

طراحی بهینه هندسه سیستم تعلیق مک فرسون برای یک خانواده محصول بر مبنای نظریه پلتفرم مشترک

محمد حسن شجاعی فرد
ابوالفضل خلخالی*
صادق یارمحمدی سطری

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله هدف بدست آوردن الگوریتمی برای طراحی هندسه سیستم تعلیق خودرو جهت استفاده در خانواده‌ی محصولات در کلاس های مختلف خودرو می باشد. این الگوریتم به گونه‌ای طراحی می شود که پارامترهای طراحی خانواده محصول با تغییر از یک کلاس خودرو به کلاس دیگر خودرو بیشترین اشتراک را با هم داشته باشند. بدین منظور در ابتدا هندسه سیستم تعلیق مورد بررسی قرار می گیرد و پارامترهای موثر در هندسه سیستم تعلیق خودرو جهت استفاده در پلتفرم های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه الگوریتمی جهت طراحی پلتفرمی خودرو بر مبنای روابط ریاضی حاکم بر انواع حرکت های نوسانی خودرو با اعمال ورودی های تصادفی جاده به سیستم تعلیق ارائه می گردد. در این الگوریتم نقاط حساس در طراحی هندسه سیستم تعلیق با رویکرد ایجاد بیشترین اشتراک در پلتفرم های مختلف خودرو تبیین می گردد. در انتها سیستم تعلیقی برای ۵ محصول خودروی تندر ۹۰ شامل خودروهای سدان، وانت، هاچ بک، استیشن واگن (مینی ون) و خودروی MPV ارائه می گردد که با حفظ بیشترین اشتراک در کلاس های مختلف خودرو الزامات مرتبط با آسایش سرنشین را برآورده نماید. مقایسه نتایج بدست آمده از سیستم تعلیق بهینه و تندر ۹۰ معمولی بیانگر کارایی این روش می باشد.

واژه های کلیدی: بهینه سازی پلتفرمی، خانواده محصول، هندسه سیستم تعلیق.

Design Algorithm of Macpherson Suspension for a Family of Products Based on Common Platform Theory

M. H. shojaeefard

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

A. Khalkhali

School of Automotive, Iran University of Science and Technology Engineering, Tehran, Iran

S.Yarmohammadisatri

School of Automotive, Iran University of Science and Technology Engineering, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, an algorithm is represented to design geometry of suspension for a family of vehicles. Product platform optimization is a way to determine design variable set which not only deserves every product qualifications, but also it helps to find a set of parameters which has the most commonality features. To determine qualifications of each vehicle model, road inputs has applied to models by means of stochastic road harshness input which includes using Power Spectral density of road input as the input of vehicle geometry model. Platform based design uses optimization to maximize commonality among family besides deserving each individual constraint. In order to do this, objective functions and constraints implemented in order to find optimum designs. This algorithm optimizes ride and handling of the car besides increasing commonality among the whole family. For a numerical solution, a family of car which includes 5 products has been proposed based on Dacia-Renault platform (L90). At last, an algorithm is presented that could design geometry of vehicle suspension for a family of products.

Keywords: Platform based optimization, Product family, Revised NSGA-II optimization algorithm, random road.

۱-مقدمه

امروزه شرکتها در تلاشند تا متنوع ترین بازارها را با کمترین تنوع در محصولات تسخیر نمایند. بدون اینکه این کاهش تنوع در اجزای محصول (به بیان دیگر اشتراک سازی) به عملکرد محصول خدشهای وارد نماید [۱-۲]. بنابراین سازهی در این خصوص ضروری به نظر می رسد،

زیرا افزایش تنوع محصولات جهت کسب سهم بیشتر از بازار نیاز به توسعه محصولات متنوع تر و سرمایه گذاری بیشتر در حوزه محصول و فرایند دارد، حال آنکه اشتراک سازی بیش از اندازه در محصولات در صورتی که تمایز بالایی در عملکردشان مشاهده نشود، می تواند از سهم بازار بکاهد.

