طراحی کنترلر LPV برای سیستم تعلیق نیمه اکتیو خودرو

سپیده شاداب، محمد هادی مالک

مرکز تحقیقات سجاد

Sepideh.shadab@gmail.com

چکیده : در این مقاله روش تغییر خطی پارامتر (LPV) برای کنترل سیستم تعلیق نیمه اکتیو خودرو بکار گرفته شده است. مدل در نظر گرفته شده یک چهارم مدل اتومبیل به همراه دمپر Magneto-Rheological (MR) می باشد. از مزایای این دمپر نسبت به دمپرهای اکتیو توان مصرفی پایین آن می باشد. وجود دمپر MR در سیستم باعث پیدا شدن خصوصیات غیرخطی در ساختار مدل می شود که این خود باعث پیچیدگی کنترل این سیستم خواهد شد. از طرف دیگر در مدلسازی LPV سیستم نیز دو عامل بهبود عملکرد و برخورد با عدم قطعیتهای موجود در سیستم مد نظر قرار گرفته است. در این سیستم سیگنالهای فیدبکی بکار رفته شامل جابجایی جرم خودرو، ولتاژ اعمالی به دمپر و جابجایی داخلی دمپر می باشد. آنالیز دینامیکی در حوزه زمان بوسیله سیگنال ضربه انجام می‌شود و با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد کنترلر طراحی شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: دمپر Magneto Rheological ، سیستم تعلیق، کنترل LPV ، کنترل روباست H^{∞}

۱-۱- مقدمه

سیستمهای تعلیق بکار رفته در کلیه سازه ها از سه نوع پسیو، اکتیو و یا نیمه اکتیو می باشد. سیستمهای تعلیق پسیو،چنانچه تغییری در ساختار سازه و شرایط اعمالی به آن ایجاد شود؛ طبیعی است که توانایی مقابله با آن را نخواهد داشت.

سیستمهای تعلیق اکتیو (فعال) ,عموماً هیدرولیکی بوده و عملکرد خوبی نسبت به سیستمهای پسیو دارند. با این وجود به لحاظ ساختار از پیچیدگی بسیار بیشتری برخوردار هستند و توان مصرفی آنها ممکن است به چند ده کیلو وات برسد (در اتومبیل این توان باید توسط موتور اتومبیل تامین شود که به هیچ عنوان مطلوب نیست). لذا این سیستم تعلیق هزینه بر و غیراقتصادی خواهد بود[۳] .

در مقابل این دو نوع سیستم، سیستمهای تعلیق نیمه فعال می باشد که توان مصرفی زیادی ندارد و به همین دلیل هزینه بهره برداری آن پایین تر از نوع اکتیو می باشد[۳].

در این مقاله، هدف، پیشنهاد روشی برای افزایش راحتی سرنشینان خودرو با سیستم تعلیق نیمه فعال کنترل شده با استفاده از کنترلر LPV می باشد که با بکارگیری آن بتوان علاوه بر پایداری سیستم، عملکرد آن را تا حد ممکن بهبود بخشیده و با عدم قطعیتهای سیستم نیز مبارزه کرد. مشکل اصلی در رسیدن به این هدف وجود مشخصه غیرخطی در مدل سیستم (به خاطر استفاده از دمپر نیمه فعال) می باشد. (شکل ۱)

۱-۲- توصیف سیستم تعلیق با دمپر MR

در سیستم تعلیق مورد نظر، یک دمپر MR که ساختار آن در شکل ۲- ب نشان داده شده است، قرار دارد. با کنترل جریان بر روی کویل الکترومغناطیسی دمپر، فلوی روغن در داخل آن می تواند تغییر کند و این تغییر باعث تغییر در میزان میرایی دمپر خواهد شد. نحوه عملکرد و نمودار عملکرد این نوع دمپر در شکل ۲ - الف رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، با تغییر جریان از ۰

تا ۲ آمپر، نیروی میراکننده می‌تواند از کم تا زیاد تنظیم شود. اما در این تحقیق جریان در حد ۱ آمپر محدود شده است زیرا استفاده از جریان ۲ آمپر، میزان توان تلفاتی را ۴ برابر بیشتر می‌کند اما میرایی را چندان تغییر نمی- دهد[۳و۵].

