گرفته شده و مقادیر آنها به روشی تکراری و با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی دو مود اول به دست آمده است. محققان دیگری نیز از همان مدل استفاده کردند، با این تفاوت که روش‌های مختلفی برای شناسایی مستقیم پارامترهای سازه توسعه داده شد [۸]. متیس و همکاران [۹] به مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌های مختلف میرایی اتصالات پیچی پرداختند. در این مطالعات، پارامترهای اتصالات پیچی مانند سفتی و ضرایب میرایی با استفاده از روش‌هایی مانند روش حداقل مربعات و با تابع پاسخ فرکانسی شناسایی شده است.

احمدیان و جلالی [۱۰] با استفاده از ماتریس‌های سفتی و ضرایب میرایی مدل اتصال عمومی‌تری را برای این نوع اتصالات پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها روشی را برای شناسایی مقادیر بهینه پارامترهای سفتی و میرایی یک اتصال خطی با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده مودال (فرکانس تشدید و ضریب میرایی) ارائه کرده‌اند. اساس الگوریتم آنها، تبدیل سیستم مونتاژ شده به چندین سیستم یک درجه آزادی به کمک بردارهای ویژه منتخب می‌باشد. گانت و همکاران [۱۱] از فنرهای ساده برای شبیه‌سازی سطوح اتصال در مراحل اولیه طراحی استفاده کرده‌اند. ژائو و همکاران [۱۲] روشی برای شناسایی پارامترهای دینامیکی المان فنر-میراگر در اتصالات پیچی به کمک خواص مودال ارائه کرده‌اند. اوپانگ و همکاران [۱۳] یک مطالعه تجربی در مورد رفتار دینامیکی یک تک اتصال پیچی که لغزش‌هایی را در سطوح مختلف پیش بار پیچ و تحریک‌ها تحمل می‌کند، ارائه کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که هر چه لغزش‌های کوچک در اتصال بیشتر ایجاد شوند، حلقه پسماند بیشتر از حالت بیضوی خارج می‌شود و سهم بیشتری از هارمونیک‌های غالب

1 Generic element



شکل ۱. مشخصات هندسی اتصال تک لپه پیچی
Fig. 1. Geometric characteristics of single-lap bolt joint

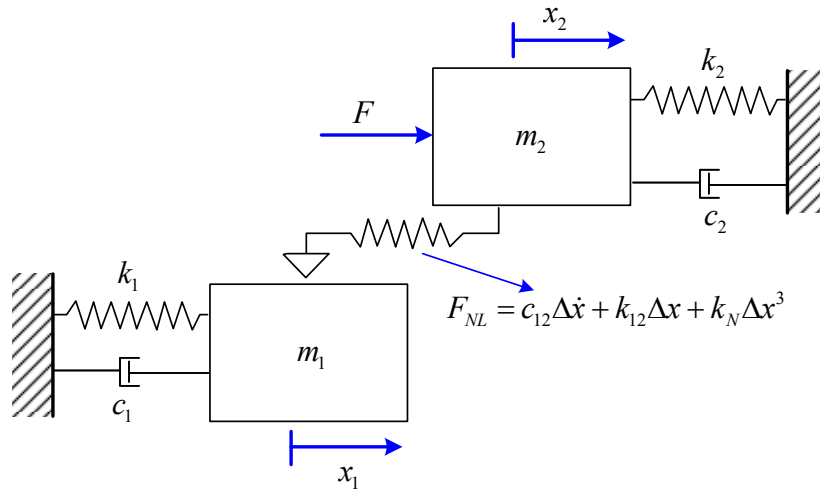
از این نوع مدل‌سازی‌ها شناخت بهتر از اثرات پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی این نوع اتصالات می‌باشد. با توجه به نتایج مطالعات تجربی مشاهده می‌شود که در برخی موارد مدل‌های خطی از دقت مناسبی برخوردار هستند. ولی در اکثر موارد، به علت وجود عدم قطعیت‌هایی در محل اتصالات پیچی نیازمند استفاده از مدل‌های غیرخطی می‌باشد. بر این اساس، در این تحقیق با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در محل اتصال، سفتی به صورت غیرخطی مدل‌سازی می‌شود. در شکل ۱ مشخصات هندسی نمونه اتصال پیچی مورد بررسی در تحقیق حاضر نشان داده شده است. مطابق شکل ۱ نمونه تحت بررسی متشکل از دو ورق آلومینیوم از جنس ۶۰۶۱-T۶ که با استفاده از شش پیچ و مهره فولادی به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. ورق دارای چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال می‌باشد. مشخصات هندسی ورق‌ها عبارت است از: طول ۲۵۰ میلی‌متر، عرض ۴۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر. نمونه مونتاژ شده دارای طول کلی L برابر ۳۶۰ میلی‌متر و طول اتصال S برابر ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. تعداد شش پیچ پر استحکام $M8$ با نیروی پیش‌کشش‌های مختلف در محدوده ۱ نیوتن متر تا ۱۰ نیوتن متر استفاده شده است.

به منظور مطالعه رفتار دینامیکی اتصال پیچی ارائه شده در شکل ۱، مدل با استفاده از یک سیستم دو درجه آزادی غیرخطی مطابق شکل ۲ شبیه‌سازی شده است. در این شکل، m_1 و m_2 به ترتیب نشان دهنده جرم معادل ورق‌های بالایی و پایینی می‌باشند که با استفاده از یک نیروی بازگرداننده داخلی غیرخطی، F_{NL} ، به یکدیگر متصل شده‌اند. نیروی تحریک خارجی به صورت بارگذاری عرضی بر سازه

پیش‌بار پیچ‌ها بر رفتار ارتعاشی اتصالات پیچ و مهره با استفاده از مدل‌های تحلیلی مطالعه نشده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر یک روش جدید برای بررسی ارتعاشات غیرخطی اتصالات پیچی دو ورق آلومینیومی ارائه شده است. برای مدل کردن تغییرات سفتی و میرایی غیرخطی موضعی در محل اتصالات پیچی، یک مدل جرم-فنر-دمپر دو درجه آزادی، معرفی شده است. پارامترهای مدل تحلیلی ارائه شده با استفاده از روش بروزرسانی مدل و به کمک الگوریتم فرا ابتکاری کرم شب‌تاب و با در نظر گرفتن فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از تست‌های تجربی به دست آمده است. در نهایت، برای اولین بار مسئله کمینه کردن تابع هدف به صورت حداقل کردن اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی مدل تحلیلی و نتایج تست‌های تجربی در حضور قید ورودی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید فرمول‌بندی شده است. فرایند بهینه‌سازی، با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب به عنوان یک روش فرا ابتکاری حل شده تا پارامترهای مجهول مدل تحلیلی ارائه شده به دست آید. پس از تعیین مشخصات دینامیکی، با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده تأثیر پارامترهای مختلف مانند نیروی پیش‌بار و دامنه نیروی تحریک خارجی بر رفتار ارتعاشی این سیستم مطالعه شده است. به منظور صحت‌گذاری نتایج، تغییرات فرکانس سیستم به ازای مقادیر مختلف نیروی پیش‌بار با نتایج حاصل از تست تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مدل تحلیلی اتصالات پیچ و مهره

ارائه مدل تحلیلی برای اتصالات پیچ و مهره یکی از پارامترهای مهم به منظور بررسی رفتار دینامیکی این سیستم‌ها می‌باشد. هدف



شکل ۲. مدل دو درجه آزادی غیرخطی معادل اتصال پیچ و مهره‌ای تحت بررسی

Fig. 2. Equivalent nonlinear two degrees of freedom model of the connection of single-lap bolt joint

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c + c_{12} & -c_{12} \\ -c_{12} & c + c_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_{12} & -k_{12} \\ -k_{12} & k + k_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k_N (x_1 - x_2)^r \\ k_N (x_1 - x_2)^r + F_{ext} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در تحقیق حاضر نیروی تحریک به صورت نیروی هارمونیک $F_{ext} = F \sin(\omega t)$ در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه اثر نیروی پیش‌بار و دامنه و فرکانس نیروی تحریک، پاسخ زمانی سیستم با حل عددی معادلات غیرخطی (۳) استخراج می‌شود. به منظور حل عددی این معادلات از روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم استفاده شده و گام زمانی برابر 2×10^{-4} در نظر گرفته می‌شود.