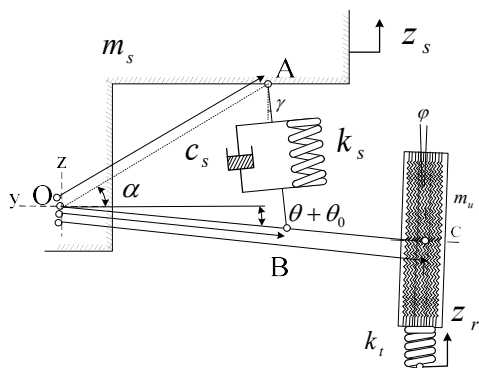
لذا استراتژی متنوعی از سوی شرکت های مختلف برای عملی ساختن این مهم به کار گرفته شد که از مهمترین آنها می توان به "Lean Production" و "Platform Strategy" اشاره نمود [۲-۵]. ایده توسعه خانواده محصولات بر اساس پلتفرم محصولات، استراتژی موثری برای کاهش هزینه ها [۶-۷] و افزایش تنوع محصول محسوب می گردد. غالباً یک خانواده محصول را به عنوان مجموعه ای از محصولات که به صورت مشترک از یک سری از اجزا و کارکردها بهره می گیرند، تعریف می شود. طوری که هر یک از محصولات با داشتن المان های منحصر به فرد، گروهی خاص از مشتریان را راضی می کنند. معمولاً اجزای مشترک را به عنوان پلتفرم تلقی می کنند [۸]. با اشتراک سازی عناصر کلیدی در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ab_khalkhali@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۶

کنترلی (طبق) می باشد. هنگامی که جرم بازوی کنترلی بسیار کوچکتر از جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده باشد، جرم آن قابل چشم پوشی می باشد.



شکل ۱- شماتیک هندسه سیستم تعلیق

مختصات نقاط A, B و C در حالت تعادل و Z_r پروفیل جاده می باشد. جرم فنربندی شده (m_s) تحت متغیر Z_s و جرم فنربندی نشده (m_u) تحت متغیر θ تغییر می کند. با در نظر گرفتن نقاط، سیستم تعلیق معادلات زیر بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} y_B &= l_B (\cos(\theta - \theta_0) - \cos(\theta_0)) \\ z_B &= z_s + l_B (\sin(\theta - \theta_0) - \sin(\theta_0)) \\ y_C &= l_C (\cos(\theta - \theta_0) - \cos(-\theta_0)) \\ z_C &= l_C (\sin(\theta - \theta_0) - \sin(-\theta_0)) \end{aligned} \quad (1)$$

به صورتی که θ و θ_0 جابجایی زاویه ای و جابجایی زاویه ای اولیه بازوی کنترلی در نقطه تعادل و α زاویه بازوی OA با خط افق می باشد.

$$\alpha' = \alpha - \theta_0 \quad (2)$$

معادلات زیر از مثلث OAB بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} l &= \left(l_A^2 + l_B^2 - 2l_A l_B \cos \alpha' \right)^{1/2} \\ l' &= \left(l_A^2 + l_B^2 - 2l_A l_B \cos(\alpha' - \theta) \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

به گونه ای که l_A ، l_B و l_C فاصله OA، OB و OC و l فاصله اولیه A تا B در حالت تعادل می باشد که تحت زاویه θ قرار گرفته است. در نتیجه تغییر اندازه فنر، سرعت وابسته میراگر و تغییر مکان تایر به صورت زیر بدست خواهند آمد.

$$\begin{aligned} (\Delta l)^2 &= (l - l')^2 = \\ &= 2a_1 - b_1 (\cos \alpha' + \cos(\alpha' - \theta)) - 2 \left\{ a_1^2 - a_1 b_1 \right. \\ &\quad \left. (\cos \alpha' + \cos(\alpha' - \theta) + b_1^2 \cos \alpha' \cos(\alpha' - \theta)) \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= l_A^2 + l_B^2 \\ b_1 &= 2l_A l_B \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta l &= l - l' = \frac{b_1 \sin(\alpha' - \theta) \theta}{2(a_1 - b_1 \cos(\alpha' - \theta))^{1/2}} \\ z_C - z_r &= l_C (\sin(\theta - \theta_0) - \sin(-\theta_0)) - z_r \end{aligned} \quad (6)$$

۱-۲- خطی سازی معادلات حرکت سیستم تعلیق

معادلات حرکت مدل جدید با استفاده از مکانیک لاگرانژ بدست

میان محصولات مختلف یک خانواده محصول، می توان محصولات متنوع جدیدی را با هزینه ای کمتر و در زمان کوتاه تر تولید نمود. بنابراین مسیله طراحی پلتفرم عملاً به چالشی بین حداکثر نمودن میزان اشتراک سازی در عین حفظ شخصیت متمایز بین محصولات در یک خانواده محصول تبدیل می شود.

