

# Impulsive Load Destructive Effects Reduction in Launch Vehicles Using Structural Joint

Hamed Kashani<sup>✉</sup>

Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

E-mail: [kashani@ari.ac.ir](mailto:kashani@ari.ac.ir)

## Abstract

Aerospace systems and subsystems are subjected to impulsive loads due to several reasons like engine start and burnout, separation and so on. These loads may make temporary or permanent failures in some sensitive components or subsystems. To avoid these failures some constraints should be consider in design mechanical process. Another approach can be reducing the load level in transmission path without any change in the source of load and without adding any new component and only with design optimization of available components i.e., structural joints destructive effects of impulsive loads. This paper uses analytical results of joints behavior to present practical solution for minimizing load transmission through the joint.

**Keywords:** Impulsive load, Friction joint, Bolted joint, Normal joint, Parallel joint, Oblique joint

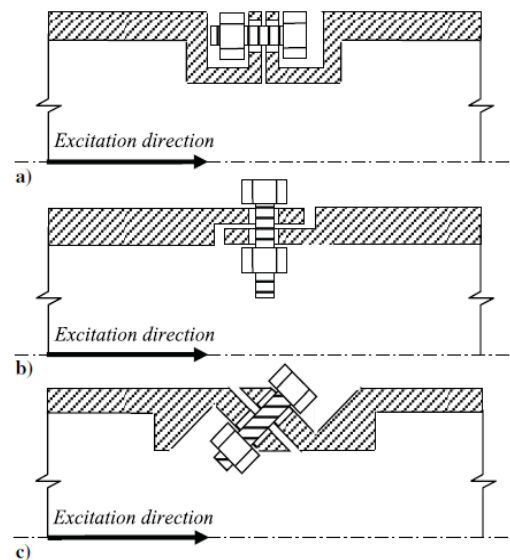
## 1. Introduction

Most of the aerospace systems specifically launch vehicles includes some sensitive subsystems and components that dynamic load such as impulsive loads may temporarily or permanently destroy their functionality. Engine start and burn out, separation, and so on are some of sources of impulsive loads in these systems. Robust design of the sensitive subsystem and components, isolating them from the loads are some solutions to protect them against environmental loads. Such protection methods always lead to addition cost and weight [1]. Following text expresses an idea to reduce the destructive effects of impulsive loads.

## 2. Joints as an Energy Dissipator for Impulsive Loads

Bolted joints that are plenty used in aerospace systems can be employed as a gratis dissipator to engorge destructive energy of impulsive load. Some considerations in joint geometry and material and fastening preload make it suitable for the mentioned aim.

Dry friction plays the main role in the bolted joints in energy dissipation. This main factor can be activated when the contact surface is not orthogonal to the load direction. Based on this condition for using a joint as an energy dissipator, three basic geometries can be imagined for it as shown in Figure 1.



**Figure 1. Fundamental joint geometries, a) normal joint, b) parallel joint, c) oblique joint [2]**

Analytical approach is considered for fundamental study of joint capability for suppressing destructive loads. This approach utilizes Jenkins element for friction modeling in joint [3, 4]. Energy balance method and time domain response are the means of study.

For high amplitude and narrow width impulsive load, energy balance method is used. Figure 2 summarizes the



## COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## How to cite this article:

H. Kashani, "Impulsive Load Destructive Effects Reduction in Launch Vehicles Using Structural Joint," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 27-36, 2023 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1436>.

results of energy balance method. Amplitude inversion border in this figure is the most interesting region from the joint design point of view. Tuning the parameters on this border prevents successive oscillations in response and mitigates the acceleration response.

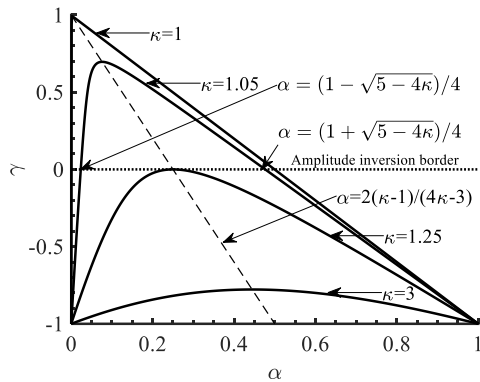


Figure 2. Characteristics curve of Jenkins element in response to narrow width impulsive load [5]

Time domain response is used in the case of input pulse width is of order of natural period of system. Figure 3 shows the fundamental curve of Jenkins element behavior in response to the pulse input. This graph represents the condition for slip occurrence in joint.

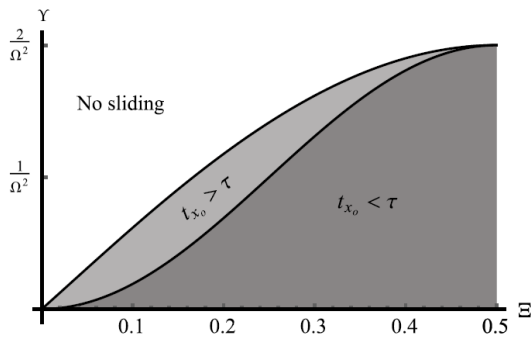


Figure 3. Slip occurrence condition in the joint [2]

After insuring of slip occurrence in the joint, tuning its parameters through geometric design and material selection by optimization process for minimizing the acceleration response.

Maximum level of shock response spectrum vs. dimensionless friction threshold is plotted in Figure 4. As seen in this figure. Maximum SRS has a minimum. This desired minimum takes place if dimensionless friction threshold is equal to the inverse of stiffness ratio. Increasing this ratio reduces the optimality of joint in dissipating energy of impulsive load as Figure 5 presents.

Dimensionless friction threshold and stiffness ratio are two parameters of parallel joint those can be tuned at desired values by fastener preload, appropriate material selection and contact surface roughness to have optimum response.

Selecting the oblique geometry for the joint provides another optimization parameter to the designer. If the fastener preload is obliged by other requirements, obliqueness angle may be used for tuning the friction

threshold and stiffness ratio and finally joint dissipation optimization.

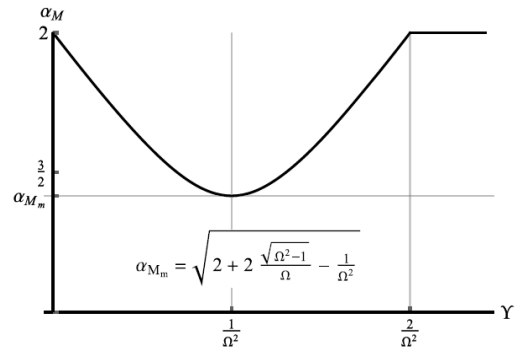


Figure 4. Maximum level of SRS vs. dimensionless friction threshold

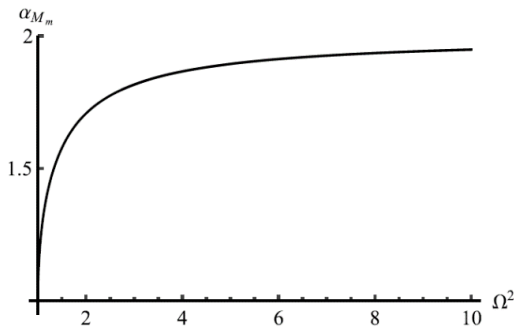


Figure 5. Minimum of maximum level of SRS vs. sticking minus slipping stiffness ratio

### 3. Conclusions

Bolted joints can be employed as a gratis dissipator to engorge destructive energy of impulsive load if the its contact surface is not normal to the load direction. Contact material and roughness, fastener preload are the means of dissipation maximizing in parallel joints. Oblique geometry provides an addition tuning parameters to the designer in the case of bolt preload is bounded by other requirement. Analytical investigations verify the ability of joints for reducing of destructivity of impulsive loads. Numerical and experimental studies are necessary for deeper perception.