۳- تست‌های تجربی

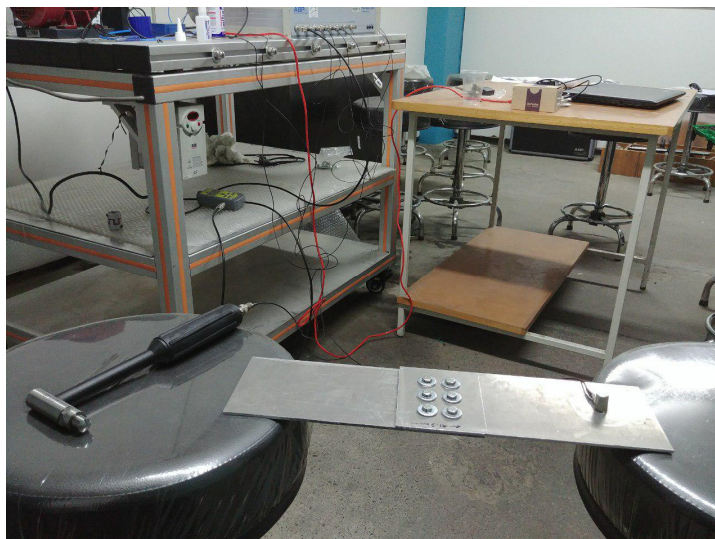
در انجام تست‌های تجربی از روش آنالیز مودال به همراه تحریک چکش ضربه برای تعیین مشخصات دینامیکی اتصال لبه‌ای با پیچ و مهره استفاده شده است. مطابق شکل ۳، تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک سیستم داده‌برداری پالس، شتاب سنج مدل B&K ۲۰۵۱، لپ‌تاب، چکش ضربه مدل B&K ۱۰۸۷ و کابل‌های آنتی نویز می‌باشد. مولتی آنالایزر پالس چهار کاناله مدل با مشخصات B&K ۳۵۶۰۰ مورد استفاده قرار گرفته است که جهت پردازش داده‌های به دست آمده از سنسورها و نیز فیلتراسیون آن‌ها و تبدیل ورودی آنالوگ به خروجی دیجیتال به

اعمال می‌شود. چنین مدلی اولین بار توسط بقراد و همکاران [۲۴] به منظور شبیه‌سازی مکانیکی برخورد ارائه شده است. در این سیستم، معادلات حرکت را با استفاده مستقیم از قانون دوم نیوتن می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_{12} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{12} (x_1 - x_2) + k_N (x_1 - x_2)^r = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 + c_{12} (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{12} (x_2 - x_1) - (c_{12} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{12} (x_1 - x_2) + k_N (x_1 - x_2)^r) = F_{exc} \quad (2)$$

که در آن x_1 و x_2 نشان دهنده مؤلفه‌های جابجایی، c_1 و c_2 نشان دهنده ضرایب میرایی ویسکوز، k_1 و k_2 نشان ثوابت سفتی میرایی معادل، c_{12} و k_{12} به ترتیب نشان دهنده سفتی و میرایی در محل اتصال و k_N سفتی فنر مرتبه سوم اتصال می‌باشد. سفتی غیرخطی مرتبه سوم در اثر اندرکنش بین اتصالات ایجاد شده و این امکان را ایجاد می‌کند که در اثر برخورد بین سطوح مختلف در حین ارتعاش، فرکانس طبیعی سازه افزایش یابد. در این تحقیق، این ثوابت مجهول با استفاده از روش بروز رسانی مدل و برای حالت‌های مختلف نیروی پیش‌بار پیچ‌ها به دست می‌آید. با توجه به بیشتر بودن تعداد مجهولات مدل و به علت متقارن بودن اتصال، فرض می‌شود که $k_1 = k_2 = k$ ، $c_1 = c_2 = c$ ، $m_1 = m_2 = m$ بر این اساس با توجه به معادلات (۱) و (۲)، معادلات حرکت را می‌توان به فرم ماتریسی زیر بیان نمود:



شکل ۳. پیکربندی انجام تست تجربی آنالیز مودال اتصال تک لپه پیچی
 Fig. 3. Configuration of experimental test analysis of single-lap bolt joint

جدول ۱. حالت‌های مختلف گشتاور اعمالی (نیوتن متر) به پیچ‌ها
 Table 1. Different states of applied torque (Nm) to bolts

شماره پیچ						شماره تست
۱	۲	۳	۴	۵	۶	تجربی
۲	۲	۲	۲	۲	۲	Ex. ۰۱
۴	۴	۴	۴	۴	۴	Ex. ۰۲
۶	۶	۶	۶	۶	۶	Ex. ۰۳
۸	۸	۸	۸	۸	۸	Ex. ۰۴

برای رسیدن به این هدف می‌باشند که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. به منظور استخراج پاسخ زمانی سیستم با استفاده از مدل دو درجه آزادی ارائه شده، دانستن مقادیر مشخصات دینامیکی سیستم معادل ضروری است. با توجه به اینکه مطابق روابط (۱) و (۲) شش مجهول وجود دارد، از این رو در این تحقیق به کمک آنالیز مودل تجربی و با کالیبره کردن مقادیر سه فرکانس طبیعی اول به دست آمده از نتایج مدل تحلیلی با نتایج تجربی، این ضرایب به دست می‌آیند. در این تحقیق سه فرکانس طبیعی اول با تابع هدف ارائه شده در رابطه (۴)، به منظور به حداقل رساندن خطای بین فرکانس‌های طبیعی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\min \sum_{i=1}^r W_i \left(\frac{\omega_i^n}{\omega_i^e} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

کار برده شده است. برای استخراج پاسخ‌های دینامیکی شتاب سنج در نزدیکی تکیه‌گاه به سازه متصل شده است. علت انتخاب این نود برای استخراج پاسخ دینامیکی این است که نقاط انتهایی به عنوان نقاط غیر گرهی مودهای فرد و زوج محسوب می‌شوند بنابراین داده‌های ثبت شده از این نقاط اطلاعات مودهای فرد و زوج را به طور کامل در اختیار خواهد گذاشت. در این تحقیق چهار تست تجربی مختلف انجام پذیرفت که در آن میزان گشتاور اعمالی به پیچ‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ گشتاور اعمالی به پیچ‌ها در هر یک از حالت‌های تجربی تحت بررسی ارائه شده است.

