

معرفی الگویی از جرم متحرک به صورت یک دستگاه سه درجه آزادی آزمایشگاهی

فریدون ایرانی، رضا اسماعیلی‌فر

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

E-mail: irani_fe@yahoo.com

چکیده: در این مقاله ابتدا روابط حرکت برای یک دستگاه سه درجه آزادی که الگوی ساده‌ای از جرم متحرک بر سطح ناصاف یک پل است به دست آمده است. سپس نقش پارامترهای مختلف در روابط حرکت مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه با استفاده از برنامه رایانه‌ای تهیه شده الگوی نامبرده تحلیل گردیده است، به طوری که تاثیرات قابل توجهی را که عوامل سرعت و جرم خودرو، ناهمواری و خصوصاً مشتقات آن در روابط حرکت ایفا می‌نماید مشخص می‌سازد.

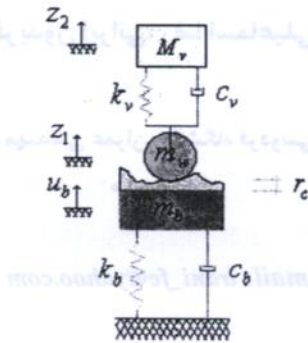
کلید واژه‌ها: دینامیک سازه‌ها، جرم متحرک، حرکت خودرو، ارتعاش پل.

۱. مقدمه

موضوع حرکت خودروها از روی پلها و اثر متقابل آنها توجه بسیاری از پژوهشگران این رشته را به خود معطوف داشته است (اینبناتان و ویلند Inbanathan, Wielad (۱۹۸۷ م) [3]، ونگ و هوانگ و شاهاوی (Wang, Huang, Shahawy) (۱۹۹۲ م) [4]، هوانگ و همکاران (۱۹۹۳ م) [5]، یانگ و لین (Yang, Lin) (۱۹۹۵ م) [6]، یانگ و لیاو (Yang, Liao) (۱۹۹۵ م) [7]، یانگ و یا او (Yang, You) (۱۹۹۷ م) [8]، کیو و فلاو (۱۹۹۷ م) [9]، اما به نقش پارامترهای مختلف موجود در روابط حرکت و میزان تأثیرگذاری آنها به صورت پارامتریک کمتر توجه شده است از این رو در اینجا با معرفی یک الگوی ساده آزمایشگاهی و تعیین روابط حرکت برای آن به نقش برخی از پارامترها که مؤثرتر می‌باشند اشاره می‌گردد.

۲. الگوی ریاضی برای حرکت جرم در یک دستگاه ساده سه درجه آزادی

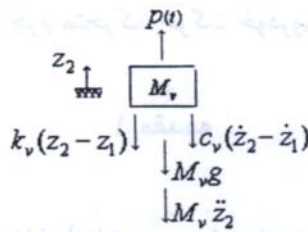
هدف از این بررسی، شناختن عوامل مؤثر بر پاسخ دینامیکی و سهم تأثیرگذاری آنها بر روابط حرکت می‌باشد بدین منظور یک دستگاه سه درجه آزادی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱) الگوی ساده پل - خودرو

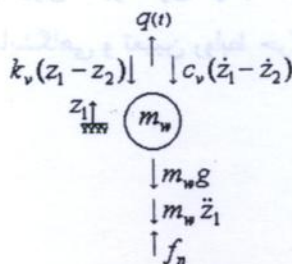
با تفکیک اجزاء (جرمها) و نوشتن معادلات تعادل برای هر یک از آنها داریم:

الف) جرم خودرو



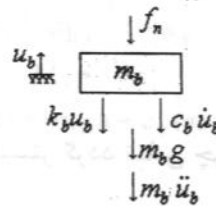
$$M_v \ddot{z}_2 + c_v \dot{z}_2 + k_v z_2 - c_v \dot{z}_1 - k_v z_1 = p(t) - M_v g \quad (1)$$

ب) جرم چرخ و محور



$$m_w \ddot{z}_1 + c_v \dot{z}_1 - k_v z_1 - c_v \dot{z}_2 - k_v z_2 = f_n + q(t) - m_w g \quad (2)$$

(ج) جرم پل



$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = f(t) - f_n - m_b g \quad (3)$$

در روابط فوق g شتاب ثقل است و جهت آن (علامت) در روابط منظور گردیده است. توجه شود که مبنای در ترتیب محل استقرار اولیه اجرام m_b, M_v, m_w می‌باشند بنابراین جابجاییهای استاتیکی در آنها پنهان بوده و با حذف مقادیر متناظر و مساوی وزنها و نیروی استاتیکی فنرها، ارتعاش؛ حول موقعیت تعادل آنها صورت خواهد پذیرفت. همچنین در روابط فوق توابع $q(t), f(t)$ ، در صورت وجود، توابع نیروی وابسته به زمان می‌باشند که ماهیت اینرسی ندارند.

برای این که چرخ خودرو همواره روی سطح پل فرضی قرار داشته باشد باید نیروی f_n همیشه به صورت فشاری بین چرخ و سطح وجود داشته باشد و چنانچه مقدار آن صفر و یا کمتر گردد چرخ از سطح پل جدا خواهد گشت بدیهی است در این صورت پل با شرایط اولیه‌ای که قبل از جدا شدن کسب نموده ارتعاش آزاد خواهد نمود و البته دستگاه دو درجه آزادی خودرو به یک سیستم جرم کاهش یافته تبدیل، و در یک حالت بی‌وزنی ارتعاش خواهد نمود و به صورت پرتابه‌ای از سطح پل جدا گشته و تا فراهم آمدن شرایط اتصال، به صورت آزاد نوسان خواهد کرد. شایان ذکر است که این سخن هنگامی معتبر است که نیروهای وابسته به زمان $f(t), g(t), p(t)$ وجود نداشته باشند، چه در غیر این صورت وضعیت ارتعاش به این نیروها وابسته خواهد بود. در این راستا روابط لحظه اتصال چرخ خودرو و پل به صورت زیر ارائه می‌شود:

با جایگذاری مقدار f_n از رابطه (۲) در رابطه (۳) داریم:

$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b + m_w \ddot{z}_1 + c_v \dot{z}_1 + k_v z_1 - c_v \dot{z}_2 - k_v z_2 = f(t) + q(t) - (m_w + m_b)g \quad (4)$$

با تعریف تابع ناهمواری $r(x)$ که در آن $x = \frac{1}{2}at^2 + vt$ و a شتاب و v سرعت اولیه جرم متحرک می‌باشد که

ثابت فرض می‌شود و با در نظر گرفتن شرط استقرار چرخ بر سطح ناهموار پل می‌توان نوشت:

$$z_1 = u_b + r(x) \quad (5)$$

(7)
$$\dot{z}_1 = \dot{u}_b + \dot{r}(x) \tag{6}$$

(7)
$$\ddot{z}_1 = \ddot{u}_b + \ddot{r}(x) \tag{7}$$

دید می‌شود چنانچه z_1 از مقدار $u_b + r(x)$ بیشتر گردد تماس چرخ و سطح پیل قطع گشته و مطابق توضیح قبل ارتعاش از نوع آزاد خواهد بود.

بسط مشتقات زمانی تابع ناهمواری به صورت زیر است:

(7)
$$\frac{\partial}{\partial t} r(x) = (at + v)r'(x) \tag{8}$$

(9)
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} r(x) \right) = ar''(x) + (at + v)^2 r''(x) \tag{9}$$

که v و a سرعت و شتاب ثابت جرم متحرک (در جهت حرکت آن) می‌باشند بنابراین:

(10)
$$z_1 = u_b + r(x) \tag{10}$$

(11)
$$\dot{z}_1 = \dot{u}_b + (at + v)r'(x) \tag{11}$$

(12)
$$\ddot{z}_1 = \ddot{u}_b + ar''(x) + (at + v)^2 r''(x) \tag{12}$$

که چنانچه متحرک دارای سرعت ثابت و شتاب صفر باشد روابط به صورت زیر ساده می‌گردند:

(13)
$$z_1 = u_b + r(x) \tag{13}$$

(14)
$$\dot{z}_1 = \dot{u}_b + vr'(x) \tag{14}$$

(15)
$$\ddot{z}_1 = \ddot{u}_b + v^2 r''(x) \tag{15}$$

با جایگذاری روابط (10) تا (12) در رابطه‌های (1) و (4) معادلات زیر بدست می‌آیند:

(16)
$$M_v \ddot{z}_2 + c_v \dot{z}_2 + k_v z_2 - c_v \dot{u}_b - k_v u_b = p(t) - M_v g + c_v (at + v)r'(x) + k_v r(x) \tag{16}$$

و برای پیل فرضی داریم:

(17)
$$(m_b + m_w)\ddot{u}_b + (c_b + c_v)\dot{u}_b + (k_b + k_v)u_b - c_v \dot{z}_2 - k_v z_2 = f(t) + q(t) - \{m_w (at + v)^2 r''(x) + [m_w a + c_v (at + v)]r'(x) + k_v r(x) + (m_w + m_b)g\} \tag{17}$$

معادلات اخیر به شکل ماتریسی زیر نیز قابل بیان هستند.

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & m_b + m_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_2 \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_b + c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_b + k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_2 \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) + c_v(at + v)r'(x) + k_v r(x) - M_v g \\ f(t) + q(t) - \{m_w(at + v)^2 r''(x) + [m_w a + c_v(at + v)]r'(x) + k_v r(x) + (m_w + m_b)g\} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

حال حالتی را بررسی می‌کنیم که چرخ خودرو از سطح رویه پل در حال جدا شدن باشد، در این صورت مقدار f_n صفر خواهد بود پس:

$$f_n = 0 \Rightarrow \begin{cases} m_w \ddot{z}_1 + c_v \dot{z}_1 + k_v z_1 - c_v \dot{z}_2 + k_v z_2 = q(t) - m_w g \\ m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + k_b u_b = f(t) - m_b g \end{cases} \quad (19)$$

$$(20)$$

لذا دو معادله وابسته (۱۶) و (۱۹) و معادله مستقل (۲۰) تشکیل خواهد شد به طوری که دو معادله اول مبین حرکت سیستم خودرو و معادله (۲۰) مشخص کننده ارتعاش پل در عدم وجود خودرو می‌باشد و حل معادلات یاد شده با شرایط مرزی کسب شده لحظه‌ای قبل از انفصال صورت می‌گیرد، دستگاه معادلات فوق به صورت ماتریسی زیر قابل بیان می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 & 0 \\ 0 & m_w & 0 \\ 0 & 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v & 0 \\ -c_v & c_v & 0 \\ 0 & 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v & 0 \\ -k_v & k_v & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_2 \\ z_1 \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) - M_v g \\ q(t) - m_w g \\ f(t) - m_b g \end{Bmatrix} \quad (21)$$

در ادامه حل پارامتریک معادلات حرکت دستگاه دو درجه آزادی (اتصال چرخ خودرو به سطح پل) و الگوی آزمایشگاهی دستگاه سه درجه آزادی (با امکان انفصال چرخ خودرو و سطح پل) جهت یک بررسی عمیقتر مسأله، ارائه می‌گردد.

