

بهینه‌سازی کمک‌فدر الکترومغناطیسی و سیستم تعلیق خودرو با استفاده از الگوریتم زنبور عسل

سعید یعقوبی^{۱*}، علی‌رضا اصفهانی^۲ و افشین قنبرزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

* ایلام، ۶۷۴۴۶-۶۹۳۱۸، Yaghoubisaeed@ymail.com

چکیده

در این تحقیق، کمک‌فدر الکترومغناطیسی به مدل یک‌چهارم خودرو با دو درجه آزادی و مدل یک‌دوم خودرو با چهار درجه آزادی اضافه شده است. در ادامه، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در دو مرحله، مدل شبیه‌سازی شده، بهینه شده است. در مرحله اول، فقط ثوابت کمک‌فدر الکترومغناطیسی بهینه شده و پارامترهای سیستم تعلیق ثابت فرض گردیده است. در مرحله دوم، علاوه بر ثوابت کمک‌فدر الکترومغناطیسی، پارامترهای سیستم تعلیق نیز مورد بهینه‌سازی قرار گرفته که در هر دو مرحله، مقادیر پارامترهای بهینه شده از اعمال ورودی ترکیبی شامل ده ورودی سینوسی با دامنه‌های مختلف و یک ورودی پله واحد به دست آمده و در نهایت با استفاده از این مقادیر، میزان انتگرال قدر مطلق خطا نسبت به چند حالت ورودی محاسبه شده است. برای تعیین تابع هدف در بهینه‌سازی انجام شده از انتگرال قدر مطلق خطا استفاده شده که هدف، کمینه سازی سطح زیر نمودار (جابه‌جایی خودرو) می‌باشد. نتایج نشان داد که مقادیر تابع هدف در حالت دوم بهینه‌سازی نسبت به حالت اول کمتر بوده، به گونه‌ای که به‌عنوان نمونه در اثر اعمال ورودی سینوسی با دامنه ۵ مقدار این تابع برای مدل یک‌چهارم و یک‌دوم خودرو در حالت اول به ترتیب برابر $0/293$ و $0/283$ و در حالت دوم بهینه‌سازی به ترتیب برابر $0/261$ و $0/255$ است.

کلیدواژگان

کمک‌فدر الکترومغناطیسی، سیستم تعلیق، الگوریتم زنبور عسل، بهینه‌سازی

Optimization of electromagnetic damper and suspension system of vehicle using bee's algorithm

S. Yaghoubi^{1*}, A. E Esfahani², A. Ghanbarzadeh³

1- Ph.D Student, Mech. Eng., Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.

2- M.Sc. of Mech. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

3- Assist. Prof., Mech. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

* 69318-67446 Ilam, Iran, Yaghoubisaeed@ymail.com

Abstract

In this study, electromagnetic damper using the model of one-fourth vehicle with two degrees of freedom, and the model of one-half with four degrees of freedom, and the effects of improving the function of suspension system have been investigated. Using the bee's optimization algorithm two phases, the simulated model, then, has been optimized. In the first phase, the constants of electro-magnetic damper have been optimized, and the parameters of suspension system have been assumed fixed. In the second phase, the parameters of suspension system have also been optimized beside the constants of electro-magnetic damper. In both phases, the size of optimized parameters using complex input including ten sine inputs with different amplitude and one step input have been earned, and eventually the size of Integral of Absolute Error according to different inputs has been calculated. In order to determine the final function in the optimization, IAE has been used, which has its aim in minimizing the space below the diagram (vehicle movement). The results indicate that the size of the final function is lower in comparison with the one-fourth model. The size of final function is lower in the second way of optimization; for instance, due to exetring sine input with the amplitude of 5, the size of this function for the one-fourth model and the one-half model was 0.293 and 0.283 for the first model; and 0.261 and 0.255 for the second one respectively.

Keywords

Electromagnetic damper, Suspension system, Bee's algorithm, Optimization

۱- مقدمه

کافی بین لاستیک و جاده به نتیجه می‌رسد. اساس کار سیستم تعلیق الکترومغناطیسی به این صورت است که وقتی جریان از درون کوئل سه‌فاز عبور می‌کند، باعث القای مغناطیس به فازهای کوئل شده و وقتی در برابر قطب‌های آهن‌ریا قرار می‌گیرد، باعث رانش و حرکت به سمت بالا و پایین می‌شود و اگر جهت جریان معکوس شود، جهت رانش عوض می‌شود. این حرکت رفت و برگشتی به‌طور پیوسته ادامه پیدا می‌کند تا نیروی