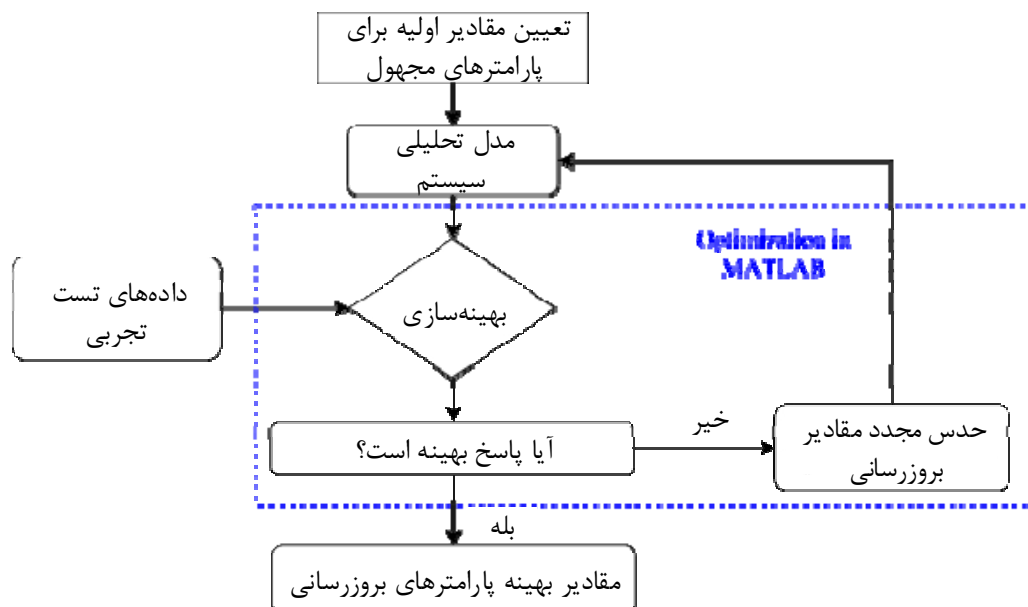
۴- شناسایی مشخصات دینامیکی و بروزرسانی مدل

یافتن مشخصات دینامیکی سازه یکی از اساسی‌ترین بخش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌ها است. روش‌های آنالیز مودال ابزار قدرتمندی

جدول ۲. محدوده تغییر پارامترهای مدل بروزرسانی شده

Table 2. Range of the model updating parameters

k_N	c_{12}	k_{12}	$m_1 = m_2 = m$	$c_1 = c_2 = c$	$k_1 = k_2 = k$	نام پارامتر
(N/m)	(N.m/s)	(N/m)	(kg)	(N.m/s)	(N/m)	
$(1-4) \times 10^2$	۲-۱	$(4-2) \times 10^6$	۳-۱	۰/۲-۰/۵	$(10-6) \times 10^5$	محدوده



شکل ۴. مراحل بروزرسانی مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب

Fig. 4. Steps to model updating method based on the firefly optimization algorithm

می‌شود. این فرایند مطابق شکل ۴ تکرار می‌گردد تا تابع هدف کمینه با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب گردد. در ادامه الگوریتم مراحل الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب بیان شده است.

۵- الگوریتم کرم شب‌تاب

اغلب مسائل بهینه‌سازی در مهندسی علاوه بر غیرخطی بودن دارای محدودیت‌های زیادی هستند. بنابراین برای یافتن حل‌های بهینه برای اینگونه مسائل غیرخطی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مؤثر و کارا نیاز می‌باشد. بر این اساس، الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشرفته با توجه به قدرت و کارایی‌شان در کاربردهای مختلف مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، الگوریتم کرم شب‌تاب می‌باشد که با الهام گرفتن از رفتار ساطع کردن نور کرم‌های شب‌تاب، برای نخستین بار توسط یانگ [۲۵] ارائه گردید. هدف اولیه کرم شب‌تاب از ساطع کردن نور به

که در آن ω_i^n و ω_i^e به ترتیب فرکانس‌های طبیعی به دست آمده با استفاده از مدل المان محدود و نتایج تست‌های تجربی می‌باشد. W_i ضریب وزنی متناظر با هر مود بوده و در این تحقیق فرض شده است که ارجحیت تمام مودها یکسان بوده و بر این اساس، تمامی ضرایب وزنی برابر واحد انتخاب می‌شود.

به منظور بهینه‌سازی و بروزرسانی مدل تابع هدف ارائه شده در رابطه (۴) از روش الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری کرم‌شب‌تاب استفاده می‌شود. فرآیند بروزرسانی مدل جهت تعیین مقادیر بهینه شش پارامتر m, c, c_{12}, k, k_{12} و k_N صورت می‌پذیرد که در جدول ۲ محدوده تغییر هر یک از این پارامترها نشان داده شده است. به ازای مقادیر اولیه این متغیرها، فرکانس‌های طبیعی سیستم با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده و سپس در هر تکرار از فرایند بهینه‌سازی، مقادیر ویژه محاسبه شده و مقدار تابع هدف تعیین می‌شود. مقدار محاسبه شده تابع هدف با مقادیر قبلی مقایسه

```

Set algorithm parameters ( $\alpha, \gamma$ )
Set simulation set-up (Number of initial solutions and maximum iteration ( $N, MaxGen$ ))
Randomly generate  $N$  initial solutions
for iteration = 1 : MaxGen
    Compute the brightness,  $I$ 
    Sort the solution in such a way that,  $I_i \geq I_{i-1}, \forall i$ 
    for  $i = 1 : n - 1$ 
        For  $j = i + 1 : n$ 
            If  $I_j > I_i$ 
                move firefly  $i$  towards firefly  $j$ 
            end if
        end for
    end for
    move firefly  $N, (x_b)$ , randomly
end for
Report the best solution,
    
```

شکل ۵. شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب [۲۷]

Fig. 5. firewall algorithm code [27]

که در آن D فضای مسئله می‌باشد.

در این الگوریتم کرم‌های شب‌تاب به سمت کرم‌های با جذابیت بیشتر حرکت می‌کنند. بنابراین، در هر مرحله میزان جابجایی کرم شب‌تاب جذب شده X_i به سوی کرم شب‌تاب جذاب‌تر (روشن‌تر) در هر تکرار به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۵]:

$$x_i = x_j + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (6)$$

در رابطه فوق ε_i یک بردار تصادفی با توزیع یکنواخت یا گوسی می‌باشد و α ضریبی است که به عنوان ضری جهش شناخته می‌شود و می‌توان مقدار آن را در هر تکرار تغییر داد تا الگوریتم به همگرایی برسد و این تغییرات می‌تواند به صورت تغییرات خطی یا نمایی باشد [۲۵].