### 4. References

- [1] S.A. Leadbetter, JR Alley, and L Vernon, "Prediction and Measurement of Natural Vibrations of Multistage Launch Vehicles," *AIAA Journal*, Vol.1, No.2, pp. 374–379, 1963.
- [2] H. Kashani, "Analytic Approach to the Shock Response Spectrum of Friction Joints," *AIAA JOURNAL*, vol. 57, pp. 4085–4092, 2019.
- [3] Y. Song, and et al, "Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 273, No.1-2, pp. 249-276, 2004.
- [4] L. Li, and et al, "Frequency spectrum analysis of the rotor system with bolted joint: Numerical and experimental verification," *Applied Mathematical Modelling*, Vol, 118, pp. 745-761, 2023.
- [5] H. Kashani, "Analytical parametric study of bi-linear hysteretic model of dry friction under harmonic, impulse and random excitations," *Nonlinear Dynamics*, vol. 89, pp. 267-279, 2017.

# کاهش اثرات مخرب بار دینامیکی ضربه در ماهواره‌ها به کمک اتصالات سازه

حامد کاشانی<sup>†</sup>

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

ایمیل: [kashani@ari.ac.ir](mailto:kashani@ari.ac.ir)

## چکیده

سامانه‌های هوافضایی و زیرسامانه‌های آن‌ها به دلایل گوناگون مانند روشن و خاموش شدن موتورها، جدایش اجزای گوناگون در طول پرواز و غیره در معرض بار ضربه قرار می‌گیرند. بار ضربه می‌تواند سبب خرابی موقت یا دائمی برخی سامانه‌ها گردد. برای پیشگیری از این خرابی‌ها در طراحی مکانیکی اجزای حساس به ضربه و ایزولاسیون آن‌ها باید تمهیدات گوناگونی پیش‌بینی شود. رویکرد دیگر می‌تواند کاهش سطح ضربه وارد شده در مسیر انتقال باشد. بدون ایجاد تغییر در منشأ ضربه و بدون افزودن اجزای جدید به سامانه و تنها با بهینه‌سازی طراحی یکی از اجزای موجود در این سامانه‌ها که همان اتصالات سازه هستند می‌توان از اثرات مخرب ضربه به میزان قابل‌توجهی کاست. در این مقاله بر مبنای نتایج رویکردی تحلیلی راه‌کارهایی عملی برای نیل بدین مقصود ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بار ضربه، اتصال اصطکاکی، اتصال پیچ، اتصال عمود، اتصال موازی، اتصال آرئیب

## علائم و اختصارات

$m$	جرم مؤثر در همسایگی اتصال
$k$	سختی مؤثر سازه در همسایگی اتصال
$k_s$	سختی خمشی مؤثر ناهمواری‌های موجود سطح تماس اتصال
$f_s$	آستانه نیروی اصطکاک مابین سطوح تماس

## مقدمه

در بسیاری از سامانه‌های هوافضایی به‌ویژه ماهواره‌ها که در بردارنده تجهیزات حساس هستند، قرار گرفتن این تجهیزات در معرض بارهای دینامیکی مانند شتاب‌های هارمونیک، شوک مکانیکی و شتاب پایه تصادفی ناگزیر است. تولید رانش در موتورهای سوخت مایع، تحریک

هارمونیک ایجاد می‌کند. روشن و خاموش شدن موتورها، جدایش موتورهای مراحل، باز شدن محفظه محموله و رهاسازی محموله سبب اعمال شوک مکانیکی و پایدرو شوک می‌شود. سوزش موتورها و نیروهای ایرودینامیک سبب بروز تحریکات تصادفی می‌شود. پیشگیری از خرابی مقطعی یا دائمی تجهیزات حساس در برابر بارهای دینامیکی پیش‌شرط ضروری موفقیت مأموریت چنین سامانه‌هایی است. روش‌های گوناگونی برای مواجهه با چنین شرایطی می‌توانند مدنظر قرار گیرند. این روش‌ها از کاهش بارهای دینامیکی گرفته تا مقاوم‌سازی تجهیزات را در بر دارد. اصلاح رفتار موتورها و بهینه‌سازی پروفایل پیش‌ران آن‌ها تا حدی می‌تواند از بروز تحریکات غیرضروری بکاهد اما نمی‌توان انتظار داشت که موتور چنان آرام روشن شود که بار دینامیکی چندان به تجهیزات وارد نیاید. این موضوع در مورد زیرسامانه‌های جدایش نیز صادق است. مقاوم‌سازی اجزای حساس مانند قطعات الکترونیکی نیز هم به افزایش سرسام‌آور هزینه منجر می‌گردد و هم تنها تا حدودی معین انجام‌پذیر است. یک

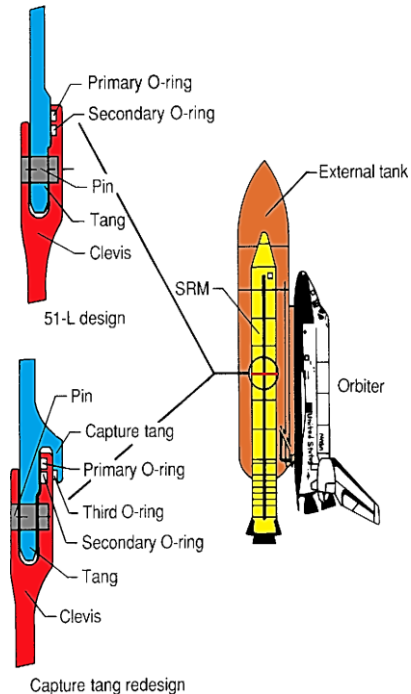
<sup>†</sup> استادیار

یکی از اولین کارهای صورت گرفته در زمینه اثرات اتصالات بر دینامیک سازه مرجع [۱] است. مراجع [۲, ۳] اثرات اتصالات دارای اصطکاک بر دینامیک سازه را در حوزه فرکانس به روش‌های تحلیلی تئوری اغتشاشات، تعادل هارمونیک و میانگین‌گیری بررسی نموده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، این اتصالات هندسه پیچیده‌ای دارند. در این مقاله سعی بر آن است که با بهره‌گیری از نتایج رویکرد تحلیلی اتخاذ شده در [۴, ۵] به بررسی توانایی اتصالات در کاستن از انرژی بارهای دینامیکی پرداخته و راه‌کارهایی عملی برای کاربردی سازی آن ارائه شود. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود اتصالات می‌توانند پیچیدگی‌هایی بسیار در هندسه و مواد داشته باشند اما بخش‌های گوناگون یک اتصال پیچیده را می‌توان با ترکیبی از هندسه‌های ساده بخش بعد مدل نمود. پس از ارائه هندسه‌های مبنا در مدل‌سازی اتصال در مواجهه با بارهای دینامیکی، در بخش "ارائه راه‌کارهای عملی مبتنی بر رویکردهای تحلیلی شناسایی رفتار اتصال" به کمک نمودارهای تبیین‌کننده رفتار اتصال در مواجهه با بار دینامیکی شوک از دو مرجع [۴, ۵] به بیان راه‌کارهایی عملی در طراحی هندسی پرداخته می‌شود. بخش نتیجه‌گیری مقاله چکیده‌ای از دستاوردها و رویکردی برای ادامه کار خواهد بود.