سیستم تعلیق، شامل مجموعه دستگاه و قطعاتی است که بین اتاق و چرخ‌ها قرار گرفته و از انتقال نوسانات حاصل از ناهمواری‌های جاده به اتاق پیشگیری می‌کنند. با این اوصاف، به‌طور کلی سیستم تعلیق دو هدف را دنبال می‌کند: آسایش مسافر و کنترل وسیله نقلیه. آسایش مسافر از طریق ایزوله کردن مسافران وسیله نقلیه از ناهمواری‌های جاده‌ای تأمین می‌شود و کنترل وسیله نقلیه از طریق جلوگیری از پرش و چرخش عرضی بیش از حد و حفظ تماس

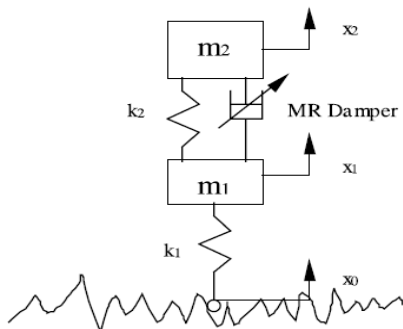
در این مطالعه، ابتدا مدل یک‌چهارم و یک‌دوم خودرو به ترتیب از مراجع [۳،۸] استخراج شده، با اعمال کمک‌فناوری الکترومغناطیسی و استفاده از مدل ریاضی باکون [۳]، مسئله را در سیمولینک^۸ مدل‌سازی نموده و مقادیر بهینه ثابت به‌ازای ورودی ترکیبی که شامل ده ورودی سینوسی با دامنه‌های متفاوت و یک ورودی پله واحد بوده، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل به‌دست آورده می‌شود. در ادامه، با استفاده از مقادیر بهینه به‌دست آمده، مقدار انتگرال خطا برای چند حالت ورودی اعمال شده به سیستم در دو مدل یک‌دوم و یک‌چهارم خودرو محاسبه می‌شود.

۲- استخراج معادلات حرکت خودرو

فرض‌هایی در مدل‌سازی خودرو در نظر گرفته شده که از جمله آن‌ها می‌توان به متمرکز بودن جرم‌ها و فرض این‌که فنرها در ناحیه خطی جابه‌جا می‌شوند اشاره نمود.

۲-۱- مدل یک‌چهارم خودرو

برای استخراج معادلات مدل یک‌چهارم، خودرو به‌صورت دو جرم با دو درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ نمایی از مدل یک‌چهارم خودرو در حالت استفاده از کمک‌فناوری الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.



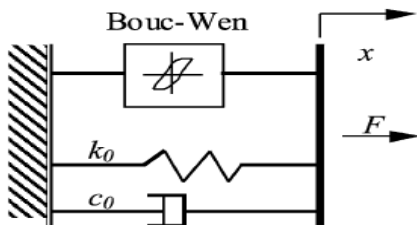
شکل ۱ طرح‌واره مدل یک‌چهارم خودرو

روابط مربوط به این نوع مدل‌سازی به‌صورت معادلات (۱) تا (۳) می‌باشد.

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_0(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) + k_1(x_1 - x_0) = \alpha z \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_0(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = -\alpha z \quad (2)$$

برای اعمال کمک‌فناوری الکترومغناطیسی، از مدل باکون [۳] استفاده شده است. در شکل ۲، نمای شماتیک این مدل نشان داده شده است.



شکل ۲ طرح‌واره مدل باکون

در این سیستم، نیرو از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

الکترومغناطیسی با نیروی گرانشی زمین به تعادل رسیده و خودرو در تعادلی نسبی قرار گیرد.

