

بررسی پاسخ‌های دینامیکی یک نمونه سورت‌مه دارای جرم و نیروهای اعمالی متغیر به اغتشاش وارد بر سطح ریل

دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، تهران، ایران، drmmajafi@ihu.ac.ir

محمدرضا نجفی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)، تهران، ایران، smahjoubmoghadass@ihu.ac.ir

سعید محبوب مقدس*

چکیده

در مقاله حاضر، پاسخ‌های دینامیکی یک نمونه سورت‌مه جرم متغیر که تحت نیروهای متغیر پیش‌رانش، برآ، پسا و اصطکاک است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با ارائه مدلی کامل از اجزای مختلف سامانه سورت‌مه، معادلات حاکم بر مسئله استخراج و از روش فضای حالت استفاده می‌شود. در ادامه، نیروهای متغیر اعمالی وارد بر مدل سورت‌مه طراحی شده، استخراج می‌شوند. جهت صحت‌سنجی نتایج روش تحلیلی، فرکانس‌های طبیعی مدل آزمایشگاهی سورت‌مه به صورت تجربی به دست آورده می‌شوند. فرکانس طبیعی اول و دوم سورت‌مه به ترتیب ۱۲/۸ و ۲۱/۴ هرتز به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج تحلیلی داشت. نتایج نشان می‌دهد که در اثر اعمال اغتشاش به سورت‌مه، میراگرها ۴۰ درصد از ارتعاشات را میرا می‌کنند. همچنین در تمامی حالات، میزان نوسان کفشک عقب از کفشک جلو بیشتر است که دلیل آن تأثیر اغتشاش کفشک جلو روی کفشک عقب است. از طرفی نیروهایی متغیر اعمالی جابجایی سورت‌مه را ۱۰ درصد افزایش می‌دهند. **واژه‌های کلیدی:** سورت‌مه، پاسخ دینامیکی، کفشک، آنالیز مودال، فرکانس طبیعی، نیروهای متغیر.

Investigation of dynamic responses of a sled sample with mass and variable applied forces to perturbation on the rail surface

M. R. Najafi

Mechanical Engineering Department, Imam Hosein comprehensive university, Tehran, Iran

S. M. Moghaddas

Mechanical Engineering Department, Imam Hosein comprehensive university, Tehran, Iran

Abstract

In the present paper, the dynamic responses of a variable mass sled sample under the variable forces of propulsion, lift, drag and friction are investigated. First, by presenting a complete model of the various components of the sled system, the governing equations are extracted and the state space method is used. Then the variable forces applied to the designed sled model are extracted. In order to validate the results of the analytical method, the natural frequencies of the sled laboratory model are obtained experimentally. The first and second natural frequencies of the sled were 12.8 and 21.4 Hz, respectively, which were in good agreement with the analytical results. The results show that due to the disturbance applied to the sled, the dampers damped 40% of the vibrations. Also, in all cases, the oscillation rate of the rear sleeper is more than the front sleeper, this is due to the effect of the turbulence of the front sleeper on the rear sleeper. On the other hand, variable forces increase the sled displacement by 10%.

Keywords: Sled, dynamic response, sleeper, modal analysis, natural frequency, variable forces.



شکل ۱- یک نمونه سورت‌مه تک‌ریل

۱- مقدمه

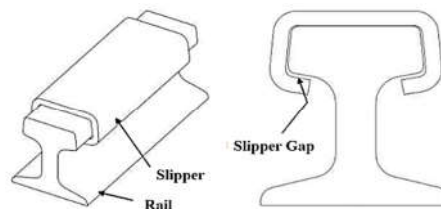
یکی از سامانه‌های پرکاربرد در صنایع هوافضا، سامانه آزمایشگر سورت‌مه است. کاربردهای فراوان این سامانه بالأخص در سرعت‌های مافوق صوت، کشورهای پیشرفته را بر آن داشته تا به منظور آزمون پرش صندلی خلبان جت‌ها [۱]، سوخت‌های هیبریدی [۲]، سرجنگی‌های جدید موشکی [۳]، سازه‌های ضد نفوذ [۴]، تست چتر نجات [۵] و استحکام سازه‌های هوافضایی [۶] از این سامانه بهره گیرند. در سورت‌مه‌های تک‌ریل، معمولاً از یک موتور موشک به منظور تأمین نیروی پیش‌ران استفاده می‌شود. در شکل ۱ یک نمونه سورت‌مه تک‌ریل نشان داده شده است.

جهت اتصال سورت‌مه بر روی ریل از قطعه‌ای به نام کفشک استفاده می‌شود. شکل ۲ نحوه اتصال ریل و کفشک را نشان می‌دهد.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: smahjoubmoghadass@ihu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۱/۲۲



شکل ۲- نحوه اتصال ریل و کفشک [۷]

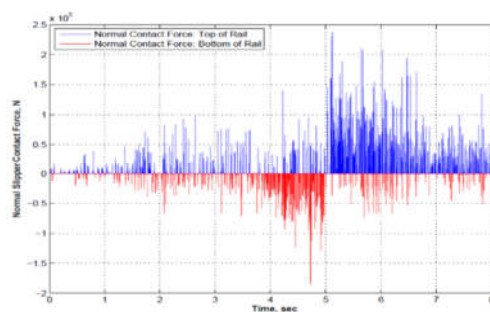
همکاران در مورد وضعیت مسیر آزمون سورتبه مغناطیسی با سرعت بالا بحث کردند. این سیستم با استفاده از سیستم تعلیق مغناطیسی به طور قابل توجهی سطح لرزش و ارتعاشات را کاهش داده است [۱۷]. با توجه به برخورد مداوم سطح ریل و کفشک، بررسی ارتعاشات وارد بر سورتبه از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۸]. هوزر نشان داد محیط ارتعاشی در تست سورتبه تابعی خطی از سرعت است. او نشان داد محیط لرزش سورتبه تک ریل شدیدترین میزان ارتعاش را دارد. سپس ریل مقیاس باریک بیشترین ارتعاشات را داشته و در نهایت ارتعاشات زوج ریل کمتر از دو حالت دیگر است [۱۹]. هوزر و هوزر با استفاده از سنسورهای مختلف معمولی، لیزری و حرارتی به بررسی رفتار سیستم سورتبه عایق شده پرداختند. هدف آن‌ها مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با عملکرد تجربی سیستم روی ریل بود. آن‌ها نشان دادند فرکانس طبیعی سیستم مورد بررسی‌شان، طبق آزمایش ارتعاشی آزمایشگاهی ۱۳ هرتز بود [۲۰]. این دو پژوهشگر از دو سیستم برای کاهش ارتعاشات سورتبه استفاده کردند. در سیستم اول از فوم و در سیستم دوم از ضربه‌گیر کابلی درون محموله سورتبه استفاده نمودند [۲۱]. ژیانو و همکاران جهت آنالیز مودال یک نمونه سورتبه 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 مورد بررسی قرار دادند. در نظر نگرفتن حرکت پیچشی سورتبه از معایب مدل‌سازی این پژوهش بوده است [۲۲]. محبی و همکاران نیروهای آیرودینامیکی ناشی از اثرات وزش باد وارد بر یک نمونه قطار پر سرعت (۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) را مورد بررسی قرار دادند. پیشنهاد آن‌ها جهت پایداری قطار استفاده از دیوارهای بادشکن در پل‌ها و بسترهای با ارتفاع زیاد بوده است [۲۳]. دانگ و همکاران با در نظر گرفتن نیروی اصطکاک، سایش ایجاد شده در سیستم سورتبه را در سرعت ۵ ماخ مورد بررسی قرار دادند. آنها با رسم نمودار چگالی طیفی توان، فرکانس‌های سیستم را استخراج نمودند [۲۴].