## اشکال گوناگون اتصال

اتصالات پیچ و پرچ را می‌توان بر اساس اینکه سطح تماس<sup>۱</sup> در محل اتصال نسبت به امتداد بار دینامیکی وارد شده چه زاویه‌ای دارد، در سه گروه قرار داد. گروه نخست در بر دارنده اتصالاتی است که سطح تماس در اتصال بر امتداد بار دینامیکی عمود است و به همین دلیل این اتصال در اینجا اتصال عمود<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. شماتیک مدل ساده شده این گروه در قسمت a از شکل (۲) نمایش داده شده است. آشکار است که با وارد آمدن بار دینامیکی، لغزشی<sup>۳</sup> در سطح تماس این اتصال پیش نمی‌آید. بنابراین نیروی اصطکاک بین سطوح فعال نشده و استهلاکی ایجاد نمی‌گردد. در شرایطی که نیروی پیشبار اتصال اجازه دهد جدایش سطوح دو سوی تماس پیش آید، با بروز پدیده لرزش- برخورد<sup>۴</sup> انرژی بار دینامیکی به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌گردد. بنابراین از دیدگاه کاهش انتقال بار دینامیکی این اتصال عملکرد مطلوبی ندارد. اما از این جهت که پیچ تنها در معرض بار محوری قرار می‌گیرد ممکن است به دلیل استحکام بالاتر کششی نسبت به برشی در برخی طراحی‌ها مطلوب باشد.

راه‌حل میانی این است که از ایزولاتورها برای جلوگیری از انتقال شوک به تجهیزات حساس بهره گرفته شود. ایراد این روش نیز علی‌رغم کاربرد گسترده آن این است که افزایش هزینه‌های تولید و افزایش وزن را به دنبال دارند و از سویی کارایی محدودی هم دارند. راه‌حل دیگر که پیشنهاد این مقاله است می‌تواند بدون افزودن اجزای جدید به سامانه و تنها با بهینه‌سازی‌هایی در اتصالات سازه‌ای، آن‌ها را به مستهلک‌کننده‌هایی توانمند در میراسازی انرژی ناشی از بارهای دینامیکی تبدیل کنند. این اتصالات در جای جای سازه به‌وفور یافت می‌شوند. در شکل (۱) نمونه‌ای از آن‌ها نمایش داده شده‌اند. در نمونه‌هایی که در شکل مزبور آورده شده، آن‌ها طبقات گوناگون پوستر جامد یک پرتابگر فضایی را به یکدیگر پیوند می‌دهند. اتصالات دیگری در پیوند این بوسترها با موتور اصلی، موتور اصلی با شاتل و شاتل به محموله حساس نیز وجود دارند که پتانسیل کاهش انرژی شوک ناشی از روشن شدن بوسترها را دارا هستند. همان‌طور که در تصویر اتصال در این شکل دیده می‌شود، اتصال از اجزای مختلف با جنس‌های متفاوت تشکیل شده که حتی می‌توان قطعات لاستیکی در آن دید که شاید در عمل برای مقاصد مانند آب‌بندی استفاده شده‌اند اما بسته به طراحی هندسی می‌توانند در کاهش شوک نیز مؤثر واقع شوند.



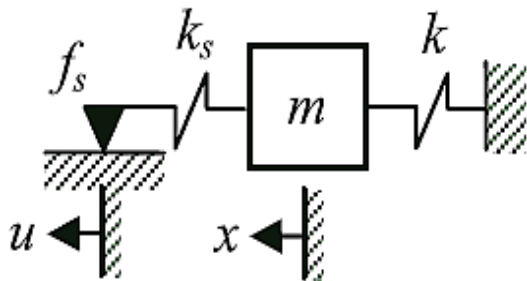
شکل ۱- نمونه‌ای از اتصالات در سازه بوستر جامد یک پرتابگر فضایی

3. Slip  
4. Vibro-impact

1. Contact  
2. Normal joint

هیسترتیک ناشی از اصطکاک خشک در اتصال را مدل می‌کند شمایی از آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

این مدل در [۶] برای توسعه مدلی عددی از اتصال تحت عنوان مدل ایوان<sup>۸</sup> به کار رفته است. از این مدل در بسیاری از مقالات نظیر [۷] برای بررسی عددی رفتار دینامیکی اتصالات استفاده شده است. بنابراین شناسایی دینامیک رفتاری المان جنکینز به عنوان عنصر اصلی سازنده مدل‌های دقیق‌تر از دینامیک اتصال برای آگاهی دقیق‌تر از رفتار مدل‌های پیچیده‌تر اهمیت ویژه دارد. به دلیل ساختار ساده، بررسی دینامیک رفتار مدل جنکینز به روش تحلیل امکان‌پذیر است. لازم به گفتن نیست که مزیت روش‌های تحلیلی ایجاد بینشی همه‌جانبه از مسئله در سطحی قابل قبول از دقت است. با همین هدف کسب بینش جامع، مرجع [۴] دینامیک رفتار المان جنکینز را تحت اثر بار دینامیکی شوک که با اعمال شرط اولیه سرعت لحاظ شده، به روش بالانس انرژی بررسی نموده است. مرجع [۵] با رویکرد حل تحلیلی معادلات حرکت برای سیستمی یک درجه آزادی و شامل المان جنکینز تحت اثر شتاب پایه با شکل پالس مربعی با پهنای پالس گوناگون در واقع طیف پاسخ شوک<sup>۹</sup> را برای سیستمی دارای این المان موردتوجه قرار داده است.