۲-۱. دستگاه دو درجه آزادی:

بسامد زاویه‌ای چنین دستگاهی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$|k - M\omega^2| = 0 \quad (22)$$

بنابراین:

$$\omega^2 = \frac{[k_v(m_b + m_w) + M_v(k_v + k_b)] \pm \sqrt{[k_v(m_b + m_w) + M_v(k_v - k_b)]^2 + 4M_v^2 k_v k_b}}{2M_v(m_b + m_w)} \quad (23)$$

و ماتریس مودال مطابق زیر خواهد بود:

$$[\bar{\phi}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_v - M_v \omega_1^2} & \frac{1}{k_v - M_v \omega_2^2} \\ \frac{1}{k_v} & \frac{1}{k_v} \end{bmatrix} \quad (24)$$

چنانچه $\bar{\omega}^2 = \frac{k_v}{M_v}$ و $\beta_i = \frac{\bar{\omega}}{\omega_i}$ که $\bar{\omega}$ بسامد دایره‌ای خودرو، ω_i بسامد زاویه‌ای دستگاه ارتعاشی نشان داده شده در شکل (۱) و β_i نسبت بسامدهای دایره‌ای نیروی محرک (خودرو) به بسامدهای دستگاه یاد شده باشند، پس از نرمالایز^۱ نمودن ماتریسهای جرم، میرایی و سختی نسبت به ماتریس مودال می‌توان به معادلات ساده‌تری دست یافت.

$$M_i = M_v + \left(1 - \frac{1}{\beta_i^2}\right) (m_b + m_w) \quad (25)$$

$$C_i = \frac{1}{\beta_i^4} c_v + \left(1 - \frac{1}{\beta_i^2}\right) c_b \quad (26)$$

$$K_i = \frac{1}{\beta_i^4} k_v + \left(1 - \frac{1}{\beta_i^2}\right) k_b \quad (27)$$

$$P_i = m_w v^2 \left(1 - \frac{1}{\beta_i^2}\right) r''(x) + \left[m_w a \left(1 - \frac{1}{\beta_i^2}\right) - \frac{1}{\beta_i^2} v c_v \right] r'(x) - \frac{1}{\beta_i^2} k_v r(x) \quad (28)$$

به طوری که ۱ و ۲ i موده‌های اول و دوم دستگاه شکل (۱) را نشان می‌دهند. بنابراین دستگاه معادلات وابسته و درهم (۱۸) را می‌توان به شکل نرمالایز شده زیر نوشت [۱، ۲، ۳، ۱۰].

$$\begin{cases} M_1 \ddot{Y}_1 + C_1 \dot{Y}_1 + K_1 Y_1 = P_1 \\ M_2 \ddot{Y}_2 + C_2 \dot{Y}_2 + K_2 Y_2 = P_2 \end{cases} \quad (29)$$

که M_i, C_i, K_i, P_i ($i=1$ و 2) از روابط فوق بدست می‌آیند و Y_i بردار جابجایی نرمال شده خواهد بود.

^۱. Normalize

برای هنگامی که چرخ خودرو از سطح پل جدا گردد، سیستم خودرو شامل جرمهای M_v, m_w و فنر k_v و میراکننده c_v به صورت پرتابه‌ای سطح پل را ترک نموده و در نقطه‌ای دیگر روی پل، وقتی شرط تقاطع (با در نظر گرفتن مقادیر جابجاییهای پل و چرخ در هر لحظه) برقرار شود سقوط می‌نماید، به طوری که در ضمن حرکت پرتابی خود، این دو جرم با توجه به شرایط اولیه کسب نموده و در لحظه‌ای قبل از انفصال، نسبت به هم نوسان خواهند نمود، جرم معادل چنین نوسانگری کاهش می‌یابد (سیستم جرم کاهش یافته) و هنگام برخورد مجدد با سطح پل به علت ایجاد یک تغییر وضعیت شدید در جمله مربوط به جرم در روابط حرکت، ضربه‌ای شدید به سیستم خودرو و نهایتاً به پل اعمال می‌گردد. نتایج برای چنین وضعی به صورت زیر می‌باشد.

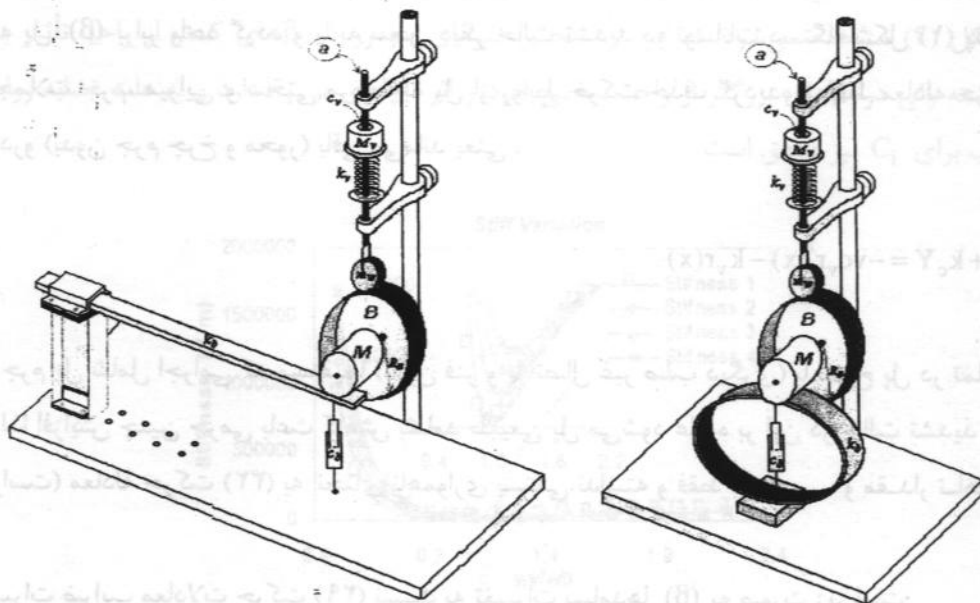
$$z_1 = c_1 - c_2 \alpha \sin \omega_2 t - c_3 \alpha \cos \omega_2 t \quad (30)$$

$$z_2 = -\frac{1}{2} C_1 g t^2 + e^{-\xi \omega t} [A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t] \quad (31)$$

به طوری که $\omega_v^2 = \frac{k_v}{M_v}$ ، $\omega_2^2 = (1 + \alpha)\omega_v^2$ ، $\alpha = \frac{M_v}{m_w}$ و ضرایب A, C_1 و B با توجه به شرایط اولیه کسب شده قبل از انفصال محاسبه می‌گردند.