با وجود پژوهش‌های محدودی که پیرامون تحلیل دینامیکی و ارتعاشی سورتبه صورت گرفته است، در نظر گرفتن همه نیروهای موثر بر سورتبه به صورت متغیر و استخراج پاسخ‌های دینامیکی سیستم، به عنوان خلأ پژوهشی در جهان مطرح است. در این مقاله پس از بدست آوردن نیروهای متغیر آیرودینامیکی، اصطکاک و پیشران، اقدام به فرموله سازی نتایج شده و باتوجه به پارامترهای هندسی و عملکردی، پاسخ‌های دینامیکی (شامل جابجایی، سرعت و شتاب) سیستم سورتبه تحت نیروهای متغیر اعمالی و جرم متغیر در طول مدت سوزش، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر افزودن میراگر در کاهش ارتعاشات وارد بر بدنه سورتبه و همچنین اثر اغتشاشات کفشک جلو بر کفشک عقب نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- استخراج معادلات

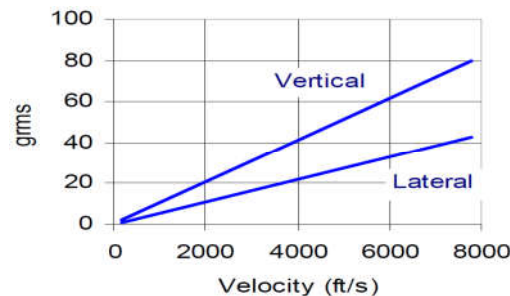
با توجه به مدل‌سازی‌های ناقصی که از سیستم سورتبه تک‌ریل صورت گرفته است، ارائه مدل جامعی که علاوه بر حرکت پیچشی و عرضی بدنه سورتبه، حرکت عمودی کفشک‌ها را نیز در نظر گرفته باشد و تمام نیروهای متغیر وارد بر آن را نیز لحاظ کرده باشد، مورد توجه قرار گرفت. شکل ۵ مدل مسئله حاضر را نشان می‌دهد.

پایداری سامانه سورتبه در برابر بارهای سنگین وارد بر آن [۸-۱۰] و کاهش ارتعاشات این سامانه [۱۱-۱۳] مورد توجه محققان قرار گرفته است. دلیون و همکاران مطابق شکل ۳ نشان دادند در اثر برخورد ریل و کفشک میزان ارتعاشات و نیروی وارد بر کفشک در طی آزمون سورتبه در نقاط بالایی ریل بیشتر از نقاط پایینی ریل خواهند بود [۱۴].



شکل ۳- میزان نیروی وارد بر کفشک در بالا و پایین ریل [۱۴]

هوزر نشان داد از میان عواملی که در ایجاد ارتعاشات وارد بر سورتبه مؤثرند، بیشترین نقش را ارتعاشات ناشی از برخورد ریل و کفشک دارد و مطابق شکل ۴ نشان داد ارتعاشات عرضی ناشی از شتاب عرضی از ارتعاشات جانبی بیشتر است [۱۵].



شکل ۴- شتاب عرضی و جانبی در سامانه سورتبه [۱۵]

مینتو برنامه ارتقاء ظرفیت‌های سورتبه سرعت بالای هالومن^۱ برای پشتیبانی از آزمایش مافوق صوت را مورد بحث قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که لغزش کفشک روی ریل و بارهای ارتعاشی تولید شده توسط ضربه‌های کفشک به ریل منجر به خرابی بدنه سورتبه آزمایش در سرعت‌های بالاتر از ۶۰۰۰ فوت در ثانیه می‌گردد [۱۶]. گورول و

^۱ Holloman

$$\ddot{\theta}_b = -\frac{c_{b1}(L_1-l_1)}{I_{yy}} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b2}(L_2-l_2)}{I_{yy}} \dot{z}_{w2} + \frac{(c_{b1}(L_1-l_1)-c_{b2}l_2)}{I_{yy}} \dot{z}_b - \frac{((c_{b1}(L_1-l_1))^2+(c_{b2}(L_2-l_2))^2)}{I_{yy}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b1}(L_1-l_1)}{I_{yy}} z_{w1} + \frac{k_{b2}(L_2-l_2)}{I_{yy}} z_{w2} + \frac{(k_{b1}(L_1-l_1)-k_{b2}(L_2-l_2))}{I_{yy}} z_b - \frac{((k_{b1}(L_1-l_1))^2+(k_{b2}(L_2-l_2))^2)}{I_{yy}} \theta_b \quad (9)$$

$$\ddot{z}_{w1} = -\frac{c_{b1}}{m_{w1}} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b1}}{m_{w1}} \dot{z}_b - \frac{c_{b1}(L_1-l_1)}{m_{w1}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b1}}{m_{w1}} z_{w1} + \frac{k_{b1}}{m_{w1}} z_b - \frac{k_{b1}(L_1-l_1)}{m_{w1}} \theta_b + \frac{f_{w1}}{m_{w1}} \quad (10)$$

$$\ddot{z}_{w2} = -\frac{c_{b2}}{m_{w2}} \dot{z}_{w2} + \frac{c_{b2}}{m_{w2}} \dot{z}_b + \frac{c_{b2}(L_2-l_2)}{m_{w2}} \dot{\theta}_b - \frac{k_{b2}}{m_{w2}} z_{w2} + \frac{k_{b2}}{m_{w2}} z_b + \frac{k_{b2}(L_2-l_2)}{m_{w2}} \theta_b + \frac{f_{w2}}{m_{w2}} \quad (11)$$

۲-۲- حل معادلات

به منظور حل معادلات استخراج شده از روش فضای حالت که دارای دقت بالا و سرعت بیشتر در حل معادلات است، استفاده می شود. در این روش معادلات دینامیکی به معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه اول تبدیل می شوند که به روش تحلیلی قابل حل هستند [۲۵]. جهت استفاده از روش فضای حالت، علاوه بر معادلات حرکت سیستم که در بخش قبل مورد بررسی و استخراج شدند، معادله زیر که نیروهای وارد بر سیستم در جهت حرکت (X) را نشان می دهد را در نظر می گیریم:

$$m_b \ddot{x}_b = f_T - f_D - f_s \quad (12)$$

معادلات حاکم بر فضای حالت با چند ورودی و چند خروجی به صورت زیر است:

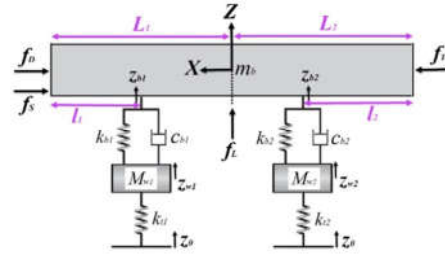
$$\{\dot{X}(t)\} = [A] \{X(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (13)$$

$$\{\dot{Y}(t)\} = [C] \{X(t)\} + [D] \{u(t)\} \quad (14)$$

با استفاده از تعریف مدل فضای حالت، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} X_1 &= z_{w1}, X_2 = \dot{z}_{w1}, X_3 = z_{w2}, \\ X_4 &= \dot{z}_{w2}, X_5 = z_b, X_6 = \dot{z}_b, X_7 = \theta_b \\ X_8 &= \dot{\theta}_b, X_9 = x_b, X_{10} = \dot{x}_b \\ \dot{X}_1 &= X_2, \dot{X}_2 = \dot{z}_{w1}, \dot{X}_3 = X_4, \dot{X}_4 = \dot{z}_{w2} \\ \dot{X}_5 &= X_6, \dot{X}_6 = \dot{z}_b, \dot{X}_7 = X_8, \dot{X}_8 = \dot{\theta}_b \\ \dot{X}_9 &= X_{10}, \dot{X}_{10} = \dot{x}_b \end{aligned} \quad (15)$$

با جایگذاری مقادیر معادله فوق در معادلات حرکت سیستم معادلات فضای حالت سیستم به صورت ماتریسی مطابق زیر خواهند بود:



شکل ۵- مدل سازی ریاضی سورتمه

۱-۲- معادلات حاکم

با استفاده از قانون دوم نیوتن برای حرکت عرضی بدنه سورتمه به دست می آید:

$$m_b \ddot{z}_b = -(k_{b1} + k_{b2}) z_b + k_{b1}(L_1 - l_1) \theta_b + k_{b1} z_{w1} - (c_{b1} + c_{b2}) \dot{z}_b + c_{b1}(L_1 - l_1) \dot{\theta}_b + c_{b1} \dot{z}_{w1} - k_{b2}(L_2 - l_2) \theta_b + k_{b2} z_{w2} - c_{b2}(L_2 - l_2) \dot{\theta}_b + c_{b2} \dot{z}_{w2} + f_L \quad (1)$$

معادلات حرکت پیچشی سورتمه نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$I_{yy} \ddot{\theta}_b = k_{b1}(L_1 - l_1) z_b - k_{b1}(L_1 - l_1)^2 \theta_b - k_{b1}(L_1 - l_1) z_{w1} + c_{b1}(L_1 - l_1) \dot{z}_b - c_{b1}(L_1 - l_1)^2 \dot{\theta}_b - c_{b1}(L_1 - l_1) \dot{z}_{w1} - k_{b2}(L_2 - l_2) z_b - k_{b2}(L_2 - l_2)^2 \theta_b + k_{b2}(L_2 - l_2) z_{w2} - c_{b2}(L_2 - l_2) \dot{z}_b - c_{b2}(L_2 - l_2)^2 \dot{\theta}_b + c_{b2}(L_2 - l_2) \dot{z}_{w2} \quad (2)$$

برای حرکت عمودی کفشک های جلو و عقب نیز به ترتیب معادلات (۳) و (۴) به دست آورده می شوند:

$$m_{w1} \ddot{z}_{w1} = -k_{b1} z_{w1} + k_{b1} z_b - k_{b1}(L_1 - l_1) \theta_b - c_{b1} \dot{z}_{w1} + c_{b1} \dot{z}_b - c_{b1}(L_1 - l_1) \dot{\theta}_b + f_{w1} \quad (3)$$

$$m_{w2} \ddot{z}_{w2} = -k_{b2} z_{w2} + k_{b2} z_b + k_{b2}(L_2 - l_2) \theta_b - c_{b2} \dot{z}_{w2} + c_{b2} \dot{z}_b + c_{b2}(L_2 - l_2) \dot{\theta}_b + f_{w2} \quad (4)$$

در معادلات فوق داریم:

$$z_b = z_{b1} + (L_1 - l_1) \theta_b = z_{b2} - (L_2 - l_2) \theta_b \quad (5)$$

$$f_{w1} = k_{t1} (z_{w1} - z_0) \quad (6)$$

$$f_{w2} = k_{t2} (z_{w2} - z_0) \quad (7)$$

با ساده سازی معادلات و ضرب مقادیر مختلف، در نهایت معادلات حرکت سیستم به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_b &= \frac{c_{b1}}{m_b} \dot{z}_{w1} + \frac{c_{b2}}{m_b} \dot{z}_{w2} - \frac{(c_{b1}+c_{b2})}{m_b} \dot{z}_b + \frac{(c_{b1}(L_1-l_1)-c_{b2}(L_2-l_2))}{m_b} \dot{\theta}_b + \frac{k_{b1}}{m_b} z_{w1} + \frac{k_{b2}}{m_b} z_{w2} - \frac{(k_{b1}+k_{b2})}{m_b} z_b + \frac{(k_{b1}(L_1-l_1)-k_{b2}(L_2-l_2))}{m_b} \theta_b + \frac{f_L}{m_b} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \\ \dot{X}_9 \\ \dot{X}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{b1}/m_{w1} & -c_{b1}/m_{w1} & 0 & 0 & k_{b1}/m_{w1} & c_{b1}/m_{w1} & -S_{12}/m_{w1} & -\dot{S}_{13}/m_{w1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{b2}/m_{w2} & -c_{b2}/m_{w2} & k_{b2}/m_{w2} & c_{b2}/m_{w2} & S_{14}/m_{w2} & \dot{S}_{15}/m_{w2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{b1}/m_b & c_{b1}/m_b & k_{b2}/m_b & c_{b2}/m_b & -S_{22}/m_b & -\dot{S}_{23}/m_b & S_{24}/m_b & \dot{S}_{25}/m_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{12}/I_{yy} & -\dot{S}_{13}/I_{yy} & S_{14}/I_{yy} & \dot{S}_{15}/I_{yy} & S_{24}/I_{yy} & \dot{S}_{25}/I_{yy} & -S_{26}/I_{yy} & -\dot{S}_{27}/I_{yy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_{w1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \begin{bmatrix} f_{w1} \\ f_{w2} \end{bmatrix} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_b/m_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (f_r - f_d - f_s)/m_b \end{bmatrix} \quad (17)$$



شکل ۶- آزمایش سنجش سفتی و میرایی میراگر با دستگاه تست دینامیک هارمونیک

مقادیر میرایی و سفتی میراگر و سایر مشخصات سیستم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و پارامتری سورتمه

واحد	مقدار	پارامتر
kg	۰/۷۹	$m_{w1} = m_{w2}$
kg	۱۴/۶۹	m_b
kN/m	۳۷۰	$k_{b1} = k_{b2}$
N.s/m	۲۹/۹۴	$c_{b1} = c_{b2}$
mm	۴۵۰	L_1
mm	۳۶۰	L_2
mm	۲۸۵	l_1
mm	۱۹۵	l_2

۳- استخراج نیروهای متغیر

مطابق با شکل ۵، نیروهای وارد بر سورتمه شامل نیروی پیشران، نیروی پسا، نیروی برآ و نیروی اصطکاک هستند که تمامی آن‌ها به صورت متغیر و وابسته به پارامترهای مختلف هستند.