شکل ۳- المان جنکینز در یک سیستم یک درجه آزادی

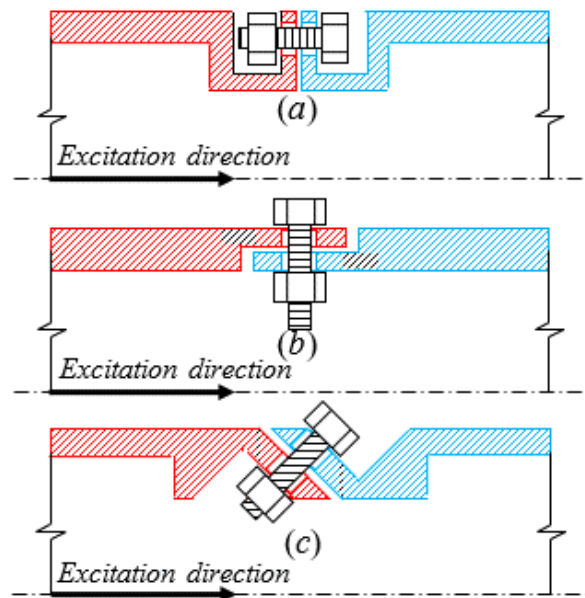
### رویکرد انرژی و ارائه راه‌کارهای کاربردی مبتنی بر آن

شکل ۴ چکیده نتایج مرجع [۴] در بخش پاسخ ضربه را نمایش می‌دهد. در این نمودار  $\alpha = \frac{x_c}{x}$  بیان‌گر نسبت آستانه جابه‌جایی لغزش المان جنکینز،  $x_c = f_s/k_s$ ، به دامنه جابجایی جرم  $m$ ، و  $\gamma$  نسبت دامنه جابه‌جایی  $m$  به دامنه پیشین است. در این نمودار همچنین  $K$  نسبت سختی سیستم در حالت سکون لغزنده به سختی سیستم در حالت لغزش لغزنده یعنی  $K = \frac{k+k_s}{k_s} = \frac{\omega_{n1}^2}{\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2}$  است که در آن  $\omega_{n1}$  فرکانس طبیعی در حالت سکون لغزنده و  $\omega_{n2}$  فرکانس طبیعی در حالت لغزش لغزنده است.

8. Iwan beam model  
9. Shock Response Spectrum (SRS)

اگر اتصال به گونه‌ای باشد که همانند قسمت b در شکل ۲) سطح تماس در اتصال با امتداد بار دینامیکی موازی باشد اتصالی با همین نام یعنی اتصال موازی<sup>۵</sup> خواهیم داشت. به دلیل امکان وقوع لغزش در سطح تماس این اتصال، اصطکاک امکان فعال شدن و میرا نمودن انرژی بار دینامیکی را خواهد داشت. اعمال بیشتر بار به صورت برشی روی پیچ می‌تواند از نقاط ضعف این اتصال باشد.

برای بهره‌برداری همزمان از مزایای دو هندسه مزبور، مدلی هندسی دیگری با نام اتصال اریب<sup>۶</sup> که بینابین دو مدل مزبور است در قسمت c از شکل ۲) نمایش داده شده است. با تغییر شیب سطح تماس نسبت به امتداد بار در این اتصال می‌توان ضمن بهره بردن از مزیت استهلاک ناشی از اصطکاک، از میزان بار برشی روی پیچ نیز کاست [۵]. با این مقدمه از هندسه اتصال، معرفی اجمالی رویکرد دو مرجع [۴، ۵]، بیان همگرایی نتایج آن‌ها در بار دینامیکی شوک و بهره‌گیری از این نتایج در بیان راه‌کارهای عملی در کاهش اثرات بارهای ضربه‌ای در ادامه موردتوجه قرار می‌گیرد.



شکل ۲- هندسه‌های گوناگون اتصال پیچ، (a) اتصال عمود، (b) اتصال موازی و (c) اتصال اریب

### ارائه راه‌کارهای عملی مبتنی بر رویکردهای تحلیلی شناسایی رفتار اتصال

مدل‌های گوناگونی برای مدل‌سازی اتصالات اصطکاک خشک وجود دارد یکی از پرکاربردترین آن‌ها مدل جنکینز<sup>۷</sup> است این مدل که ترکیبی سری از یک لغزنده کولمب و یک فتر خطی است رفتار

5. Parallel joint  
6. Oblique joint  
7. Jenkins

المان جنکینز دومین ابزار را در اختیار طراح می‌گذارد. تنظیم آستانه اصطکاک بین سطوح اتصال به کمک تنظیم گشتاور پیشبار پیچ‌های اتصال به گونه‌ای که  $\alpha = (1 \pm \sqrt{5 - 4\kappa})/4$  می‌تواند رسیدن به شتاب صفر بلافاصله پس از نیم‌پریود را محقق سازد. همان‌طور که در [۵] ذکر شده مقدار بزرگ‌تر نسبت  $\alpha$  که از رابطه مزبور با علامت + حاصل می‌شود، در زمانی کوتاه‌تر جرم را به نقطه تعادل می‌رساند.

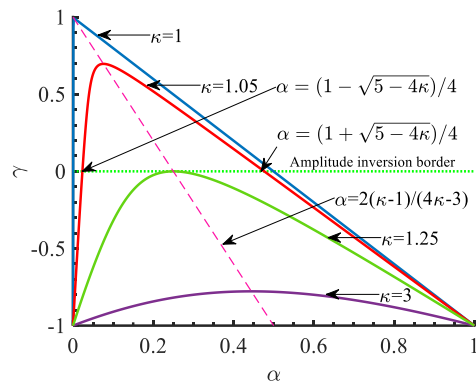
سرانجام آخرین ابزاری که این منحنی مشخصه روی میز طراح می‌گذارد برای زمانی است که به دلیل نرمی در اتصال محدوده طراحی در پایین مرز وارون‌ساز دامنه قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی رسیدن به نقطه تعادل و ماندن در آن ناممکن است اما با تنظیم آستانه لغزش به کمک گشتاور پیشبار در محدوده قله منحنی مشخصه می‌توان تجهیزات حساس را کمتر در معرض شتاب‌های مزاحم ناشی از ضربه قرار داد. با آگاهی از نسبت سختی‌ها برای قرار گرفتن در بهترین شرایط باید  $\alpha = 2(\kappa - 1)/(4\kappa - 3)$  باشد.

همان‌طور که در ابتدای این بخش گفته شد، روش انرژی مبتنی بر پاسخ ضربه ایده‌آل است. این بدان معناست که در این روش به‌صورت ضمنی فرض بر آن است که پهنای پالس ضربه در قیاس با دوره‌های تناوب متناظر با کوچک‌ترین فرکانس طبیعی سازه بسیار کوچک باشد. این فرض به شوک‌ها ناشی از انفجار در سیستم‌ها جدایش بسیار نزدیک است. شوک‌های مکانیکی معمولاً در پهنه گسترده‌تری از زمان و با دامنه‌ای بسیار کوچک‌تر از شوک‌های پایدروتکنیک پدید می‌آیند. رویکرد آنالیز پاسخ دینامیکی با فرض پهنای قابل‌توجهی برای پالس ضربه تحریک شتاب پایه، بیشتر برای بررسی شوک‌ها مکانیکی می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. این رویکرد و نکات کاربردی آن در ادامه توصیف می‌شوند.