۲-۲. الگوی آزمایشگاهی پیشنهادی

در اینجا برای یک تحقیق عملی و آزمایشگاهی اثر جرم و نیروی متحرک دستگاه سه درجه آزادی شکل زیر پیشنهاد شده است:



شکل ۲- الگوهای آزمایشگاهی

مطابق شکل، دستگاه از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت فوقانی الگوی خودرو است که شامل جرم M_v و جرم m_w می‌باشد به طوری که این دو توسط فنر k_v به هم مرتبط بوده و جرم M_v می‌تواند در امتداد محور نگهدارنده a به صورت قائم نوسان کند همچنین جرم m_w معرف چرخ خودرو که قادر است حول محور خود روی سطح تماس بغلند و نهایتاً قسمت دوم که شامل چرخ بزرگ است که توسط موتور M با دور قابل تنظیم گردانده می‌شود این سیستم بر روی یک فنر خمشی که محور آن از مرکز ثقل دستگاه گذشته و سختی آن با تغییر طول عضو فنری قابل تنظیم است، سوار شده است. سطح ناهمواری را می‌توان توسط حلقه‌هایی از لاستیک که روی آنها زبری‌های متفاوتی ایجاد شده شبیه سازی نمود به طوری که این لایه‌ها قابل تعویض بوده و آزمایش با سطوح زبری مختلف قابل انجام می‌باشد. میراکننده‌ها را نیز می‌توان از نوع لزجی یا اصطکاکی اختیار نمود. روش کار بدین گونه است که هنگام چرخیدن چرخ بزرگ B توسط موتور M با سرعت زاویه‌ای ω سطح ناهمواری با سرعت خطی $v = R_B \omega$ از زیر چرخ به جرم m_w عبور می‌نماید. در حقیقت در اینجا به جای این که الگوی خودرو حرکت نماید سطح پل فرضی حرکت می‌کند و چنانچه منظور؛ بررسی اثر نیروی متحرک باشد جرمهای m_w و M_v حذف و بجای آن یک فنر K_v فشرده شده و بدون وزن استفاده می‌گردد. در هر صورت برای مشاهده نتایج می‌توان در مقابل هر درجه آزادی (محور چرخها و صفحه زیر جرم M_v) یک ثبات مکانیکی یا دیجیتالی نصب نمود.

۳. نقش متغیرها در معادلات حرکت

برای دستگاه دو درجه آزادی شکل (۱) دستگاه معادلات (۲۹) بدست آمدند به طوری که پارامترهای مربوطه در روابط (۲۵) تا (۲۸) مشخص شده‌اند چنانکه در این روابط مشاهده می‌شود هنگامی که نسبت بسامدهای طبیعی خودرو به پل (β) برابر واحد گردد و یا به سخن دیگر حالت تشدید در نوسانات دستگاه شکل (۱) پدید آید در این صورت جملات جرم، میرایی و سختی مربوط به پل از روابط حرکت حذف گردیده و فقط معادله حرکت مربوط به جرم خودرو (بدون جرم چرخ و محور) باقی می‌ماند یعنی :

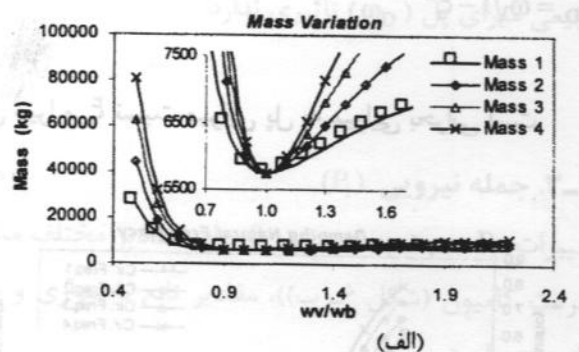
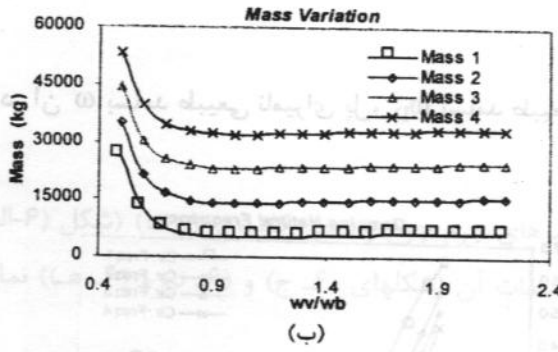
$$M_v \ddot{Y} + c_v \dot{Y} + k_c Y = -vc_v r'(x) - k_v r(x) \quad (32)$$

بنابراین جرم پل شامل اجزای که مستقیماً (بدون فنر و یا اتصال غیر صلب دیگری) با سطح پل در تماس هستند نیز می‌شود لذا افزایش چنین جرمی باعث کاهش بسامد طبیعی پل می‌شود علاوه بر این در حالت تشدید جمله نیرویی (سمت راست) معادله حرکت (۳۲) به انحنا ناهمواری بستگی نداشته و فقط به شیب و مقدار ناهمواری وابسته است.

تغییرات ضرایب معادلات حرکت (۲۹) نسبت به تغییرات بسامدها (β) به صورت زیر است:

۳-۱. جمله مربوط به جرم (M_i)

با تغییر مقادیر جرم پل (m_b)، جرم خودرو (M_v) در برابر تغییرات نسبت بسامدها می‌توان تغییرات M_i را مطابق رابطه (۲۵) به صورت شکل (۳) نشان داد.

