

# مطالعه تحلیلی رفتار میکرو حسگر و برد الکترونیکی با پایه تیر تاشو تحت شوک مکانیکی در سامانه‌های هوافضا

بهزاد حیدرپور

مرتضی شهری\*

مهران سفیدگران

عباس رهی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران،

b\_heidarpour@sbu.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران،

m\_shahravi@sbu.ac.ir

مریی، مهندسی هوا فضا، گروه مهندسی هوا فضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،

msef@live.com

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران،

a\_rahi@sbu.ac.ir

## چکیده

حفاظت از سیستم‌های الکترونیکی در سیم‌های نایبری هوافضا که تحت شوک مکانیکی هستند، اهمیت بالایی دارد. در این مقاله رفتار یک برد الکترونیکی و میکرو حسگر بر روی برد که تحت شوک مکانیکی پایه قرار دارد به صورت تحلیلی مطالعه می‌شود. برد الکترونیکی مورد نظر که حسگر شتاب‌سنج بر روی آن قرار دارد، با استفاده از ۵ پایه به بدنه متصل است. پایه‌ها به صورت تیر تاشو طراحی شده‌اند. هدف از این مطالعه بررسی عوامل مختلف بر انتقال شوک مکانیکی پایه به حسگر می‌باشد، به طوری که حسگر کمترین شتاب ممکن را داشته باشد. در این مطالعه حسگر به صورت میکروتیر فرض شده‌است و پارامترهای هندسی و زاویه پایه، برد و حسگر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شتاب مطلق حسگر در اندازه و زوایای مختلف تیر تاشو متفاوت می‌باشد و با افزایش طول تیرهای تاشو و کاهش شعاع پایه قابلیت انتقال شوک کاهش می‌یابد. همچنین پارامتر اندازه مربوط به میکروتیر نیز مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد با افزایش این پارامتر قابلیت انتقال شوک افزایش می‌یابد. نوآوری این مطالعه در مدل‌سازی همزمان پایه‌های تیر تاشو، برد الکترونیکی و حسگر به صورت سیستم سه درجه آزادی و تحلیل پارامتری انتقال شوک با در نظر گرفتن تأثیر مقیاس در رفتار میکرو حسگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شوک، تیر تاشو، برد الکترونیکی، میکروتیر، هوافضا، شتاب‌سنج.

## Analytical Study of the Behavior of a Micro-Sensor and Folded-Beam-Based Electronic Board under Mechanical Shock in Aerospace Systems

B. Heidarpour

M. Shahravi

M. Sefidgaran

A. Rahi

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

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

Department of Aerospace, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

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

## Abstract

The protection of electronic systems in aerospace navigation against mechanical shock is critically important. This paper presents an analytical investigation of the dynamic behavior of a Printed Circuit Board (PCB) and its mounted microsensor when subjected to base-excited mechanical shock. The board, which houses an accelerometer sensor, is connected to the main structure via five support legs designed as folded beams. The study aims to evaluate key factors influencing mechanical shock transmission from the base to the sensor, with the objective of minimizing sensor acceleration. The sensor is modeled as a microbeam, and the effects of geometric parameters, including the angles and dimensions of the base, board, and sensor, are systematically analyzed. Results demonstrate that the sensor's absolute acceleration varies significantly with changes in the folded beam's geometry: Longer folded beams and a smaller base radius, reduce shock transmission. Also, the size-dependent parameter of the microbeam plays a notable role; increasing this parameter enhances shock transmission. The key novelty of this work lies in the 3-DOF dynamic model integrating the folded beams, Printed Circuit Board, and microsensor, along with a comprehensive parametric analysis of shock attenuation. Additionally, the study accounts for size-dependent effects in the microsensor's response, providing insights for optimized shock isolation in aerospace applications.

**Keywords:** Shock, Folded-beam, Printed Circuit Board (PCB), Microbeam, aerospace, accelerometer.

## ۱- مقدمه

فرود یا انتقال ناگهانی انرژی باشند و معمولاً دارای دامنه بالا و مدت‌زمان بسیار کوتاه‌اند. این نوع تحریک می‌تواند باعث آسیب دیدن یا حتی نابودی اجزای حساسی مانند حسگرها، بردهای الکترونیکی یا تجهیزات اپتومکانیکی شود. به همین دلیل، طراحی سیستم‌هایی با قابلیت «جداسازی شوک» یکی از مباحث فعال در زمینه دینامیک سازه و طراحی تجهیزات دقیق است.

در بسیاری از سامانه‌های حساس مانند تجهیزات هوافضا، ابزارهای پزشکی، ادوات نظامی و سیستم‌های میکرومکانیکی، محافظت از اجزای الکترونیکی در برابر شوک‌های مکانیکی ناگهانی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. شوک‌های مکانیکی می‌توانند ناشی از برخورد، انفجار،

\* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m\_shahravi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴

طی دهه‌های اخیر، روش‌های متنوعی برای کاهش انتقال شوک به سیستم توسعه یافته‌اند. این روش‌ها را می‌توان به‌طور کلی به چند گروه اصلی تقسیم کرد: جداسازهای ویسکوالاستیک، سازه‌های اصطکاکی، میراگرهای مغناطیسی، سازه‌های با سفتی متغیر و ساختارهای مکانیکی مبتنی بر طراحی‌های خاص هندسی. در روش‌های ویسکوالاستیک، از مواد پلیمری برای جذب انرژی و تبدیل آن به حرارت استفاده می‌شود. این روش‌ها اگرچه ساده و ارزان‌اند، اما در دماهای بالا و شرایط دینامیکی پیچیده عملکرد مناسبی ندارند [۱]. ساختارهای اصطکاکی با ایجاد مقاومت در برابر حرکت نسبی بین سطوح، انرژی شوک را مستهلک می‌کنند ولی غالباً در کاربردهای دقیق دچار خطا یا سایش زودهنگام می‌شوند [۲].

