

استخراج فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی یک نمونه سامانه آزمایشگر سورتمه تک‌ریل دارای میراگر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

محمد رضا نجفی^۱، سعید محجوب مقدس^۲

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، تهران، ایران.

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، تهران، ایران، نویسنده مسئول، smahjoubmoghadass@ihu.ac.ir

چکیده

در این مقاله ارتعاشات وارد بر یک نمونه سامانه آزمایشگر سورتمه تک‌ریل دارای میراگر بررسی می‌شود. ابتدا با استخراج معادلات ارتعاشی حاکم بر مسئله، اقدام به کد نویسی در نرم‌افزار متلب شده و با رسم نمودار FFT، فرکانس‌های طبیعی سیستم به دست آورده می‌شوند. فرکانس اول و دوم سیستم به ترتیب مربوط به جابه‌جایی پیچشی و عرضی سورتمه هستند. با توجه به سازه‌ای بودن میرایی سامانه سورتمه، برای استخراج مقادیر سفتی معادل و میرایی معادل، از آزمون تجربی به وسیله دستگاه تست دینامیک هارمونیک استفاده می‌شود. سپس با شبیه‌سازی مدل سورتمه در نرم‌افزار آباکوس، آنالیز مودال صورت گرفته و فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها استخراج می‌شوند. در نهایت با ساخت مدل طراحی شده سورتمه و انجام آزمایش تجربی، فرکانس‌های طبیعی سیستم با دو روش قبل مورد مقایسه قرار گرفته و با خطای کمتر از ۹ درصد تأیید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سامانه آزمایشگر سورتمه، فرکانس طبیعی، آنالیز مودال، سفتی معادل، میرایی معادل

Vibration analysis of a sample of single-rail sled tester system with dampers analytically, numerically and experimentally

Mohammad Reza Najafi¹, Saeed Mahjoub Moghadass^{2*}

1- PhD student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein comprehensive University, Tehran, Iran.

2- * Associate Prof., Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein comprehensive University, Tehran, Iran.

smahjoubmoghadass@ihu.ac.ir

Abstract

In this paper, the vibrations on the sample of a single-rail sled tester system with dampers are investigated. First, by extracting the vibration equations governing the problem coded in MATLAB software and by drawing the FFT diagram, the natural frequencies of the system are obtained. The first and second frequencies of the system are related to torsional displacement and transverse sled displacement, respectively. Due to the structural damping of the sled system, to extract the equivalent stiffness and equivalent damping values, the experimental test is used by the harmonic dynamic test device. Then, by simulating the sled model in ABAQUS software, modal analysis is performed and natural frequencies and mode shapes are extracted. Finally, by constructing a designed sled model and performing experimental modal analysis, the natural frequencies of the system are compared with the previous two methods and confirmed with an error of less than 9%.

Keywords: Sled tester system, natural frequency, modal analysis, equivalent stiffness, equivalent damping.

۲۵

سال ۱۰- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و

فناوری هوا فضا



۱. مقدمه

سامانه آزمایشگر سورتمه، مجموعه‌ای است که با کفشک به ریل متصل شده و به وسیله نیروی پیشرانه موشک در طول ریل حرکت نموده و می‌تواند به سرعت‌های مافوق صوت برسد. آزمایش سورتمه در واقع سیستمی است که در زمینه آزمایش‌های هوافضایی، فاصله بین بررسی‌ها و تحقیقات آزمایشگاهی را با آنچه در حالت واقعی رخ می‌دهد، پر می‌کند. سورتمه اجزای مختلفی از جمله ریل، شاسی، کالسکه، بستر پرتابه، موتور پیشرانش و کفشک دارد. شاسی و کالسکه اغلب در سورتمه‌های سنگین و دوریلی استفاده می‌شوند و در سورتمه‌های تک‌ریل استفاده نمی‌شوند. در شکل (۱) شمای کلی سورتمه موشکی به نمایش درآمده است.



شکل ۱- شمای کلی سامانه آزمایشگر سورتمه

شکل (۲) یک نمونه سورتمه واقعی تک‌ریل بدون شاسی و کالسکه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سورتمه بدون شاسی و کالسکه [۱]

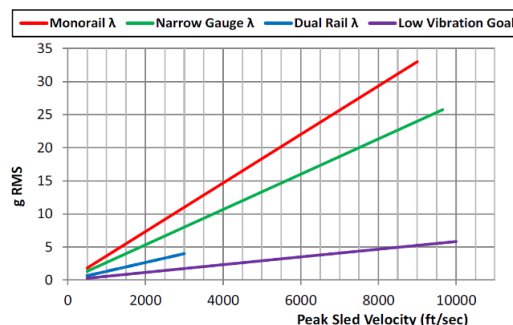
از سامانه آزمایشگر سورتمه برای ارزیابی تجهیزات سیستم‌های فضانوردی [۲]، آزمایش جداسازی صندلی خلبان هواپیما [۳]، تحلیل آبرودینامیکی سازه‌های هوایی [۴]، ارزیابی

عملکرد نفوذ و انفجار در یک هدف سخت [۵]، آزمایش سازه‌های ضد نفوذ [۶] و ارزیابی سوخت‌های هیبریدی [۷] استفاده می‌شود.