۶- بررسی نتایج

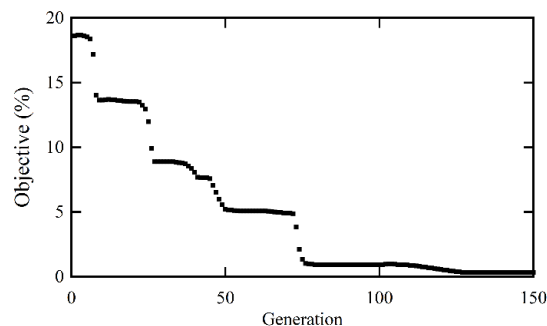
در این تحقیق با استفاده از تست‌های تجربی و مدل تحلیلی به بررسی تأثیر لقی پیچ‌ها بر مشخصه‌های ارتعاشی ورق‌های مونتاژ شده پیچی پرداخته می‌شود. در ابتدا با استفاده از برورسانی مدل چند درجه آزادی ارائه شده، مشخصات مکانیکی بهینه به منظور تطابق نتایج دو روش تحلیلی و تجربی تعیین می‌شود. دقت پاسخ‌ها به جمعیت تصادفی اولیه و پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده بستگی دارد. در شکل ۶ یک نمونه نمودار همگرایی الگوریتم کرم شب‌تاب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که همگرایی تابع

مانند یک سیستم علامت‌دهی برای جذب کرم‌های شب‌تاب دیگر است. یانگ [۲۵] الگوریتم کرم شب‌تاب را بر اساس چهار فرضیه ارائه کرده است: ۱- کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت هستند، بنابراین یک کرم شب‌تاب می‌تواند توسط تمام کرم‌های شب‌تاب دیگر جذب شود. ۲- جذابیت متناسب با نور کرم شب‌تاب است، به این صورت که کرم‌های با نور کمتر جذب کرم‌های با نور بیشتر می‌شود و به سمت آن حرکت می‌کند. با افزایش مسافت، کاهش نور کرم‌های شب‌تاب نیز در نظر گرفته می‌شود. ۳- اگر هیچ کرم شب‌تاب نورانی‌تری نباشد، کرم شب‌تاب به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد. ۴- روشنایی باید با تابع هدف در ارتباط باشد.

مقایسه این الگوریتم با الگوریتم‌های PSO و GA نشان می‌دهد که این الگوریتم برای پیدا کردن نقطه بهینه مطلق از کارایی بهتری برخوردار است [۲۶]. در شکل ۵ شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب نشان داده شده است.

بر اساس فرضیات الگوریتم کرم‌شب‌تاب، یک کرم شب‌تاب حتی با نورانیت بیشتر ولی در فاصله بسیار دور جذابیت کمتری برای افراد دیگر گروه یا طعمه دارد. در این الگوریتم، جذابیت نور در فاصله r به صورت $\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r}$ می‌باشد [۲۸]. که در آن r فاصله بین دو کرم شب‌تاب، β_0 جذب اولیه در $r = 0$ و γ ضریب جذب نور می‌باشد. برای دو کرم شب‌تاب X_i و X_j ، فاصله بین آنها r_{ij} به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۵]:

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{d=1}^D (x_{id} - x_{jd})^2} \quad (5)$$



شکل ۶ کمترین مقدار تابع هزینه در هر مرحله

Fig. 6 The minimum value of the cost function in each step

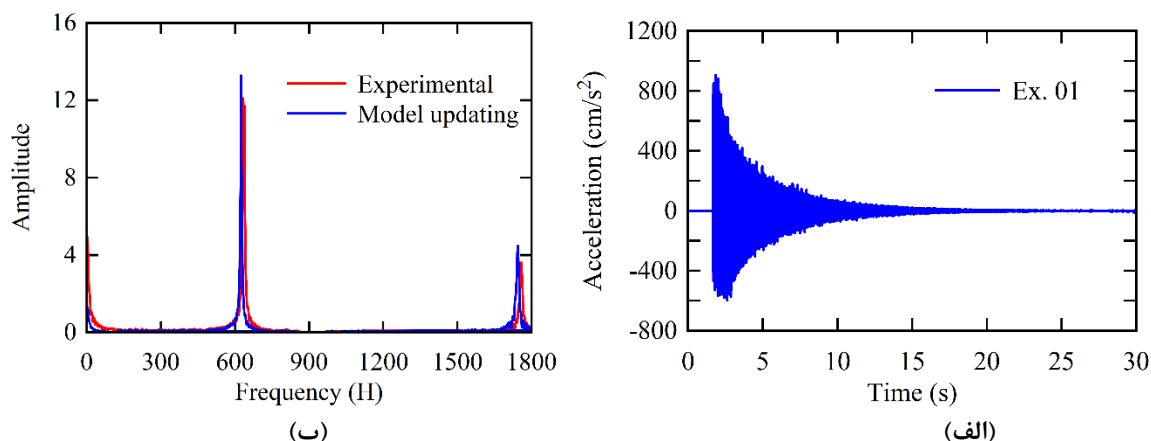
جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در مدل تحلیلی ارائه شده برای اتصال پیچی پس از استفاده از روش بروز رسانی

Table 3. Parameters used in the analytical model presented for bolted joints after model updating method

k_N (N/m)	c_{12} (N.m/s)	k_{12} (N/m)	$m_1 = m_2 = m$ (kg)	$c_1 = c_2 = c$ (N.m/s)	$k_1 = k_2 = k$ (N/m)	نام پارامتر نام مدل
$2/04 \times 10^3$	0/34	$4/14 \times 10^6$	1/47	0/78	$8/24 \times 10^5$	Ex. 01
$2/24 \times 10^3$	0/38	$4/23 \times 10^6$	1/89	1/24	$8/87 \times 10^5$	Ex. 02
$1/67 \times 10^3$	0/54	$4/56 \times 10^6$	2/35	1/39	$10/56 \times 10^5$	Ex. 03
$1/97 \times 10^3$	0/69	$4/07 \times 10^6$	2/38	1/54	$11/86 \times 10^5$	Ex. 04

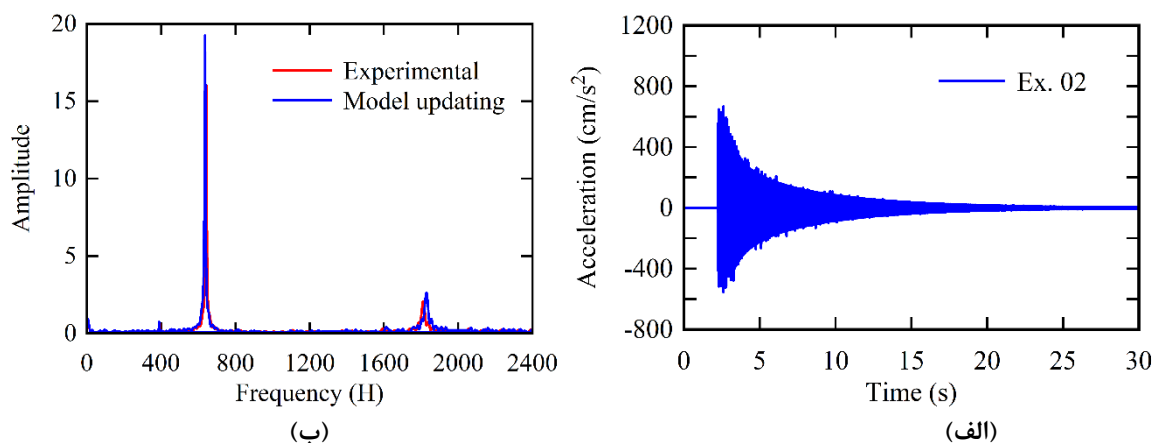
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود که حداکثر خطای پیش‌بینی فرکانس طبیعی مدل بروز رسانی شده با نتایج تجربی کمتر از ۲ درصد می‌باشد که مقدار مناسب و قابل قبولی می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ماتریس جرم و سفتی ایجاد شده توسط بروز رسانی مدل تحلیلی، به خوبی می‌تواند رفتار دینامیکی سازه سیستم را بیان کند و به کمک آن می‌توان مدلی دقیق‌تر از سیستم ایجاد کرد. بر این اساس، با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده در رابطه (۳) رفتار دینامیکی این سیستم‌ها را می‌توان با دقت مناسبی به ازای مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر مانند دامنه و فرکانس نیروی تحریک خارجی و میزان پیش‌بار اعمالی به پیچ‌ها مطالعه نمود. با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی پیش‌بار، مساحت سطح تماس سطوح افزایش می‌یابد، بنابراین فرکانس نوسانات با افزایش نیروی پیش‌بار، بیشتر می‌شود. به عنوان نمونه با افزایش نیروی پیش‌بار از ۲ نیوتن متر به ۸ نیوتن متر، فرکانس طبیعی اول از مقدار ۶۳۹ هرتز به ۶۹۱ هرتز افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش حدود ۸ درصدی فرکانس طبیعی