میراگرهای مغناطیسی که بر اساس تعادل نیروی جذب و دفع قطب‌های مغناطیسی طراحی می‌شوند، فاقد تماس مکانیکی‌اند و در محیط‌های خلأ نیز قابل استفاده‌اند. با این حال، هزینه بالا، تنظیم دقیق و حساسیت به دما از نقاط ضعف آن‌ها محسوب می‌شود [۳]. ساختارهایی مانند فنرهای پیش‌فشرده، تیرهای خمیده و سامانه‌های با سفتی منفی نیز در دسته روش‌های مکانیکی غیرخطی قرار می‌گیرند که با بهره‌گیری از رفتار ویژه‌ی هندسی و مصالح، توانایی بالایی در کنترل پاسخ دینامیکی دارند [۴].

در میان این روش‌ها، تیرهای تاشو (Folded Beam Structures) جایگاه خاصی یافته‌اند. این تیرها معمولاً به‌شکل U، Z یا شکل‌های ترکیبی طراحی می‌شوند و قابلیت ایجاد نواحی با سفتی منفی یا شبه-صفر دارند. استفاده از تیرهای تاشو علاوه بر امکان فشرده‌سازی و طراحی جمع‌وجور، به‌واسطه رفتار مکانیکی غیرخطی، امکان تنظیم پاسخ سیستم نسبت به تحریکات مختلف را فراهم می‌سازد [۵]. این مزیت باعث شده تا در طراحی محافظ‌های شوک و جداسازهای ارتعاشی به‌ویژه در مقیاس‌های کوچک مانند ممز بسیار مورد توجه قرار گیرند.

مطالعات متعددی به بررسی رفتار دینامیکی و عملکرد جذب شوک تیرهای تاشو پرداخته‌اند. ژو و همکاران [۵] یک ساختار تیر تاشو برای محافظت از ژيروسکوپ ممز در شرایط شوک حرارتی طراحی کرده‌اند که در آن با تنظیم ابعاد هندسی تیر، پاسخ دینامیکی سیستم کنترل شده‌است. آن‌ها نشان دادند که استفاده از ساختار تاشو منجر به کاهش بیش از ۴۰٪ در شتاب انتقالی به ژيروسکوپ می‌شود. وی و همکاران [۶] تأثیر زاویه خمیدگی و تعداد پایه‌های تاشو را در یک سیستم جداساز بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در زاویه‌های ۶۰-۷۵ درجه و افزایش تعداد تیرها از ۴ به ۶، انتقال شوک به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در مقاله‌ای دیگر، ژانگ و همکاران [۷] تیرهای تاشو را با اتصالات متحرک ترکیب کرده و یک سامانه جداساز با میرایی تطبیقی توسعه داده‌اند. آن‌ها با استفاده از آزمون‌های دینامیکی، اثبات کردند که این نوع طراحی می‌تواند شوک‌های بالاتر از ۱۰۰۰g را بدون تخریب به سطح زیرین منتقل کند. مطالعه‌ای مشابه توسط لیئو و همکاران [۸] با تمرکز بر شتابسنج ممز نشان داد که ساختارهای تاشو قادر به تحمل بارهای گذرا تا 1500g بوده و پاسخ سیستم به‌شدت به ضخامت، طول موثر و پیکربندی خمیدگی تیر وابسته است. چن و همکاران [۹] با مدل‌سازی غیرخطی پاسخ دینامیکی تیر تاشو، اثر سفتی و دامنه

تحریک را تحلیل کرده و نشان دادند که طراحی مناسب می‌تواند پدیده جهش را کنترل کند.

در پژوهشی دیگر، منصور و همکاران [۱۰] یک شتاب‌سنج سه‌محوره مبتنی بر ممز را طراحی کردند که از تیرهای تاشو برای تعلیق جرم استفاده می‌کند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که این ساختار می‌تواند حساسیت بالایی در سه محور ارائه دهد و پایداری مکانیکی مناسبی در برابر شوک‌های محیطی داشته باشد.

همچنین، یون [۱۱] در پایان‌نامه خود به بررسی روش‌های مختلف حفاظت از ممز در برابر شوک و ارتعاش پرداخت. او با طراحی و آزمایش تیرهای تاشو با ابعاد مختلف نشان داد که این ساختارها می‌توانند شوک‌هایی تا ۵۰۰۰g را تحمل کنند و عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی دارند.

در مطالعه‌ای دیگر، لیئو و همکاران [۱۲] به بررسی پاسخ دینامیکی تیرهای تاشو در محیط‌های شوک‌زا پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی نشان دادند که طراحی مناسب تیرهای تاشو می‌تواند به‌طور مؤثری انرژی شوک را جذب کرده و از انتقال آن به اجزای حساس جلوگیری کند.

با وجود مطالعات متعدد، هنوز شکاف مهمی در ادبیات وجود دارد: بیشتر کارهای گذشته یا صرفاً به طراحی عددی/تجربی پرداخته‌اند، یا تنها یک جزء سیستم را بررسی کرده‌اند. مدلی که هم پایه (تیر تاشو)، هم برد الکترونیکی و هم میکروچسگر را هم‌زمان و در یک قالب تحلیلی بررسی کند، بسیار کم‌یاب یا حتی غایب است.

