



بررسی تحلیلی تاثیر مشخصات هندسی پایه مدار الکترونیکی در انتقال ضربه ناشی از جدایش ماهواره

بهزاد حیدرپور^۱، عباس رهی^{۲*}، مرتضی شهبازی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

سیستم ماهواره هنگام پرتاب و جدایش تحت ضربه قرار می‌گیرد. در صورت عدم کنترل ضربه این ضربه بر قسمت‌های مختلف از جمله سیستم‌های الکترونیکی آسیب وارد می‌کند. در این مقاله مدار الکترونیکی مرتبط با سیستم هدایت ماهواره به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. این مدار روی ۵ پایه قرار دارد که به بدنه متصل می‌باشند. هدف از این بررسی و مطالعه، طراحی و تحلیل پایه‌ها، می‌باشد، به طوری که کمترین مقدار ضربه به مدار الکترونیکی وارد شود. مدار الکترونیکی در این مطالعه یک صفحه در نظر گرفته شده است. پارامترهای موثر در انتقال ضربه از جمله پارامترهای هندسی و زاویه پایه با سطح افق مورد مطالعه قرار گرفته است. تاثیر زاویه پایه با سطح افق بر سفتی سیستم به صورت تحلیلی بررسی و با استفاده از شبیه سازی المان محدود صحت سنجی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که تغییر زاویه پایه، باعث می‌شود، قابلیت انتقال پذیری شتاب متناسب با فرکانس تحریک تغییر کند؛ همچنین به دلیل وابسته بودن قابلیت انتقال پذیری شتاب به نسبت $\frac{\omega}{\omega_n}$ ، پارامترهای مختلف باید متناسب با محدوده فرکانس تحریک انتخاب شوند، زیرا در صورت عدم انتخاب صحیح پارامترهای مختلف شتاب مدار از شتاب ورودی بیشتر خواهد بود.

کلمات کلیدی: پایه مدار الکترونیکی؛ ضربه؛ ماهواره.

Analytical investigation of the effect of the leg geometric characteristics of the electronic board on the shock transmission caused by satellite separation

Behzad Heidarpour¹, Abbas Rahi^{2,*}, Morteza Shahravi³

¹Ph.D. Student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University

²Assist. Prof., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University

³Assoc. Prof., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University

Abstract

The satellite system is subjected to shock during launch and separation. The shock causes damage to various parts, including the electronic system. In this article, the electronic board of the satellite guidance system has been analytically examined. This board is located on 5 legs that are connected to the body. The purpose of this study is to design the legs so that the least amount of shock is introduced to the electronic board. The electronic board is assumed to be a plate. Effective parameters in shock transmission, including geometrical parameters and the leg angle with the horizon surface, have been studied. The influence of the leg angle with the horizontal surface on the stiffness of the system has been investigated using analytical relations. Finite element simulation has been used to validate the equivalent stiffness. The results of this study show that changing the base angle causes the transmissibility of acceleration to change according to the excitation frequency. Acceleration transmissibility depends on the ratio $\frac{\omega}{\omega_n}$. For this reason, different parameters should be selected according to the excitation frequency range. If different parameters are not selected properly, the output acceleration will be higher than the input acceleration.

Keywords: Electronic board; leg; shock; satellite.

۱- مقدمه

عملکرد صحیح سیستم‌های الکترونیکی در عملکرد سیستم هدایت ماهواره بسیار مهم است. ماهواره به هنگام پرتاب و همچنین جدایش تحت ضربه^۱ قرار می‌گیرد. ضربه ایجاد شده می‌تواند به سیستم‌های الکترونیکی آن آسیب وارد کرده و عملکرد این سیستم‌ها را با اختلال رو به رو کند. پژوهشگران در رابطه با کاهش اثرات ضربه بر سامانه‌ها و مدارهای ماهواره، تحقیقاتی را انجام داده‌اند. رامیرز و همکاران [۱] یک دستگاه تغییر سفتی آزمایشی برای جداسازی ضربه ارائه دادند. این سیستم از نیروی مغناطیسی برای اعمال نیروی بازگردانی استفاده می‌کند که منجر به سفتی موثری می‌شود که برای جداسازی یک محموله استفاده می‌شود. هنگامی که نیروی مغناطیسی روشن و خاموش می‌شود، سفتی قابل تغییر به دست می‌آید. بر حسب درصد تغییر سفتی و نسبت میرایی موثر هنگام جابجایی بین دو حالت سفتی ثابت تخمین زده می‌شود. این سیستم برای جداسازی ضربه بسیار موثر عمل کرده است. پارک و همکاران [۲] ویژگی‌های دینامیکی و پاسخ ضربه سیستم‌های جداسازی ارتعاش را تحلیل کردند که از دیسک‌ها پشتیبانی می‌کنند. عملکرد ضد لرزش از طریق ارسال خطای موقعیت و قابلیت انتقال شتاب بررسی شده و پاسخ ضربه را بر اساس غیرخطی بودن پایه‌های لاستیکی از یک مدل پارامتر توده‌ای استخراج کردند. فولچر و همکاران [۳] رفتار مکانیزم تیر دارای خمیدگی را برای جداسازی ارتعاش و کاهش اثر ضربه بررسی کردند. آنها فنرهای خطی با سفتی مثبت را به موازات حرکت عرضی تیرهای خمیده قرار دادند، که منجر به رفتار سفتی شبه صفر شد. برای سیستم‌های جداسازی ارتعاش، سفتی شبه صفر فرکانس تشدید سیستم را کاهش می‌دهد و در نتیجه قابلیت انتقال آن را در فرکانس‌های بیشتر از تشدید کاهش می‌دهد. دنگ و همکاران [۴] برای کاهش اثر میکرو ارتعاش فلاپویل بر روی سیستم تصویر برداری دوربین، از ضربه گیر لاستیکی در سیستم ماهواره‌ای استفاده کردند و اثرات آن را به روش شبیه‌سازی و آزمایشی تحلیل کردند. آنها در شبیه‌سازی، یک تحلیل مدلسازی یکپارچه بر اساس ردیابی تیر توسعه دادند. نتایج تجربی آنها به خوبی با نتایج شبیه‌سازی شده مطابقت داشته و نشان دادند