دیوید مینتو [۸-۹] تست سرعت بالای سورتمه هالومن را برای بهبود قابلیت‌های آن در سرعت‌های مافوق صوت تا ۳ کیلومتر بر ثانیه بررسی کرد. همچنین مسائلی از قبیل قدرت تخریب سرچنگی، عملکرد فیوز، فرسایش در دمای بالا و روش‌های حفاظت از آن، فرسایش ناشی از باران و ذرات معلق (در هوا)، سیستم‌های ناوبری و مکان‌یابی بررسی شده و ارتقا یافتند. میچام و همکاران [۱۰]، در پژوهشی با استفاده از تست سورتمه میزان مقاومت یک چتر نجات در برابر فشار بالا (در حدود ۵/۵ MPa) و نحوه سقوط آن پس از آسیب دیدگی را مورد بررسی قرار دادند. گارلند و مورین [۱۱] شاتل فضایی نیروی هوایی ایالات متحده و ناسا را با استفاده از آزمایش سورتمه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش آزمون در سرعت ۷ ماخ انجام شده و شبیه‌سازی فشار محفظه موتور در ارتفاع‌های ۱۶۰۰۰ فوت انجام شده است. پاهارج و روگر [۱۲] محاسبات مدل‌سازی سه نمونه پیکربندی سورتمه یکپارچه را مورد استفاده قرار دادند. برای محاسبات از کد نویسی استفاده شده است و نتایج تحلیل نیروها با یکدیگر در محیط هوا و هلیوم صحت‌سنجی شده است. گارزون و ماتیشک [۱۳] در مورد نیروی پسا در سرعت مافوق صوت هواپیماهای جت جنگی در سورتمه مطالعه انجام دادند و عوامل کاهش نیروی پسا را بررسی کردند. دلئون و پلازوتو [۱۴] سایش کفشک ناشی از لغزش مافوق صوت روی ریل در حرکت سورتمه و مفاهیم جدید مربوط به پرتاب‌های ریلی را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل المان محدود از کفشک تهیه و سایش را در سطح ریزساختار بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از میزان سایش کفشک‌ها با استفاده از معادلات حالت و بدون آن، تفاوت ۵ درصدی

در سرعت ۷۵۰ m/s و ۱۱ درصدی در سرعت ۱۵۰۰ m/s را نشان می‌دهد.

پایدار کردن سیستم سورت‌مه در برابر بارهای سنگین وارد بر آن [۱۵-۱۶] در این سیستم مورد توجه محققان بوده است. بوسمجیان و همکاران [۱۷] سیستم ریل مغناطیسی سورت‌مه را مطالعه کردند. هدف این مطالعه افزایش قابلیت سرعت پایانی تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه با محیط ارتعاشی کمتر بوده است. هوزر [۱۸] نشان داد ارتعاشات ایجاد شده در تست آزمایشگاه هالومن وابستگی شدیدی به تعداد ریل دارد. بر اساس نتایج شکل (۳) مشاهده می‌شود که محیط لرزش تک‌ریل، شدیدترین میزان ارتعاش را دارد. در ادامه ریل مقیاس باریک بیشترین ارتعاشات را داشته و در نهایت ارتعاشات زوج ریل کمتر از دو حالت دیگر است و به دلیل بزرگ بودن سورت‌مه‌های زوج ریل محدودیت بیشینه سرعت برای آن‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- میزان ارتعاشات در حالت‌های مختلف ریل [۱۸]

ژیانهو و شوشان [۱۹] شبیه‌سازی دینامیکی نیروهای وارد بر سورت‌مه و بررسی مودهای سیستم را انجام داده‌اند. ابتدا با نرم‌افزار انسیس قسمت‌های انعطاف‌پذیر را شبیه‌سازی کرده و در ادامه با انتقال اطلاعات به نرم‌افزار آدامز، شبیه‌سازی دینامیکی انجام شده است. محاسبات پیش‌رانه نیز با استفاده از نرم‌افزار آدامز انجام گرفت؛ همچنین میزان شتاب در سه جهت محور در چهار ثانیه اول آزمون به دست آورده شد. هوزر

و هوزر با استفاده از حس‌گرهای مختلف معمولی، لیزری و حرارتی به بررسی رفتار سیستم سورت‌مه عایق شده پرداختند. آن‌ها از دو سیستم برای کاهش ارتعاشات سورت‌مه استفاده کردند. در سیستم اول از فوم در محفظه [۲۰] و در سیستم دوم از ضربه‌گیر کابلی درون محموله سورت‌مه [۲۱] استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند هر دو ایده باعث کاهش ارتعاشات سیستم می‌شود. فرکانس طبیعی سیستم مورد بررسی، طبق آزمایش ارتعاشی آزمایشگاهی ۱۳ هرتز بود. ژیانو و همکاران [۲۲] برای آنالیز مودال یک نمونه سورت‌مه از یک سیستم یک درجه آزادی استفاده کرده و ماتریس سفتی میرایی و جرم را به دست آوردند و در ادامه فرکانس‌های طبیعی سیستم را با شبیه‌سازی در نرم‌افزار سالیدورکس^۱ و انسیس ورک‌بنچ^۲ مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به شکست تعدادی از آزمایش‌های سامانه آزمایشگر سورت‌مه به دلیل انحراف از مسیر [۲۳] تمرکز پژوهشگران به کاهش ارتعاشات وارد بر سامانه معطوف شده است [۲۴-۲۵] اما تحلیل ارتعاشی سورت‌مه‌ای که در محل اتصال کفشک به بدنه از میراگر استفاده شده باشد، همچنان به‌عنوان خلأ پژوهشی مطرح است.