## رویکرد پاسخ دینامیکی و ارائه راه‌کارهای کاربردی مبتنی بر آن

پس از معرفی پهنای پالس بی‌بعد شده با پریود سیستم در حالت سکون لغزنده،  $\Xi = \frac{\omega n_1 \tau}{2\pi}$  و شتاب بی‌بعد شده آستانه اصطکاک یعنی  $Y = \frac{f_s}{A}$  که در آن  $A$  دامنه پالس شتاب تحریک و  $f_s = \frac{F_s}{m}$  شتاب معادل آستانه اصطکاک هستند و  $F_s$  آستانه لغزش لغزنده کولمب است. اکنون به کمک نتایج مرجع [۵] در کاهش اثرات مخرب شوک با طراحی بهینه اتصال پرداخته می‌شود.

نخستین دیاگرام مهم در مرجع [۵] که مبین وقوع یا عدم وقوع لغزش است در شکل ۵ آورده شده است. در یک پهنای پالس بی‌بعد مشخص  $\Xi$  برای وقوع لغزش آستانه اصطکاک بی‌بعد باید  $Y < \frac{2}{\Omega^2} \sin \pi \Xi$  باشد. لازم به ذکر است که در این مرجع به جای  $\kappa$  در مرجع [۴] از  $\Omega^2$  استفاده شده است.

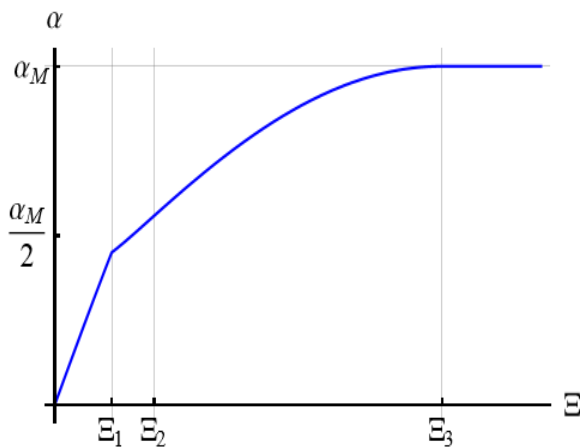


شکل ۴- منحنی مشخصه پاسخ ضربه المان جنکینز

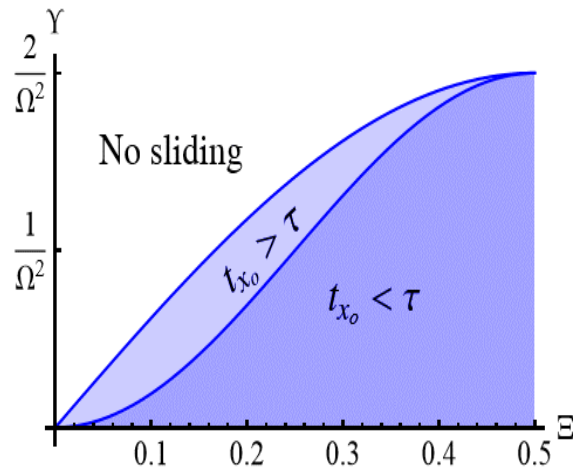
در توصیف پارامترهای فیزیکی باید گفت که  $m$  جرم مؤثر در همسایگی اتصال است که می‌تواند حاوی تجهیزات حساس باشد،  $k$  سختی مؤثر سازه در همسایگی اتصال،  $k_s$  سختی خمشی مؤثر ناهمواری‌های موجود سطح تماس اتصال و  $f_s$  آستانه نیروی اصطکاک مابین سطوح تماس هستند. با این معرفی از فیزیک مسئله، در پاسخ ضربه اگر سهم سختی مؤثر سازه،  $k$  در برابر  $k_s$  اندک باشد، به دلیل فقدان نیروی برگردان کافی جرم  $m$  به نقطه تعادل بر نمی‌گردد به همین دلیل در بالای مرز وارون‌ساز دامنه نسبت دو دامنه پی در پی نوسان مثبت است زیرا جابه‌جایی تغییر علامت نمی‌دهد. با رسیدن سختی سازه به یک چهارم سختی تماس در اتصال، نیروی برگردان ناشی از سختی پس از نیم‌پریود جرم را به نقطه تعادل رسانده و در آنجا نسبت به اینرسی تثبیت می‌نماید که این به معنای عدم اعمال شتاب دیگری به جرم است که از منظر تجهیزات حساس در زمان وقوع بارهای ضربه‌ای بسیار مطلوب است.

اولین دانشی که نمودار مزبور در اختیار طراح سازه قرار می‌دهد، این است که افزایش سختی سازه نسبت به سختی تماس در اتصال، رفته رفته سبب پاسخ شدید به ضربه در آلترناتیو مقابل در پاسخ می‌گردد که اگر این فرآیند پی در پی تکرار شود بسیار نامطلوب است. تنظیم نسبت سختی سازه به سختی تماس در اتصال با استفاده از مواد سخت‌تر در سطوح تماس اتصال و تنظیم صافی این سطوح با روش‌های ماشین‌کاری ایده‌هایی هستند که می‌توانند در به فعل رساندن توان بالقوه اتصال در کاهش اثرات شوک مطرح گردند. به‌عنوان مثال مرجع [۸] اثر سطوح پرداخت شده، زبر، رنگ شده با ضخامت ۲۰ میکرون، رنگ شده با ضخامت ۴۰ میکرون، آجدار مثلثی و آجدار مربعی در رفتار اصطکاکی اتصال پیچ در یک سازه ساختمانی را بررسی نموده است.

ابعاد بسیار کوچک ناهمواری‌های سطح تماس در اتصال می‌تواند سبب بزرگ شدن  $k_s$  نسبت به  $k$  شده و امکان رسیدن به نسبت مطلوب  $\kappa = 1/4$  را میسر نسازد. در اینجاست که منحنی مشخصه پاسخ ضربه



شکل ۶- طیف پاسخ شوک در اتصال موازی



شکل ۵- نواحی وقوع یا عدم وقوع لغزش

که  $\Gamma = \frac{\sqrt{\Omega^2 - 1} \sqrt{Y(2 - Y\Omega^2)}}{1 - Y\Omega^2}$  و  $\Psi = \pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{\Omega^2 - 1} \sqrt{Y(2 - Y\Omega^2)}}{1 - Y\Omega^2}$  در اینجا کاربردهای علمی مباحث نظری مطرح شده در [۵] مدنظر است، با توجه پیچیدگی روابط استخراج شده در این مرجع سعی بر آن است که تنها به ذکر روابط اساسی در کاربرد بسنده شود و بیشتر به مباحث عملی پرداخته شود.