که تعدیل تابع انتقال تقریباً ۱۰ درصد افزایش می‌یابد که تأیید می‌کند، فنر لاستیکی به کاهش تأثیر لرزش چرخ طیار بر روی تصاویر دوربین کمک می‌کند. تپیا و لدزما [۵] عملکرد جداسازی لرزش و ضربه چندین جداکننده کابل تحت بارگذاری محوری را بررسی کردند. آنها همچنین پاسخ ضربه جداسازها هنگام قرار گرفتن در معرض پالس‌هایی با مدت زمان‌های مختلف و یافتن بهبود عملکرد جداسازی در مقایسه با یک سیستم خطی معادل را مطالعه کردند. اسماعیل و فرگوسن [۶] یک راهبرد جدید جداسازی ضربه برای سیستم تحریک پایه با معرفی یک مدل دو درجه آزادی با اصطکاک غیرفعال را ارائه دادند. عملکرد مدل را از نظر حداکثر پاسخ جابجایی و شتاب در طول اعمال ورودی ضربه برای حالتی که مدت زمان ورودی ضربه تقریباً برابر با دوره تناوب سیستم است، مقایسه کردند. نتایج مدل ارائه شده در مرجع [۶] نشان می‌دهد که حداکثر جابجایی و شتاب در نقطه انتقال کاهش می‌یابد. جونگ و همکاران [۷] یک روش اسکن موج ضربه توسط لیزر Q برای تجزیه و تحلیل کاهش ضربه و به تصویر کشیدن انتشار موج ضربه در یک ساختار پیچیده را پیشنهاد دادند. این روش برای ارزیابی و تجسم کاهش ضربه توسط عایق‌های لاستیکی نصب شده در پیکربندی به کار گرفته شد که موج ضربه از طریق یک پایه لاستیکی بوتیل به صفحه نصب قطعات الکترونیکی منتقل و منتشر می‌شود. استفاده از پایه لاستیکی بوتیل باعث کاهش ۷۵ درصدی موج ضربه می‌شود. آنها انتشار ضربه کاهش یافته را از نظر کمی مشاهده کردند. کاول و همکاران [۸] با توجه به مزایای خواص میرایی برتر لاستیک فلزی، ساختارهای آن را برای جذب ارتعاشات طراحی کردند. به همین ترتیب، رفتارهای دینامیکی سیستم یکپارچه را به طور جامع مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند؛ همچنین آنها، اثرات پارامترهای هندسی سازه‌های جدا شده بر خواص ارتعاشی سیستم را بررسی کردند. در نهایت روش طراحی عملی برای استفاده از ساختارهای ساده مذکور، به جای جداسازهای بسیار پیچیده، برای یک سیستم پرتاب ماهواره متحرک در حال حرکت در جاده‌های ناهموار را ارائه دادند. کایکینیو و همکاران [۹]، یک طرح میرایی ارتعاش را با استفاده از یک مستهلک کننده لاستیکی فلزی برای آشکارسازهای حساس مکانیکی دوربین‌های فضایی پیشنهاد کردند. با توجه

^۱ shock

جدا کند. خیکسیونگ و همکاران [۱۴] جداسازی ضربه نوع خاصی از رابط موشک فضاپیما را مورد بررسی قرار دادند که در آن دو ساختار جداسازی ضربه را بر اساس نظریه موج تنش پیشنهاد دادند. آنها از دو روش شبیه‌سازی المان محدود و آزمایش برای ارزیابی عملکرد جداسازی ضربه دو راهبرد ضربه پیشنهادی استفاده کردند. هویی و همکاران [۱۵] برای حل مشکلات محیط ضربه و جداسازی ضربه، یک روش تشخیص ضربه ارائه دادند که می‌تواند به طور کمی بین ضربه و حالت ارتعاش اجباری تمایز قائل شود. آنها عملکرد جداسازی ضربه یک جداکننده ضربه فنرهای دیسکی مخالف با پیش سفت شدن تحت شرایط اصطکاک مرزی را بررسی کردند. آنها یک مدل دینامیکی ضربه از جداکننده ضربه فنرهای دیسکی مخالف با پیش سفت شدن تحت شرایط اصطکاک مرزی را ارائه دادند. عسکری و لنسی [۱۶] رفتار دینامیکی میکرو صفحات بسته بندی شده تحت ضربه را بررسی کردند. آنها میکرو صفحه را به صورت غیرخطی هندسی وابسته به اندازه مدل‌سازی کردند و این بسته را مانند یک سیستم جرم و فنر یک درجه آزادی معادل کردند.