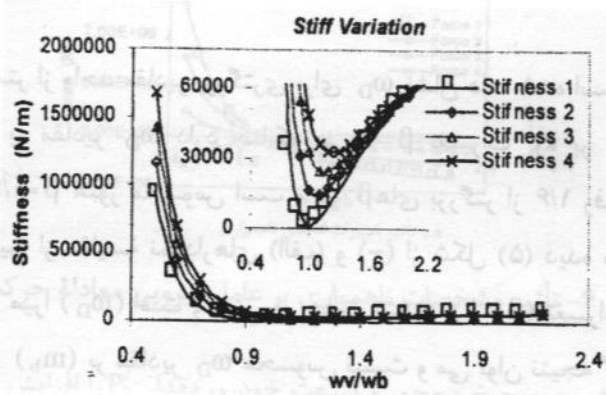


شکل ۳- تغییرات M_i برای β های مختلف به ازای تغییر (الف) (m_w, m_b) (ب) M_v

چنانکه از روابط (۲۵) پیداست نقش جرم چرخ و محور خودرو (m_w) در روابط حرکت مانند جرم پل (m_b) است و مستقیماً در روابط حرکت پل اثر می‌نماید. همچنین در شکل (الف) مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن β به مقدار واحد به شدت از تأثیر جرم پل (و چرخ و محور کامیون) کاسته می‌شود اما در شکل (ب) با افزایش جرم خودرو کاهش چشمگیری مشاهده نمی‌گردد.

۳-۲. جمله مربوط به سختی (K_i) و میرایی (C_i)

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که افزایش سختی فنرهای خودرو در β های کمتر از واحد تأثیر بسزایی بر مقدار K_i داشته ولی در β های بزرگتر از واحد سختی خودرو اثر ناچیزی بر K_i دارد و به علت تشابه روابط C_i و K_i این مطلب برای C_i نیز صادق است.

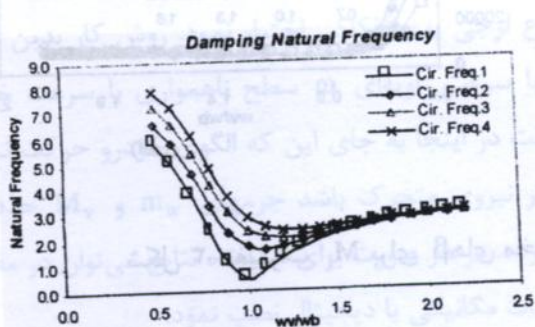


شکل ۴- تغییرات سختی K_i در برابر تغییرات β برای مقادیر مختلف سختی خودرو (k_v)

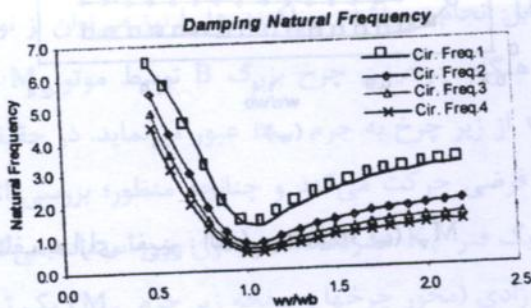
همچنین با توجه به رابطه (۳۳) تغییرات بسامد طبیعی میرای پل را می توان برای مقادیر مختلف مشخصات خودرو و پل به ازای β در بازه (۰/۵ و ۲) به شکل (۵) مراجعه نمود.

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (33)$$

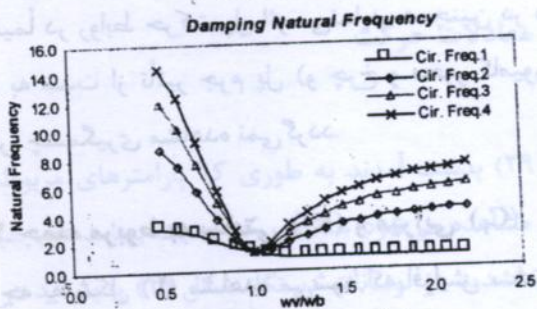
که در آن ω بسامد طبیعی نامیرای پل، ω_D بسامد طبیعی میرا و ξ نسبت میرایی پل به میرایی بحرانی است.



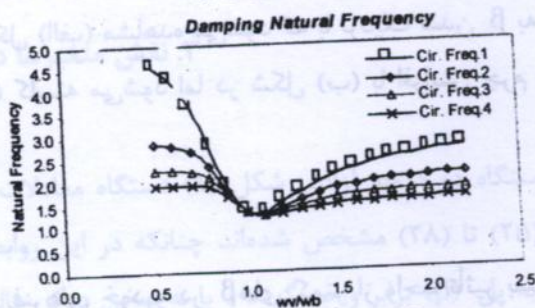
(ب) تأثیر سختی خودرو بر ω_D



(الف) تأثیر جرم خودرو بر ω_D



(د) تأثیر سختی پل بر ω_D



(ج) تأثیر جرم پل بر ω_D

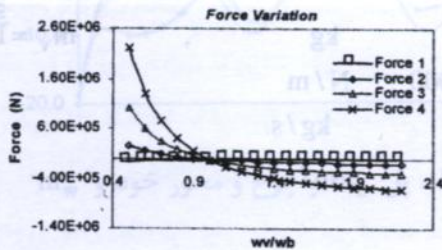
شکل ۵- تغییرات بسامد طبیعی میرایی پل بر حسب β