از سوی دیگر، با کاهش ابعاد به مقیاس میکرو، رفتار مکانیکی کلاسیک دیگر پاسخ‌گوی تحلیل دقیق نیست. در این شرایط، تئوری‌های غیرکلاسیک مانند تئوری تنش کوپل اصلاح‌شده ضروری می‌شوند. این تئوری‌ها اجازه می‌دهند تأثیر اندازه در تحلیل وارد شود، به‌ویژه در تیرهای باریک یا میکروساختارها که نسبت ضخامت به طول کوچک است. کیم و همکاران [۱۳] نشان دادند که در مدل‌سازی میکروتیرهای مورد استفاده در ممز، استفاده از نظریه تنش کوپل می‌تواند تا ۳۰٪ دقت پیش‌بینی را نسبت به مدل کلاسیک بهبود دهد. این موضوع در طراحی و حفاظت از میکروچسگرها در برابر شوک بسیار حیاتی است. تئوری تنش کوپل اصلاح‌شده نخستین‌بار توسط یانگ و همکاران [۱۴] معرفی شد و برای تحلیل رفتار مواد در مقیاس میکرو توسعه یافت. این نظریه با در نظر گرفتن ممان‌های داخلی و طول مشخصه، توانست دقت پیش‌بینی‌های مکانیکی را در تیرهای باریک بهبود دهد.

پژوهش حاضر با هدف پرکردن این خلأ علمی طراحی شده است. در این مطالعه، یک مدل دینامیکی سه درجه آزادی توسعه داده شده که شامل پایه‌های تاشو (به‌صورت فنرهای معادل با سفتی مشخص)، برد الکترونیکی به‌عنوان جرم میانی، و میکروچسگر مدل‌شده با تئوری تنش کوپل می‌باشد. تحریک پایه به‌صورت نیم‌سینوسی با شدت ۱۰۰۰g و مدت زمان ۱ میلی‌ثانیه اعمال شده و پاسخ سیستم به‌صورت گذرا بررسی شده‌است. با استفاده از تحلیل عددی معادلات حرکت، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله طول و زاویه پایه‌های تاشو، ضخامت برد، و پارامتر مقیاسی حسگر بررسی شده و نتایج نشان داده‌اند که انتخاب مناسب این پارامترها می‌تواند انتقال شوک به حسگر را به‌طور محسوسی کاهش دهد.

الکترونیکی  $\frac{\gamma}{\delta_f}$  برابر جرم برد الکترونیکی می‌باشد [۱۴].

سفتی معادل میکرو تیر به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۷]:

$$k_{eq3} = \frac{3E_s I}{L_s^3} \left[ 1 + \frac{2}{1+\nu} \left( \frac{L_s}{h_s} \right)^2 \right] \quad (6)$$

در اینجا  $E_s$  مدول الاستیسیته،  $L_s$  طول،  $h_s$  ضخامت و  $I_s$  پارامتر وابستگی اندازه میکرو تیر را نشان می‌دهد. با توجه به تئوری‌های غیر کلاسیک در زمینه ابعاد میکرو، پارامتر اندازه بر جرم معادل ساختار میکرو تاثیر گذار نمی‌باشد، لذا جرم معادل میکرو تیر  $\frac{33}{140}$  برابر جرم میکرو تیر می‌باشد [۱۶].

معادله ارتعاش سیستم ۳ درجه آزادی با شوک پایه به شرح زیر است [۱۸]:

$$\begin{bmatrix} m_{eq1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{eq2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{eq1} + k_{eq2} & -k_{eq2} & 0 \\ -k_{eq2} & k_{eq2} + k_{eq3} & -k_{eq3} \\ 0 & -k_{eq3} & k_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) - u_b(t) \\ x_2(t) - u_b(t) \\ x_3(t) - u_b(t) \end{Bmatrix} = 0 \quad (7)$$

برای هر جرم، مختصات نسبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_j(t) = x_j(t) - u_b(t) \quad (8)$$

با استفاده از معادلات (۷) و (۸) می‌توان معادله (۹) را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} m_{eq1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{eq2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Z}_1(t) \\ \ddot{Z}_2(t) \\ \ddot{Z}_3(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{eq1} + k_{eq2} & -k_{eq2} & 0 \\ -k_{eq2} & k_{eq2} + k_{eq3} & -k_{eq3} \\ 0 & -k_{eq3} & k_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ Z_3(t) \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{eq1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{eq2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_b(t) \quad (9)$$

برای شوک پایه با تابع نیم سینوس  $\ddot{u}_b$  به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\ddot{u}_b = A_0 \left\{ \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) U(t) + \sin\left[\frac{\pi}{T}(t-T)\right] U(t-T) \right\} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $A_0$  دامنه شتاب،  $U(t)$  تابع پله واحد و  $T$  مدت زمان اعمال شوک می‌باشد.

با استفاده از معادلات (۸) و (۹) شتاب مطلق به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{eq1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{eq2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{eq3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_{eq1} + k_{eq2} & -k_{eq2} & 0 \\ -k_{eq2} & k_{eq2} + k_{eq3} & -k_{eq3} \\ 0 & -k_{eq3} & k_{eq3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1(t) - u_b(t) \\ x_2(t) - u_b(t) \\ x_3(t) - u_b(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

مدل پیشنهادی در عین سادگی محاسباتی، انعطاف‌پذیر و قابل توسعه است. از آن می‌توان به‌عنوان ابزاری برای طراحی اولیه و بهینه‌سازی ساختارهای جداساز در سامانه‌های حساس استفاده کرد. همچنین این مدل قابلیت گسترش به سیستم‌های چند پایه، رفتار غیرخطی تیرها، یا درنظر گرفتن میرایی و اصطکاک را نیز در تحقیقات آینده خواهد داشت.