در این مقاله یک مدار الکترونیکی که به ۵ پایه به بدنه متصل است و تحت ضربه مکانیکی است، به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این بررسی طراحی و تحلیل پایه‌ها است، به نحوی که مدار الکترونیکی کمترین مقدار شتاب را تحت ضربه وارده از بدنه داشته باشد. برای رسیدن به هدف بیان شده پارامترهایی مانند ابعاد هندسی پایه و زاویه پایه با سطح افق به عنوان متغیر انتخاب شده‌اند.

۲- مدلسازی

در مدلسازی، مدار الکترونیکی صلب و پایه‌های اتصال آن به بدنه متقارن در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱) یک مدار الکترونیکی دایره‌ای که به وسیله ۵ پایه که با سطح افق زاویه α دارند، به بدنه متصل شده است.

به شرایط آزمایش مربوطه، پارامترهای مربوط به مستهلک کننده لاستیکی فلزی طراحی شده است و اثر میرایی ارتعاش طرح با آزمایشات تأیید می‌شود. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که استفاده از مستهلک کننده لاستیکی فلزی می‌تواند در انتقال انرژی ارتعاشی دوربین فضایی نقش داشته باشد، بنابراین به طور موثر مقدار RMS شتاب را در جهت اصلی ارتعاش کاهش می‌دهد. یوان و همکاران [۱۰] رفتار مکانیکی مواد سیم فلزی در هم پیچیده را تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای بررسی کرده و مکانیسم جذب انرژی ضربه را تحلیل کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل سیم فلزی در هم پیچیده عمدتاً به حداکثر باری که تحمل می‌کند، بستگی دارد. با افزایش سرعت ضربه، اثر میرایی هوا در داخل آن بر خواص مکانیکی آن بیشتر خواهد بود؛ همچنین مواد سیم فلزی برای جذب انرژی ضربه تکراری مناسب است. جیفنگ دینگ و همکاران [۱۱] تئوری سیاه‌چاله آکوستیکی غیر ایده‌آل را به حوزه مسئله کاهش ضربه جداسازی ماهواره از موشک بسط داده و طراحی بهبود یافته اتصالات ماهواره را ارائه دادند. تجزیه و تحلیل عددی و آزمایش‌های متعدد آنها نشان داد که طراحی بهبود یافته اتصال ماهواره با سیاه‌چاله آکوستیکی غیر ایده‌آل می‌تواند سطح ضربه را به طور موثر کاهش دهد. سوپارک و همکاران [۱۲] طراحی جدیدی از درج صفحه ساندویچی برای تضعیف ضربه پیشنهاد دادند و کاربرد آن را در یک سازه فضایی بررسی کردند. مطالعه آنها نشان داد که درج ضربه گیر ارائه شده توسط آنها باعث صرفه جویی در فضا و پایداری دینامیکی می‌شود و این قابلیت را دارد که از تجهیزات الکترونیکی کوچکی که بر روی صفحه ساندویچی لانه زنبوری نصب شده است، در برابر ضربه شدید محافظت کند. یان و همکاران [۱۳] پاسخ‌های دینامیکی صفحه‌های لانه زنبوری آلومینیومی که در معرض ضربه با فرکانس بالا قرار گرفته‌اند را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. برای رسیدن به بارگذاری ضربه از ضربه لیزری استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که تحریک لیزری می‌تواند به طور موثر به بارهای ضربه با فرکانس بالا دست یابد و بر معایب روش‌های بار ضربه سنتی غلبه کند. با افزایش انرژی تک ضربان، لیزر می‌تواند یک منبع تحریک بالقوه برای شبیه‌سازی محیط‌های ضربه با فرکانس بالا باشد. صفحه لانه زنبوری آلومینیومی قادر است فرکانس بالا را به میزان قابل توجهی

مقدار $w \sin(\alpha)$ مولفه نیرو در راستای میله و مقدار $w \cos(\alpha)$ مولفه نیرو عمود بر میله را نشان می‌دهد. در این حالت جابجایی در راستای تیر پایه و عمود بر آن از روابط زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\delta_1 = \frac{w \cos(\alpha) l^3}{3EI} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \frac{w \sin(\alpha) l}{EA} \quad (2)$$