یکی از اجزای سیستم تعلیق کمک‌فناوری می‌باشد. کمک‌فناوری را می‌توان وسیله‌ای برای کنترل حرکات نامطلوب فنر در طی فرایند تعلیق تعریف نمود. کمک‌فناوری الکترومغناطیسی بر پایه تغییر ویسکوزیته سیال مورد استفاده در آن برای تغییر پارامترها عمل می‌کند. سیال به‌کار رفته، دارای خاصیت لزجت وابسته به میدان مغناطیسی است. با پیچیدن سیم فلزی دور میله پیستون لرزه‌گیر و عبور جریان الکتریکی از این سیم‌پیچ، می‌توان میدان مغناطیسی در محفظه به‌وجود آورده و با تغییر جریان، میدان مغناطیسی و در نتیجه لزجت سیال را تغییر داد. یثربی و همکاران [۱]، تاثیر افزودن کمک‌فناوری الکترومغناطیسی به سیستم تعلیق نیمه فعالی را مورد بررسی قرار داده و آن را روی مدل یک‌چهارم خودرو اعمال کردند. نتیجه به‌دست آمده حاکی از آن بوده که سیستم تعلیق نیمه فعال مجهز به این نوع کمک‌فناوری، راحتی سفر را نسبت به سیستم تعلیق غیر فعال به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد. لیائو^۱ [۲]، بر روی سیستم تعلیق با کمک‌فناوری الکترومغناطیسی یک وسیله نقلیه که روی خط آهن حرکت می‌کند، تحقیقاتی انجام داده و توانست با مقایسه این سیستم تعلیق نیمه فعال نسبت به حالت غیر فعال برای مدل نه درجه آزادی، کاهش ارتعاشات را اثبات نماید. یائو^۲ و همکاران [۳]، سیستم تعلیق با کمک‌فناوری الکترومغناطیسی را در نظر گرفته و توانایی آن‌را در حالتی که جریان برقرار بوده، توسط یک مدل ریاضی به‌نام باکون^۳، مورد بررسی قرار داده و با ضرایب به‌دست آمده حاصل از بهینه‌سازی، کاهش ارتعاشات نسبت به حالت غیر فعال را مشاهده نمودند. دومینگوئز^۴ و همکاران [۴]، یک مدل جدید غیرخطی برگرفته شده از مدل باکون برای شبیه‌سازی رفتار کمک‌فناوری را مورد بررسی قرار داده و در آن، فرکانس، دامنه و تحریک جریانی را به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفتند. در پایان، نتایج مدل‌سازی را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کرده که به‌میزان قابل قبولی هم‌پوشانی داشتند. وک^۵ و همکاران [۵]، یک مدل نامتقارن برگرفته از مدل باکون را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقادیر پارامترها را به‌دست آوردند. در پایان برای تأیید نتایج، مقادیر به‌دست آمده را با داده‌های آزمایشگاهی موجود برای پارامترهای مورد نظر مقایسه نمودند. لی^۶ و همکاران [۶]، از یک کمک‌فناوری الکترومغناطیسی نیمه فعال برای مدل‌سازی سیستم تعلیق خودرو و کنترل ارتعاشات آن استفاده کردند. آن‌ها پس از اطمینان از این‌که می‌توانند نیروی کمک‌فناوری را به وسیله افزایش میدان مغناطیسی به‌صورت کاملاً پیوسته کنترل کنند، کمک‌فناوری را روی یک مدل کامل خودرو اعمال کرده و پارامترهای آن‌را به‌وسیله یک کنترل‌گر به کنترل درآوردند. فرناندو^۷ و همکاران [۷]، یک روش برای اندازه‌گیری زمان پاسخ کمک‌فناوری الکترومغناطیسی پیشنهاد دادند. آن‌ها با فرستادن یک موج مثلثی با سرعت ثابت به‌داخل کمک‌فناوری دو حالت متفاوت را بررسی نموده و نتایج به‌دست آمده را با نتایجی که در گذشته و در منابع ثبت شده بود، مقایسه نمودند که به‌صورت قابل قبولی نتایج هم‌پوشانی داشتند.

¹ Liao

² Yao

³ Bouc-Wen

⁴ Dominguez

⁵ Kwok

⁶ Lee

⁷ Fernando

⁸ Simulink

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z \quad (3)$$

در رابطه (۳)، α یک پارامتر ثابت می‌باشد و متغیر z از رابطه (۴) استخراج می‌شود.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_2 - \dot{x}_1| z |z|^{n-1} - \beta |z|^n (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + A (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، β ، γ و A پارامترهای مربوط به حالت حلقه پسماند می‌باشند. نمونه‌ای از مقادیر ثوابت فوق برای جابه‌جایی‌های ۲ و ۴ میلی‌متر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مقادیر ثوابت به ازاء تغییرات جریان [۳]

جابه‌جایی	پارامتر	جریان (آمپر)		
		۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵
۲ میلی‌متر	c_0 (N.s/mm)	۰/۷۸	۲/۴۰	۳/۴۸
	α (N/mm)	۵/۶۳	۴/۲۳	۶/۸۸
۴ میلی‌متر	c_0 (N.s/mm)	۰/۶۵	۱/۶۵	۲/۲
	α (N/mm)	۵/۶۳	۴/۱۰۲	۶/۸۸

$$(7)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \dot{\theta}) - k_2 (x - x_2 + a_2 \theta) + k_{t2} (x_2 - x_0) = 0 \quad (8)$$