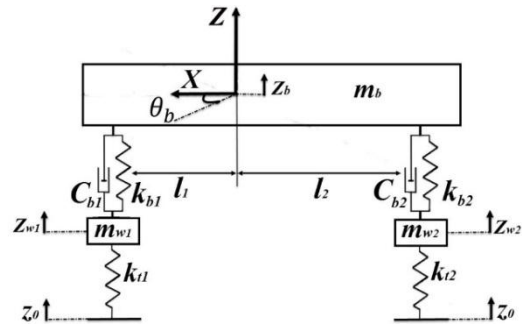
هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی ارتعاشات و آنالیز مودال سیستم سورت‌مه تک‌ریل دارای میراگر است. از آنجاکه میراگر می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش ارتعاشات سیستم‌ها داشته باشد [۲۶]، ایده استفاده از میراگر در محل اتصال کفشک به بدنه سورت‌مه، برای اولین بار در مقاله حاضر بررسی می‌شود. بدین منظور، پس از مدل‌سازی سیستم و استخراج معادلات ارتعاشی، فرکانس‌های طبیعی سیستم به دست آورده می‌شوند. در روش عددی با وارد کردن مشخصات هندسی و پارامتری در نرم‌افزار، فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی به دست آورده می‌شود. به منظور صحت‌سنجی نتایج، با ساخت نمونه سورت‌مه طراحی شده به آنالیز



مودال تجربی پرداخته شده و فرکانس‌های طبیعی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۲. استخراج معادلات حاکم

با در نظر گرفتن حرکت پیچشی و عرضی بدنه سورتمه در کنار حرکت عمودی کفشک‌های متصل به آن، می‌توان سورتمه مورد بررسی را به صورت شکل (۴) مدل‌سازی نمود.



شکل ۴- مدل ریاضی سورتمه

با استفاده از قانون دوم نیوتن معادله حرکت عمودی (Z_b) بدنه سورتمه (m_b) به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m_b \ddot{z}_b = -(k_{b1} + k_{b2}) z_b + k_{b1} l_1 \theta_b + k_{b1} z_{w1} - (c_{b1} + c_{b2}) \dot{z}_b + c_{b1} l_1 \dot{\theta}_b + c_{b1} \dot{z}_{w1} - k_{b2} l_2 \theta_b + k_{b2} z_{w2} - c_{b2} l_2 \dot{\theta}_b + c_{b2} \dot{z}_{w2} \quad (1)$$

معادلات حرکت پیچشی سورتمه (θ_b) نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$I_{yy} \ddot{\theta}_b = k_{b1} l_1 z_b - k_{b1} l_1^2 \theta_b - k_{b1} l_1 z_{w1} + c_{b1} l_1 \dot{z}_b - c_{b1} l_1^2 \dot{\theta}_b - c_{b1} l_1 \dot{z}_{w1} - k_{b2} l_2 z_b - k_{b2} l_2^2 \theta_b + k_{b2} l_2 z_{w2} - c_{b2} l_2 \dot{z}_b - c_{b2} l_2^2 \dot{\theta}_b + c_{b2} l_2 \dot{z}_{w2} \quad (2)$$

برای حرکت عمودی کفشک‌های جلو و عقب (Z_{w1}, Z_{w2}) نیز به ترتیب معادله‌های ۳ و ۴ به دست آورده می‌شوند:

$$m_{w1} \ddot{z}_{w1} = -k_{b1} z_{w1} + k_{b1} z_b - k_{b1} l_1 \theta_b - c_{b1} \dot{z}_{w1} + c_{b1} \dot{z}_b - c_{b1} l_1 \dot{\theta}_b + k_{t1} (z_{w1} - z_0) \quad (3)$$

$$m_{w2} \ddot{z}_{w2} = -k_{b2} z_{w2} + k_{b2} z_b + k_{b2} l_2 \theta_b - c_{b2} \dot{z}_{w2} + c_{b2} \dot{z}_b + c_{b2} l_2 \dot{\theta}_b + k_{t2} (z_{w2} - z_0) \quad (4)$$

با ساده‌سازی و ضرب مقادیر معادله‌های بالا، معادله‌های حرکت ارتعاشی سیستم سورتمه به صورت روابط زیر استخراج می‌شوند:

$$\ddot{z}_b = \frac{c_{b1}}{m_b} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b2}}{m_b} \dot{z}_{w2} - \frac{(c_{b1} + c_{b2})}{m_b} \dot{z}_b + \frac{(c_{b1} l_1 - c_{b2} l_2)}{m_b} \dot{\theta}_b + \frac{k_{b1}}{m_b} z_{w1} + \frac{k_{b2}}{m_b} z_{w2} - \frac{(k_{b1} + k_{b2})}{m_b} z_b + \frac{(k_{b1} l_1 - k_{b2} l_2)}{m_b} \theta_b \quad (5)$$

$$\ddot{\theta}_b = -\frac{c_{b1} l_1}{I_{yy}} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b2} l_2}{I_{yy}} \dot{z}_{w2} + \frac{(c_{b1} l_1 - c_{b2} l_2)}{I_{yy}} \dot{z}_b - \frac{((c_{b1} l_1^2) + (c_{b2} l_2^2))}{I_{yy}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b1} l_1}{I_{yy}} z_{w1} + \frac{k_{b2} l_2}{I_{yy}} z_{w2} + \frac{(k_{b1} l_1 - k_{b2} l_2)}{I_{yy}} z_b - \frac{((k_{b1} l_1^2) + (k_{b2} l_2^2))}{I_{yy}} \theta_b \quad (6)$$

$$\ddot{z}_{w1} = -\frac{c_{b1}}{m_{w1}} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b1}}{m_{w1}} \dot{z}_b - \frac{c_{b1} l_1}{m_{w1}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b1}}{m_{w1}} z_{w1} + \frac{k_{b1}}{m_{w1}} z_b - \frac{k_{b1} l_1}{m_{w1}} \theta_b + \frac{k_{t1} (z_{w1} - z_0)}{m_{w1}} \quad (7)$$

$$\ddot{z}_{w2} = -\frac{c_{b2}}{m_{w2}} \dot{z}_{w2} + \frac{c_{b2}}{m_{w2}} \dot{z}_b + \frac{c_{b2} l_2}{m_{w2}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b2}}{m_{w2}} z_{w2} + \frac{k_{b2}}{m_{w2}} z_b + \frac{k_{b2} l_2}{m_{w2}} \theta_b + \frac{k_{t2} (z_{w2} - z_0)}{m_{w2}} \quad (8)$$