۳-۱- نیروی پیشران

برای رساندن سورتمه به سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه، طراحی گرین موتور با توجه به پارامترهای هندسی و عملکردی سورتمه مورد بررسی

در ماتریس فوق، پارامترها به صورت روابط زیر تعریف شده‌اند:

$$S_{12} = k_{b1} (L_1 - l_1) \quad (18)$$

$$\dot{S}_{13} = c_{b1} (L_1 - l_1) \quad (19)$$

$$S_{14} = k_{b2} (L_2 - l_2) \quad (20)$$

$$\dot{S}_{15} = c_{b2} (L_2 - l_2) \quad (21)$$

$$S_{16} = k_{b1} (L_1 - l_1)^2 \quad (22)$$

$$\dot{S}_{17} = c_{b1} (L_2 - l_2)^2 \quad (23)$$

$$S_{18} = k_{b2} (L_1 - l_1)^2 \quad (24)$$

$$\dot{S}_{19} = c_{b2} (L_2 - l_2)^2 \quad (25)$$

$$S_{22} = k_{b1} + k_{b2} \quad (26)$$

$$\dot{S}_{23} = c_{b1} + c_{b2} \quad (27)$$

$$S_{24} = k_{b1} (L_1 - l_1) - k_{b2} (L_2 - l_2) \quad (28)$$

$$\dot{S}_{25} = c_{b1} (L_1 - l_1) - c_{b2} (L_2 - l_2) \quad (29)$$

$$S_{26} = k_{b1} (L_1 - l_1)^2 + k_{b2} (L_1 - l_1)^2 \quad (30)$$

$$\dot{S}_{27} = c_{b1} (L_2 - l_2)^2 + c_{b2} (L_2 - l_2)^2 \quad (31)$$

۳-۲- مشخصات هندسی و پارامتری

با توجه به این که در سورتمه مسئله حاضر، بدنه سورتمه به صورت صلب در نظر گرفته شده است، می‌بایست مقدار میرایی و میراگر استفاده شده را به دست آورد. بدین منظور از تست تجربی به وسیله دستگاه دینامیک هارمونیک یکی از شرکت‌های قطعه‌سازی خودرو مطابق با شکل ۶ استفاده شد.

مطابق با جدول ۲، صورت می‌پذیرد.

جدول ۳- نتایج مطالعه شبکه

ردیف	تعداد سلول	مقدار نیروی پسا [N]
۱	۱۴۰۱۰۸	۶۵/۲۴
۲	۱۳۹۷۸۵۲	۶۱/۶۱
۳	۲۸۵۲۹۵۷	۵۹/۲۳
۴	۵۶۲۰۱۳۸	۵۸/۶

با تنظیم شرایط حل بر اساس مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ و به منظور صحت سنجی روش عددی، نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی تونل باد در دو فشار مختلف مورد مقایسه قرار می‌گیرند و نتایج به صورت جدول ۴ استخراج می‌گردند.

جدول ۴- نتایج روش حاضر و پژوهش تجربی مرجع [۲۷]

خطا	روش عددی [N]	نتایج تجربی [۲۲] [N]	P [psi]
٪ ۸/۵۴	۵۹/۲۳	۶۴/۷۶	۷/۵
٪ ۸/۸۸	۳۶/۸	۴۰/۳۹	۴/۵

همان‌گونه که مشاهده می‌شود خطای روش عددی حاضر از نتایج تجربی کمتر از ۹ درصد بوده که این اختلاف می‌تواند ناشی از فرضیاتی باشد که در روش عددی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب صحت نتایج عددی مورد تأیید قرار می‌گیرد.

با طراحی هندسه سورت‌مه پژوهش حاضر و شبکه‌بندی آن، مقادیر نیروهای برآ و پسا پس از فرموله کردن به صورت معادلات زیر به دست می‌آید:

$$f_D = 0.0099v^2 - 0.2162v + 2.8804 \quad (۳۳)$$

$$f_L = -0.0012v^2 - 0.0563v + 0.5537 \quad (۳۴)$$

۳-۳- نیروی اصطکاک

نیروی اصطکاک وابسته به نیروی برآ و نیروی وزن است که هر دو نیرو در طول زمان سوزش متغیر هستند. بنابراین:

$$f_s(t, v) = \mu N = \mu (f_L + W) = \mu (f_L(v) + m(t)g) \quad (۳۵)$$

با توجه به جنس ریل و کفشک، مقدار μ برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. میزان کاهش جرم سورت‌مه نیز با محاسبات انجام شده در بخش به دست آوردن نیروی پیشران، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m(t) = -2.3t + 20.04 \quad (۳۶)$$

بدین ترتیب نیروی اصطکاک نیز به صورت فرموله شده زیر استخراج می‌گردد:

$$f_s(t, v) = 0.00018v^2 - 0.0085v - 3.39t + 29.41 \quad (۳۷)$$

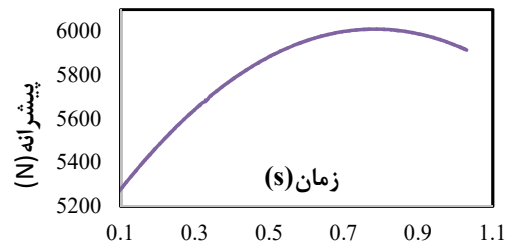
۴- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی نتایج روش تحلیلی، مقدار فرکانس‌های طبیعی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بدین منظور با استفاده از معادلات استخراج‌شده (۸) تا (۱۱) و با توجه به ماتریس

جدول ۲- مشخصات عملکردی برای طراحی گرین موتور سورت‌مه

پارامتر	مقدار	واحد
قطر گرین موتور	۱۰۰	mm
طول موتور با نازل	۲۴۵	mm
قطر خروجی نازل	۸۸	mm
طول سورت‌مه	۶۵۰	mm
جرم کل	۶	kg
جرم سوخت	۲/۳۵۶	kg
فشار محفظه	۵۰	bar
زمان سوزش	۱	Sec
ضربه ویژه	۲۴۰	Sec
نرخ سوزش	۲۶/۶	mm/s

با استفاده از مشخصات عملکردی و هندسی برای طراحی گرین موتور سوخت جامد و نازل آن استفاده می‌شود [۲۶]. با استفاده از مشخصات جدول ۲ و با کدنویسی صورت گرفته، میزان نیروی پیشران موتور سورت‌مه در طول مدت سوزش به صورت شکل ۷ به دست می‌آید.