مانند قبل برای β های کمتر از واحد مقادیر بزرگتری برای ω_D نشان داده شده است همچنین سختی خودرو نسبت به سختی پل اثر بیشتری بر مقادیر ω_D دارد چنانکه در $\beta=1$ تغییرات k_b بر ω_D اثر چندانی ندارد اما برای سختی k_v این اثرات تا $\beta=1/6$ هنوز محسوس است و در β های بزرگتر از $1/6$ رفته رفته برای کلیه k_v ها مقدار ω_D ثابت می گردد، همچنین از مقایسه نمودارهای (الف) و (ج) از شکل (۵) دیده می شود که افزایش جرم خودرو باعث کاهش بسامد طبیعی میرا (ω_D) است و حتی در حالت تشدید ($\beta=1$) تغییرات M_v بر ω_D مؤثر است اما در این حالت تغییرات جرم پل (m_b) بر مقادیر ω_D محسوس نیست و می توان نتیجه گرفت که بسامد طبیعی دستگاه شکل (۱) در حالت تشدید نسبت به تغییرات مشخصات خودرو حساس ولی نسبت به تغییرات مشخصات پل بی

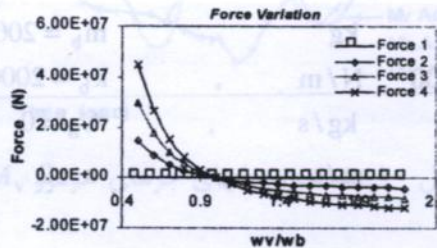
تفاوت است. بنابراین با توجه به شکل (۵-ب) می‌توان گفت که با افزایش سرعت خودرو (افزایش β) تأثیر سختی خودرو (k_v) بر ω_D ناچیز می‌گردد، لذا بعلت وجود طیف نسبتاً وسیع ω_D در ناحیه $\beta=1$ احتمال بروز همگامی پل هنگام عبور خودرو کاهش می‌یابد و برای k_b چنانکه شکل (۵-د) نشان می‌دهد تغییرات سختی پل بر بسامد طبیعی میرای پل (ω_D) تأثیری ندارد.

۳-۳. جمله نیرویی (P_i)

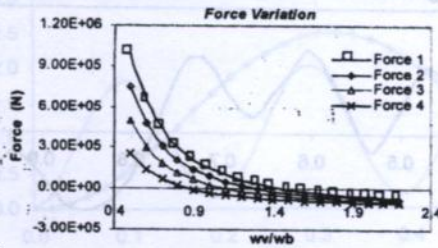
تغییرات P_i نسبت به تغییرات β برای مقادیر مختلف متغیرهای جرم چرخ و محور کامیون (m_w) (شکل ۶-الف)، سرعت کامیون (شکل ۶-ب)، مقادیر تابع ناهمواری و مشتقات آن (شکلهای ۶-ج و ۶-د) و (۶-ه) نمایش داده شده است.



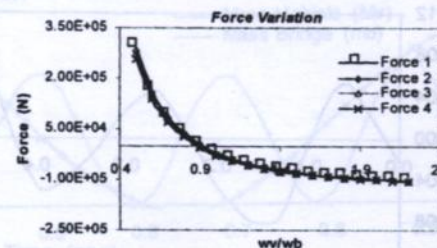
(ب) تأثیر تغییرات سرعت خودرو



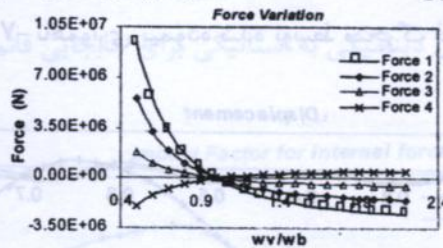
(الف) تأثیر تغییرات جرم چرخ و محور



(د) تأثیر تغییرات شیب منحنی ناهمواری



(ج) تأثیر تغییرات ناهمواری



(ه) تأثیر تغییرات انحنای ناهمواری

شکل ۶- تأثیر مشخصات ناهمواری بر عامل نیرویی معادله حرکت

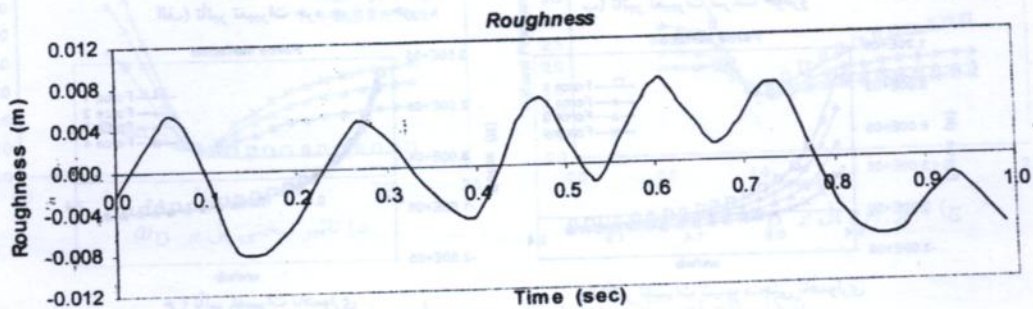
چنانکه مشاهده می‌گردد، افزایش جرم چرخ و محور و سرعت خودرو، مقدار P_i را افزایش می‌دهند و در $\beta=1$ مقدار صفر و برای β های بزرگتر از یک جهت P_i تغییر می‌کند (شکلهای الف و ب)، همچنین تغییرات مقادیر واقعی

ناهمواری بر P_i اثر چندانی نمی‌گذارد و حال آنکه مطابق شکل‌های (د) و (ه) تغییرات مقادیر مشتقات اول و دوم ناهمواری، بر P_i اثر قابل توجهی از خود نشان می‌دهد به طوری که میزان تغییرات P_i نسبت به تغییرات انحنای حدود ۱۰ برابر اثر شیب منحنی بر P_i است.