۳. استخراج پارامترهای سیستم

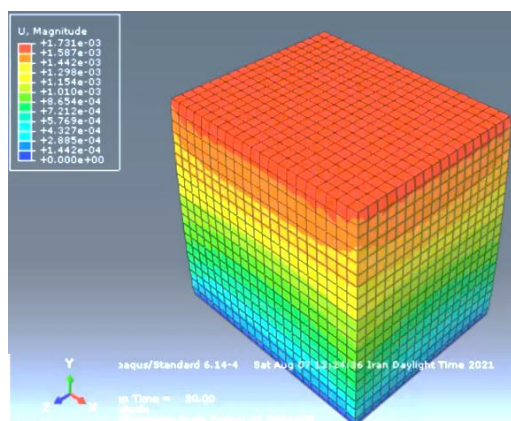
به منظور تحلیل ارتعاشی سیستم سورتمه، علاوه بر پارامترهای هندسی و جرمی، مقادیر سفتی و میرایی معادل نیز می‌بایست به دست آورده شوند. در سورتمه مسئله حاضر جرم بدنه ۱۴/۶۹ kg، جرم کفشک‌ها ۰/۷۹ kg، ممان دوم سطح برابر ۰/۸۷۷ kgm²، فاصله کفشک جلو تا مرکز جرم سورتمه ۱۶۵ mm و فاصله کفشک عقب تا مرکز جرم سورتمه ۱۹۸ mm است.

۳-۱. سفتی معادل

با توجه به صلیبیت بالای اجزای مختلف سورتمه، به دست آوردن سفتی میراگر استفاده شده در سیستم الزامی است. با استفاده از خواص مکانیکی، ابعاد هندسی (۴۳×۴۰×۳۵) و چگالی میراگر (۱۱۲۰ kg/m³)، در نرم‌افزار

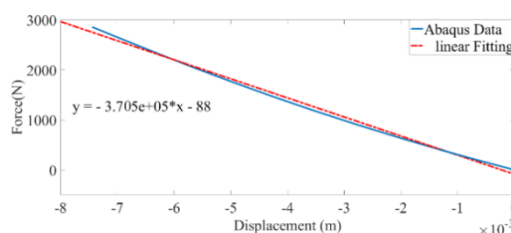


آباکوس نسخه ۶.۱۴ میراگر تحت نیروهای مختلف قرار داده شده و میزان جابه‌جایی آن به دست آورده می‌شود. تعداد مش‌ها برابر ۲۱۹۸۵ و از نوع المان quad است. در این حالت، برای مش‌بندی و ایجاد شبکه اجزای محدود، فقط از المان‌های چهارگوش استفاده می‌شود. المان استفاده‌شده نیز از نوع C3D8R است. شکل (۵) میراگر را تحت نیروی عمودی نشان می‌دهد.



شکل ۵- میراگر تحت نیروی عمودی

شکل (۶) مقادیر به‌دست‌آمده از میزان جابه‌جایی میراگر تحت نیروهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش اعمال نیرو، میزان جابه‌جایی عمودی میراگر تقریباً به‌صورت خطی افزایش یافته است.



شکل ۶- به دست آوردن سفتی میراگر با اعمال نیروهای مختلف

با فرموله کردن نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی، به رابطه ۹ دست می‌یابیم:

$$y = -370500x - 88 \quad (9)$$

شیب نمودار که همان ضریب x در رابطه بالاست، برابر با مقدار سفتی میراگر است. بدین ترتیب مقدار سفتی به‌دست‌آمده برابر 370500 N/m

است.

۳-۲. میرایی معادل

با فرض میرایی تناسبی، برای سیستم دارای میرایی سازه‌ای، معادله حرکت را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۲۷]:

$$m\ddot{x} + \frac{\beta k}{\omega} \dot{x} + kx = F \sin \omega t \quad (10)$$

در اینجا $\left(\frac{\beta k}{\omega}\right) \dot{x}$ نیروی میرایی سازه‌ای است. با در نظر گرفتن نیروی هارمونیک، حل پایدار معادله به‌صورت رابطه ۱۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \varphi) \quad (11)$$

بدین ترتیب به‌دست می‌آید:

$$X = \frac{F}{k\sqrt{(1-r^2)^2 + \beta^2}} \quad (12)$$

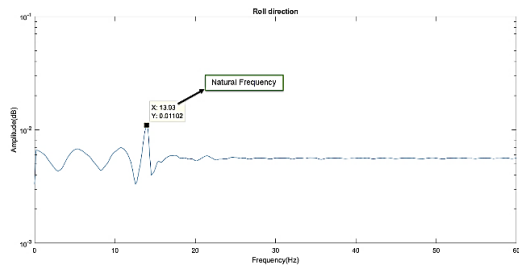
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{1-r^2} \quad (13)$$

برای به دست آوردن میرایی معادل میراگر، از آزمایش تجربی با دستگاه تست دینامیک هارمونیک (مطابق شکل ۷) استفاده می‌شود.