هدف به ازای تقریباً ۱۲۰ تکرار روی می‌دهد. پس از همگرایی تابع هدف، در جدول ۳ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در تحلیل‌ها به دست آمده از روش الگوریتم کرم شب‌تاب ارائه شده است. همچنین، در شکل‌های ۷ تا ۹ پاسخ ارتعاشات آزاد ورق مونتاز شده پیچی به ازای نیروی پیش‌بار ۲ کیلونیوتن، ۴ کیلونیوتن و ۶ کیلونیوتن و تابع پاسخ فرکانسی تست‌های تجربی و نتایج به دست آمده با استفاده از مدل دو درجه آزادی ارائه شده، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با استفاده از الگوریتم کرم‌های شب‌تاب، مشخصه‌های دینامیکی سیستم دو درجه آزادی غیرخطی پیشنهاد شده به صورت مناسب تعیین شده و در نتیجه مدل ارائه شده، قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار دینامیکی این سیستم‌ها را دارد. با توجه به اینکه مطابق شکل‌های ۷ تا ۹ مشاهده می‌شود که برای تحریک این سازه در شکل موده‌های بالاتر از دو، فرکانس تحریک بسیار بالایی نیاز می‌باشد، بنابراین می‌توان بیان نمود که دو شکل مود ارتعاشی اول این نوع اتصالات تأثیر غالب بر پاسخ دینامیکی آنها تحت شرایط مختلف بارگذاری خواهند داشت.



شکل ۷. پاسخ ارتعاشات آزاد ورق مونتاژ شده پیچی به ازای نیروی پیش‌بار ۲ کیلو نیوتن (نمونه Ex ۰۱) و (ب) مقایسه تابع پاسخ فرکانسی تجربی و تئوری نمونه Ex ۰۱.

Fig. 7. Response of free vibrations of bolt joint with a force of 2 kN (sample Ex. 01) And (b) Comparison of experimental frequency response function and theory results of Ex01 .



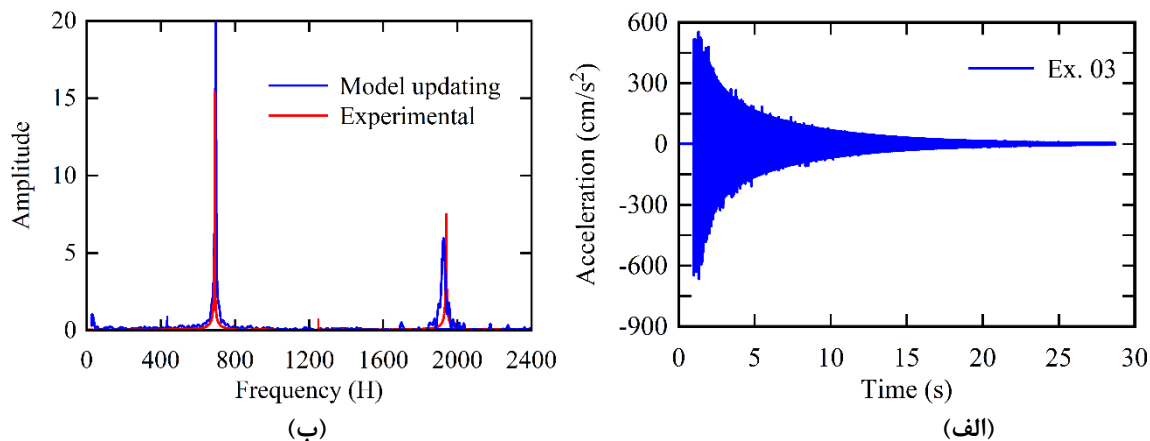
شکل ۸. پاسخ ارتعاشات آزاد ورق مونتاژ شده پیچی به ازای نیروی پیش‌بار ۴ کیلو نیوتن (نمونه Ex ۰۲) و (ب) مقایسه تابع پاسخ فرکانسی تجربی و تئوری نمونه Ex ۰۲.

Fig. 8. Response of free vibrations of bolt joint with a force of 4 kN (sample Ex. 02) And (b) Comparison of experimental frequency response function and theory results of Ex02 .

درد و با فنرهای غیرخطی شبیه‌سازی می‌شود، افزایش می‌یابد. این رفتارهای غیرخطی باعث می‌شود که مدل‌سازی تحلیلی اتصالات پیچ و مهره همواره با نامعینی‌های زیادی همراه باشد و لزوم دستیابی به مدل دقیق‌تر از این اتصالات استفاده از تست‌های تجربی و برورسانی مدل باشد.

به منظور مطالعه رفتار غیرخطی اتصالات پیچی، منحنی تابع پاسخ فرکانسی به ازای مقادیر مختلف دامنه نیروی تحریک و در حوالی مود اول خمشی در شکل ۱۰ برای چهار نمونه تحت بررسی نشان داده شده است. دامنه نیروی ۱ نیوتن متناظر با پاسخ نسبتاً

اول می‌باشد. بنابراین، می‌توان بیان نمود که با افزایش گشتاور اعمالی به پیچ‌ها فرکانس‌های طبیعی در نتیجه بیشتر شدن سفتی معادل سازه، افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی سازه وابستگی زیادی به نیروی پیش‌بار پیچ‌ها و دامنه برخورد سطوح بستگی دارد، بنابراین انتظار می‌رود که رفتار ارتعاشی این سازه‌ها به شدت غیرخطی بوده و وابستگی زیادی به میزان دامنه ارتعاشات داشته باشد. هنگامی که نیروی پیش‌بار پیچ‌ها با افزایش گشتاور اعمالی بیشتر می‌شود، مقادیر پارامترهای میرایی و سفتی معادل سطوح تماس که تحت تأثیر تنش‌های فشاری بین سطوح قرار



شکل ۹. پاسخ ارتعاشات آزاد ورق مونتاژ شده پیچی به ازای نیروی پیش‌بار ۶ کیلو نیوتن (نمونه Ex. ۰۳) و (ب) مقایسه تابع پاسخ فرکانسی تجربی و تئوری نمونه Ex. ۰۳.

Fig. 9. Response of free vibrations of bolt joint with a force of 6 kN (sample Ex. 03) And (b) Comparison of experimental frequency response function and theory results of Ex03 .