که در آن $I = \frac{\pi r_s^4}{4}$ و $A = \pi r_s^2$ است و l ، E و r_s به ترتیب نشان دهنده شعاع، طول و مدول الاستیسیته تیر پایه است. همانطور که در شکل (۳) نیز قابل مشاهده است، جابجایی نوک تیر در راستای x و y از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta_V = \delta_1 \cos(\alpha) + \delta_2 \sin(\alpha) = \left(\frac{\cos^2(\alpha) l^3}{3EI} + \frac{\sin^2(\alpha) l}{EA} \right) w \quad (3)$$

$$\delta_H = \delta_1 \sin(\alpha) - \delta_2 \cos(\alpha) = \frac{w \sin(\alpha) \cos(\alpha) l^3}{3EI} - \frac{w \sin(\alpha) \cos(\alpha) l}{EA} \quad (4)$$

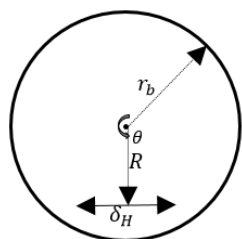
در روابط فوق δ_V و δ_H نشان دهنده جابجایی در راستای عمودی و افقی مختصات کلی را نشان می‌دهند. با استفاده از رابطه نیرو و جابجایی در فنر خطی، می‌توان سفتی معادل برای یک پایه را از رابطه ۵ بدست آورد:

$$K_{eq1} = \frac{w}{\delta_V} = \frac{1}{\frac{\cos^2(\alpha) l^3}{3EI} + \frac{\sin^2(\alpha) l}{EA}} \quad (5)$$

رابطه ۵ برای یک پایه محاسبه شده است. با توجه به اینکه در کل ۵ پایه وجود دارد؛ بنابراین رابطه ۵ برای کل سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$K_{eq} = 5K_{eq1} = \frac{5}{\frac{\cos^2(\alpha) l^3}{3EI} + \frac{\sin^2(\alpha) l}{EA}} \quad (6)$$

زمانی که پایه در راستای y (راستای افق) حرکت می‌کند، به دلیل تقارن به اندازه θ جابجایی زاویه‌ای ایجاد خواهد شد.

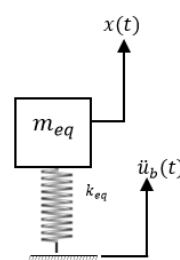


شکل ۴- جابجایی زاویه‌ای مدار الکترونیکی

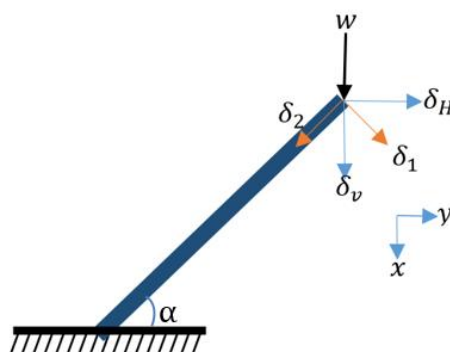


شکل ۱- مدل‌سازی مدار الکترونیکی با ۵ پایه. الف: نمای سه بعدی، ب: نما از بالا، ج: نما از راست، د: نما از چپ

برای بررسی رفتار سیستم تحت اثر ضربه، سیستم به صورت جرم و فنر معادل شکل (۲) مدل‌سازی می‌شود؛ همچنین برای محاسبه سفتی معادل، سیستم مورد نظر از روش نیرو استفاده شده است. شکل (۱) نشان می‌دهد که سیستم از ۵ پایه تشکیل شده است که مدار الکترونیکی روی این ۵ پایه قرار گرفته است. اهر یک از این پایه‌ها یک فنر فرض شده است و این ۵ فنر با هم موازی هستند. مطابق شکل (۳) فرض می‌شود، نیروی w به پایه وارد می‌شود.



شکل ۲- سیستم جرم و فنر معادل تحت ضربه



شکل ۳- مدل‌سازی نیرو و جابجایی در پایه

$$\ddot{\mathbf{z}}(t) + \omega_n^2 \mathbf{z}(t) = -\dot{\mathbf{u}}_b(t) \quad (14)$$

که در آن $\dot{\mathbf{u}}_b(t)$ شتاب (ضربه) وارده به پایه سیستم و $\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}}$ است. شتاب (ضربه) وارده به پایه سیستم به صورت ضربه نیم سینوسی مدل شده است [۱۷].

$$\dot{\mathbf{u}}_b(t) = \dot{\mathbf{u}}_b(t) = A_0 \left\{ \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) U(t) + \sin\left[\frac{\pi}{T}(t-T)\right] U(t-T) \right\} \quad (15)$$

A_0 و T نیز به ترتیب نشان دهنده دامنه و مدت زمان ضربه می‌باشند؛ همچنین در رابطه ۱۵ U تابع پله است. با استفاده از معادلات ۱۲ و ۱۴ شتاب مدار الکترونیکی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = -\omega^2 \mathbf{z}(t) \quad (16)$$