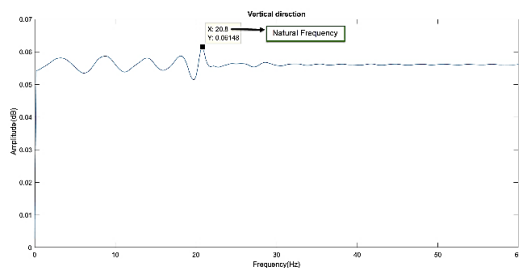
شکل ۷- سنجش میرایی میراگر با دستگاه تست دینامیک هارمونیک

روش تست بدین‌صورت است که با تعیین میزان فرکانس برای دستگاه، مقدار $\tan \varphi$ دریافت می‌شود و با استفاده از معادله ۱۳ و با داشتن مقدار r می‌توان مقدار بی‌بعد نسبت میرایی سازه‌ای (β) را به‌دست آورد. برای به‌دست آوردن مقدار r می‌بایست فرکانس طبیعی میراگر را به‌دست آورد. با استفاده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس، فرکانس طبیعی میراگر (مطابق شکل ۸) برابر با $609/5$ هرتز به‌دست آمد.



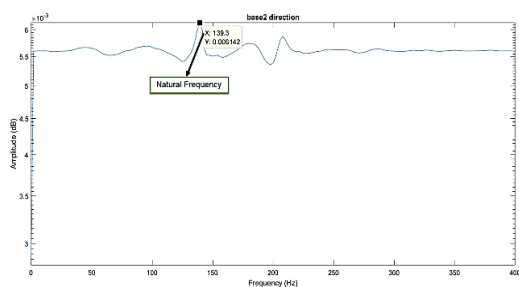
شکل ۹- فرکانس طبیعی مربوط به حرکت پیچشی بدنه سورتمه

شکل (۱۰) نمودار FFT مربوط به حرکت عرضی بدنه سورتمه را نمایش می‌دهد که فرکانس طبیعی سیستم برابر با ۲۰/۸ هرتز است.



شکل ۱۰- فرکانس طبیعی مربوط به حرکت عرضی بدنه سورتمه

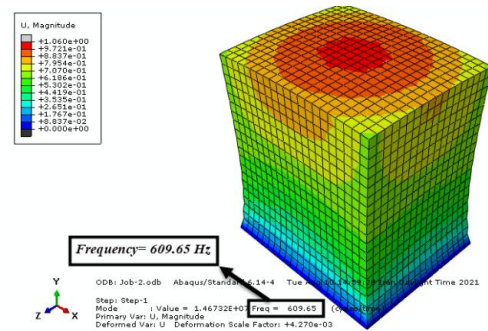
شکل (۱۱) نیز نمودار FFT مربوط به کفشک جلو را نشان می‌دهد که مشابه رفتار کفشک عقب است و به همین دلیل یکی از این نمودارها آورده شده است.



شکل ۱۱- فرکانس طبیعی مربوط به حرکت عرضی بدنه سورتمه

۴-۲. شبیه‌سازی عددی

سورتمه مورد بررسی در این پژوهش به صورت یکپارچه بوده و با توجه به تکریل بودن، فاقد شاسی و کالسکه است. برای مهار بدنه اصلی سورتمه از دو قطعه رول شده نیم‌دایره به صورت



شکل ۸- به دست آوردن فرکانس طبیعی میراگر با انجام آزمایش در فرکانس‌های مختلف، مقدار میانگین β برابر با ۰.۳۱ به دست آمده شد. از طرفی [۲۸]:

$$\xi_{eq} = \frac{c_{eq}}{2m\omega_n} = \frac{\beta}{2} \quad (14)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\xi_{eq} \cong 0.155 \quad (15)$$

در نهایت با تبدیل فرکانس طبیعی میراگر به واحد رادیان بر ثانیه، با استفاده از معادله ۱۴ مقدار میرایی معادل به دست می‌آید:

$$c_{eq} = \frac{\beta k}{\omega} = \frac{0.31 * 370000}{3830} = 29.94 \text{ N.s/m} \quad (16)$$

۴. استخراج فرکانس‌های طبیعی

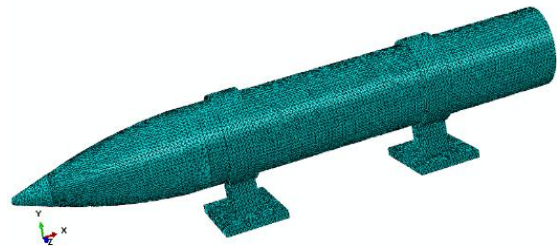
۴-۱. حل تحلیلی

در سورتمه مسئله حاضر جرم بدنه ۱۴.۶۹ کیلوگرم، جرم هرکدام از کفشک‌ها ۰.۷۹ کیلوگرم و فاصله کفشک جلو و عقب از مرکز ثقل نیز ۱۶۵ میلی‌متر هستند. با جایگذاری مقادیر پارامترهای مختلف به دست آمده در بخش قبل مانند میرایی معادل و سفتی معادل اقدام به حل تحلیلی معادله‌های حاکم بر مسئله (معادله‌های ۸-۵) می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار متلب، نمودار^۳ FFT سیستم برای درجات آزادی مختلف به دست آورده می‌شود.

شکل (۹) بالاترین قله فرکانس طبیعی سیستم که مربوط به حرکت پیچشی بدنه سورتمه است را نشان می‌دهد که برابر با ۱۳/۹۳ هرتز است.



کمر بند استفاده شده که با پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند. از دو ورق فولادی که نقش بخش بالایی کفشک را ایفا می‌کنند، استفاده شده که به وسیله میراگر به بدنه اصلی سورتمه متصل می‌شوند. قسمت جلوی سورتمه به صورت اجابو^۴ مدل سازی شد تا از لحاظ آیرودینامیکی مناسب تر باشد. مدل مش بندی شده سورتمه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. تعداد شبکه در دامنه محاسباتی برابر ۲۸۴۶۶۶۲ است.