برای حالتی که کمک‌فکر الکترومغناطیسی در سیستم تعلیق اعمال شده، دو مسئله بهینه‌سازی مجزا صورت گرفته است. در حالت اول، پارامترهای سیستم تعلیق، ثابت در نظر گرفته شده [۳] و ثوابت کمک‌فکر الکترومغناطیسی متغیر بوده و در حالت دوم، علاوه بر ثوابت کمک‌فکر الکترومغناطیسی، پارامترهای سیستم تعلیق نیز متغیر بوده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل بهینه می‌شود. پس از استخراج مقادیر بهینه به‌دست آمده، مقادیر تابع هدف به‌ازای اعمال ورودی‌های مورد نظر محاسبه می‌شود.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

در این بخش، ابتدا فرآیند جستجوی غذا در طبیعت توسط زنبور عسل توضیح داده شده است. سپس مراحل اصلی الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل که از این فرآیند برگرفته شده، بیان می‌شود.

۳-۱- فرآیند جستجوی غذا در طبیعت

از بین گروهی از زنبورها تعدادی به عنوان مأمورین اکتشاف انتخاب می‌شوند [۹] که این زنبورها به طور تصادفی گلزارها را یکی پس از دیگری جستجو می‌کنند و آن‌ها را بر اساس دو پارامتر کیفیت غذا و مقدار انرژی مورد نیاز برای رسیدن به آن گلزار ارزیابی می‌کنند [۱۰]. سپس زنبورها از طریق یک رقص چرخشی و جنبشی با دیگر زنبورها ارتباط برقرار می‌کنند. این رقص‌ها شامل اطلاعاتی همچون جهت گلزارها (با استفاده از زاویه خورشید و گلزار)، فاصله گلزار تا کندو (استمرار رقص) و دسته‌بندی کیفیت گلزارها (فرکانس رقص) می‌باشند [۹، ۱۱]. سپس با توجه به اطلاعات رسیده شده در مورد کیفیت و کمیت گلزارها، گلزارهای مناسب برای فرستادن زنبورهای بیشتر مشخص می‌شوند [۱۰، ۱۲].

۳-۲- مراحل اصلی الگوریتم زنبورعسل

در این بخش، فلوچارت مراحل اصلی الگوریتم زنبورعسل در شکل ۴ به‌طور خلاصه، بیان شده است. الگوریتم زنبورعسل به تعدادی پارامتر بستگی دارد که قبل از شروع الگوریتم باید توسط کاربر مشخص شوند. این پارامترها در جدول ۲ توضیح داده شده است.

۴- نتایج تحقیق

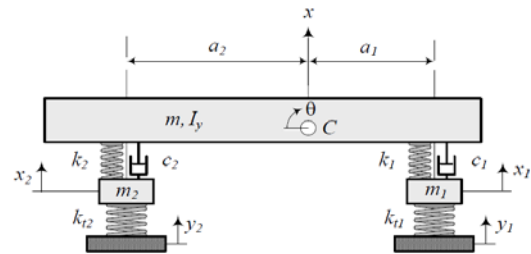
برای مدل‌سازی مسئله از نرم‌افزار سیمولینک متلب استفاده شده و نتایج هر دو مدل یک‌چهارم و یک‌دوم خودرو با استفاده از مقادیر بهینه شده به‌ازای هر کدام از ورودی‌ها محاسبه گردیده است.

۴-۱- تابع هدف مورد نظر

برای تعیین تابع هدف در بهینه‌سازی انجام شده، از تابع ارائه شده در رابطه (۹) استفاده گردیده است.

۲-۲- مدل یک‌دوم خودرو

برای این نوع مدل‌سازی خودرو، یک متحرک با چهار درجه آزادی در نظر گرفته شده است. در شکل ۳، نمایی از مدل یک‌دوم خودرو بدون اعمال کمک‌فکر الکترومغناطیسی آورده شده است.



شکل ۳ طرح‌واره مدل یک‌دوم خودرو

در این مدل‌سازی، همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است، جرم m علاوه بر جابه‌جایی خطی x ، جابه‌جایی دورانی θ را نیز حول مرکز جرم دارد. این در حالی است که جرم‌های m_1 و m_2 به‌ترتیب فقط جابه‌جایی خطی x_1 و x_2 را خواهند داشت [۸].