جدول ۴. مقادیر دو فرکانس طبیعی اول برای حالت‌های مختلف تست تجربی مطابق جدول ۱

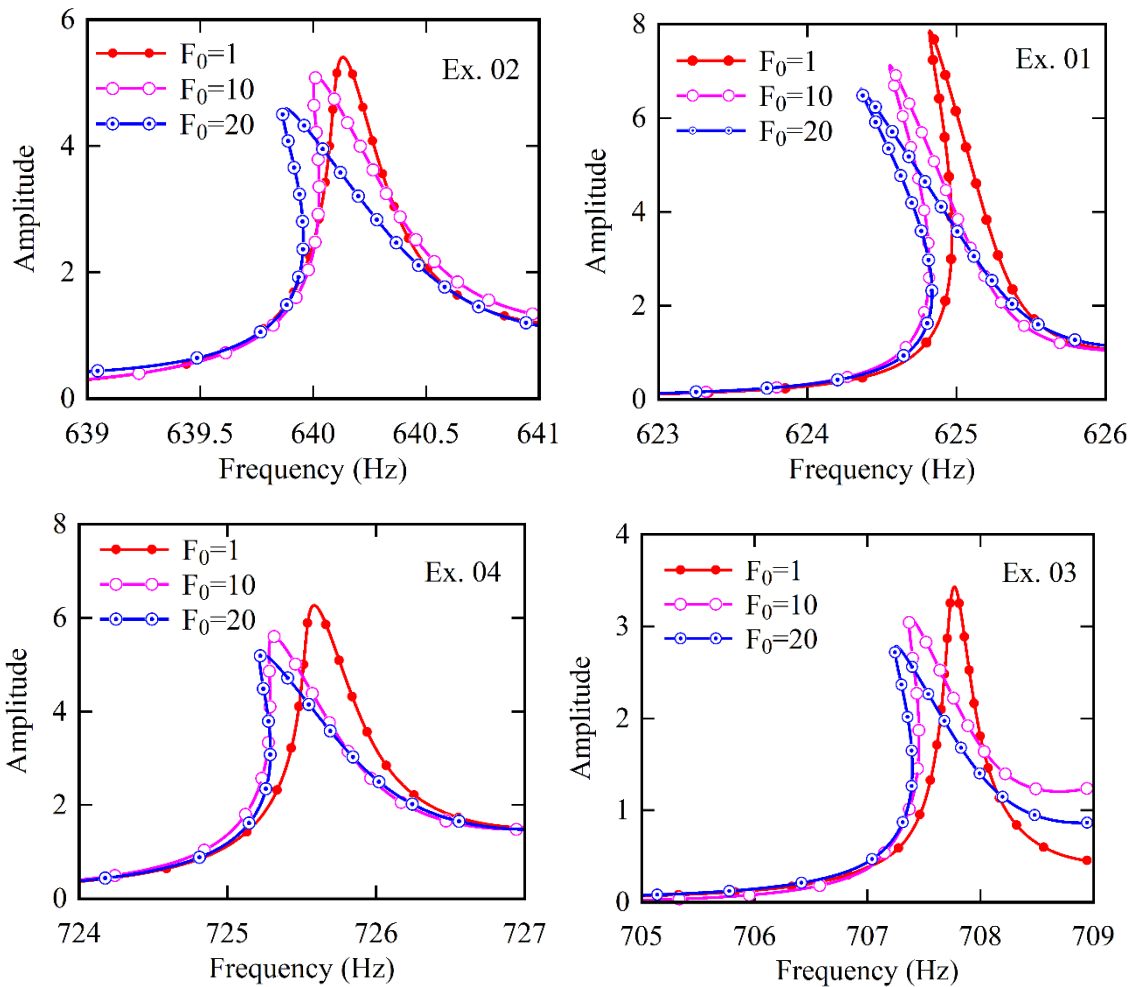
Table 4. Values of the first two natural frequencies for different experimental test modes according to Table 1

Error (%)	Eigen frequencies	Experimental (هرتز)	Updated result (هرتز)	Sample ID. (Bolt Torque)
۰/۹۴	۱	۶۳۹	۶۳۳	Ex. ۰۱ (۲ N.m)
۰/۲۳	۲	۱۷۵۳	۱۷۴۹	
۰/۹۳	۱	۶۴۴	۶۳۸	Ex. ۰۲ (۴ N.m)
۰/۲۱	۲	۱۸۷۸	۱۸۸۲	
۰/۵۹	۱	۶۸۲	۶۷۸	Ex. ۰۳ (۶ N.m)
۰/۴۱	۲	۱۹۳۹	۱۹۳۱	
۱/۸۸	۱	۶۹۱	۷۰۴	Ex. ۰۴ (۸ N.m)
۰/۴۶	۲	۲۰۲۶	۲۰۱۷	

که نشان دهنده رفتار غیرخطی نرم‌شونده می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش دامنه نیرو، منحنی‌های فرکانسی باریک‌تر شده و در نتیجه میرایی معادل سیستم کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی پیش‌بار پیچ‌ها رفتار ارتعاشی این اتصالات تقریباً تمایل به رفتار سیستم‌های خطی دارند. علت این امر را می‌توان در نتیجه کاهش اثرات لقی بین اتصالات و همچنین میکرو لغزش‌ها در هنگام ارتعاشات بیان کرد که اثر عوامل غیرخطی را از بین می‌برند.

در شکل ۱۱ پاسخ زمانی سازه تحت بررسی به ازای گشتاور اعمالی ۴ نیوتن متر به پیچ‌ها و به ازای مقادیر مختلف فرکانس

خطی سیستم می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ الف مشاهده می‌شود که برای نمونه Ex. ۰۱ به ازای $F_1 = 1\text{ N}$ انحراف قابل ملاحظه‌ای در پیک منحنی ایجاد می‌شود ولی برای نمونه‌های دیگر این میزان دامنه نیروی تحریک تأثیر چندانی بر انحراف تابع پاسخ فرکانسی نداشته و رفتار این اتصالات در پیش‌بارهای بالا به ازای این مقدار نیرو نسبتاً خطی می‌باشد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود این است که به ازای مقادیر بیشتر نیروی پیش‌بار، رفتار غیرخطی سیستم شدت می‌یابد که این امر در نتیجه لقی ایجاد شده در اتصال و ایجاد میکرو لغزش‌ها می‌باشد. با افزایش دامنه نیروی اعمالی، نقطه پیک رزونانسی حالت تقارن خود را از دست داده و به سمت چپ تمایل پیدا می‌کند