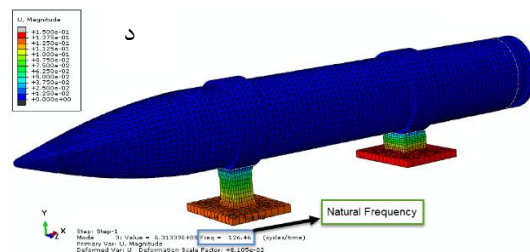
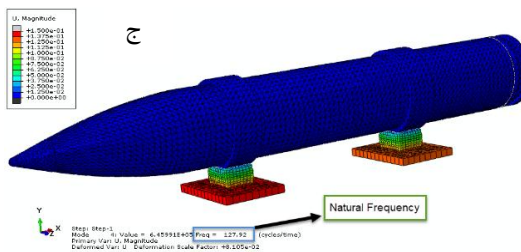
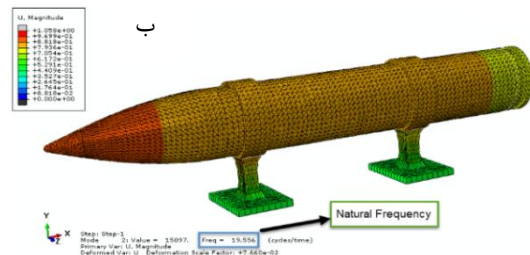
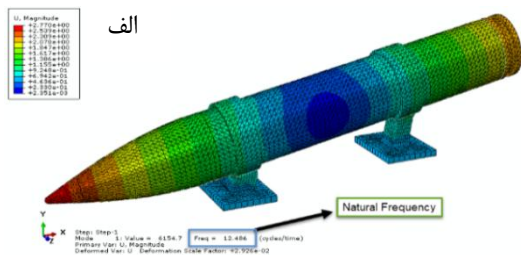
شکل ۱۲- مدل مش بندی شده سورتمه

شکل (۱۳) شکل مودهای سورتمه طراحی شده در مودهای اول تا چهارم را نشان می‌دهد. مود اول شکل (۱۳-الف) مربوط به نوسان پیچشی حول مرکز جرم سورتمه است. با توجه به

صلبیت بدنه سورتمه، میزان نوسان صورت گرفته به صورت پیچشی اندک می‌باشد. در مود دوم شکل (۱۳-ب)، سورتمه بدون حرکت پیچشی، به صورت عمودی نوسان می‌کند و میزان نوسان دو کفشک با یکدیگر برابر است. در مود سوم شکل (۱۳-ج) هر دو کفشک در یک جهت (عرضی) نوسان می‌کنند و هیچ حرکت پیچشی در سورتمه وجود ندارد. نوسان ایجاد شده به نسبت نوسانات در مودهای اول و دوم بسیار بیشتر بوده و اهمیت نقش کفشک را می‌رساند. مود چهارم شکل (۱۳-د) نیز شبیه مود سوم است با این تفاوت که کفشک‌ها به واسطه نوسان پیچشی، در خلاف جهت هم جابه جا شده‌اند.

۵. آزمایش تجربی

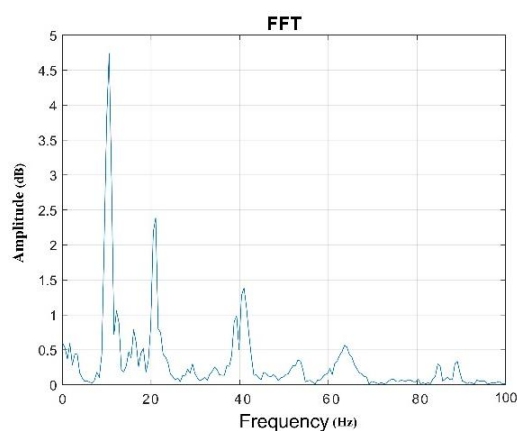
به منظور ساخت مدل آزمایشگاهی سورتمه طراحی شده، پس از اندازه‌گذاری و برش ورق‌های مختلف، اقدام به جوشکاری و رنگ کاری سورتمه شد. در نهایت با ساخت، برشکاری و جوشکاری قطعات مختلف، مدل سورتمه طراحی شده مطابق با شکل (۱۴) ساخته شد.



شکل ۱۳- آنالیز مودال سورتمه مورد مطالعه



برای انجام آزمایش، شتاب سنج‌ها در بالای کفشک‌ها و مرکز جرم سورت‌مه قرار داده شده و ضربه‌های چکش به محل اتصال کفشک به ریل زده می‌شود. خروجی‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، فایل‌های متنی شامل داده‌های زمان و جابه‌جایی هستند که با کدنویسی در نرم‌افزار متلب و با روش FFT اقدام به بردن نتایج از حوزه زمان به حوزه فرکانس می‌شود. شکل (۱۷) نمودار FFT پس از فیلتر کردن نتایج به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- نمونه‌ای از نتایج آزمایش تجربی پس از فیلتر کردن در متلب

جدول ۱ مقادیر فرکانس‌های طبیعی سورت‌مه از سه روش تحلیلی، عددی و تجربی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقادیر به‌دست‌آمده از روش تجربی به‌عنوان نتایج اصلی در نظر گرفته می‌شوند، خطای نتایج را با مقایسه با نتایج تجربی به‌دست می‌آوریم.