روابط حاکم بر دینامیک مدل دمپرMR ،شکل ۳ به صورت معادلات (۱) می باشد[۵].

$$f = c\dot{x} + \alpha z$$
$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}||z||z|^{n-1} - \beta(\dot{x})|z|^n - A\dot{x}$$
$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \qquad (۱)$$
$$c = c_a + c_b u$$

در روابط فوق، z، یک متغیر کمکی است که جهت نگه داشتن سابقه اطلاعات بکار گرفته شده است. پارامترهای α و c در معادلات دمپر، به ولتاژ اعمال شده به درایور جریان دمپر بستگی دارد و u، خروجی فیلتر مرتبه اول با رابطه (۲) خواهد بود.

$$\dot{u} = -\frac{1}{190}(u - v) \qquad (۲)$$

در قسمت شبیه سازی، پارامترهای $\alpha_a, \alpha_b, c_a, c_b, \beta$ و A، مطابق جدول ۱ درنظر گرفته شده است. [۵]

نتایج شبیه سازی مدل پیشنهادی در مقایسه با عملکرد واقعی یک دمپر MR ، در شکل ۴ مشاهده می شود و این شکل نمایانگر نزدیک بودن رفتار این دمپر با مدل پیشنهادی می باشد [۶].

۱-۳-توصیف مدل سیستم

مدل بکار رفته در شکل ۱ جهت طراحی سیستم تعلیق نیمه فعال بکار گرفته شده است که در این شکل m_s، جرم اتومبیل، m_{us}، جرم تایر می باشد. k_s, b_s، به ترتیب ضریب دمپ و سختی فنر سیستم تعلیق پسیو موجود بین تایر و بدنه خودرو می باشد. k_tنیز سختی فنری است که بعنوان مدل تایر خودرو در نظر گرفته شده است.

متغیرهای r, x_{us}, x_s، نیز جابجایی بدنه، جابجایی تایر و اغتشاشات جاده می باشد. نیروی f نیرویی است که از طرف دمپر به بدنه اعمال می شود و این نیرو با توجه به مطالب گفته شده با اعمال ولتاژ قابل تغییر به دمپر نیمه فعال، قابل تغییر و تنظیم است.[۶]

با توجه به قوانین حاکم بر این سیستم دینامیکی می توان روابط ۳ را برای آن بدست آورد.

$$F_{m_s} = -F_{k_s} - F_{b_s} + f \qquad (۳)$$
$$F_{m_{us}} = +F_{k_s} + F_{b_s} - F_{k_t} - f$$

بر اساس قوانین نیوتن و روابط موجود میان نیروی فنر و دمپر روابط (۴) را خواهیم داشت. [۱]

$$F_{m_s} = m_s\ddot{x}_s \quad , \quad F_{m_{us}} = m_{us}\ddot{x}_{us}$$
$$F_{k_s} = k_s(x_{us} - x_s) \quad , \quad F_{k_t} = k_t(x_{us} - r) \qquad (٤)$$
$$F_{b_s} = b_s(\dot{x}_{us} - \dot{x}_s)$$

با استفاده از مجموعه روابط (۱)، (۳) و (۴) و با در نظر گرفتن $x_1 := x_s$ و $x_3 := x_{us}$ و $x_5 := z$ ، معادلات حالت سیستم به صورت رابطه (۵) بدست خواهد آمد.

$$\dot{x}_1 = x_2 \qquad (٥)$$
$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{m_s}[k_s(x_1 - x_3) + b_s(x_2 - x_4) - \alpha x_5$$
$$- c(x_2 - x_4)]$$
$$\dot{x}_3 = x_4$$
$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_{us}}[k_s(x_1 - x_3) + b_s(x_2 - x_4) - \alpha x_5$$
$$- c(x_2 - x_4) - k_t(x_3 - r)]$$
$$\dot{x}_5 = -\gamma|x_2 - x_4||x_5||x_5|^{n-1} - \beta(x_2 - x_4)|x_5|^n$$
$$+ A(x_2 - x_4)$$
$$\dot{x}_6 = -\frac{1}{190}(x_6 - v)$$