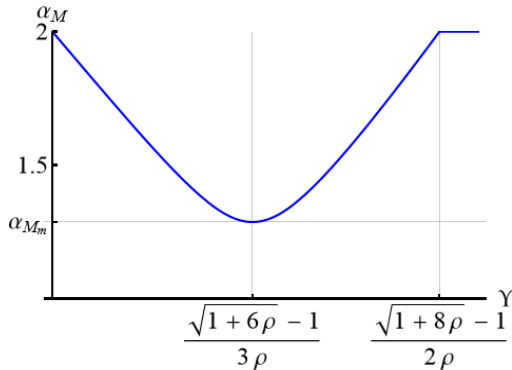
هدف اصلی تنظیم پارامترهای فیزیکی سازه در برابر تحریک مشخص برای نیل به کمترین سطح پاسخ شوک است. این بهینه‌سازی را می‌توان به کمک تنظیم گشتاور پیشبار در پیچ‌ها اتصال از مسیر تنظیم آستانه اصطکاک به انجام رساند. با تغییر آستانه اصطکاک سطح بالایی منحنی طیف پاسخ شوک مطابق نمودار شکل ۷ تغییر می‌کند. چنانکه دیده می‌شود در صورت تنظیم آستانه اصطکاک به کمک گشتاور پیشبار پیچ در مقدار  $Y = \frac{1}{\Omega^2}$ ، سطح طیف پاسخ به  $\alpha_{Mm}$  می‌رسد. همان‌طور که در این شکل آورده شده نشیب این کمینه وابسته به نسبت سختی است که این وابستگی در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش  $\Omega^2$  که در اثر افزایش سختی سازه نسبت به سختی اتصال پیش می‌آید از بهینگی استهلاک اتصال کاسته می‌شود. این نتیجه با نتیجه حاصل از روش انرژی نیز همخوان است. نسبت  $\kappa = \Omega^2 = 1 \frac{1}{4}$  در اینجا نیز مقداری مناسب تلقی می‌شود. باید در نظر داشت که در عمل نمی‌توان به  $\Omega^2 = 1$  رسید زیرا این به منزله سختی بسیار بالای اتصال در مقابل سازه است که نیازمند استفاده از موادی با سختی سطح بسیار بالا در اتصال است. در اینجا نیز با انتخاب صحیح مواد در سطح تماس اتصال و ماشین‌کاری این سطوح با صافی سطح مشخص سختی اتصال نسبت به سازه قابل تنظیم خواهد بود.

در صورتی که  $Y < \frac{1}{\Omega^2} (1 - \cos 2\pi E)$  باشد لغزش پیش از پایان یافتن تحریک آغاز می‌گردد. در این نمودار  $t_{x_0}$  زمان آغاز لغزش را نشان می‌دهد. با توجه به این که  $\Omega \in [1, \infty)$  اگر  $Y > 2$  باشد در هیچ پهنای پالسی، اتصال قادر به استهلاک انرژی نخواهد بود. بنابراین با شناخت شکل موج و ویژگی‌های تحریک شتاب پایه ضربه، در پارامتر  $E$  باید سختی نسبی سازه و اتصال،  $\Omega^2$  و آستانه اصطکاک  $Y$  به گونه‌ای انتخاب شوند که طراحی در یکی از دو ناحیه خاکستری رنگ در شکل ۵ قرار گیرد تا بتوان از خاصیت میراکننده اتصال در استهلاک انرژی ضربه بهره جست. از این پس برای اختصار در نوشتار پسوند بی‌بعد در باقیمانده متن از پارامترهای مسئله حذف می‌گردد.

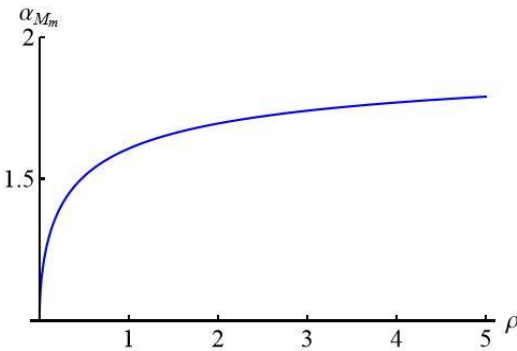
حال که شرط فعال شدن اتصال در استهلاک انرژی ضربه مشخص شد، پاسخ این که چگونه می‌توان این بهره‌برداری را بیشینه نمود در بهینه‌سازی طیف پاسخ شوک نهفته است. نمودار طیف پاسخ شوک از مرجع [۵] در اینجا در شکل ۶ بازنشر می‌شود که در آن  $\alpha$  نسبت شتاب نسبی جرم  $m$  به سطح شتاب تحریک پایه پالس است. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، به ازای پهنای پالس‌های  $E > \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\Omega\Psi}{\sqrt{\Omega^2 - 1}} + \cos^{-1}(1 - Y\Omega^2) \right]$  برابری (۱) می‌رسد.

$$\alpha_M = \begin{cases} \sqrt{Y^2\Omega^2 + 2\Gamma - 2Y + 2}; & Y \leq \frac{2}{\Omega^2} \\ 2; & Y \geq \frac{2}{\Omega^2} \end{cases} \quad (1)$$

ناهمواری‌ها در سطح تماس برای داشتن صافی سطح مناسب در فرایند ماشین کاری اتصال بهره برد.



شکل ۹- تغییرات بیشینه طیف پاسخ شوک برحسب آستانه اصطکاک با فرض وابستگی خطی نسبت سختی و آستانه اصطکاک

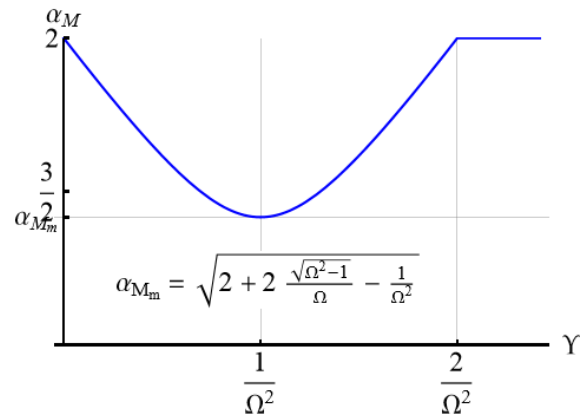


شکل ۱۰- تغییرات کمینه‌ی بیشینه طیف پاسخ شوک بر ضریب وابستگی خطی نسبت سختی و آستانه اصطکاک

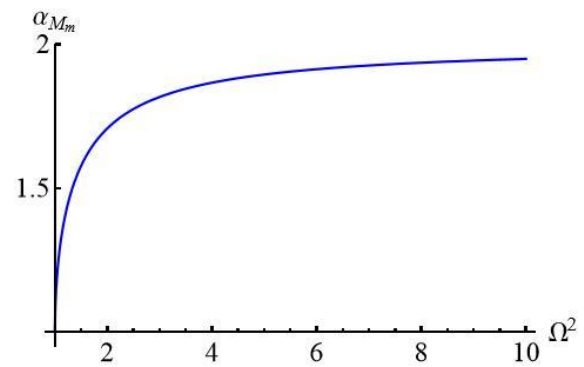
تا بدین‌جا مشخص شده که با انتخاب هندسه موازی برای اتصال، پیشبار پیچ، جنس و صافی سطح سطوح تماس در اتصال سه ابزار در دست طراح برای کنترل شدت پاسخ شوک هستند. در مرجع [۵] مفهومی دیگر تحت عنوان اتصال اریب نیز مورد بررسی قرار گرفته که در عمل، پارامتری دیگر یعنی شیب اتصال نسبت به امتداد بارگذاری را به‌عنوان ابزار کنترل شدت پاسخ شوک در اختیار طراح قرار می‌دهد.