جدول ۱. مقایسه فرکانس‌های طبیعی سورت‌مه (Hz)

| نتایج تحلیلی | شبه‌سازی عددی | آزمایش تجربی | فرکانس طبیعی |
|--------------|---------------|--------------|--------------|
| ۱۳/۹۳ | ۱۲/۴۹ | ۱۲/۷ | مود اول |
| ٪ ۸/۸ | ٪ ۱/۶ | | |
| ۲۰/۸ | ۱۹/۵۶ | ۲۱/۴ | مود دوم |
| ٪ ۳/۲ | ٪ ۸/۹ | | |



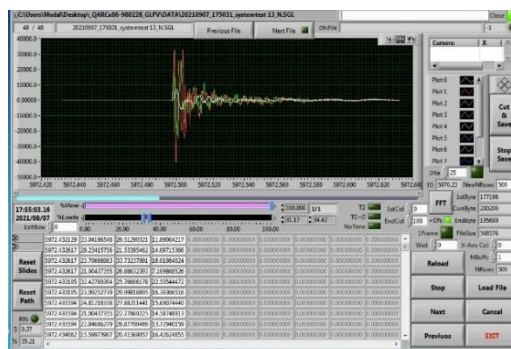
شکل ۱۴- مدل آزمایشگاهی سورت‌مه ساخته‌شده

در این پژوهش از سه شتاب‌سنج با مدل 333B30 ساخت شرکت PCB، استفاده شد. همچنین برای دریافت سیگنال الکترونیکی پیزوالکتریک از شتاب‌سنج‌ها از دستگاه تجزیه و تحلیل‌کننده ساخت شرکت National Instruments استفاده شد. به‌منظور تحریک سورت‌مه نیز از چکش ضربه ویژه آنالیز مودال ساخت شرکت PCB استفاده شد. شکل (۱۵) شتاب‌سنج، دستگاه تجزیه و تحلیل‌کننده و چکش ضربه را نشان می‌دهد.

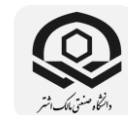


شکل ۱۵- الف) شتاب‌سنج (ب) چکش ضربه (ج) دستگاه تجزیه و تحلیل‌کننده

پس از اتصال تجهیزات مختلف به مدل سورت‌مه، اقدام به آزمایش تجربی شده و پاسخ دینامیکی سورت‌مه در نرم‌افزار به‌دست می‌آید که یک نمونه از نتایج در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۶- نمونه‌ای از نتایج آزمایش در نرم‌افزار



- 1 PartF (2020) 1-6. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0369>
- [3] H.J. McSpadden, R.R. Higgins, The history of hurricane mesa test facility, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Jt. Propuls. Conf. Exhib. (2004).
- [4] H. Gurol, D. Ketchen, L. Holland, D. Minto, M. Hooser, N. Bosmajian, Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT), AIAA Aviat. 2014 - 30th AIAA Aerodyn. Meas. Technol. Gr. Test. Conf. (2014) 1-15. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2655>.
- [5] M.B. Meacham, A. Kennett, D.J. Townsend, B. Marti, Rocket sled propelled testing of a supersonic inflatable aerodynamic decelerator, AIAA Aerodyn. Decelerator Syst. Conf. 2013. 122 (2013) 1-13. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1351>.
- [6] M. Itoh, M. Katayama, R. Rainsberger, Computer simulation of an F-4 Phantom crashing into a reinforced concrete wall, WIT Trans. Modelling Simul. 40 (2005).
- [7] D. NAKATA, A. KOZU, J. YAJIMA, K. NISHINE, K. HIGASHINO, N. TANATSUGU, Predicted and Experimented Acceleration Profile of the Rocket Sled, Trans. Japan Soc. Aeronaut. Sp. Sci. Aerosp. Technol. Japan. 10 (2012) 1-5. https://doi.org/10.2322/tastj.10.ta_1.
- [8] M.B. Meacham, A. Kennett, D.J. Townsend, B. Marti, Rocket sled propelled testing of a supersonic inflatable aerodynamic decelerator, AIAA Aerodyn. Decelerator Syst. Conf. 2013. 122 (2013) 1-13. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1351>.
- [9] D.W. Minto, AIAA-2002-3034 the Holloman High Speed Test Track Hypersonic Upgrade Program Status, Aerodyn. Meas. Technol. Gr. Test. Conf. (2002) 24-26.
- [10] M.B. Meacham, J.C. Gallon, M.R. Johnson, D.B. Natzic, N. Thompson, D. Aguilar, B. Marti, E. Hennings, T. Rivellini, Rocket sled strength testing of large, supersonic parachutes, Aerodyn. Decelerator Syst. Technol. Conf. (2015) 1-28. <https://doi.org/10.2514/6.2015-2163>.
- [11] C.D. Morin, K.L. Sparks, Developing a high altitude simulating,

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیلی و عددی کمتر از ۹ درصد با روش تجربی اختلاف دارند و صحت هر سه روش تأیید می‌شود. دلیل اختلاف نتایج می‌تواند ناشی از تفاوت توزیع جرم و هندسه اجایو سورت‌مه طراحی‌شده باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله تحلیل ارتعاشی و آنالیز مودال یک نمونه سورت‌مه تک‌ریل که طراحی مفهومی آن با ایده استفاده از میراگر در فاصله بین بدنه و کفشک‌ها صورت گرفته است، بررسی شد. ابتدا با استخراج معادلات ارتعاشی حاکم بر مسئله و کدنویسی در نرم‌افزار متلب، فرکانس‌های طبیعی سیستم به روش تحلیلی استخراج شدند. برای به‌دست آوردن مقادیر پارامترهای سفتی معادل و میرایی معادل از آزمایش تجربی به‌وسیله دستگاه تست دینامیک هارمونیک و شبیه‌سازی عددی استفاده شد. سپس با مدل‌سازی سورت‌مه در نرم‌افزار آباکوس و آنالیز مودال آن، شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی سیستم استخراج شد. درنهایت با ساخت مدل طراحی‌شده سورت‌مه و آزمایش تجربی، نتایج روش‌های تحلیلی و عددی با اختلاف کمتر از ۹ درصد اثبات شد. همچنین نوسانات پیچشی و عرضی ایجادشده در کفشک‌ها نشان می‌دهد که این بخش از سورت‌مه اهمیت بسیاری داشته و در اثر تنش‌های وارد بر آن، بیشتر در معرض آسیب است.