۳- ارایه نتایج و بحث و نتیجه گیری

در این بخش ابتدا سفتی معادل ارائه شده در این مقاله با روش المان محدود صحت گذاری می‌شود. برای صحت سنجی یک تیر با مشخصات بیان شده در جدول (۲) در نرم افزار آباکوس مدل سازی می‌شود. نتایج مقایسه روش المان محدود و روش تحلیلی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- صحت سنجی روش سفتی معادل با شبیه سازی المان محدود

خطا (%)	تحلیلی (N/m)	شبیه سازی (N/m)	زاویه (درجه)
0/47	1/297e5	1/2923e5	۳۰
0/7	1/9439e5	1/9369e5	۴۵
1/4	3/8781e5	3/864e5	۶۰

مشخصات هندسی و جنس پایه‌ها و مدار الکترونیکی در جدول (۲) آمده است. در این قسمت با توجه به مقادیر جدول (۲) تاثیر پارامترهای مختلف هندسی بر شتاب مدار الکترونیکی بررسی خواهد شد. این بررسی در یک ضربه با دامنه 3000g و مدت زمان ۰/۳ میلی ثانیه [۱۸] است. مطابق رابطه ۱۵ ضربه به شکل نیم سینوسی به سیستم وارد می‌شود.

مطابق شکل (۴) مقدار این جابجایی زاویه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta_H = R\theta \quad (7)$$

که در آن R فاصله بین مرکز مدار الکترونیکی و محل اتصال تیر پایه است. در نتیجه داریم:

$$\theta = \frac{\delta_V K_{eq} \sin(2\alpha)}{2R} \left[\frac{l^3}{3EI} - \frac{l}{EA} \right] \quad (8)$$

همچنین جرم معادل سیستم بدون در نظر گرفتن وزن میله با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$T = \frac{1}{2} \left[m_b \delta_v^2 + \bar{I} \theta^2 \right] \quad (9)$$

$$m_{eq} = m_b + \bar{I} \left[\frac{K_{eq} \sin(2\alpha)}{2R} \left[\frac{l^3}{3EI} - \frac{l}{EA} \right] \right]^2 \quad (10)$$

که در آن $\bar{I} = \frac{\pi r_b^4}{4}$ ، و r_b و m_b به ترتیب شعاع و جرم مدار الکترونیکی است.

همچنین با در نظر گرفتن جرم میله، می‌توان جرم معادل سیستم را نیز از معادله زیر محاسبه کرد:

$$M_{eq} = m_b + \bar{I} \left[\frac{K_{eq} \sin(2\alpha)}{2R} \left[\frac{l^3}{3EI} - \frac{l}{EA} \right] \right]^2 + 5 * \left[\frac{m}{3} \sin^2(\alpha) + \frac{33*m}{140} \cos^2(\alpha) \right] \quad (11)$$

که در آن m جرم میله پایه است.

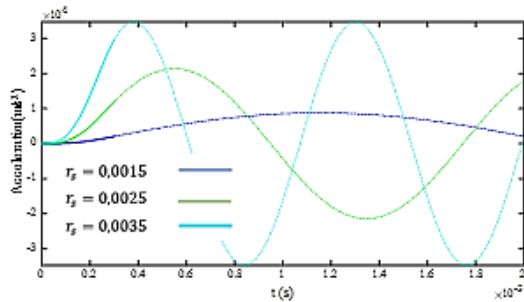
همچنین معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی به صورت زیر است:

$$M_{eq} \ddot{\mathbf{x}}(t) + k_{eq} (\mathbf{x}(t) - \mathbf{u}_b(t)) = 0 \quad (12)$$

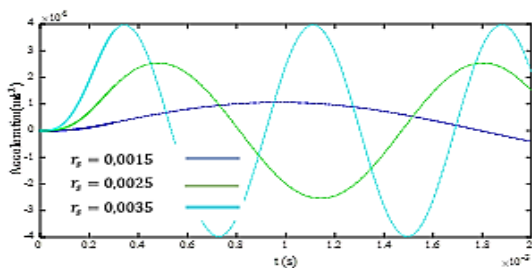
مختصات نسبی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{u}_b(t) \quad (13)$$

اگر از معادله ۱۳، دو بار مشتق گرفته شود و در معادله ۱۲ جایگذاری شود، معادله حرکت در مختصات نسبی به صورت زیر خواهد بود:



شکل ۶- تأثیر شعاع تیر پایه بر شتاب مدار در زاویه $\alpha = \frac{\pi}{6}$



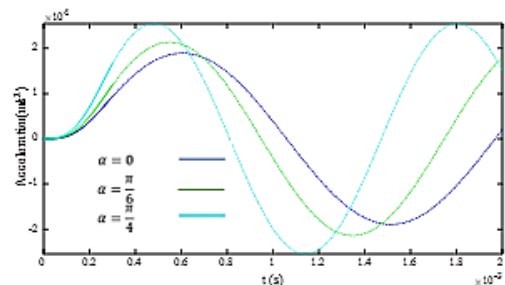
شکل ۷- تأثیر شعاع تیر پایه بر شتاب مدار در زاویه $\alpha = \frac{\pi}{4}$