در این معادلات، سیگنال r، ورودی اغتشاش و سیگنال v، ولتاژ اعمال شده به دمپر یا در حقیقت سیگنال کنترلی خواهد بود. باید توجه داشت که:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b x_6 \qquad (٦)$$
$$c = c_a + c_b x_6$$

۱-۳- مدلسازی LPV برای سیستم تعلیق

دسته ای از سیستمهای خطی با بعد محدود که ماتریسهای فضای حالتی آن به صورت پیوسته، فقط به بردار پارامتر، $\theta(t)$، بستگی دارد، LPV نامیده می شود. در ادامه مقاله، به جای استفاده از $\theta(t)$در روابط از θ استفاده خواهد شد

تعریف مشخص سیستم LPV، به صورت زیر است:

تعریف ۱ – سیستم خطی پارامتر متغیر (LPV)، سیستمی است که توصیف فضای حالت آن تابعی از پارامتر θ می باشد. به بیان دیگر سیستم:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(\theta)x + B(\theta)r \\ y = C(\theta)x + D(\theta)r \end{cases} \tag{۷}$$

یک سیستم LPV است که:

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_m\} \tag{۸}$$

و

$$\underline{\theta}_i \le \theta_i \le \overline{\theta}_i \tag{۹}$$

در مدلسازی LPV ، پارامترهای θ، که یا مستقیماً اندازه گیری می شوند و یا قابل محاسبه از سایر سیگنالهای اندازه گیری هستند، توسط طراح باید انتخاب گردند.[۲و۴]

بردار پارامترهای ما بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \theta &= [|x_2 - x_4| \quad |x_5| \quad x_5^2 \quad u] \\ &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4] \end{aligned} \tag{۱۰}$$

با بهره گیری از رابطه (۱۰)، ماتریسهای پارامتری سیستم LPV مدل شده (۷) به صورت رابطه (۱۱) حاصل خواهد شد.

$$A(\theta) = \tag{۱۱}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{k_s}{m_s} & \dfrac{-b_s + c(\theta_4)}{m_s} & \dfrac{k_s}{m_s} & \dfrac{b_s - c(\theta_4)}{m_s} & \dfrac{\alpha(\theta_4)}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \dfrac{k_s}{m_s} & \dfrac{b_s - c(\theta_4)}{m_s} & \dfrac{k_t - k_s}{m_s} & \dfrac{-b_s + c(\theta_4)}{m_s} & -\dfrac{\alpha(\theta_4)}{m_s} \\ 0 & A - \beta\theta_3 & 0 & -(A - \beta\theta_3) & -\gamma\theta_1\theta_2 \end{bmatrix}$$

$$B(\theta) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -k_t \quad 0]$$

$$C(\theta) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad D = 0$$

بنابراین با تعیین حدود مناسب برای پارامترهای $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ و θ_4، محدوده کاری سیستم، یک چند رأسی خواهد بود.

طراح باید در هرکدام از این گوشه ها (رئوس)، کنترلر مناسب را طراحی کند.

۱-۵- کنترلر LPV با معیار H^∞

فرض می کنیم سیستم LPV ، به صورت رابطه (۱۲) باشد:

$$\begin{cases} x(t) = A(\theta)x(t) + B_1(\theta)w(t) + B_2(\theta)u(t) \\ z(t) = C_1(\theta)x(t) + D_{12}(\theta)u(t) \\ y(t) = C_2(\theta)x(t) + D_{21}(\theta)u(t) \\ \theta \in \Theta \end{cases} \tag{۱۲}$$

که $x \in \Re^n$، $u \in \Re^m$ ، $z \in \Re^p$ و $y \in \Re^q$، به ترتیب بردار حالت، بردار کنترل، بردار خروجی اندازه گیری شونده و بردار خروجی کنترل شونده می باشند و سیگنال $w \in L_2[0,\infty)$ نیز سیگنال اغتشاش ورودی به سیستم خواهد بود.