شکل ۷- مقدار نیروی پیشران در مدت زمان سوزش

با فرموله کردن مقادیر نیروی پیشران در طول مدت سوزش، معادله زیر استخراج می‌گردد:

$$f_T(t) = -1568.1t^2 + 2456.6t + 5048 \quad (۳۲)$$

۳-۲- نیروهای آیرودینامیکی

از آنجاکه مدل سورت‌مه دارای شکل‌های مختلف هندسی مانند کفشک است، برای به دست آوردن نیروهای آیرودینامیکی که شامل دو نیروی پسا و برآ است، از روش شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. در این راستا ابتدا می‌بایست از صحت نتایج روش عددی اطمینان حاصل کرد. بدین منظور از نمونه موشکی که به صورت تجربی در تونل باد ناسا آمریکا مورد آزمایش قرار گرفته و شباهت کاملی به سورت‌مه مسئله حاضر دارد [۲۷]، استفاده می‌شود. با استفاده از مشخصات طراحی، اقدام به ترسیم هندسه مدل تجربی در نرم‌افزار شده و شرایط مرزی اعمال می‌شود. نتایج مطالعه تعداد سلول‌های شبکه در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق نتایج، شبکه‌بندی ردیف سوم به عنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب می‌گردد.

فضای حالت (معادله ۱۷) اقدام به کدنویسی و حل تحلیلی سیستم می‌گردد.

در ادامه به مدل‌سازی و ساخت نمونه آزمایشگاهی سورت‌مه پرداخته می‌شود. تجهیزات مورد استفاده جهت آنالیز مودال سورت‌مه نیز شامل دستگاه تجزیه و تحلیل کننده، شتاب‌سنج و چکش مودال می‌باشد که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- مدل آزمایشگاهی سورت‌مه ساخته شده همراه با تجهیزات آنالیز مودال عملیاتی

به‌منظور شباهت شرایط تست تجربی با حالت واقعی، از اعمال تحریک به‌وسیله چکش در محل کفشک‌ها، استفاده می‌شود. نتایج به دست آمده از روش تحلیلی و تجربی در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقایسه فرکانس طبیعی به روش تحلیلی و تجربی (Hz)

فرکانس طبیعی	حل تحلیلی	آزمایش تجربی	درصد خطا
اول	۱۳/۹۳	۱۲/۸	۸٪
دوم	۲۰/۸	۲۱/۴	۲/۸٪

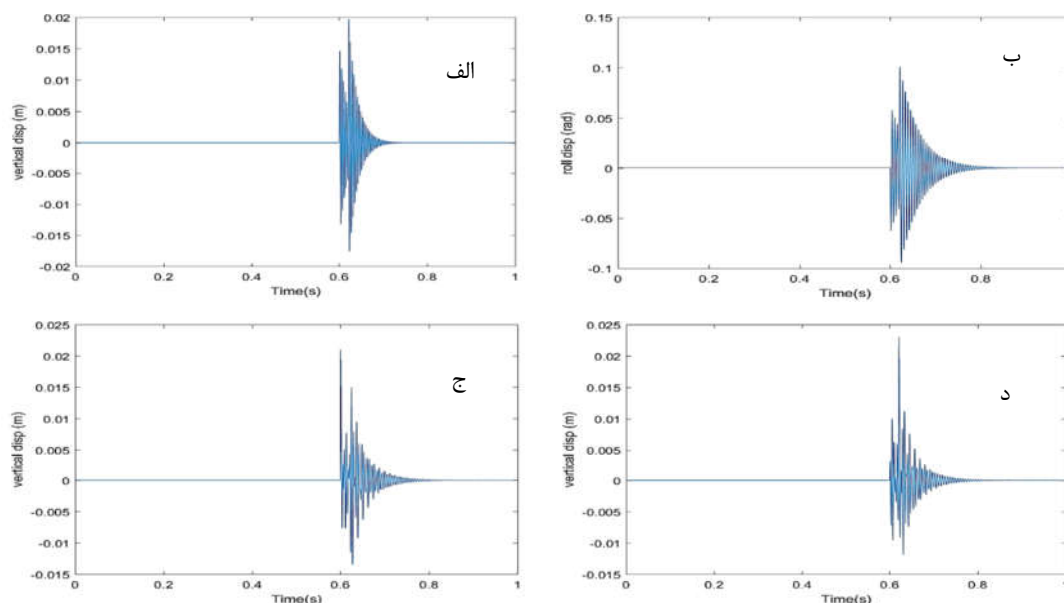
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حل تحلیلی با آزمایش تجربی کمتر از ۸ درصد اختلاف داشته که آن هم می‌تواند مربوط به فرض توزیع یکسان وزن و هندسه سورت‌مه در روش تحلیلی باشد و بدین ترتیب صحت روش تحلیلی مورد تأیید قرار می‌گیرد.

۵- پاسخ‌های سیستم

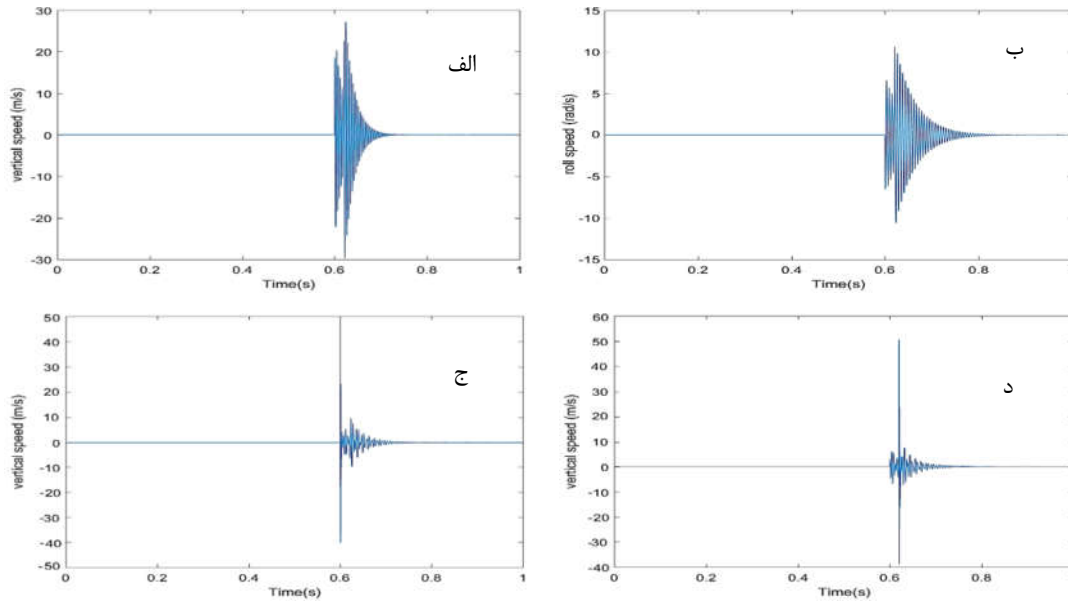
در این بخش به بررسی پاسخ‌های سیستم به اغتشاشات وارد بر سیستم پرداخته می‌شود. به‌منظور در نظر گرفتن ناهمواری‌های سطح ریل می‌بایست دقیق‌ترین و مناسب‌ترین شرایط را به‌عنوان ورودی اغتشاشی سیستم اعمال نمود. با توجه به سرعت بالای حرکت سورت‌مه، اغتشاشات وارده از سوی ریل به‌عنوان تابع ضربه‌ای واحد (ایمپالس) مدل‌سازی می‌گردد. در مسئله حاضر با توجه به سرعت بالای سورت‌مه و وجود دو کفشک متصل به سورت‌مه، مدت زمان فاصله اعمال تحریک بین دو کفشک، ۰/۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده است تا بتوان اثر اغتشاشات ایجاد شده روی کفشک جلو بر کفشک عقب را در طول مدت سوزش که برابر با یک ثانیه است، بررسی نمود.