روابط مربوط به‌مدل یک‌دوم خودرو ارائه شده به‌صورت معادلات (۵) تا (۸) می‌باشد.

$$m \ddot{x} + c_1 (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \dot{\theta}) + c_2 (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \dot{\theta}) + k_1 (x - x_1 - a_1 \theta) + k_2 (x - x_2 + a_2 \theta) = 0 \quad (5)$$

$$I_z \ddot{\theta} - a_1 c_1 (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \dot{\theta}) + a_2 c_2 (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \dot{\theta}) - a_1 k_1 (x - x_1 - a_1 \theta) + a_2 k_2 (x - x_2 + a_2 \theta) = 0 \quad (6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_1 (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \dot{\theta}) - k_1 (x - x_1 - a_1 \theta) + k_{t1} (x_1 - x_0) = 0$$

۳-۴- مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق

مقادیر عددی پارامترهای سیستم تعلیق برای حالت اولیه بهینه‌سازی مدل یک‌چهارم و مدل یک‌دوم خودرو به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۴ مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق مدل یک‌چهارم خودرو در حالت اولیه [۳]

پارامتر	مقدار
m_1	۳۱ (Kg)
m_2	۲۲۱ (Kg)
k_1	۱۲۲۵۰۰ (N / m)
k_2	۱۴۲۳۰ (N / m)
C	۲۲۰۰ (N.s / m)

جدول ۵ مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق مدل یک‌دوم خودرو در حالت اولیه [۸]

پارامتر	مقدار
m	۴۲۰ (Kg)
m_1	۵۳ (Kg)
m_2	۷۶ (Kg)
I_z	۱۱۰۰ (m^4)
a_1	۱/۴ (m)
a_2	۱/۴۷ (m)
k_1	۱۰۰۰۰ (N / m)
k_2	۱۳۰۰۰ (N / m)
k_{t1}	۲۰۰۰۰۰ (N / m)
k_{t2}	۲۰۰۰۰۰ (N / m)
c_1	۲۲۰۰ (N.s / m)
c_2	۲۲۰۰ (N.s / m)

۴-۴- حالت اول بهینه‌سازی

در این حالت، همان‌طور که توضیح داده شد، پارامترهای سیستم تعلیق ثابت در نظر گرفته شده و ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی توسط الگوریتم زنبورعسل بهینه شده است.

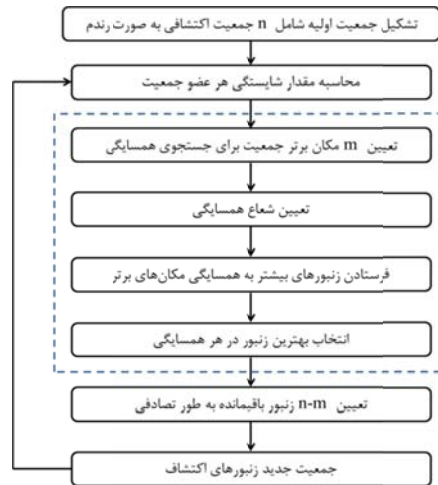
۴-۴-۱- مدل یک‌چهارم خودرو

مقادیر بهینه به دست آمده ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی برای مدل یک‌چهارم خودرو در حالت اول بهینه‌سازی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ مقادیر بهینه به دست آمده برای مدل یک‌چهارم خودرو در حالت اول

پارامتر	مقدار
A	۱۰۱/۹۹
α	۳۷۹۹/۱۴
β	۰/۵
γ	۸۱۶۶/۹۵
c_0	۴۲۵۲/۲۱
n	۱/۴

۴-۴-۲- مدل یک‌دوم خودرو



شکل ۴ فلوجارت الگوریتم زنبورعسل

جدول ۲ پارامترهای موجود در الگوریتم زنبورعسل

پارامتر	تعریف
n	تعداد جمعیت زنبورهای اکتشاف
m	تعداد محل‌های انتخاب شده از بین n مشاهده شده
e	تعداد بهترین مکان‌ها از بین m مکان انتخاب شده
nep	تعداد زنبورهایی که به e مکان انتخاب شده فرستاده می‌شوند
nsp	تعداد زنبورهایی که به $m - e$ مکان انتخاب شده فرستاده می‌شوند
ngh	شعاع هر گلزار که شامل محل بازدید و همسایگی اش می‌شود

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (9)$$

که در آن T ، زمان اجرای سیمولینک است.