با تغییر پارامتر θ در فضای Θ ، معادلات سیستم تغییر کرده و ماتریس چند وجهی سیستم را می توان به صورت (۱۳) درنظر گرفت:

$$S_i = \begin{bmatrix} A_i & B_{1i} & B_{2i} \\ C_{1i} & 0 & D_{12i} \\ C_{2i} & D_{21i} & 0 \end{bmatrix} \tag{۱۳}$$

ساختار کنترلر را به صورت (۱۴) در نظر گرفته می شود:

$$K(\theta) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i(\theta).K_i \tag{۱۴}$$

که در این ساختار، $\sum_{i=1}^{N} \alpha_i(\theta) = 1$ و $\alpha_i(\theta) \ge 0$ و:

$$K_i = \begin{bmatrix} A_{ci} & B_{ci} \\ C_{ci} & 0 \end{bmatrix} \tag{۱۵}$$

تحقق فضای حالتی سیستم حلقه بسته به صورت (۱۶) در نظر گرفته می شود:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A_e(\theta)X(t) + B_e(\theta)w \\ z(t) = C_e(\theta)X(t) \end{cases} \tag{۱۶}$$

که در سیستم (۱۶):

$$\begin{aligned} A_e &= \begin{bmatrix} A(\theta) & B_2(\theta)C_c(\theta) \\ B_c(\theta)C_2(\theta) & A_c(\theta) \end{bmatrix} \\ B_e &= [B_1(\theta) \quad B_c(\theta)D_{21}(\theta)]^T \\ C_e &= [C_1(\theta) \quad D_{12}(\theta)C_c(\theta)] \end{aligned} \tag{۱۷}$$

لازم است شرایط لازم برای پایداری کنترلر روباست H^∞ بیان شود.

قضیه ۱ [۸]: یک سیستم LTI با تحقق فضای حالتی به فرم معادلات (۱۸):

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Br \\ y = Cx + Dr \end{cases} \tag{۱۸}$$

پایدار است، اگر و فقط اگر ماتریس متقارن P وجود داشته باشد که:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \quad , \quad P \succ 0 \tag{۱۹}$$

بنابراین طراحی کنترلر H_∞ برای سیستم (۱۸) عبارتست از کنترلری به فرم (۲۰) که سیستم حلقه بسته (۲۱) را پایدار کرده و $\|q\|_2 \prec \gamma \|w\|_2$. q خروجی کنترل شده و w ورودی خارجی می باشد .

$$\begin{cases} \dot{x}_k = A_k x_k + B_k y \\ r = C_k x_k + D_k y \end{cases} \quad (۲۰)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{cl} = A_{cl} x_{cl} + B_{cl} w \\ q = C_{cl} x_{cl} + D_{cl} w \end{cases} \quad (۲۱)$$

پس بر اساس قضیه ۱، کنترلر H_∞ مناسب برای سیستم (۱۸) باید در روابط (۲۲) صدق کند. در این نامعادله ماتریسی، C_{cl}, B_{cl}, A_{cl} و D_{cl}، تحقق فضای حالتی سیستم حلقه بسته با کنترلر فیدبکی H_∞ می باشد (معادلات این سیستم حلقه بسته در (۲۱) نشان داده شده است).

$$\begin{bmatrix} A_{cl}{}^T P + PA_{cl} & PB_{cl} & C_{cl}{}^T \\ B_{cl}{}^T P & -\gamma I & D_{cl}{}^T \\ C_{cl} & D_{cl} & -\gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \quad , \quad P \succ 0 \quad (۲۲)$$

برای حل نامساوی فوق باید از ابزار LMI در نرم افزار Matlab بهره گرفت.[۷]

در این مقاله روش پیشنهادی بر اساس قضیه زیر است.یافتن کنترلری با ماتریس متغیر با زمان .

قضیه۲[۱۰]: چنانچه ماتریسهای متقارن مثبت $X, Y \in \Re^{n\times n}$ و ماتریسهای $L \in \Re^{m\times n}$ و $F \in \Re^{n\times q}$ و $\forall i = 1, \cdots, N$، ماتریس $M_i \in \Re^{n\times n}$ حلهای نامساوی ماتریسی (۲۴) باشد، آنگاه سیستم LPV بیان شده در رابطه (۱۲) با فیدبکی به فرم رابطه (۱۴) پایدار بوده و :