۵-۱- پاسخ جابجایی سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد

شکل ۹ پاسخ جابجایی سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اغتشاش ایجاد شده توسط کفشک جلو باعث بیشتر شدن جابجایی سیستم به هنگام اعمال اغتشاش به کفشک عقب شده است و حداکثر جابجایی عرضی بدنه سورت‌مه کمتر از ۲ سانتی‌متر شده و زمان نشت حدود ۰/۰۸ ثانیه می‌باشد. از طرفی حداکثر میزان پیچش بدنه سورت‌مه ۰/۱ رادیان بر ثانیه است. میزان جابجایی عمودی کفشک به حدود ۲/۳ سانتی‌متر می‌رسد و این یعنی جابجایی کفشک از جابجایی بدنه سورت‌مه ۱۰ درصد بیشتر است. در اثر اعمال اغتشاشات کفشک جلویی بر کفشک عقبی، میزان جابجایی کفشک عقب بیشتر از میزان جابجایی کفشک جلو شده و به حدود ۲/۵ سانتی‌متر می‌رسد. می‌توان گفت کمتر شدن میزان جابجایی بدنه سورت‌مه نسبت به جابجایی کفشک‌ها، ناشی از میراگرهای تعبیه‌شده بالای کفشک است و به‌طور میانگین حدود ۴۰ درصد از ارتعاشات را میرا نموده است.



شکل ۹- پاسخ جابجایی سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد (الف) جابجایی عرضی بدنه، (ب) جابجایی پیچشی بدنه، (ج) جابجایی عمودی کفشک جلو، (د) جابجایی عمودی کفشک عقب



شکل ۱۰- پاسخ سرعت سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد الف) سرعت عرضی بدنه، ب) سرعت پیچشی بدنه، ج) سرعت عمودی کفشک جلو، د) سرعت عمودی کفشک عقب

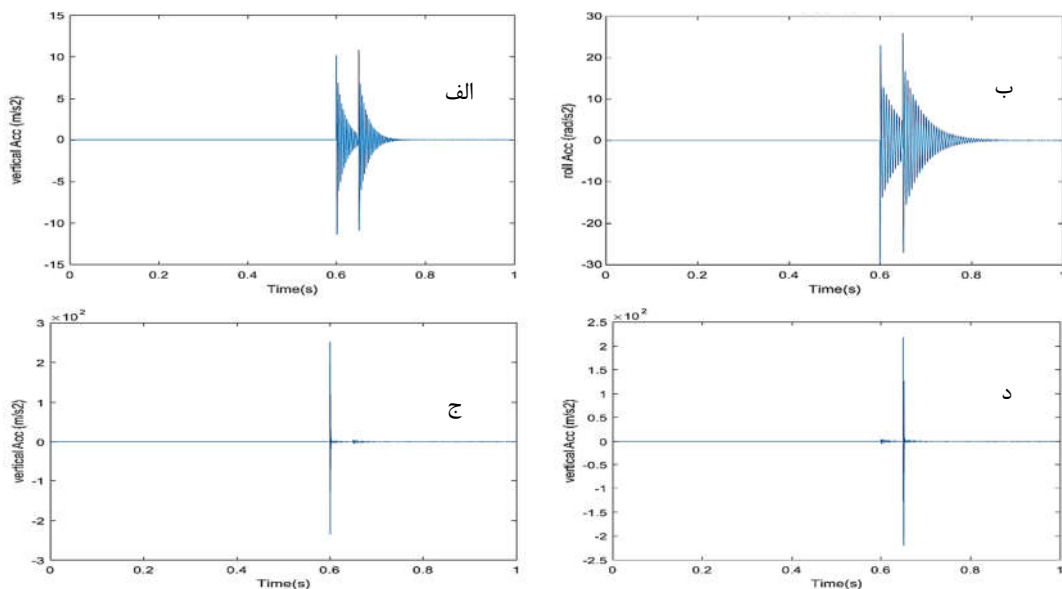
نیز می‌رسد. این در حالی است که شتاب عمودی جابجایی کفشک‌ها حدود ۲۰ برابر شتاب عرضی بدنه است که دلیل این تفاوت چشمگیر، جرم کم کفشک‌ها در مقایسه با جرم بدنه سورتمه و همچنین وجود میراگر بین کفشک و بدنه سورتمه است. به معنای دیگر در صورت عدم استفاده از میراگر و صلب بودن اتصالات، بدنه سورتمه نیز متحمل شتاب بسیار زیادی می‌شد که احتمال انحراف را به همراه داشت.

۵-۲- پاسخ سرعت سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد

شکل ۱۰ پاسخ سرعت جابجایی سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، سرعت عرضی جابجایی بدنه سورتمه تا ۲۷ متر بر ثانیه نیز می‌رسد درحالی‌که سرعت عمودی جابجایی کفشک عقب به ۱۰۰ متر بر ثانیه هم می‌رسد که نشان‌دهنده اثر زیاد اغتشاشات وارد بر کفشک است.