۲-۴- مقادیر پارامترهای الگوریتم زنبورعسل

در جدول ۳، مقادیر پارامترهای موجود در الگوریتم زنبورعسل آورده شده است.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای موجود در الگوریتم زنبورعسل

پارامتر	مقدار
n	۱۰۰
m	۵۰
e	۱۵
nep	۱۰
nsp	۵
$ngh - A$	۵
$ngh - \alpha$	۱۰
$ngh - \beta$	۱
$ngh - \gamma$	۱۰
$ngh - c_0$	۱۰
$ngh - k_1$	۲۰
$ngh - k_2$	۲۰

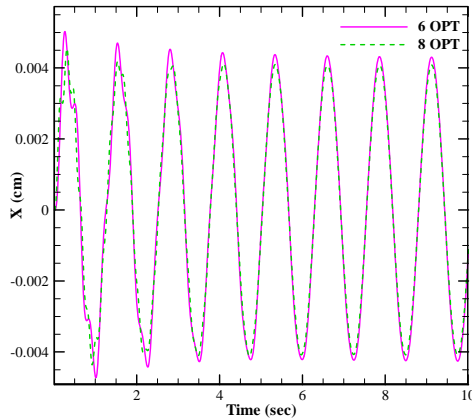
$$\frac{1}{53} \quad n$$

۴-۶- نمودار جابه‌جایی x بر حسب زمان

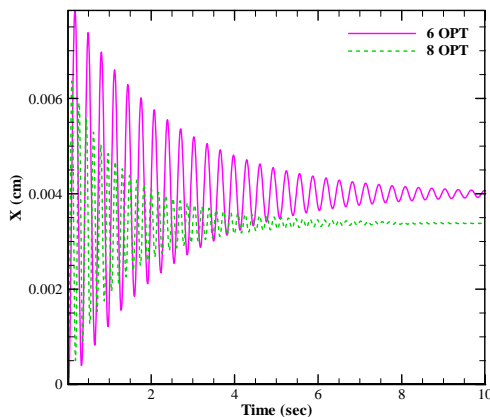
هدف از این بخش، مقایسه جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل‌های خودرو می‌باشد. برای این کار به‌ازای هر کدام از ورودی‌های مورد نظر، نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان در هر دو حالت بهینه‌سازی به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است.

۴-۶-۱ نمودار جابه‌جایی x بر حسب زمان به‌ازای چند حالت ورودی متفاوت برای مدل یک‌چهارم خودرو

نمودار جابه‌جایی x بر حسب زمان با استفاده از مقادیر بهینه به‌دست آمده مدل یک‌چهارم خودرو در حالت اول و دوم بهینه‌سازی برای ورودی سینوسی با دامنه ۵، ورودی پله واحد و در نهایت ورودی ترکیبی شامل پله واحد و ورودی‌های سینوسی با دامنه ۱ و ۵ به‌ترتیب در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵ جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل یک‌چهارم خودرو نسبت به ورودی سینوسی با دامنه ۵



شکل ۶ جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل یک‌چهارم خودرو نسبت به ورودی پله واحد

مقادیر بهینه به‌دست آمده ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی برای مدل یک‌دوم خودرو در حالت اول بهینه‌سازی در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷ مقادیر بهینه به‌دست آمده برای مدل یک‌دوم خودرو در حالت اول

بهینه‌سازی	
پارامتر	مقدار
A	۱۳۳/۱۹
α	۵۵۰۰
β	۴/۶۶
γ	۹۷۰۱/۴۲
c_0	۶۰۰۰
n	۱/۰۶

۴-۵- حالت دوم بهینه‌سازی

در این حالت، پارامترهای سیستم تعلیق و ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی متغیر بوده و مقادیر آن‌ها توسط الگوریتم زنبورعسل بهینه شده است.

۴-۵-۱ مدل یک‌چهارم خودرو

مقادیر بهینه شده به‌دست آمده ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی و پارامترهای سیستم تعلیق در مدل یک‌چهارم خودرو برای حالت دوم بهینه‌سازی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸ مقادیر بهینه به‌دست آمده برای مدل یک‌چهارم خودرو در حالت دوم