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty \prec \gamma, \forall \theta \in \Theta \quad (۲۳)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \succ 0 \\ \begin{bmatrix} H_i & Z_i + M_i & B_1 & L^T D_{12}^T + YC_1^T \\ * & G_i & XB_1 + FD_{21} & C_1^T \\ * & * & \gamma I & 0 \\ * & * & * & \gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \end{cases} \quad (۲٤)$$

علامت (*) درایه های متقارن نسبت به قطر اصلی می باشد و

$$\begin{aligned} H_i &= A_i Y + YA_i^T + B_{2i} L + L^T B_{2i}^T \\ G &= XA_i + A_i^T X + FC_{2i} + C_{2i}^T F^T \\ Z &+ A_i + YA_i^T X + L^T B_{2i}^T X + YC_{2i}^T F^T \end{aligned} \quad (۲۵)$$

حاصل این مساله ماتریسهای X, Y, F, L و M_i خواهد بود و ماتریس تحقق فضای حالتی کنترلر ($K_i = \begin{bmatrix} A_{ci} & B_{ci} \\ C_{ci} & 0 \end{bmatrix}$) نیز به صورت رابطه (۲۶) محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} A_{ci} &= (I - XY)^{-1} M_i \\ B_{ci} &= (I - XY)^{-1} F \\ C_{ci} &= L \end{aligned} \quad (۲٦)$$

که ماتریس کنترلر برای گوشه های سیستم می باشد.

قضیه ۳[۱۰]: سیستم (۱۲) با کنترلر فیدبکی (۱۴) پایدار بوده و قطبهای حلقه بسته آن در سمت چپ صفحه $\forall \theta \in \Theta; \mathrm{Re}(s) \prec -\alpha, \alpha \succ 0$ قرار خواهد داشت اگر ماتریس متقارن مثبت X_e وجود داشته باشد به قسمی که:

$$A_e X_e + X_e A_e^T + 2\alpha X_e \prec 0 \quad (۲۷)$$

بدین ترتیب مساله مینیمیم سازی (۲۸) حاصل خواهد شد که اساس طراحی کنترلر در این مقاله می باشد.

$$\begin{cases} \min \ \gamma \\ \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \succ 0 \\ \begin{bmatrix} H_i & Z_i + M_i & B_1 & L^T D_{12}^T + YC_1^T \\ * & G_i & XB_1 + FD_{21} & C_1^T \\ * & * & \gamma I & 0 \\ * & * & * & \gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \\ \begin{bmatrix} H_i & M_i^T + Z_i^T \\ M_i^T + Z_i^T & G_i \end{bmatrix} + 2\alpha \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \prec 0 \end{cases} \quad (۲۸)$$

۱-۶- نتایج شبیه سازی

با توجه به مطالبی که بیان شد و پس از طراحی کنترلر LPV برای سیستم تعلیق، یک سیگنال پله به عنوان ورودی اغتشاش به سیستم اعمال شده و پاسخ سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. در شکل ۵، پاسخ حلقه باز سیستم را می توان مشاهده کرد که سیستمی با نوسانات میرا شونده خواهد بود اما زمان میرا شدن نوسانات زیاد است (حدود ۵۰ ثانیه). با اعمال کنترلر LPV، به سیستم

تعلیق، خروجی سیستم مورد نظر به شکل ۶، ظاهر خواهد شد که در این شکل، کاهش قابل توجه دامنه نوسانات خروجی و همچنین کاهش زمان نشست سیستم به وضوح مشاهده می شود. (در این حالت نوسانات در زمان حدود ۲ ثانیه کاملاً میرا می شود). در شکل ۷، سیگنال کنترل حاصل از کنترلر LPV مشاهده می شود.

شکل ۸ نمایانگر پاسخ فرکانسی سیستم خواهد بود. در این شکل مشاهده می شود که در فرکانسهای پایین، (کمتر از ۱ هرتز) نسبت شتاب بدنه به اغتشاشات ورودی در حالت بدون کنترلر (خط چین) با حالتی که سیستم تحت کنترل قرار گرفته است (خط ممتد) متفاوت بوده و عملکرد مناسبی (نسبت کمتر) را در حالت استفاده از کنترلر شاهد خواهیم بود.