## ۲- مدل‌سازی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، برد الکترونیکی که حسگر روی آن قرار دارد با ۵ پایه به صورت تیرتاشو به زمین متصل شده‌است. در این شکل برد به رنگ سبز و حسگر که به صورت یک میکروتیر فرض شده، به رنگ قرمز می‌باشد.

به منظور تحلیل، سیستم به صورت یک مدل ۳ درجه آزادی مدل شده‌است (شکل ۲).

با توجه به شکل ۲ که به صورت مدل سه درجه آزادی می‌باشد، سفتی و جرم معادل هرکدام از درجات آزادی باید محاسبه شود.  $k_{eq1}$  به صورت زیر می‌باشد:

$$k_{eq1} = 5k_l \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $k_l$  سفتی مربوط به هرکدام از پایه‌ها می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$k_l = \frac{1}{2 \left( \frac{L_1}{E_l A} \sin^2(\alpha) + \frac{L_1^3}{12 E_l I} \cos^2(\alpha) \right)} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $l$  طول تیر مربوط به پایه،  $E$  مدول الاستیسیته،  $A$  سطح مقطع تیر پایه و  $I$  ممان سطح مقطع تیر می‌باشد. جرم معادل هر کدام از پایه‌ها از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$m_{eq1} = 2 \times \left( \frac{m}{3} \sin^2(\alpha) + \frac{33 \cdot m}{140} \cos^2(\alpha) \right) \quad (3)$$

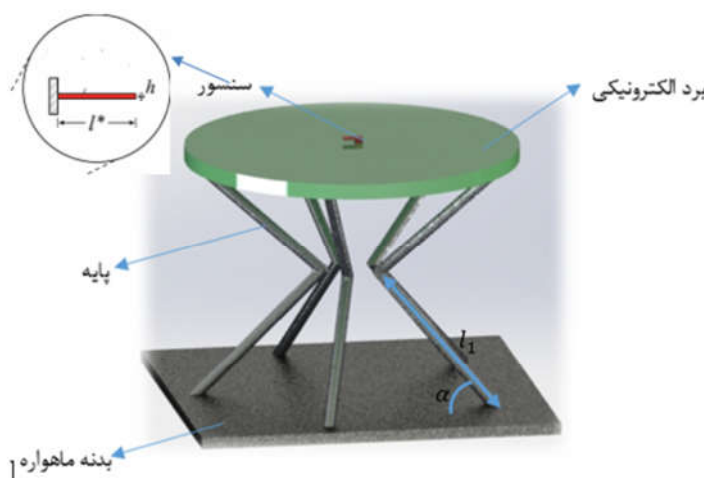
$m$  در رابطه فوق برابر جرم تیر مربوط به پایه می‌باشد که برابر با  $m = \rho_l l \pi r_l^2$  است. در این رابطه  $\rho_l$  چگالی و  $r_l$  شعاع تیر می‌باشد. برای محاسبه سفتی معادل برد الکترونیکی فرض می‌شود که شرایط مرزی برد به صورت گیردار باشد. سفتی معادل به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود. [۱۶]:

$$k_{eq2} = \frac{16\pi H}{r_b^2} \quad (4)$$

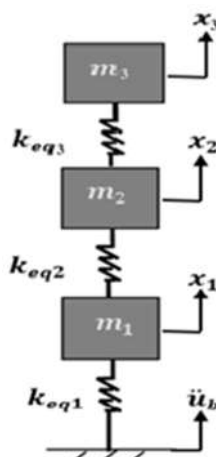
که در آن  $r_b$  شعاع برد الکترونیکی بوده و  $H$  از معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

در این رابطه  $h_b$  ضخامت برد الکترونیکی،  $E_b$  مدول الاستیک برد الکترونیکی و  $\nu$  نسبت پواسون را نشان می‌دهد. جرم معادل برد



شکل ۱- برد الکترونیکی با حسگر بر روی ۵ پایه



شکل ۲- طرحواره مدل ۳ درجه آزادی پایه، برد الکترونیکی و حسگر

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

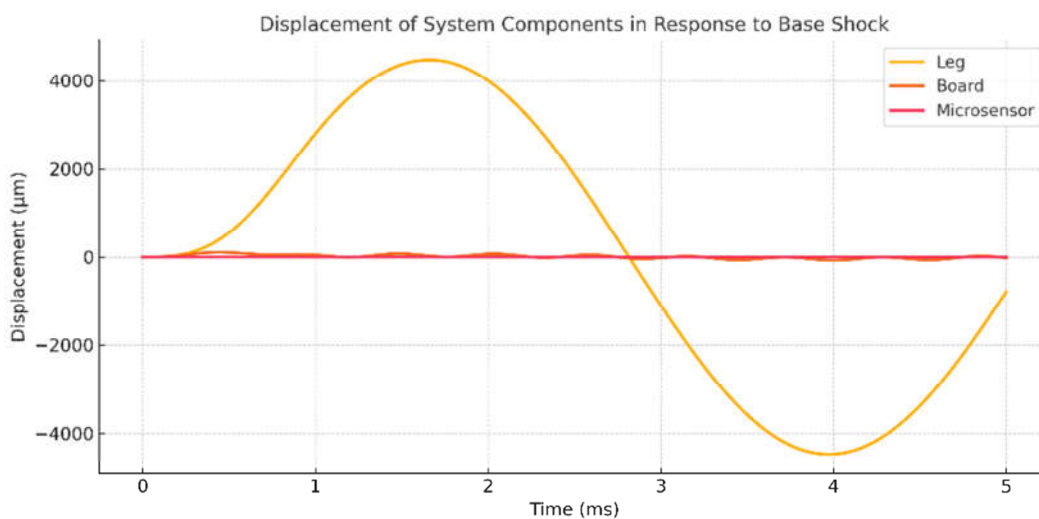
مشخصات هندسی و جنس پایه، برد الکترونیکی و میکرو حسگر در جدول ۱ بیان شده است. در این قسمت تاثیر پارامترهای مختلف هندسی بر شتاب مطلق در هر سه درجه آزادی بررسی خواهد شد. به منظور بررسی بهتر تاثیر تحریک خارجی بر رفتار سیستم و انتقال این تحریک به میکرو حسگر، این بررسی در حوزه فرکانس صورت می‌گیرد. به منظور بررسی صحت فرض خطی بودن برای پایه‌های تاشو، نمودار جابجایی اجزای سیستم در پاسخ به شوک پایه با دامنه ۱۰۰۰g و مدت زمان  $T=0.001s$  در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به دامنه جابجایی مشاهده شده، می‌توان گفت که پاسخ سیستم در محدوده‌ای قرار دارد که فرض خطی بودن برای پایه‌ها قابل قبول است. به عنوان نمونه، در این تحلیل فرکانس تحریک برابر با ۳۰۰۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است، که نشان می‌دهد حتی در فرکانس‌های بالا نیز دامنه جابجایی در محدوده مجاز برای فرض خطی باقی می‌ماند. در شکل ۴ نسبت شتاب در هر ۳ درجه آزادی مسئله نسبت به شتاب پایه مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳ شتاب حسگر از شتاب پایه و برد کمتر می‌باشد. در این مقاله همان‌طور که بیان شد، هدف