همانطور که نتایج نمودارهای فوق نشان می‌دهند، اندازه شعاع تیر پایه در شتاب انتقالی به مدار الکترونیکی موثر است. تغییر اندازه شعاع تیر پایه سفتی سیستم را تغییر می‌دهد و با تغییر سفتی سیستم مقدار شتاب مدار الکترونیکی نیز تغییر می‌کند. یکی دیگر از موارد مورد بررسی فرکانس تحریک است. نمودار شتاب-زمان در زوایای مختلف α رسم شده است. نتایج نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهند که تغییر مدت زمان اعمال ضربه که همان تغییر فرکانس تحریک است، در زوایای مختلف تأثیر برابری نمی‌گذارد. از این عدم مساوی بودن اختلاف در شتاب می‌توان نتیجه گرفت که زاویه انتخابی تیر پایه باید متناسب با مدت زمان ضربه وارده باشد.

جدول ۲- مشخصات هندسی پایه و مدار الکترونیکی

نماد	پارامتر	مقدار	واحد
r_s	شعاع تیر پایه	0/0025	m
E_s	مدول الاستیسیته پایه فولادی	240	Gpa
E_{Al}	مدول الاستیسیته پایه آلومینیومی	69	Gpa
l	طول تیر پایه	0/061	m
r_b	شعاع مدار الکترونیکی	0/0595	m
ρ_s	چگالی پایه فولادی	7800	kg/m ³
ρ_{Al}	چگالی پایه آلومینیومی	2710	kg/m ³
m_b	جرم مدار الکترونیکی	0/0298	kg
T	مدت زمان اعمال ضربه	0/0003	s

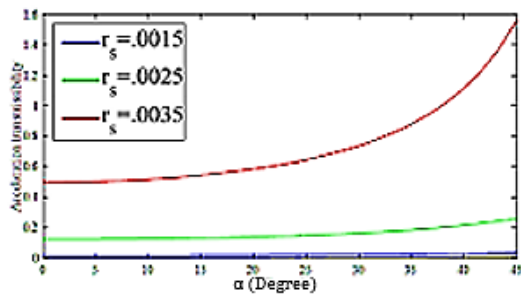
همانطور که بیان شد زاویه بین پایه و سطح افق بر شتاب انتقالی موثر است. نمودار شکل (۵) نشان دهنده این تأثیر است. مطابق شکل (۵)، مقدار شتاب مدار الکترونیکی در زاویه صفر درجه پایه مقدار کمتری دارد. با افزایش زاویه پایه‌ها، مقدار سفتی سیستم افزایش پیدا می‌کند و با افزایش مقدار سفتی مقدار ضربه وارد بر مدار الکترونیکی افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تأثیر زاویه پایه‌ها با سطح افق یعنی زاویه α ، بر شتاب مدار الکترونیکی

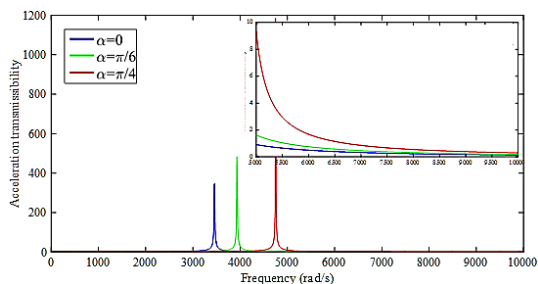
از پارامترهای هندسی مهم که در ضربه منتقل شده به مدار الکترونیکی اهمیت دارد، شعاع تیر پایه است. نمودار شکل‌های (۶) و (۷) تأثیر این شعاع را در زوایای مختلف پایه با سطح افق یعنی زاویه α ، نشان می‌دهند.

در نمودارهای فوق موارد موثر بر شتاب انتقالی به مدار مورد بررسی قرار گرفت. در نمودارهای (۱۱) و (۱۲) قابلیت انتقال پذیری شتاب بر حسب زاویه پایه و همچنین فرکانس تحریک در یک بازه خاص نشان داده شده است. در شکل (۱۱) تاثیر زاویه بر قابلیت انتقال پذیری در ۳ شعاع پایه نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در شعاع ۳٫۵ میلی متر قابلیت انتقال از زاویه حدود ۴۰ درجه بیشتر از یک است که به دلیل افزایش سفتی و افزایش فرکانس طبیعی سیستم و در نهایت تاثیر گذاری روی نسبت $\frac{\omega}{\omega_n}$ می باشد. این مورد در نمودار شکل (۷) نیز برای شعاع ۳٫۵ میلی متر قابل مشاهده است.



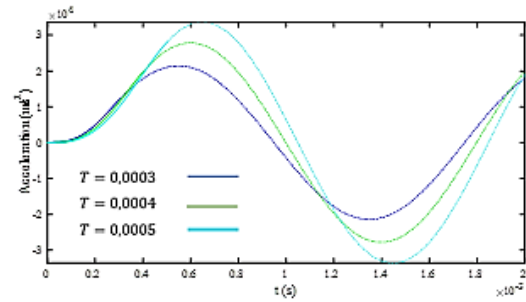
شکل ۱۱- تاثیر زاویه پایه بر قابلیت انتقال پذیری شتاب

شکل (۱۲) قابلیت انتقال پذیری را بر حسب فرکانس تحریک نشان می دهد. مطابق این نمودار که برای ۳ زاویه ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه رسم شده است هر کدام از زاویهها فرکانس طبیعی جداگانه داشته و باعث می شود، در یک فرکانس خاص تشدید اتفاق بیافتد که قله هر نمودار بیانگر این موضوع است.