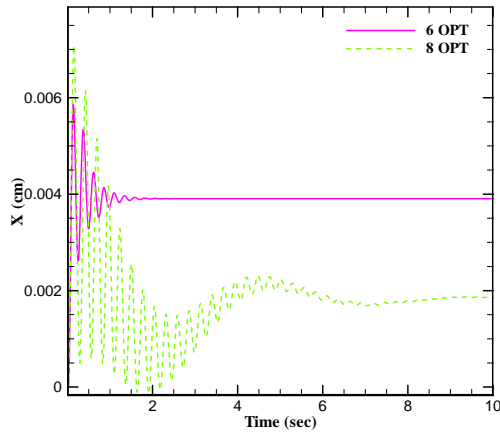
بهینه‌سازی	
پارامتر	مقدار
A	۱۵۹/۷۱
α	۴۱۲۶/۴۳
β	۱۴/۹
γ	۱۵۰۰۰
c_0	$(N \cdot s / m)$ ۱۱۹۳/۹۱
k_1	(N / m) ۵۵۲۵
k_2	(N / m) ۱۷۳۶/۸۹
n	۱/۰۶

۴-۵-۲ مدل یک‌دوم خودرو

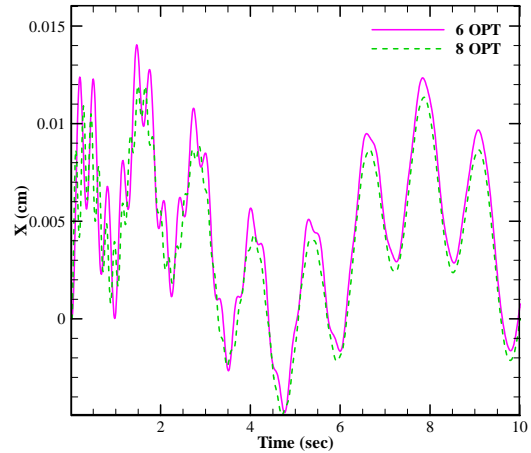
مقادیر بهینه شده به‌دست آمده ثوابت کمک‌فناوری الکترومغناطیسی و پارامترهای سیستم تعلیق در مدل یک‌دوم خودرو برای حالت دوم بهینه‌سازی در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹ مقادیر بهینه به‌دست آمده برای مدل یک‌دوم خودرو در حالت دوم

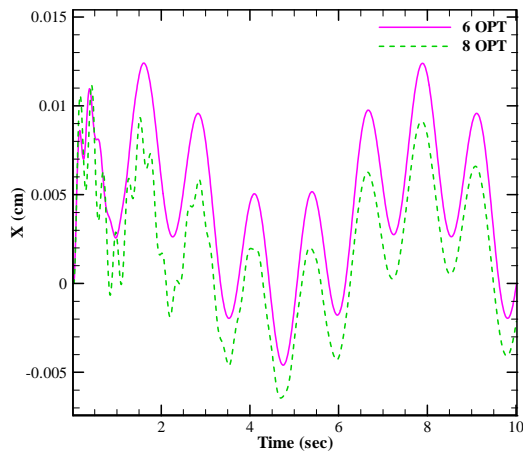
بهینه‌سازی	
پارامتر	مقدار
A	۱۹۳/۶۲
α	۵۲۸۲/۱۳
β	۱۰
γ	۹۹۶۳/۳۹
c_0	$(N \cdot s / m)$ ۱۳۴۷/۳۹
k_1	(N / m) ۲۹۶۴/۵۹
k_2	(N / m) ۳۰۰۰



شکل ۸ جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل یک‌دوم خودرو نسبت به ورودی سینوسی با دامنه ۵



شکل ۷ جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل یک‌چهارم خودرو نسبت به ورودی ترکیبی



شکل ۹ جابه‌جایی x بر حسب زمان برای مدل یک‌دوم خودرو نسبت به ورودی ترکیبی

۴-۶-۲ نمودار جابه‌جایی x بر حسب زمان به‌ازای چند حالت ورودی متفاوت برای مدل یک‌دوم خودرو

نمودار جابه‌جایی x بر حسب زمان با استفاده از مقادیر بهینه به‌دست آمده مدل یک‌دوم خودرو در حالت اول و دوم بهینه‌سازی برای ورودی پله واحد و در نهایت ورودی ترکیبی شامل پله واحد و ورودی‌های سینوسی با دامنه ۱ و ۵ به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

۴-۷-۱ مقادیر تابع هدف

مقادیر تابع هدف برای مدل‌های یک‌چهارم و یک‌دوم خودرو به‌ازای ورودی‌های خواسته شده در حالت‌های اول و دوم بهینه‌سازی به‌ترتیب در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