## اتصال اریب

همان‌طور که پیش از این گفته شد، مزیت اتصال عمود در عدم اعمال بار برشی روی پیچ‌ها و مزیت اتصال موازی بهره‌گیری از آن برای کاهش اثرات بارهای ضربه‌ای است. برای بهره‌گیری همزمان از مزایای مزبور می‌توان هندسه‌ای میانی را فرض نمود. این هندسه میانی می‌تواند مقطعی شیب‌دار با شیب ثابت نظیر آنچه در شکل ۲) نمایش داده شده باشد یا اینکه دارای پروفایلی خاص با شیب متغیر باشد. به دلیل رویکرد تحلیلی مرجع [۵] شیب ثابت را مدنظر قرار



شکل ۷- تغییرات بیشینه طیف پاسخ شوک برحسب آستانه اصطکاک با فرض عدم وابستگی نسبت سختی و آستانه اصطکاک



شکل ۸- تغییرات کمینه‌ی بیشینه طیف پاسخ شوک برحسب نسبت سختی

در عمل پارامترهای نسبت سختی،  $\Omega^2$  و آستانه اصطکاک  $\gamma$  به یکدیگر وابسته هستند. با افزایش گشتاور پیشبار پیچ، آستانه اصطکاک به دلیل درگیری تعداد بیشتری از ناهمواری‌های سطح تماس در اتصال افزایش می‌یابد. همزمان بالا رفتن تعداد ناهمواری‌های درگیر سبب افزایش سختی اتصال نیز می‌گردد. با فرض خطی بودن این وابستگی به‌صورت زیر است.

$$\Omega^2 = 1 + \rho\gamma \quad (2)$$

پس از انجام محاسباتی که جزئیات آن در [۵] آمده، مشخص خواهد شد که بیشینه پاسخ شوک برحسب آستانه اصطکاک رفتاری نظیر آنچه در شکل ۹) نمایش داده شده دارد.

نقطه شیب این منحنی برحسب پارامتر  $\rho$  تغییراتی دارد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. برای نیل به بهترین پاسخ تا حد امکان باید ضریب وابستگی نسبت سختی به آستانه اصطکاک کمینه ممکن باشد. کوچک بودن این ضریب به معنی کوچک بودن نسبت سختی است که پیش از این نیز به آن به‌عنوان ضرورتی در نیل به پاسخ کمینه اشاره شده بود که برای رسیدن به آن می‌توان از انتخاب جنس سخت در سطح تماس اتصال یا تنظیم ابعاد

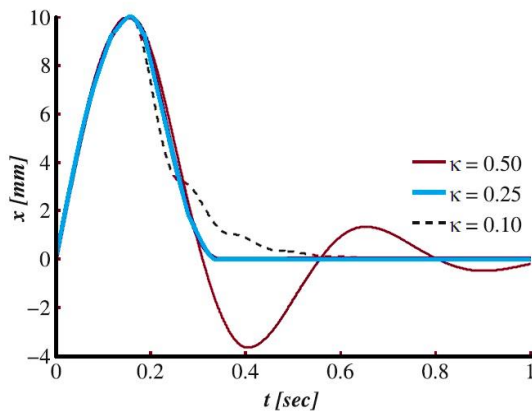


دیگر قیود طراحی، دست طراح را در انتخاب جنس سطوح تماس در اتصال و گشتاور پیشبار ببندند، طراح می‌تواند با تنظیم زاویه سطح تماس نسبت به امتداد بار اعمالی، باز هم به شرایط بهینه برای کمینه سازی پاسخ شوک دست یابد.

## شبیه‌سازی

برای کاربردی‌تر کردن مباحث مزبور، مثال‌هایی در قالب شبیه‌سازی‌های ساده انجام می‌شود تا میزان تأثیر بهره‌گیری از قابلیت اتصال در کاهش اثرات مخرب بارهای ضربه‌ای روشن‌تر گردد.

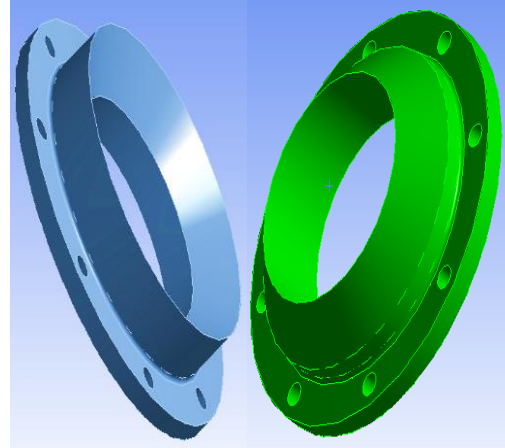
بر اساس نتایج رویکرد انرژی برای جرم تجهیزات حساس معادل  $m = 1 \text{ kg}$ ، سختی سازه برابر  $k = 100 \text{ N/m}$  و  $\alpha = 1/4$  زمانی که جرم، در اثر وارد آمدن بار ضربه به سرعت اولیه  $v_0 = 0.1 \text{ m/s}$  رسیده، با تنظیم سختی اتصال موازی به گونه‌ای که نسبت سختی  $\kappa \in \{0.1, 0.25, 0.5\}$  باشد، جابجایی تجهیزات حساس در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با انتخاب سختی مناسب برای اتصال به گونه‌ای که نسبت سختی  $\kappa = 0.25$  محقق گردد، جابجایی جرم حساس بلافاصله پس از پیک نخست به صفر می‌رسد و از وارد آمدن شتاب‌های پی در پی بدان جلوگیری می‌شود.



شکل ۱۲- پاسخ زمانی جابه‌جایی به شرط اولیه سرعت در نسبت سختی‌های مختلف

بهره‌برداری از نتایج رویکرد پاسخ دینامیکی با اجرای شبیه‌سازی سیستم با جرمی برابر  $m = 1 \text{ kg}$  دامنه پالس  $A = 1 \text{ m/s}^2$  پهنای پالس  $\tau = 0.1 \text{ sec}$  و  $\Omega^2 = 1.1$  پاسخ شتاب را مطابق آنچه در شکل (۱۲) نمایش داده شده، محاسبه نموده است. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود استفاده از قابلیت اتصال در کاستن از انرژی بار دینامیکی دامنه شتاب را به بیش از نصف حالت عدم بهره‌برداری از قابلیت میرایی اتصال می‌رساند.

داده که در اینجا از نتایج آن بهره‌برداری عملی می‌شود. البته می‌توان بخشی از اتصال را اریب و بخشی دیگر را عمود طراحی نمود و این راهی دیگر برای بهره‌گیری همزمان از مزایای دو اتصال است که اجزای آن به‌صورت شماتیک در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات کمینه‌ی بیشینه طیف پاسخ شوک بر ضریب وابستگی خطی نسبت سختی و آستانه اصطکاک

بر فرض آنکه زاویه سطح تماس با امتداد بارگذاری با  $\theta$  نام‌گذاری شود، بر اساس آنچه که در [۵] استخراج شده، نسبت سختی،  $\Omega^2$ ، برای اتصال اریب به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Omega^2 = \frac{\omega_{n_1}^2 \cos \theta}{\omega_{n_1}^2 - \omega_{n_2}^2 - \omega_{n_b}^2} \quad (3)$$

که در آن  $\omega_{n_b}^2 = \mu(k_b/m) \sin \theta \cos \theta$  است.  $m$  جرم مؤثر در همسایگی اتصال،  $k_b$  سختی خمشی مؤثر در همسایگی اتصال و  $\mu$  ضریب اصطکاک دینامیکی مؤثر در اتصال هستند.