۵-۳- پاسخ شتاب سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد

شکل ۱۱ پاسخ شتاب سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد را نشان می‌دهد. شتاب عرضی جابجایی بدنه سورتمه تا ۱۱ متر بر مجذور ثانیه



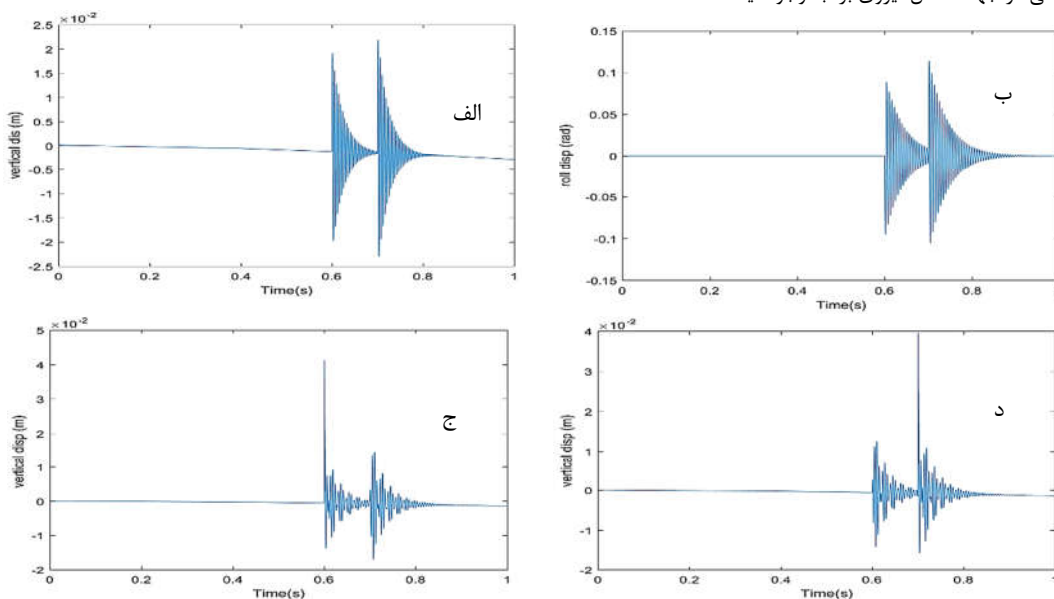
شکل ۱۱- پاسخ شتاب سیستم به اغتشاش ضربه‌ای واحد الف) شتاب عرضی بدنه ، ب) شتاب پیچشی بدنه ، ج) شتاب عرضی کفشک جلو ، د) شتاب عرضی کفشک عقب

۵-۵- پاسخ سرعت جابجایی سیستم دارای جرم و نیروی متغیر

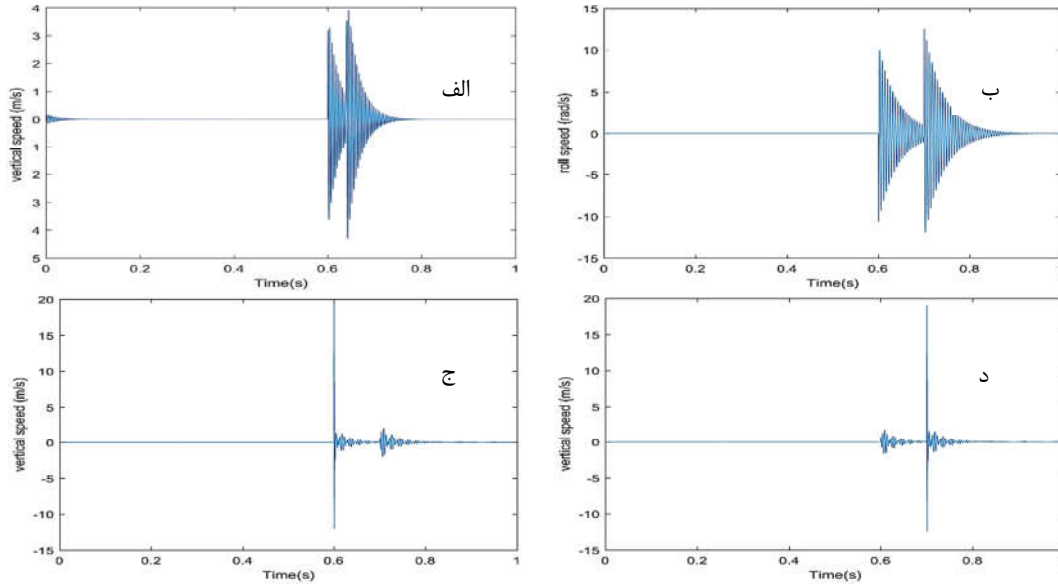
شکل ۱۳ پاسخ سرعت جابجایی بدنه سیستم دارای جرم و نیروی متغیر به اغتشاش ضربه‌ای واحد را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده در این حالت در مقایسه با نتایج مربوط به اغتشاش ضربه‌ای واحد بدون اعمال نیروها، نشان می‌دهد که مدت زمان نشت در شرایط اعمال نیرو، طولانی تر از شرایط مشابه بدون اعمال نیرو است. از طرفی میزان سرعت در تمامی حالت‌ها نیز کمتر از حالت بدون اعمال نیرو می‌باشد.

۵-۴- پاسخ جابجایی سیستم دارای جرم و نیروی متغیر

در این بخش، با در نظر گرفتن سیستم دارای جرم و نیروی متغیر و با وارد کردن تابع ضربه‌ای واحد، پاسخ سیستم به دست آورده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود میزان جابجایی عرضی سیستم جرم متغیر در حالتی که تحت نیروهای متغیر است، ۱۰ درصد بیشتر از حالت قبل است. میزان جابجایی سیستم حدود ۲/۲ سانتی‌متر شده است که دلیل آن می‌تواند اثر نیروهای متغیر اعمالی بر سورت‌مه باشد. از طرفی نیروی آپرودینامیکی برآ با توجه به این که به سمت پایین اعمال می‌شود، باعث شده است که در میرا شدن نوسانات، یک شیب منفی در جهت اعمال نیروی برآ به وجود آید.



شکل ۱۲- پاسخ جابجایی سیستم دارای جرم و نیروی متغیر به اغتشاش ضربه‌ای واحد الف) جابجایی عرضی بدنه ، ب) جابجایی پیچشی بدنه ، ج) جابجایی عمودی کفشک جلو ، د) جابجایی عمودی کفشک عقب



شکل ۱۳- پاسخ سرعت جابجایی سیستم دارای جرم و نیروی متغیر (الف) سرعت عرضی بدنه ، (ب) سرعت پیچشی بدنه ، (ج) سرعت عمودی کفشک جلو ، (د) سرعت عمودی کفشک عقب

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی پاسخ‌های دینامیکی وارد بر یک نمونه سورت‌مه جرم متغیر تحت نیروهای متغیر پرداخته شد. پس از استخراج معادلات حاکم، نیروهای متغیر اعمالی بر نمونه سورت‌مه فرموله شدند. برای رساندن سورت‌مه به سرعت ۳۰۰ متر بر ثانیه در مدت یک ثانیه، نیروی پیشرانش پس از طراحی گرین موتور و با استفاده از مشخصات عملکردی و پارامتری توسط کدنویسی در هر زمان به دست آورده شده و فرموله شد. نیروهای آیرودینامیکی برآ و پسا، پس از اعتبار سنجی روش عددی با پژوهش تجربی انجام شده در ناسا آمریکا، استخراج و فرموله شدند. نیروی اصطکاک نیز با توجه به نرخ کاهش جرم سورت‌مه به دست آورده شد. در ادامه با انجام آنالیز مودال عملیاتی، نتایج روش تحلیلی صحت سنجی شد. نتایج نشان دادند که استفاده از میراگر ۴۰ درصد از نوسانات وارد بر کفشک‌ها را میرا نموده است. بیشتر شدن ارتعاشات وارد بر کفشک عقب نسبت به کفشک جلو نیز ناشی از اغتشاشاتی است که ابتدا به کفشک جلو وارد شده و قبل از پایان زمان نشت، روی کفشک عقب تأثیر می‌گذارد. میزان جابجایی بدنه سورت‌مه جرم متغیر تحت نیروهای متغیر ۱۰ درصد بیشتر از حالتی است که سورت‌مه با اغتشاش ضربه‌ای واحد تحریک شود.