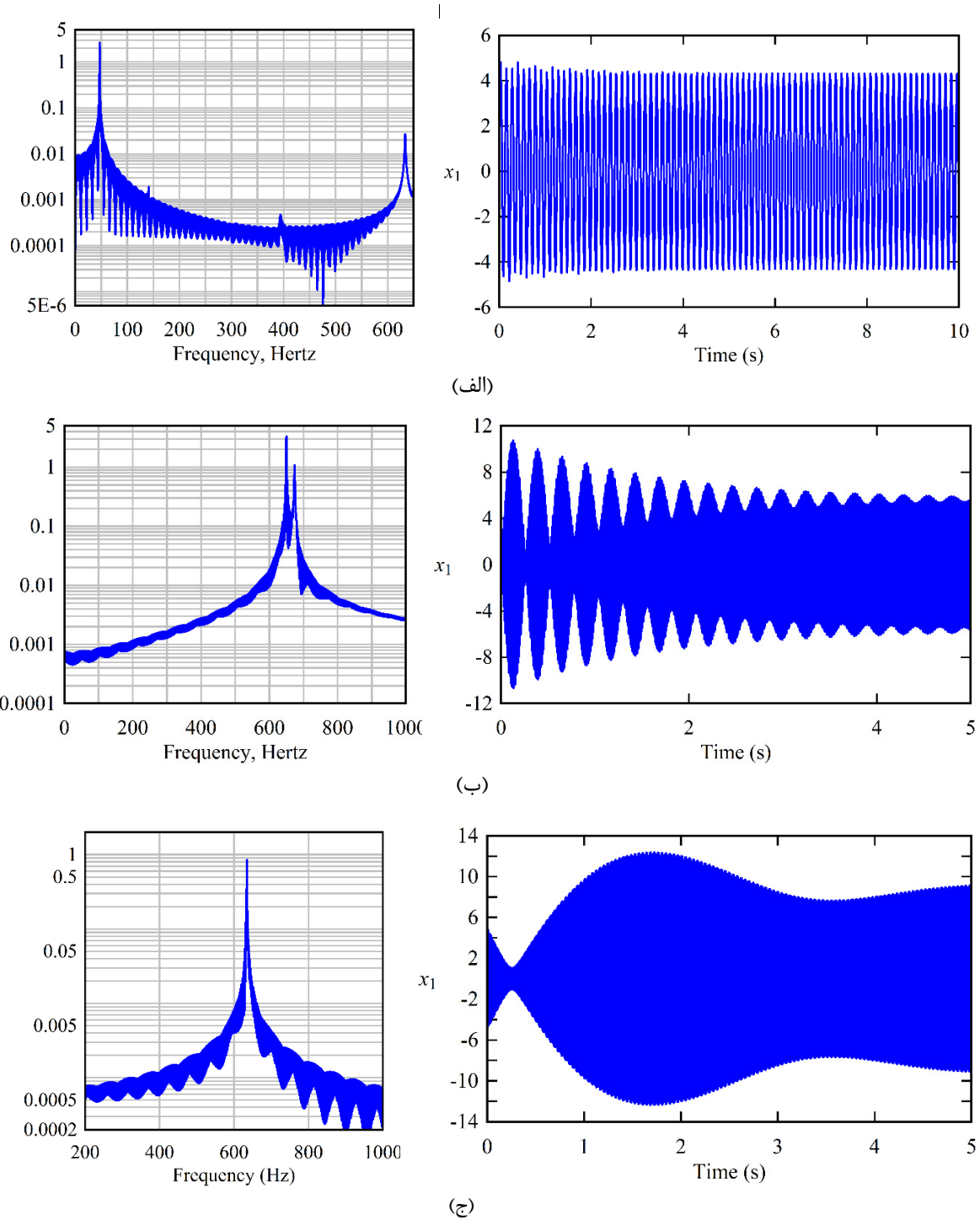


شکل ۱۰. منحنی تابع پاسخ فرکانسی حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده برای نمونه‌های مختلف تحت بررسی (جدول ۱) و به دست آمده با استفاده از مقادیر بروزرسانی شده پارامترها

Fig. 10. Frequency response function curve obtained from the presented analytical model for the various samples (see Table 1) and obtained using the updated values of the parameters

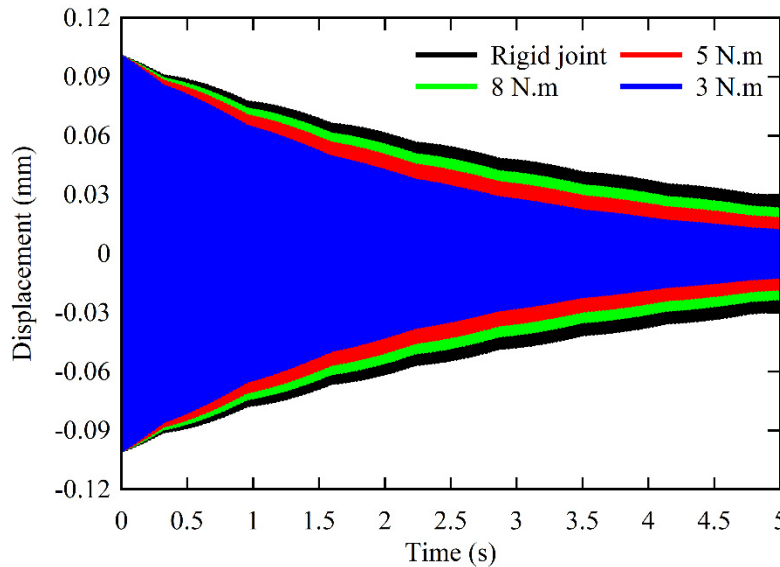
سیستم اتفاق می‌افتد و در ابتدا دامنه نوسانات سیستم افزایش و با گذشت زمان به مقدار مشخصی همگرا شده و سپس دامنه نوسانات ثابت می‌ماند. این پدیده در شرایط تشدید داخلی با پاسخ زمانی شبه متناوب و دامنه ارتعاشی ناپایدار اتفاق می‌افتد. با افزایش بیشتر فرکانس تحریک، رفتار سیستم به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر پیدا کرده در اثر لقی موجود در اتصالات انرژی سیستم به علت برخوردی ایجاد شده بین سطوح افزایش پیدا کرده و در نتیجه با گذشت زمان دامنه نوسانات رشد کرده و افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که رفتار اتصالات پیچی کاملاً غیرخطی بوده و با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان با دقت مناسبی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی این سازه‌ها را مطالعه نمود.

تحریک برابر ۵۰ هرتز، ۶۳۰ هرتز و ۶۴۰ هرتز نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که فرکانس نیروی تحریک تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ زمانی اتصال تحت بررسی دارند. به ازای مقادیر کمتر فرکانس نیروی تحریک، پاسخ سیستم به صورت هارمونیک می‌باشد که این نتیجه با توجه به شکل ۱۱ الف به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به اینکه در این حالت فرکانس طبیعی سازه برابر ۶۳۹ هرتز می‌باشد، بنابراین در شکل‌های ۱۱ ب و ۱۱ ج پاسخ سازه در حوالی فرکانس طبیعی نشان داده شده است. در صورتی که فرکانس بارگذاری هارمونیک نزدیک به فرکانس مود اول سیستم باشد، در این حالت پدیده ضربان اتفاق می‌افتد. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که به ازای تحریک با فرکانس ۶۳۰ هرتز پدیده ضربان در پاسخ



شکل ۱۱. پاسخ زمانی سازه تحت بررسی به ازای گشتاور اعمالی ۴ نیوتن متر به پیچ‌ها، دامنه نیروی تحریک $F_0 = 1N$ و مقادیر مختلف فرکانس تحریک برابر (الف) ۵۰ هرتز، (ب) ۶۳۰ هرتز و (ج) ۶۴۰ هرتز

Fig. 11. Time response of the joint for the torque of 4 Nm, excitation force amplitude of $F_0 = 1N$ and different values of excitation frequency (a) 50 Hz, (b) 630 Hz and (c) 640 Hz



شکل ۱۲. پاسخ زمانی سیستم به ازای مقادیر مختلف گشتاور پیش‌بار پیچ
 Fig. 12. System time response for different values of torque