کاهش شتاب وارده بر حسگر می‌باشد. لذا در ادامه پارامترهای مختلف تاثیرگذار بر شتاب حسگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۴ در ناحیه فرکانسی پایین شتاب ورودی با شتاب خروجی برابر می‌باشد. از دیدگاه مراجع [۲۰-۲۱] این ناحیه یک ناحیه شبه استاتیک است. دلیل برابر بودن شتاب خروجی و ورودی در این ناحیه این است که سیستم زمان لازم جهت پاسخ دادن به تحریک خارجی را دارد. همچنین مطابق این شکل، نمودار در چند نقطه دارای قله است، که این قله‌ها نتیجه وقوع تشدید در اثر نزدیک شدن فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سیستم می‌باشد. در شکل ۵ نمودار شتاب در حوزه زمان رسم شده است. این شکل بیانگر شتاب در فرکانس پایین ( $5 \text{ rad/s}$ ) می‌باشد و همان‌طور که انتظار می‌رود شتاب ورودی با شتاب خروجی یکسان بوده و نیم سینوسی با دامنه ۱۰۰۰g را نشان می‌دهد.

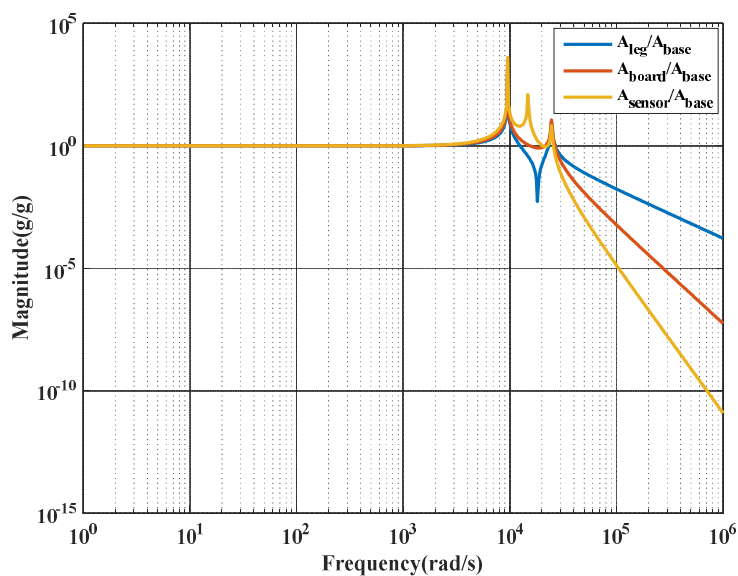
یکی از عوامل موثر در انتقال شتاب پایه به حسگر ابعاد تیر تاشو مربوط به پایه می‌باشد. شکل ۵ تاثیر شعاع این تیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، با کاهش شعاع تیر پایه از ۲ میلی‌متر به ۱.۵ میلی‌متر، شتاب حسگر حدود ۲۲٪ کاهش یافت که ناشی از کاهش محسوس سفتی پایه‌ها می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی پایه برد الکترونیک و میکروتیر

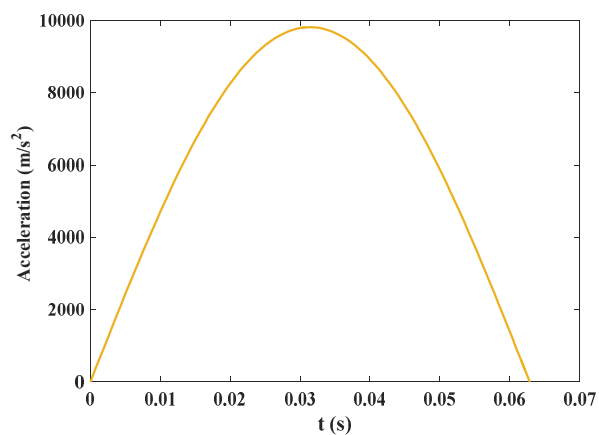
| پارامتر                   | نماد     | اندازه  | واحد     |
|---------------------------|----------|---------|----------|
| شعاع پایه                 | $r_l$    | ۰/۰۰۲   | $m$      |
| مدول الاستیسیته پایه      | $E_l$    | ۷۱      | $Gpa$    |
| چگالی پایه                | $\rho_l$ | ۲۸۰۰    | $kg/m^3$ |
| طول تیر پایه              | $l_l$    | ۰/۰۸    | $m$      |
| شعاع برد الکترونیکی       | $r_b$    | ۰/۰۴    | $m$      |
| چگالی برد الکترونیکی      | $\rho_b$ | ۱۸۵۰    | $kg/m^3$ |
| ضخامت برد الکترونیکی      | $h_b$    | ۰/۰۰۲۵  | $m$      |
| نسبت پواسن برد الکترونیکی | $\nu_b$  | ۰/۱۳۶   | -        |
| مدول الاستیسیته میکروتیر  | $E_s$    | ۱/۴۴    | $Gpa$    |
| چگالی میکروتیر            | $\rho_s$ | ۱۲۲۰    | $kg/m^3$ |
| نسبت پواسن میکروتیر       | $\nu_s$  | ۰/۳۸    | -        |
| طول میکرو تیر             | $L_s$    | ۰/۰۰۰۲  | $m$      |
| ضخامت میکرو تیر           | $h_s$    | ۰/۰۰۰۰۲ | $m$      |
| پارامتر اندازه            | $l_s$    | ۰/۰۰۰۰۲ | $m$      |