۱-۷-نتایج

در این مقاله یک کنترلر خطی پارامتر متغیر (LPV) برای کنترل سیستم تعلیق دارای دمپر MR به کار گرفته شده است. رفتار غیرخطی دمپر MR در این سیستم باعث می شود که کنترلرهای خطی پاسخهای مناسبی را ارائه ندهد. به خصوص زمانی که سیستم تحت تاثیر نویز و اغتشاشات خارجی قرار می گیرد [۸]، با استفاده از مدل سازی LPV، یک مدل چند راسی برای سیستم، حاصل شده و برای هر راس کنترل روباست H_∞، با استفاده از مساله می نیمم سازی با قیود نامساوی های ماتریسی، طراحی شده است و با استفاده از قانون درونیابی، می توان مقادیر میانی برای کنترل سیستم در فضای چندراسی را به دست آورد. از آنجایی که اساس ساختار کنترلر LPV بر کنترل روباست H_∞، استوار است، این کنترلر توانایی برخورد با نویز، اغتشاش و عدم قطعیت در سیستم را دارد.

علاوه بر این در طراحی کنترلر قید اضافی برای محل قرار گرفتن قطبهای حلقه بسته اعمال شده است. با اعمال این موارد بهبود قابل توجهی در رفتار سیستم مشاهده می شود که در نتایج شبیه سازی می توان این بهبود را به وضوح مشاهده کرد.

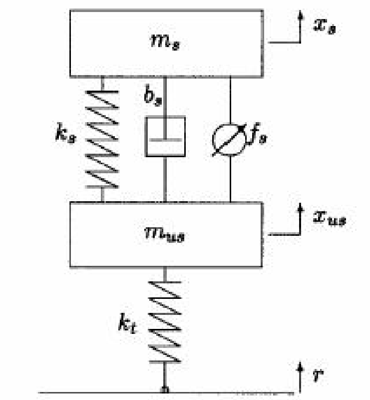
۱-۸- مراجع

1. P. Gaspar, I. Szaszi , J. Bokor ,"Active Suspension Design using linear parameter varying control" , IJVAS, 2003.
2. H. D. Tuan, E. Ono, P. Apkarian & S. Hoses, "Nonlinear H_∞ Control for an Integrated Suspension System via Parameterized Linear Matrix Inequality Characterizations", 2000.
3. S.J. Dyke, B.F. Spencer, M.K. Sain & J.D. Carlson, " An Experimental Study of MR Damper for Seismic Protection" , Smart Material & Structures: Special Issue on Large Civil Structure.
4. M.H. Bouazizi,A. Kochbati & M. Ksouri, "H_∞ control of LPV System with Dynamic Output Feedback". Moraco, 2002
5. L.M. Jansen, Sh.J. Dyke, " Semi Active Control Strategies for MR Damper A Comparative Study", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, pp. 795-803, 2005.
6. X. Song, M. Ahmadian, " Study of Semi active Adaptive Control Algorithm with MR Seat Suspension", SAE International , 2004.
7. M. Yokoyama, J. Karl & Sh. Toyama, " A Model Following Sliding Mode Controller for Semi-Active Suspension System with MR Damper", Proceeding of the American Control Conference Arlington, Jun. 2001.
8. U. Retting, O.V. Strylk, "Robust & Optimal damping control for semi active vechicle suspention", ENOC2005 , Eindhoven, Aug. 2005
9. J.H. Koo, "Using Magneto- Rheological Dampers in Semi active Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations", PHD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, July 2003.

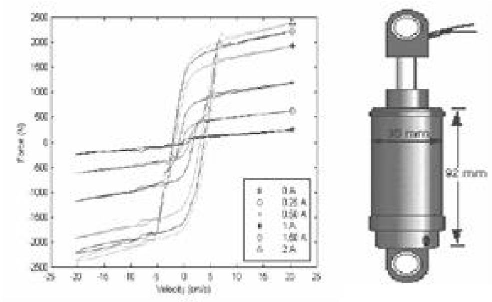
۱۰ - نجمه اقبال، " مدلسازی و کنترل LPV هواپیمای F16 "، رساله کارشناسی ارشد کنترل، گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، ۱۳۸۳

جدول ۱ – جریان مغشوش بین دو صفحه موازی

$\alpha_a = 8.66$	$\alpha_b = 8.86$
$c_a = 0.0064$	$c_b = 0.0052$
$A = 120$	$n = 2$
$\beta = 300$	$\gamma = 300$