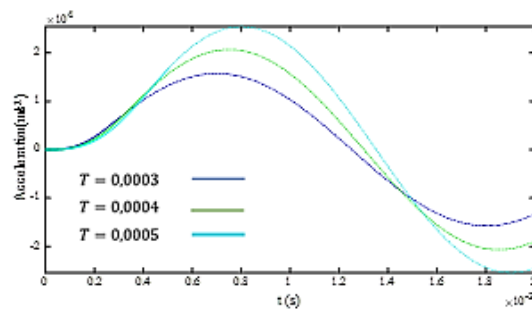


شکل ۱۲- قابلیت انتقال پذیری شتاب بر حسب فرکانس تحریک

نمودار شکل (۱۳)، نمودار طیفی ضربه برای ضربه نیم سینوسی را نشان می دهد. در این نمودار، محور افقی $\frac{T}{T_n}$ است که در آن

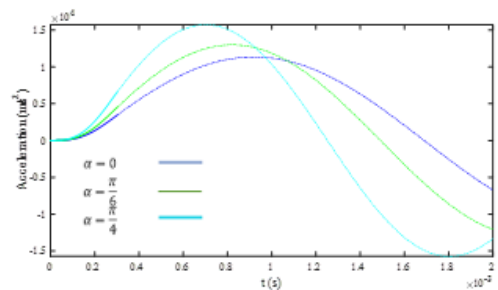


شکل ۸- تاثیر مدت زمان ضربه بر شتاب مدار الکترونیکی در $\alpha = \frac{\pi}{6}$ ($\omega_n = 3933/9$)



شکل ۹- تاثیر مدت زمان ضربه بر شتاب مدار الکترونیکی در $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ($\omega_n = 2/8512e3$)

یکی از مواردی که می تواند بر انتقال ضربه به مدار الکترونیکی موثر باشد، جنس پایه است. تحلیل های انجام شده بر اساس جنس فولاد برای پایه بود. در این قسمت جنس آلومینیوم برای پایه در نظر گرفته می شود. نتایج این تحلیل در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰) نشان می دهد که تغییر جنس پایه از فولاد به آلومینیوم باعث کاهش شتاب مدار می شود. دلیل این کاهش تفاوت مدول الاستیسیته دو ماده است که بر سفتی سیستم تاثیر می گذارد.



شکل ۱۰- تاثیر زاویه پایه آلومینیومی (α) بر شتاب مدار الکترونیکی

مدار روی ۵ پایه که به بدنه متصل است، قرار گرفته است. ضربه وارد شده به سیستم ممکن است، به مدار الکترونیکی آسیب وارد کند، لذا لازم است تا حد امکان مقدار ضربه وارد بر مدار الکترونیکی کاهش یابد. در انتقال ضربه به مدار الکترونیکی پارامترهای مختلفی موثر است. این پارامترها شامل هندسه پایه، جنس پایه و همچنین موقعیت زاویه پایه نسبت به سطح افق است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که:

- تغییر زاویه تیر پایه، سفتی سیستم را تغییر می‌دهد و این تغییر باعث می‌شود، قابلیت انتقال پذیری شتاب متناسب با فرکانس تحریک تغییر کند.
- سفتی معادل پایه تابعی از ابعاد پایه است؛ لذا با تغییر شعاع سفتی معادل تغییر می‌کند. با توجه به اینکه زاویه پایه نیز در سفتی موثر است، لذا ابعاد پایه باید متناسب با زاویه پایه باشد تا قابلیت انتقال پذیری شتاب در سیستم در محدوده مورد نظر قرار گیرد.
- به دلیل وابسته بودن قابلیت انتقال پذیری شتاب به نسبت $\frac{\omega}{\omega_n}$ ، پارامترهای مختلف باید متناسب با محدوده فرکانس تحریک انتخاب شوند؛ زیرا در صورت عدم انتخاب صحیح پارامترهای مختلف شتاب مدار از شتاب ورودی بیشتر خواهد بود.

[5] Tapia-González, P. E., & Ledezma-Ramírez, D. F. (2017). Experimental characterisation of dry friction isolators for shock and vibration. *J LOW FREQ NOISE V A*, 36(1), 83-95.

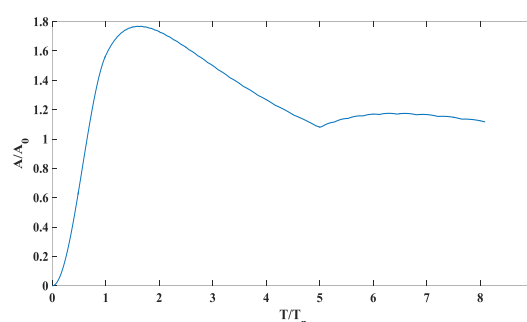
[6] Ismail, M. I., & Ferguson, N. S. (2017). Passive shock isolation utilising dry friction. *Shock. Vib.*, 2017.