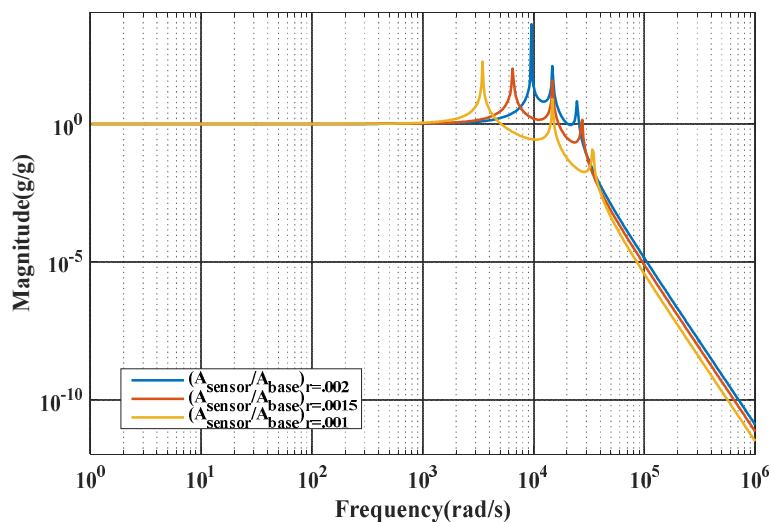
شکل ۳- جابجایی اجزای سیستم شامل پایه ، برد الکترونیکی و میکرو حسگر در پاسخ به شوک پایه نیم سینوسی



شکل ۴- نسبت شتاب پایه، برد و میکرو حسگر به شتاب پایه



شکل ۵- شتاب حسگر در فرکانس تحریک  $50 \text{ rad/s}$



شکل ۶- تاثیر شعاع تیر تاشو بر قابلیت انتقال شوک

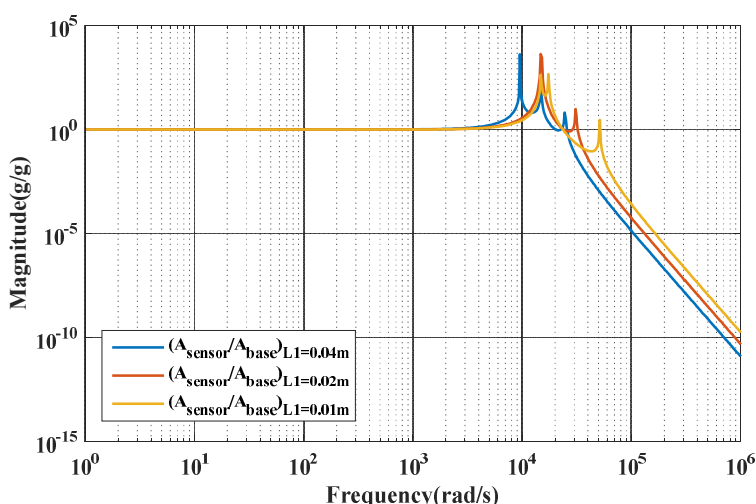
تقریباً ۱۹٪ افزایش نشان داد.

علاوه بر مشخصات پایه مشخصات برد الکترونیکی از جمله ضخامت برد نیز می‌تواند بر انتقال شوک تاثیرگذار باشد. تاثیر این پارامتر در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل با کاهش ضخامت برد الکترونیکی انتقال شوک کاهش می‌یابد. دلیل کاهش انتقال شوک با کاهش ضخامت برد الکترونیکی، کاهش سفتی برد الکترونیکی می‌باشد.