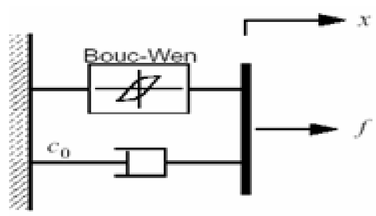
شکل ۱- مدل سیستم تعلیق برای یک چهارم خودرو



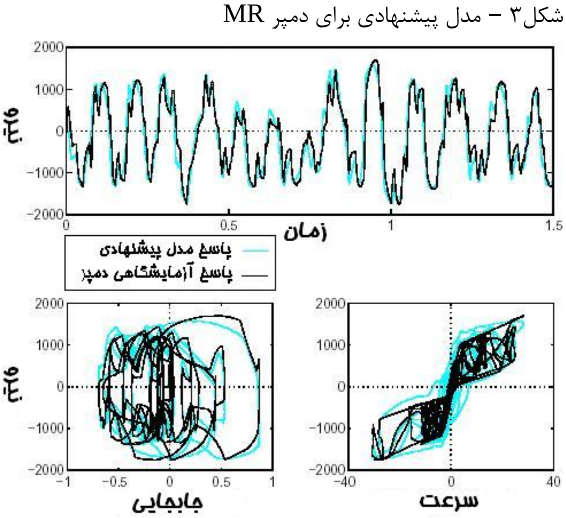
(الف)　　(ب)

شکل۲ – الف) نمودار سرعت نیرو در دمپر MR

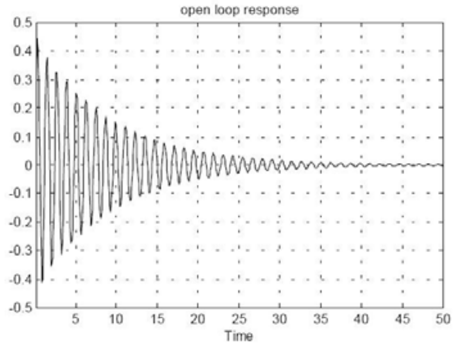
ب)شمای خارجی دمپر MR:[۷]



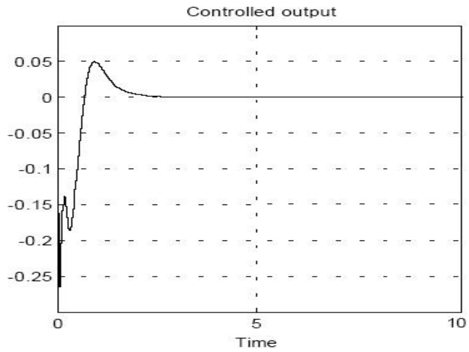
شکل۳ – مدل پیشنهادی برای دمپر MR



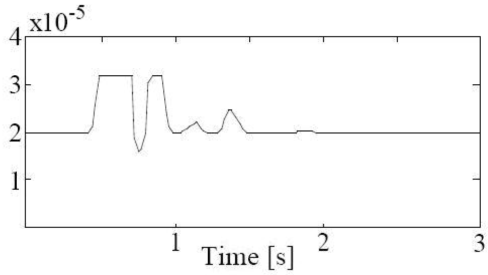
شکل ۴ – مقایسه نتایج شبیه سازی عملی دمپر با مدل[۷]



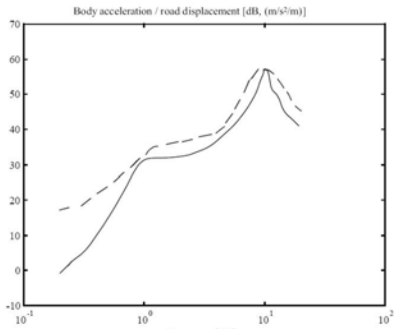
شکل۵ – پاسخ سیستم حلقه باز



شکل۶ – پاسخ سیستم حلقه بسته با اعمال کنترلر LPV



شکل۷ – سیگنال کنترل حاصل از کنترلر LPV



شکل۸ –پاسخ فرکانسی سیستم مورد مطالعه