۷- نمادها

جرم بدنه سورت‌مه	m_b
جرم کفشک جلو	m_{w1}
جرم کفشک عقب	m_{w2}
جابجایی عرضی بدنه سورت‌مه	z_b
جابجایی عرضی در محل کفشک جلو	z_{b1}
جابجایی عرضی در محل کفشک عقب	z_{b2}

۸- مراجع

- [1] Liever, P. and Habchi, S., Separation analysis of launch vehicle crew escape systems, *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, 2004.
- [2] Davies, H., Reaction Motors (Thiokol) Family of Packaged Liquid Rocket Engines. *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol 44 No 6, pp. 1271-1284, 2007.
- [3] Zhang, J.H., Dynamic coupling analysis of rocket propelled sled using multibody-finite element method, *Journal of Computer Modelling New Technologies*, Vol 18, pp. 25-30, 2014.
- [4] Szmerekovsky, A.G. and Palazotto, A.N., Structural dynamic considerations for a hydrocode analysis of hypervelocity test sled impacts, *AIAA journal*, Vol 44 No6, pp.1350-1359, 2006.

- [۲۳] محبی م.، رضوانی م و درگزی م.، اثرات وزش باد بر حرکت قطارهای پرسرعت (۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) از منظر آیرودینامیک و ارائه راهکارهای اصلاحی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۸، ش. ۱، ص ۳۱۵-۳۲۱، ۱۳۹۷.
- [24] Dang, T., Liu, Z., Zhou, X., Sun, Y. and Zhao, P., Dynamic Response of a Hypersonic Rocket Sled Considering Friction and Wear Structural dynamic considerations for a hydrocode analysis of hypervelocity test sled impacts, *AIAA journal*, 2022. <https://doi.org/10.2514/1.A35267>.
- [25] K. Ogata, *Modern control engineering*, Prentice hall, 2010.
- [۲۶] رنجبر م.، پور موید ع.، طراحی هندسی و آیرودینامیکی نازل جهت افزودن لوله بلست. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۴۰۰.
- [27] Carlson, H.W. and Gopcynski, J.P., An Experimental Investigation at a Mach Number of 2.01 of the Effects of Body Cross-Section Shape on the Aerodynamic Characteristics of Bodies and Wing-Body Combinations, 1955.
- [28] Zhang P., Nagae T., McCormick J., Ikenaga M., Katsuo M., Nakashima M., Friction-based sliding between steel and steel, steel and concrete, and wood and stone, in: *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng. Beijing, China*, pp. 12-17, 2008.
- [5] Xiao, J. X., Zhang, W. W., Wang, X. H., Zhang, L. R., Geng, Q. and Guo, B., Verification of recovery strength of rocket sled double track sled, *Artificial Intelligence and Computer Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2623159>.
- [6] Xue, X., Wen, C. Y., Review of unsteady aerodynamics of supersonic parachutes, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol 125, pp. 77-80, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100728>.
- [7] Meacham M.B., Kennett A., Townsend D.J., Marti B., Rocket sled propelled testing of a supersonic inflatable aerodynamic decelerator, *AIAA Aerodyn. Decelerator System*, Vol 122, pp 1-13, 2013.
- [8] Zhi-wei, D.O.U. and Suo-xiu, S.H.E.N.G., The Application Research of Metal Rubber Technology [J]. *Aircraft Design*, Vol 5. pp. 77-80, 2010.
- [9] Tang R.Y., Finite element structural analysis of a machine gun based on ANSYS, *Nanjing Univ. Sci. Technology*, 2007.
- [10] W.Gao, N.J. Kessissoglou, Dynamic Response Analysis of Stochastic Truss Structures under Non-stationary Random Excitation using the Random Factor Method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrgy*, Vol 196 pp. 2765-2773, 2007.
- [11] Rodney, D., Gadot, B., Martinez, O.R., Du Roscoat, S.R. and Orgéas, L., Reversible dilatancy in entangled single-wire materials, *Nature materials*, Vol 15, No.1, pp.72-77, 2016.
- [12] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Calculation of flexural-and-torsional vibrations of a rocket track rail, *J. Mach. Manuf. Reliab.* Vol 45, pp. 211-213, 2016.
- [13] Tong D.C., Mechanical simulation of rocket sled test damping system, *Nav. Electron. Eng.* Vol 15, No.1, pp. 87-89, 2012.
- [14] Deleon A., Baker W.P., Palazotto A.N., Evaluation of a nonlinear melt region produced within a high speed environment, *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structure Dynamic. Material Conference*, 2018.
- [15] Hooser M.D., The Holloman High Speed Test Track Gone Soft Recent Advances In Hypersonic Test Track Vibration Environment, *22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2002.
- [16] Minto D.W., Recent increases in hypersonic test capabilities at the holloman high speed test track, *38th Aerospace Sci. Meet. Exhib. Conference*, 2000.
- [17] Gurol H., Ketchen D., Holland L., Minto D., Hooser M., Bosmajian N., Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT), *30th AIAA Aerodynamic Technology Test Conference*, 2014.
- [18] Buentello Hernandez R.G.Palazotto, A.N., K.H. Le, 3D finite element modeling of high-speed sliding wear, *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structure Dynamic. Material Conference*, 2013.
- [19] Hooser, Michael, Soft Sled-the Low Vibration Sled Test Capability at the Holloman High Speed Test Track, *Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, 2018.
- [20] Hooser, M., Hooser, C., 103X-A1 Vibration Analysis, HHSMTT digital archive, Holloman High Speed Test Track, 2016.
- [21] Hooser, M., Hooser, C., Soft Sled Design Evaluation Report, Holloman High Speed Test Track, 2016.
- [22] Xiao, J., Wei-Wei Z., Qiang X., Wei-Bo G. and Lin-Rui Z., Modal Analysis for Single Track Sled, *18th International Conference on physics, Mathematics, Statistics Modelling and Simulation (pmsms)*, Chine, 2018.