[7] Jung, B. H., Kim, Y. W., Lee, J. R., & Kim, D. S. (2019). Visualization of pyroshock wave reduction by insulator using a laser shock based simulation method. *Measurement*, 137, 302-311.

[8] Cao, X., Wei, C., Liang, J., & Wang, L. (2019). Design and dynamic analysis of metal rubber isolators between satellite and carrier rocket system. *Mech. Sci.*, 10(1), 71-78.

[9] Yue, K., Wang, F., Zhang, H., & Li, S. (2019, November). Design and Experiment of Vibration Reduction Scheme for Sensitive Detectors Based on Random Vibration. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 688, No. 3, p. 033085). IOP Publishing.

T دوره تناوب تحریک و T_n دوره تناوب طبیعی است؛ همچنین محور قائم $\frac{A}{A_0}$ است که مطابق رابطه ۱۵، A_0 دامنه تحریک و A شتاب خروجی است. مطابق این نمودار با نزدیک شدن مدت زمان ضربه به دوره تناوب طبیعی سیستم شتاب خروجی افزایش می‌یابد که این موضوع با نمودارهای موجود در شکل (۱۲) سازگاری دارد.



شکل ۱۳- نمودار طبیعی ضربه

۴- جمع بندی

در این مقاله مدار الکترونیکی مرتبط با سیستم هدایت ماهواره که هنگام جدایش و یا پرتاب تحت ضربه مکانیکی قرار می‌گیرد، به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. این

مراجع

[1] Ledezma-Ramirez, D. F., Ferguson, N. S., & Brennan, M. J. (2012). An experimental switchable stiffness device for shock isolation. *J. Sound Vib.*, 331(23), 4987-5001.

[2] Park, K. S., Lim, S., Park, Y. P., Chang, Y. B., & Park, N. C. (2012). Shock and vibration isolation of laptop hard disk drive using rubber mount. *Microsyst. Technol.*, 18(9), 1559-1566.

[3] Fulcher, B. A., Shahan, D. W., Haberman, M. R., Conner Seepersad, C., & Wilson, P. S. (2014). Analytical and experimental investigation of buckled beams as negative stiffness elements for passive vibration and shock isolation systems. *J Vib Acoust*, 136(3).

[4] Deng, C., Mu, D., Jia, X., & Li, Z. (2016). Effects of rubber shock absorber on the flywheel micro vibration in the satellite imaging system. *Photonic Sens.*, 6(4), 372-384.

- [15] Hui, A. M., Yan, M., Zhang, L., Jin, Y. L., Wang, K., & Liu, H. (2021). Shock Characteristics of the Opposed Disc Springs (ODS) Shock Isolator with Pretightening under Boundary Friction Condition. *Shock. Vib.*, 2021.
- [16] Askari, AR, Lenci, S. Size-dependent response of electrically pre-deformed micro-plates under mechanical shock incorporating the effect of packaging, a frequency-domain analysis, *Journal of the Brazilian Society of Int. J. Mech. Sci.*. 43 (2021) 1-21.
- [17] Younis, MI, Jordy, D, Pitarresi, JM. Computationally efficient approaches to characterize the dynamic response of microstructures under mechanical shock, *J Micromech Microeng.* 16 (2007) 628-38.
- [18] Lee, D. O., Han, J. H., Jang, H. W., Woo, S. H., & Kim, K. W. (2010). Shock response prediction of a low altitude earth observation satellite during launch vehicle separation. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, 11(1), 49-57.
- [10] Wu, Y., Jiang, L., Bai, H., Lu, C., & Li, S. (2019). Mechanical behavior of entangled metallic wire materials under quasi-static and impact loading. *Materials*, 12(20), 3392.
- [11] Ding, J., Zhao, H., Wang, J., Sun, Y., & Chen, Z. (2020). Numerical and experimental investigation on the shock mitigation of satellite-rocket separation. *Aerosp Sci Technol*, 96, 105538.
- [12] Park, H. S., Hwang, D. H., Han, J. H., & Yang, J. (2020). Development of shock-absorbing insert for honeycomb sandwich panel. *Aerosp Sci Technol*, 104, 105930.
- [13] Yan, H., Qin, Z., Chu, F., Zhang, W., Yang, Z., Ming, A., & Wang, X. (2020). Dynamic response of aluminum honeycomb panels to high-frequency laser shock excitations. *J Spacecr Rockets*, 57(1), 198-201.
- [14] Xixiong, W. A. N. G., Tao, Y. U., Huipeng, Y. A. N., Jifeng, D. I. N. G., Zhen, L. I., Zhaoye, Q. I. N., & Fulei, C. H. U. (2021). Application of stress wave theory for pyroshock isolation at spacecraft-rocket interface. *Chinese J. Aeronaut.*, 34(8), 75-86.