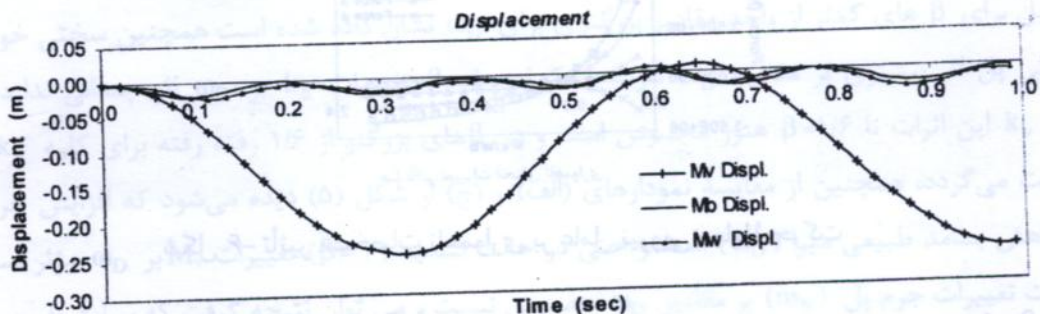
۴. حل یک مثال عددی

بر اساس روابط حاصل در این قسمت برنامه رایانه‌ای برای محاسبه پاسخ دستگاه شکل (۲) تهیه شده است به طوری که قادر است دستگاه شکل (۲) را به صورت یک دستگاه دو درجه آزادی (هنگامی که خودرو روی پل فرضی واقع است) و یا یک دستگاه سه درجه آزادی (هنگامی که خودرو فرضی از پل جدا شده است) الگوسازی نماید. بر این اساس برای داده‌های زیر پاسخ‌های جابجایی و نیرویی دستگاه بدست آمده‌اند.

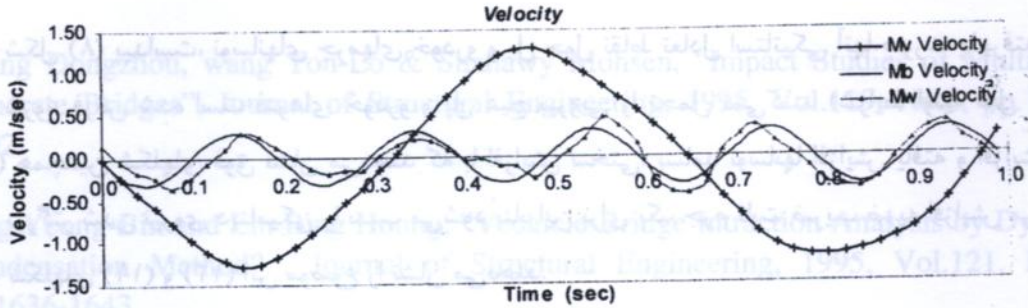
$M_v = 20$	kg	,	$m_b = 200$	kg	,	$m_v = 1$	kg
$K_v = 2000$	N/m	,	$k_b = 200000$	N/m			
$C_v = 0$	kg/s	,	$C_b = 0$	kg/s			
$V = 30$	m/s	,	$a = 0$	m/s^2			



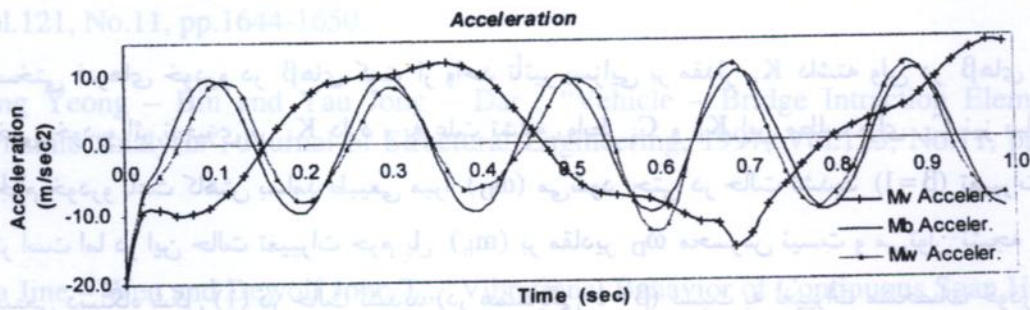
شکل ۷- ناهمواری پیموده شده توسط متحرک فرضی شکل (۲)



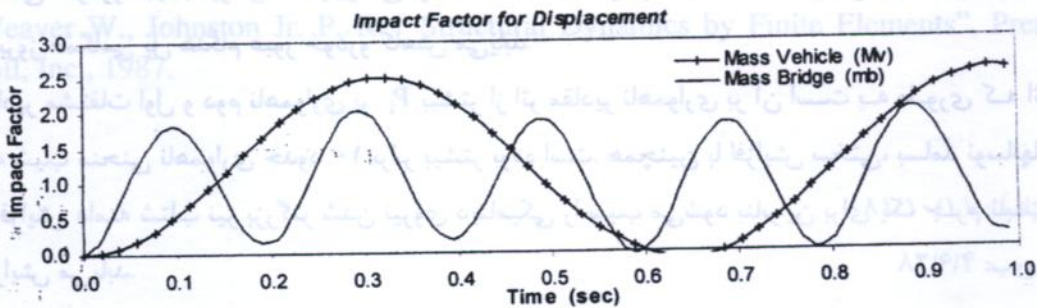
شکل ۸- جابجایی قائم جرم‌های خودرو M_v ، پل m_b و چرخ و محور خودرو m_w