۷. مآخذ

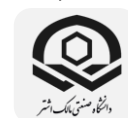
- [1] Evaluation of Flow and Failure Properties of Treated 4130 Steel | SpringerLink, (n.d.). <https://link.springer.com/article/10.1007/s40870-016-0059-1/figures/1> (accessed November 21, 2021).
- [2] A. Gragossian, D.F. Pierrottet, J. Estes, B.W. Barnes, F. Amzajerjian, G.D. Hines, Navigation Doppler Lidar performance analysis at high speed and long range, AIAA Scitech 2020 Forum.



- L. Zhang, Modal Analysis for Single Track Sled, (2018).
- [23] J. Zhang, Dynamic coupling analysis of rocket propelled sled using multibody-finite element method, 18 (2014) 25–30.
- [24] نجفی محمدرضا، محجوب مقدس سعید، مرادی مجتبی، تعیین میراگر پیچشی مناسب جهت کاهش دامنه ارتعاشات موتور هواپیماهای فوق سبک، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۹۹، 10.30506/IJMEP.2021.141449.1746
- [25] C. Hooser, M. Hooser, Soft Sled Evaluation Design Report, 2016. https://www.mhiglobal.com/products/expand/ram_jet_engine_test_facility_supply_result_01.html.
- [26] S. Chen, Y. He, Z. Li, Analysis of the Rocket Sled Track Irregularity in Time and Frequency Domains, in: CICTP 2014 Safe, Smart, Sustain. Multimodal Transp. Syst., 2014: pp. 111–118.
- [27] محجوب مقدس سعید، کتاب ارتعاشات مکانیکی، ایران، تهران، ۱۳۸۷.
- [28] S.A. Al-Gahtany, Mechanical properties of styrene-butadiene rubber/ethylene propylene diene monomer rubber-based conductive blends, J. Elastomers Plast. 45 (2013) 367–389. <https://doi.org/10.1177/0095244312454035>.
- dynamic, ground test capability at the holloman afb high speed test track, USAF Dev. Test Eval. Summit. (2004) 1–9.
- [12] S.C. Praharaj, R.P. Roger, Aerodynamic computations of integrated missile-on-sled vehicles, 34th Aerosp. Sci. Meet. Exhib. (1996). <https://doi.org/10.2514/6.1996-290>.
- [13] G. Andres Garzon, J.R. Matisheck, Supersonic testing of natural laminar flow on sharp leading edge airfoils. Recent experiments by Aerion Corporation, 42nd AIAA Fluid Dyn. Conf. Exhib. 2012. (2012) 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2012-3258>.
- [14] A. DeLeon, A.N. Palazotto, Shock Wave Investigation of High Speed Asperity Collision with Finite Element Modeling, (2020) 1–20. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0316>.
- [15] Z. Dou, S. Sheng, Application of Metal Rubber Technology, Aircr. Des. 30 (2010) 77–80.
- [16] D.C. Tong, Mechanical simulation of rocket sled test damping system, Nav. Electron. Eng. (2012) 87–89.
- [17] N. Bosmajian, D. Minto, L. Holland, Status of the magnetic levitation upgrade to the Holloman High Speed Test Track, in: 21st Aerodyn. Meas. Technol. Gr. Test. Conf., 2000: p. 2289.
- [18] M. Hooser, Soft sled – The low vibration sled test capability at the holloman high speed test track, 2018 Aerodyn. Meas. Technol. Gr. Test. Conf. (2018) 1–12. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3872>.
- [19] J.H. Zhang, S.S. Jiang, Definition of boundary conditions and dynamic analysis of rocket sled and turntable, Appl. Mech. Mater. 52–54 (2011) 261–266. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.261>.
- [20] M. Hooser, C. Hooser, 103X-A1 Vibration Analysis Report, 2016.
- [21] M. Hooser, C. Hooser, Soft Sled Design Evaluation Report, 2016.
- [22] J. Xiao, W. Zhang, Q. Xue, W. Gao,

۸. نمادها

| | |
|------------|--------------------------------------|
| m_b | جرم بدنه سورتمه |
| Z_{b1} | جابه‌جایی عرضی سیستم در محل کفشک جلو |
| Z_{b2} | جابه‌جایی عرضی سیستم در محل کفشک عقب |
| Z_{w1} | جابه‌جایی عرضی کفشک جلو |
| Z_{w2} | جابه‌جایی عرضی کفشک عقب |
| θ_b | چرخش بدنه سورتمه حول محور Y |



| | |
|-----------------------------|------------|
| اغتشاش سطح ریل وارد بر کفشک | z_0 |
| ضریب میرایی | ξ |
| فرکانس طبیعی نامیرا | ω_n |
| فاز حرکت | φ |
| فرکانس تحریک | ω |
| ممان اینرسی | I_{yy} |
| نسبت میرایی سازه‌ای | β |

پی‌نوشت

-
- 1- Solidworks
 - 2- Ansys workbench
 - 3- Fast Fourier transform
 - 4- Ogive

۳۵

سال ۱۰- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و
فناوری هوا فضا



استخراج فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی یک نمونه
سامانه آزمایشگر سورتمه تک‌ریل دارای میراگر