بروزرسانی مدل به کمک الگوریتم فرا ابتکاری صورت گرفته و از فرکانس‌های طبیعی، برای تشکیل تابع هدف بهینه‌سازی و از الگوریتم کرم شب‌تاب برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اتصال پیچی دو ورق به ازای دامنه تحریک کوچک دارای رفتار خطی می‌باشد و فرکانس‌های طبیعی را می‌توان با استفاده از تست مودال و یا تحریک با سیگنال تصادفی تعیین کرد. با افزایش دامنه تحریک، رفتار سیستم غیرخطی شده و تابع پاسخ فرکانسی نشان دهنده تمایل پیک منحنی به سمت چپ و اثر نرم‌شوندگی در سیستم می‌باشد. استفاده از روش بروزرسانی مدل به کمک الگوریتم کرم شب‌تاب، پارامترهای مدل را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده و مدل دو درجه آزادی دقیقی را در اختیار می‌گذارد که با استفاده از آن رفتار دینامیکی سیستم را می‌توان با دقت بالایی مطالعه نمود. مدل ارائه شده در این تحقیق با دقت بالا و نیاز به کمترین زمان محاسباتی اثرات غیرخطی را در سطوح مشترک اتصالات پیچی پیش‌بینی کرده و به راحتی قابل اعمال به انواع مختلف اتصالات در این زمینه می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Rezaee, V. Maleki, A New Nonlinear Model for Flexural Vibration Analysis of a Cracked Beam with a Fatigue Crack, Journal of Applied and Computational

در شکل ۱۲ پاسخ ارتعاشات آزاد سیستم به ازای مقادیر مختلف گشتاور پیش‌بار نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود میرایی معادل سازه‌ای در حالتی که اتصال به صورت ایده‌آل و صلب در نظر گرفته شود کمتر از سایر حالت‌ها می‌باشد. این نتایج نیز حاکی از آن است که با کاهش نیرو پیش‌بار میرایی اتصال به علت ایجاد حرکت‌های میکرو لغزش بیشتر شده و در نتیجه این امر سبب اتلاف بیشتر انرژی در سازه تحت ارتعاش می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر توسعه روش‌های مختلف پایش وضعیت اتصالات مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها، آنالیز ارتعاشی می‌باشد که برای استفاده از این روش با ارائه مدل ریاضی از سیستم می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف را با دقت بیشتری مطالعه نمود. در تحقیق حاضر به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و در نظر گرفتن اثرات غیرخطی اتصالات پیچی، مدل دو درجه آزادی غیرخطی معادل این اتصالات ارائه شد. پس از تعیین مشخصه‌های دینامیکی معادل سازه با استفاده از روش بروزرسانی و حداقل کردن خطای بین فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از روش تحلیلی و تست‌های تجربی، تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های ارتعاشی این نوع اتصالات به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت.

- (2012) 3017-3027.
- [13] H. Ouyang, M. Oldfield, J. Mottershead, Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(12) (2006) 1447-1455.
- [14] G.O. Adeoti, F. Fan, M. Huihuan, S. Shen, Investigation of aluminium bolted joint (HBJ) system behavior, *Thin-Walled Structures*, 144 (2019) 34-56.
- [15] D. Li, C. Xu, J. Kang, Z. Zhang, Modeling tangential friction based on contact pressure distribution for predicting dynamic responses of bolted joint structures, *Nonlinear Dynamics*, 101(1) (2020) 255-269.
- [16] L. Shuguo, M. Yanhong, Z. Dayi, H. Jie, Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29 (2012) 120-136.
- [17] M. Mayer, L. Gaul, Segment-to-segment contact elements for modelling joint interfaces in finite element analysis, *Mechanical systems and signal processing*, 21(2) (2007) 724-734.
- [18] G. Song, P. Zhang, L. Li, M. Singla, D. Patil, H. Li, Y. Mo, Vibration control of a pipeline structure using pounding tuned mass damper, *Journal of Engineering Mechanics*, 142(6) (2016) 34-54.
- [19] E.S. Buice, D. Otten, R.H. Yang, S.T. Smith, R.J. Hocken, D.L. Trumper, Design evaluation of a single-axis precision controlled positioning stage, *Precision engineering*, 33(4) (2009) 418-424.
- [20] X. Cai, L.R. Taerwe, Y. Yuan, Hysteretic behavior of UHPC beam-column joints after fire exposure, *Fire Safety Journal*, 117 (2020) 10-27.
- [21] D.D. Quinn, Modal analysis of jointed structures, *Journal of Sound and Vibration*, 331(1) (2012) 81-93.
- [22] G. Park, K.-N. Hong, H. Yoon, Vision-based structural FE model updating using genetic algorithm, *Applied Sciences*, 11(4) (2021) 16-32.
- [23] F. Adel, S. Shokrollahi, M. Jamal-Omidi, H. Ahmadian, A model updating method for hybrid composite/aluminum bolted joints using modal test data, *Journal of Sound and Vibration*, 396(4) (2017) 172-185.
- Sciences in Mechanics, 22(2) (2011) 35-52.
- [2] M. Ghaderi, H. Ghaffarzadeh, V.A. Maleki, Investigation of vibration and stability of cracked columns under axial load, *Earthquakes and Structures*, 9(6) (2015) 1181-1192.
- [3] Q. Sun, B. Yuan, X. Mu, W. Sun, Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt, *Smart Materials and Structures*, 28(5) (2019) 23-45.
- [4] N. Jamia, H. Jalali, J. Taghipour, M. Friswell, H.H. Khodaparast, An equivalent model of a nonlinear bolted flange joint, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 153 (2021) 67-89.
- [5] Y. Luan, Z.-Q. Guan, G.-D. Cheng, S. Liu, A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints, *Journal of Sound and Vibration*, 331(2) (2012) 325-344.
- [6] D.J. Segalman, A four-parameter Iwan model for lap-type joints, (2005).
- [7] M. Yoshimura, K. Okushima, Measurement of dynamic rigidity and damping property for simplified joint models and simulation by computer, *Annals of the CIRP*, 25(1) (1977) 193-198.
- [8] N.N. Balaji, M.R. Brake, On the modal surrogacy of joint parameter estimates in bolted joints, in: *Nonlinear Structures and Systems*, Volume 1, Springer, 2020, pp. 137-140.
- [9] A.T. Mathis, N.N. Balaji, R.J. Kuether, A.R. Brink, M.R. Brake, D.D. Quinn, A review of damping models for structures with mechanical joints, *Applied Mechanics Reviews*, 72(4) (2020) 23-45.
- [10] H. Ahmadian, H. Jalali, Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2) (2007) 1041-1050.
- [11] F. Gant, P. Rouch, F. Louf, L. Champany, Definition and updating of simplified models of joint stiffness, *International Journal of Solids and Structures*, 48(5) (2011) 775-784.
- [12] T. Guo, L. Li, L. Cai, Y. Zhao, Alternative method for identification of the dynamic properties of bolted joints, *Journal of mechanical science and technology*, 26(10)

- [27] W.A. Khan, N.N. Hamadneh, S.L. Tilahun, J. Ngnotchouye, A review and comparative study of firefly algorithm and its modified versions, *Optimization Algorithms-Methods and Applications*, 45 (2016) 281-313.
- [28] H. Wang, X. Zhou, H. Sun, X. Yu, J. Zhao, H. Zhang, L. Cui, Firefly algorithm with adaptive control parameters, *Soft computing*, 21(17) (2017) 5091-5102.
- [24] S. Bograd, P. Reuss, A. Schmidt, L. Gaul, M. Mayer, Modeling the dynamics of mechanical joints, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8) (2011) 2801-2826.
- [25] X.-S. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*, Luniver press, 2010.
- [26] X.-S. Yang, Firefly algorithms for multimodal optimization, in: *International symposium on stochastic algorithms*, Springer, 2009, pp. 169-178.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Pirdayr, M. Mohammadi, M. J. Kazemzadeh-Parsi, M. Rajabi, *Analytical Study on Effect of Loosening on Nonlinear Vibration Behavior of Bolted Joints*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 5739-5754.

DOI: [10.22060/mej.2021.19852.7132](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19852.7132)