با بازگشت به شکل (۷) برای یافتن میزان بهینه پارامترها، باید  $\gamma = 1/\Omega^2$  باشد. زمانی که گشتاور پیشبار پیچ‌ها با قیودی غیر از آنچه موضوع این مقاله است تعیین می‌گردد، برای نیل به بهینگی پارامتر  $\theta$  به کمک طراح می‌آید. مقدار بهینه برای این پارامتر هندسی از برابری زیر به‌دست می‌آید.

$$\theta_{opt} = \frac{1}{2} \text{atan} \frac{N_1 \pm N_2}{D_1 \pm D_2} \quad (4)$$

که در آن

$$\begin{aligned} N_1 &= \mu \omega_b^2 (\omega_{n_1}^2 (2 - \gamma_0) - 2\omega_{n_2}^2) \\ N_2 &= \omega_{n_1}^2 \gamma_0 \sqrt{\mu^2 \omega_b^4 + 4(\omega_{n_1}^2 - \omega_{n_2}^2)(\omega_{n_1}^2 (\gamma_0 - 1) + \omega_{n_2}^2)} \\ D_1 &= \omega_{n_1}^2 \gamma_0 (\omega_{n_1}^2 (2 - \gamma_0) - 2\omega_{n_2}^2) \\ D_2 &= \mu \omega_b^2 \sqrt{\mu^2 \omega_b^4 + 4(\omega_{n_1}^2 - \omega_{n_2}^2)(\omega_{n_1}^2 (\gamma_0 - 1) + \omega_{n_2}^2)} \end{aligned} \quad (2)$$

و  $\omega_b^2 = k_b/m$ ،  $\gamma_0 = f_{s_0}/A$  که  $f_{s_0}$  آستانه اصطکاک نرمالایز شده به جرم ناشی از پیشبار پیچ است. بنابراین در صورتی که

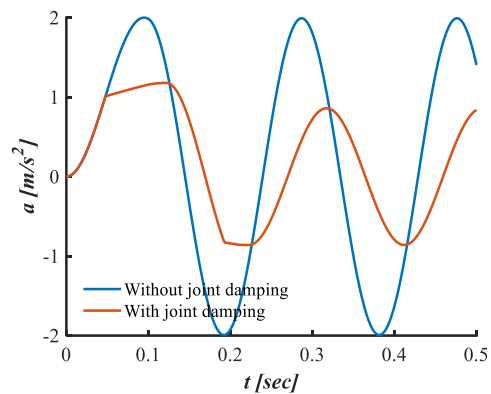
قیودی دیگر غیر از آنچه مدنظر این مقاله است تعیین گردد، اتصال اریب پارامتر کنترلی دیگری در اختیار طراح برای نیل به بهینگی در پاسخ شوک و ضربه قرار می‌دهد. سرنخ‌های کاربردی استفاده از اتصالات در کاهش اثرات مخرب بارهای دینامیکی که در اینجا بر پایه نتایج تحلیلی مراجع به کار رفته ارائه شد در گام‌های بعدی توسط مدل‌های المان محدود و آزمایش قابل توسعه هستند.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

- [1] S.A. Leadbetter, JR Alley, and L Vernon, "Prediction and Measurement of Natural Vibrations of Multistage Launch Vehicles". *AIAA Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 374–379, 1963.
- [2] H. Ahmadian and R. Hashemi, "frequency response of nonlinear joint structures," *14<sup>th</sup> Conf. Mechanical Engineering*, Isfahan University of Technology, 2006 (in Persian).
- [3] H. Nazhafi, P. Asgharifard, and H. Ahmadian, "Analytical development of single - dimensional friction model and determination of transition boundary from adhesion areas to landslide," *Journal of Aerospace Mechanical*, vol. 45, no. 4. 2016 (in Persian).
- [4] H., Kashani, "Analytical parametric study of bi-linear hysteretic model of dry friction under harmonic, impulse and random excitations," *Nonlinear Dynamics*, vol., 89, no. 1, pp. 267-279, 2017.
- [5] H.Kashani, "Analytic Approach to the Shock Response Spectrum of Friction Joints," *AIAA Journal*, vol. 57, no.9, pp. 4085–4092, 2019.
- [6] Y. Song, and et al, "Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 273, no. 1-2, pp. 249-276, 2004.
- [7] L. Li, and et al, "Frequency spectrum analysis of the rotor system with bolted joint: Numerical and experimental verification." *Applied Mathematical Modelling*, vol, 118, pp. 745-761, 2023.
- [8] M. Mahmoudi, M. Kosari, M. Lorestani., " Experimental Evaluation of the Effect of Contact Surfaces on Friction Resistance of Bolt Connections." *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol, 33, no.3, pp. 69-84, 2020 (in Persian).



شکل ۱۲- پاسخ زمانی شتاب به تحریک پایه پالس مربعی شتاب در نسبت سختی بهینه با و بدون اثر میرایی اتصال

## نتیجه‌گیری

بارهای دینامیکی در سیستم‌های هوافضایی مشکلات گوناگونی را سبب می‌شوند. روش‌های گوناگونی برای پیشگیری از اثرات مخرب توسط طراحان در نظر گرفته می‌شود. یکی از روش‌های پیشگیری از تخریب استفاده از اتصالات سازه در کاهش انرژی بار دینامیکی است. مزیت اصلی این روش بی‌نیازی از افزودن اجزای جدید به سیستم است که نتیجه آن بهینه شدن جرم سیستم خواهد بود که این موضوع در سیستم‌های هوافضایی اهمیت بالایی دارد. با بهره‌گیری از نتایج تحلیلی مراجع به کار رفته، سرنخ‌هایی از راه‌کارهایی عملی برای بهره‌گیری از اتصالات در کاهش اثرات مخرب بار دینامیکی شوک و ضربه ارائه شد. در گام نخست باید توجه داشت که برای این بهره‌برداری هندسه اتصال باید به گونه‌ای باشد که در زمان تحریک اصطکاک در سطح تماس فعال شود به همین دلیل تنها اتصالاتی که در آن‌ها سطح تماس بر امتداد بارگذاری عمود نیست می‌توانند مدنظر قرار بگیرند. تنظیم نسبت سختی آستانه لغزش با انتخاب جنس مواد، رسیدن به صافی مناسب در سطوح تماس و انتخاب گشتاور پیشبار مناسب، دست یافتنی است. با تنظیم این پارامترها در اتصال موازی می‌توان در استهلاک انرژی بار ضربه به بهینگی رسید. در صورتی که گشتاور پیشبار توسط