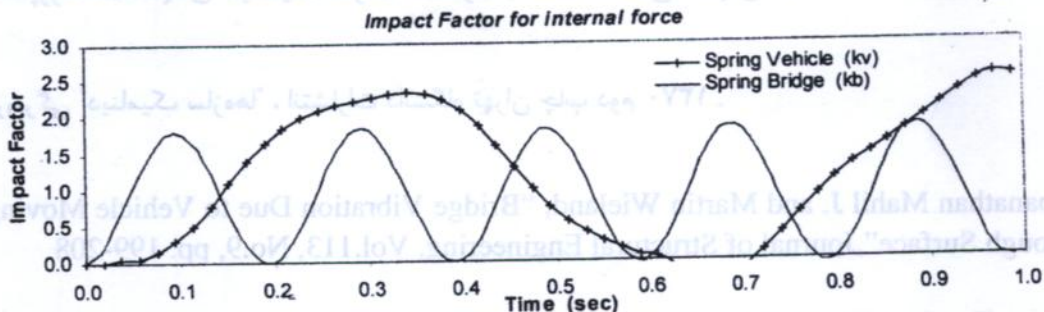
شکل ۹- سرعت ارتعاشات جرمهای خودرو M_v ، پل m_b و چرخ و محور خودرو m_w



شکل ۱۰- شتاب نوسانهای جره‌های خودرو M_v ، پل m_b و چرخ و محور خودرو m_w



شکل ۱۱- نسبت پاسخهای دینامیکی به استاتیکی برای جابجایی قائم خودرو و پل



شکل ۱۲- نسبت پاسخهای دینامیکی به استاتیکی برای نیروهای فنرهای خودرو و پل

چنانکه از شکل (۸) پیداست، نوسانهای جرمهای خودرو و پل حول نقاط تعادل استاتیکی آنها صورت پذیرفته است و در لحظه شروع فرض شده است فنرهای خودرو و پل هیچ نیرویی را تحمل نمی‌کنند (شرایط اولیه قبل از تعادل استاتیکی) همچنین شکل‌های فوق نشان می‌دهند که با افزایش سختی، بسامد نوسانها افزایش یافته و افزایش دامنه شتاب نیز بزرگتر شدن نیروی دینامیکی را سبب می‌شود بنابراین برای یک جرم ثابت ضریب ضربه افزایش می‌یابد، به طوری که شکل‌های (۱۱) و (۱۲) این موضوع را نشان می‌دهند.

۵. نتیجه‌گیری

افزایش سختی فنرهای خودرو در β های کمتر از واحد تأثیر بسزایی بر مقدار K_i داشته ولی در β های بزرگتر از واحد سختی خودرو اثر ناچیزی بر K_i دارد و به علت تشابه روابط C_i و K_i این مطلب برای C_i نیز صادق است. افزایش جرم خودرو باعث کاهش بسامد طبیعی میرا (ω_D) می‌شود حتی در حالت تشدید ($\beta=1$) تغییرات M_v بر ω_D مؤثر است اما در این حالت تغییرات جرم پل (m_b) بر مقادیر ω_D محسوس نیست و می‌توان نتیجه گرفت که بسامد طبیعی دستگاه شکل (۱) در حالت تشدید (در همسایگی $\beta=1$) نسبت به تغییرات مشخصات خودرو حساس ولی نسبت به تغییرات مشخصات پل بی‌تفاوت است بنابراین می‌توان گفت که با افزایش سرعت خودرو (افزایش β) تأثیر سختی خودرو (k_v) بر ω_D ناچیز می‌گردد، لذا به علت وجود طیف نسبتاً وسیع ω_D در ناحیه ($\beta=1$) احتمال بروز همگامی پل هنگام عبور خودرو کاهش می‌یابد.

تأثیر مقادیر مشتقات اول و دوم ناهمواری بر P_i بیشتر از اثر مقادیر ناهمواری بر آن است به طوری که اثر انحنا نسبت به شیب منحنی ناهمواری حدود ۱۰ برابر بیشتر بوده است. همچنین با افزایش سختی، بسامد نوسانها افزایش یافته و افزایش دامنه شتاب نیز بزرگتر شدن نیروی دینامیکی را سبب می‌شود بنابراین برای یک جرم ثابت ضریب ضربه افزایش می‌یابد.

مراجع

[۱] سعادت‌پور، محمد مهدی "دینامیک سازه‌ها" انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان ۱۳۷۰.

[۲] خسروبرگی "دینامیک سازه‌ها"، انتشارات دانشگاه تهران چاپ دوم ۱۳۷۰.

[3] Inbanathan Mahil J. and Martin Wieland, "Bridge Vibration Due to Vehicle Moving Over Rough Surface", Journal of Structural Engineering, Vol.113, No.9, pp. 199-208.

[4] Wang Ton-Lo, Huang Dongzhou, Shahawy Mohsen, "Dynamic Response of Multigirder Bridges", Journal of Structural Engineering, 1992, Vol.118, No.8 pp. 2222-2223.

- [5] Huang Dongzhou, wang Ton-Lo & Shahawy Mohsen, "Impact Studies of Multigirder Concrete Bridges", Journal of Structural Engineering, 1995, Vol.119, No.8, pp. 2387-2402.
- [6] Yang Yeong-Bin and Lin Bing Houng, "Vechicle-Bridge Intraction Analysis by Dynamic Condensation Method" , Journal of Structural Engineering, 1995, Vol.121. No.11, pp.1636-1643.
- [7] Yang Yeong-Bin, Liao Shu-Shyan and Lin Bing - Houng, " Impact Formulus for Vehicles Moving Over Simple and Continuous Beams", Journal of Structural Engineering, 1995 Vol.121, No.11, pp.1644-1650.
- [8] Yang Yeong - Bin and Yau Jong - Dar , "Vehicle - Bridge Intraction Element for Dynamic Analysis", Journal of Structural Engineering, 1997, Vol.123, No.11, pp.1512-1518.
- [9] Kou Jine - Wen and Dewolf John T., "Vibrational Behavior of Continuous Span Highway Bridge - Infuencing Variables", Journal of structural Engineering, 1997, Vol.123, No.3, pp. 333-334.
- [10] Weaver W., Johnston Jr. P. R.," Structural Dynamics by Finite Elements", Prentice - Hall, Inc., 1987.

تاریخ دریافت: ۸۱/۱۰/۱۱

تاریخ تصویب: ۸۲/۶/۴