از نتایج به‌دست آمده نتیجه می‌شود که افزودن کمک‌فتر الکترومغناطیسی در حالت کلی، ارتعاشات خودرو را در هر دو مدل یک‌چهارم و یک‌دوم خودرو و در هر دو حالت بهینه‌سازی صورت گرفته کاهش می‌دهد. با توجه به این‌که مدل یک‌دوم خودرو نسبت به مدل یک‌چهارم به واقعیت نزدیک‌تر بوده، انتظار می‌رفت که نتایج مربوط به مدل یک‌دوم نسبت به مدل یک‌چهارم دارای دقت بیشتر و در نتیجه مقدار انتگرال خطای کمتری باشند که مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف مطابق با این موضوع می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج، حالت دوم بهینه‌سازی که در آن علاوه بر ثابت‌های کمک‌فتر الکترومغناطیسی پارامترهای سیستم تعلیق نیز بهینه شده است، دارای مقادیر انتگرال خطای کمتری نسبت به حالت اول بهینه‌سازی می‌باشد. از مقادیر تابع هدف مشخص است که به‌عنوان نمونه در اثر اعمال ورودی ترکیبی مقدار این تابع برای مدل یک‌دوم خودرو در حالت اول و دوم بهینه‌سازی به‌ترتیب برابر ۰/۵۲۸ و ۰/۳۶۲ بوده که کاهش سطح زیر نمودار انتگرال قدر مطلق خطا در حالت دوم بهینه‌سازی مشاهده شده است.

جدول ۱۰ مقادیر به‌دست آمده برای حالت اول بهینه‌سازی

مدل	نوع ورودی	مقدار بهینه انتگرال خطا	مقدار انتگرال خطا در حالت اولیه
	سینوسی با دامنه ۵	۰/۲۹۳	۰/۷۴۳
۱/۴	پله واحد	۰/۳۹۹	۰/۷۴۳
	ورودی ترکیبی	۰/۵۲۹	۰/۷۴۳
	سینوسی با دامنه ۵	۰/۲۸۳	۰/۶۹۷
۱/۲	پله واحد	۰/۳۹۱	۰/۶۹۷
	ورودی ترکیبی	۰/۵۲۸	۰/۶۹۷

- [2] W. H. Liao, D. H. Wang, Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, pp. 270-288, 2003.
- [3] G. Z. Yao, F. F. Yap, G. Chen, S. H. Yeo, MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system, *Mechatronic*, Vol. 12, pp. 963-973, 2002.
- [4] A. Dominguez, R. Sedaghati, L. Stihatu, Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 86, pp. 407-415, 2008.
- [5] N. M. Kwok, Q. P. Ha, B. Samali, Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 46, pp. 167-179, 2007.
- [6] H. S. Lee, S. B. Choi, Control and Response characteristics of a Magneto-Rheological Fluid Damper for Passenger Vehicles, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, pp. 80-87, 2000.
- [7] F. D. Fernando, J. H. Koo, M. Ahmadian, Experimental Approach for Finding the Response Time of MR Dampers for Vehicle Applications, *ASME*, pp. 425-430, 2003.
- [8] R. N. Jazar, *Vehicle Dynamics Theory and application*, Springer, New York, pp. 827-878, 2008.
- [9] K. Von Frisch, *Bees: their vision, chemical senses and language*, Cornell University Press, Ithaca, 1967.
- [10] T. D. Seeley, *The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies*, Harvard University Press, Cambridge, 1996.
- [11] S. Camazine, J. L. Deneubourg, G. Theraula, E. Bonabeau, *Self-organization in biological systems*, Princeton University Press, Princeton, 2003.
- [12] B. K. Kannan, S. N. Kramer, An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 405-411, 1995.

جدول ۱۱ مقادیر به‌دست آمده برای حالت دوم بهینه‌سازی

مدل	نوع ورودی	مقدار بهینه انتگرال خطا	مقدار انتگرال خطا در حالت اولیه
	سینوسی با دامنه ۵	۰/۲۶۱	۰/۵۱۵
۱/۴	پله واحد	۰/۳۳۷	۰/۵۱۵
	ورودی ترکیبی	۰/۴۷۵	۰/۵۱۵
	سینوسی با دامنه ۵	۰/۲۵۵	۰/۵۱۳
۱/۲	پله واحد	۰/۱۸۲	۰/۵۱۳
	ورودی ترکیبی	۰/۳۶۲	۰/۵۱۳

۶- مراجع

- [1] N. Yasrebi, Analysis of Performance and The Effect of Semi-Active Suspension System With MR-Damper on Automobile, *Tehran University*, 2006. (In Persian)