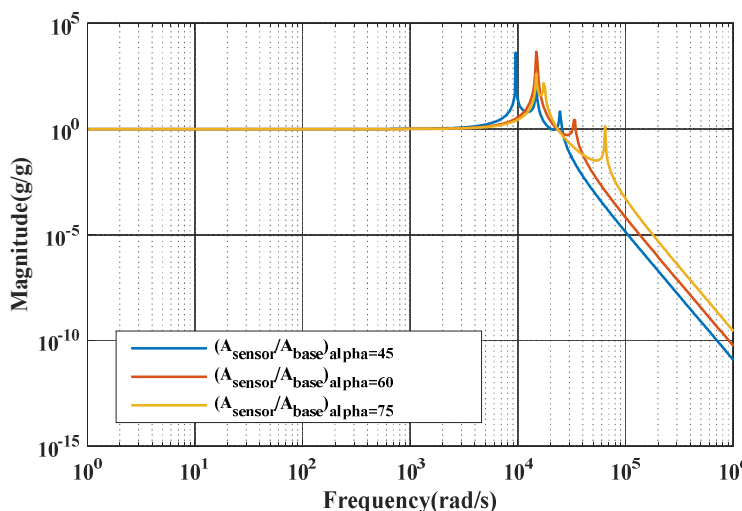
با توجه به بخش قبلی حسگر به صورت یک میکرو تیر فرض شده است. در این قسمت پارامترهای موثر بر شتاب حس شده توسط میکرو حسگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از مواردی که می‌تواند بر شتاب احساس شده توسط میکرو حسگر تاثیر گذار باشد، پارامتر اندازه است که مستقیماً بر سفتی میکرو تیر موثر خواهد بود. شکل ۱۰ تاثیر این پارامتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد با افزایش نسبت  $l_s/h_s$  قابلیت انتقال شوک افزایش می‌یابد، که دلیل این موضوع افزایش سفتی می‌باشد.

در صورتی که فاصله بین زمین و برد الکترونیکی ثابت فرض شود، با افزایش تعداد تیرهای تاشو باید با نسبت مناسب اندازه آن‌ها کوتاه شود. در شکل ۷ تاثیر این موضوع نشان داده شده است. با کاهش اندازه طول تیر تاشو سفتی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی با افزایش تعداد سری تیرهای تاشو سفتی کاهش پیدا می‌کند. شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاهش طول هر تیر تاشو از ۸ به ۵ سانتی‌متر (با حفظ فاصله برد از زمین)، شتاب حسگر حدود ۱۵٪ افزایش یافت. این افزایش به دلیل افزایش سفتی مؤثر سیستم در ترکیب با افزایش تعداد پایه‌ها اتفاق افتاده است.

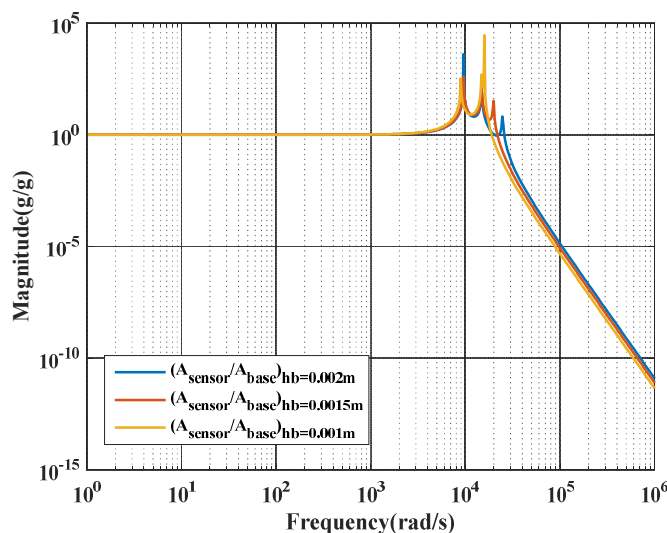
از دیگر عوامل موثر بر انتقال شوک زاویه تیر تاشو می‌باشد. در بررسی زاویه تیر تاشو فرض می‌شود که فاصله برد الکترونیکی از زمین ثابت است. با این فرض با افزایش زاویه، طول تیر تاشو کاهش می‌یابد. شکل ۸ با این فرض قابلیت انتقال شوک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود با افزایش زاویه پایه از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه (در شرایط ثابت بودن فاصله برد از زمین)، دامنه پاسخ حسگر



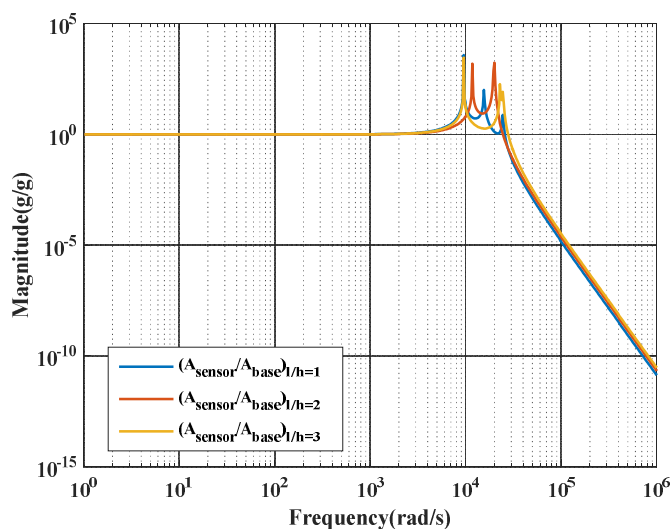
شکل ۷- تاثیر طول تیر تاشو با فرض ثابت بودن فاصله برد الکترونیکی از زمین بر قابلیت انتقال شوک



شکل ۸- تاثیر زاویه تیر تاشو با فرض ثابت بودن فاصله برد الکترونیکی از زمین بر قابلیت انتقال شوک



شکل ۹- تاثیر ضخامت برد الکترونیکی بر قابلیت انتقال شوک



شکل ۱۰- تاثیر نسبت  $\frac{l_s}{h_s}$  بر قابلیت انتقال شوک

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله سیستم برد الکترونیکی مربوط به یک سیستم تحت شوک پایه بررسی شد. برد الکترونیکی با ۵ تیر تاشو به بدنه سیستم متصل می‌باشد. به منظور بررسی رفتار این سیستم تحت شوک پایه، سیستم مورد نظر به صورت یک سیستم ۳ درجه آزادی فرض شده‌است. در این سیستم ۳ درجه آزادی پایه‌ها به صورت ۵ فنر موازی، و حسگر به صورت میکرو تیر فرض شده‌است. پارامترهای مختلف موثر بر انتقال شوک پایه به برد الکترونیکی و حسگر بررسی شده‌است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که شتاب حسگر کمتر از شتاب پایه و برد الکترونیکی می‌باشد. هندسه تیر تاشو در انتقال شوک تاثیر زیادی دارد. به طوری که با کاهش شعاع تیر تاشو به دلیل کاهش سفتی سیستم، انتقال شوک کاهش می‌یابد. همچنین در رابطه با هندسه تیر تاشو، یکی دیگر از عوامل موثر بر انتقال شوک اندازه طول تیر و تعداد تیرها

می‌باشد. با کاهش طول تیر و افزایش تعداد تیرها سفتی افزایش پیدا کرده و قابلیت انتقال شوک افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر پایه، هندسه برد نیز بر شتاب حسگر تاثیرگذار است. به طوری که ضخامت برد با سفتی سیستم رابطه عکس داشته و در نتیجه با قابلیت انتقال شوک رابطه مستقیم دارد. یکی از مواردی که می‌تواند بر شتاب احساس شده توسط میکرو حسگر تاثیرگذار باشد، پارامتر اندازه است که مستقیماً بر سفتی میکرو تیر موثر خواهد بود. با افزایش نسبت  $l_s/h_s$  قابلیت انتقال شوک افزایش می‌یابد، که دلیل این موضوع افزایش سفتی می‌باشد. این پژوهش با بهره‌گیری از یک مدل تحلیلی ساده‌شده اما دقیق، امکان بررسی پارامتری تاثیر اجزای مختلف سازه‌ای در کاهش شوک وارده به حسگر را فراهم می‌سازد که می‌تواند در طراحی بهینه سیستم‌های حفاظتی برای تجهیزات حساس الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد. یکی از مسیرهای توسعه آینده این پژوهش، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی پایه‌های تاشو از جمله سفتی متغیر با جابجایی، و همچنین

مدل‌سازی غیرخطی اتصال بین برد و حسگر می‌باشد. این توسعه می‌تواند پاسخ سیستم در شرایط واقعی‌تر و پیچیده‌تری از تحریک شوک را با دقت بیشتری شبیه‌سازی نماید.

## ۵- مراجع

- [1] Wang J, Zhang Y, Li H. Review of shock isolation techniques for microelectromechanical systems (MEMS). *Sensors*. 2020; 20(14):3891
- [2] Liu C, Zhang Y. Frictional shock absorbers in precision devices: Modeling and experimental validation. *J Vib Control*. 2018; 24(2):245–258.
- [3] Lee J, Kim S. Design of a magnetically suspended micro vibration isolator for high-precision equipment. *Sens Actuators A Phys*. 2019; 290:140–150.
- [4] Khosrojerdi M, Mahzoon M. Nonlinear stiffness isolation systems: a comprehensive review. *Mech Syst Signal Process*. 2021; 152:107433.
- [5] Zhou X, Tong W, Dai L, Wei B. Design of a shock-protected structure for MEMS gyroscopes over a full temperature range. *Micromachines*. 2023; 14(2):206.
- [6] Wei B, Tong W, Dai L. Design optimization of folded beam structures for MEMS shock isolation. *Microsyst Technol*. 2023; 29(5):2111–2120.
- [7] Zhang X, Chen J, Qian X. Adaptive shock isolation using folded beams with movable supports. *J Microelectromech Syst*. 2022; 31(3):345–352.
- [8] Liu Y, Zhang M, Sun H. Experimental evaluation of MEMS accelerometers with folded beam suspensions. *J Micromech Microeng*. 2021; 31(5):055011.
- [9] Chen D, Wang R, Lin F. Nonlinear dynamic response of folded-beam MEMS devices under shock loads. *J Sound Vib*. 2020; 486:115584.
- [10] Mansour R, Hashemian M, Fathalilou M. Design and simulation of a triaxial MEMS accelerometer using folded beam suspensions. *Microsyst Technol*. 2023; 29(3):1237–1247.
- [11] Yoon H. Design and test of folded beam shock isolation structures for MEMS packaging. M.Sc. Thesis, Seoul National University; 2022.
- [12] Liu J, Hu Z. Dynamic performance analysis of folded beam micro-structures under impact loading. *Sens Actuators A Phys*. 2023; 351:114089.
- [13] Kim T, Park Y. Modeling and simulation of MEMS devices using modified couple stress theory. *Int J Eng Sci*. 2019; 143:103130.
- [14] Yang F, Chong ACM, Lam DCC, Tong P. Couple stress based strain gradient theory for size-dependent material behavior in microstructures. *Int J Solids Struct*. 2002; 39(10):2731–2743.
- [15] Rao SS. *Vibration of continuous systems*. 2019; John Wiley & Sons.
- [16] Heidarpour B, Rahi A. Analytical investigation of vibration behavior of damaged micro sensor based on modified couple stress theory. *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*. 2022; 10(1):14-20. doi: 10.22111/cnmst.2023.43988.1232
- [17] Alexander JE. Shock response spectrum-a primer. *Sound and Vibration*. 2009; 43(6):6-15.
- [18] Younis MI, Jordy D, Pitarresi JM. Computationally efficient approaches to characterize the dynamic response of microstructures under mechanical shock. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2007; 16(3): 628-638.
- [19] Yan L, Shouhu X, Xinglong G. Shock isolation performance of a geometric anti-spring isolator. *Journal of Sound and Vibration*. 2018 413: 120-143.
- [20] Ledezma-Ramirez DF, et al. An experimental nonlinear low dynamic stiffness device for shock isolation. *Journal of Sound and Vibration*. 2015; 347:1-13.