پلتفرم مشترک در خودروها با کلاس های متفاوت به معنی استفاده از یک ساختار طراحی کلی است. با کمینه کردن اختلافات مدل های گوناگون علاوه بر تأمین کردن خواص مورد نیاز برای هر کلاس خودرو، هزینه تولید تا حد امکان کاهش یابد. یکی از اجزای خودرو که تاثیر بسیاری در عملکرد خودرو دارا می باشد، سیستم تعلیق است. در سال های اخیر کنترل ارتعاشات وسایط نقلیه توجه بسیاری از محققین را به سمت خود جلب کرده است. ارتعاشات ناشی از جاده نقش بسیار مهمی را در راحتی^۱ مسافران و پایداری خودرو در عبور از ناهمواری ها دارا است. تعدادی از کارهای پیشین در این زمینه نشان داده است که ارتعاشات خودرو تأثیر مستقیمی بر راحتی و سلامتی سرنشینان دارد [۹-۱۰]. یکی از سیستم تعلیق های مورد استفاده در خودرو، سیستم تعلیق مک فرسون می باشد که به صورت گسترده در خودروهای تجاری مورد استفاده قرار می گیرد [۱۱]. وزن سبک، اندازه کوچک و ساختار ساده این نوع سیستم تعلیق سبب شده تا در تعلیق جلو و عقب قابل استفاده باشد [۱۲].

در این مقاله هدف بدست آوردن الگوریتمی نوین جهت طراحی سیستم تعلیق به صورت پلتفرمی است، به گونه ای که در پلتفرم های متفاوت بیشترین اشتراک را داشته باشد. از آنجایی با افزایش تعداد پارامترهای مشابه در هر سیستم تعلیق، تطبیق پذیری آن سیستم با خودروی خاص در هر کلاس کاهش می یابد، لذا باید با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی یک راه حل میانه برای این منظور استخراج می گردد. در این مدل هندسه سیستم تعلیق مک فرسون با توجه به این که در اکثر خودروهای تجاری مورد استفاده قرار می گیرد مبنای طراحی قرار گرفته است. بدین منظور الگوریتمی ارایه می شود که ضریب سختی فنر جلو، ضریب دمپینگ جلو و پارامترهای هندسی سیستم تعلیق جلو خودرو را در کلاس های مختلف خودرو به گونه ای طراحی کند که بیشترین اشتراک بین کلاس های مختلف خودرو وجود داشته باشد. در ادامه خوش سواری و پایداری خودرو که در تضاد با هم هستند بررسی شده و سیستم تعلیق مناسب برای هر دو حالت طراحی می شود و پارامترهای هندسه سیستم تعلیق خودرو تندر ۹۰، در کلاس های مختلف این خودرو بر مبنای ورودی ارتعاشات تصادفی جاده مدل می شود. در نهایت پارامترهای بهینه سیستم تعلیق خودرو در کلاس های متفاوت به گونه ای ارایه می گردد که بیشترین اشتراک را با هم داشته باشند.

۲- مدل هندسه سیستم تعلیق خودرو مک فرسون

طرحواره هندسه سیستم تعلیق مک فرسون در شکل ۱ نمایش داده شده است که شامل بدنه خودرو، تایر، فنر کوئل، میراگر و یک بازوی

¹ Ride comfort

$$z(0) = z(x_1, x_2, z_r) = x_1 + l_c (\sin(x_3 - \theta_0) - \sin(-\theta_0)) - z_r$$

معادله (۱۳) در حالت تعادل خطی سازی می‌شود. به‌گونه‌ای که $X_e = (x_{1e}, x_{2e}, x_{3e}, x_{4e}) = (0, 0, 0, 0)$ و نیروهای خارجی وارد بر سیستم می‌باشد. در انتها معادله خطی شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{x} = Ax(t) + B_1 f_a(t) + B_2 z_r(t) + B_3 f_d(t) \quad (17)$$

به‌گونه‌ای که:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial f_1}{\partial f_a} & 0 & \frac{\partial f_2}{\partial f_a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{l_B \cos(-\theta_0)}{m_s l_c + m_u l_c \sin^2(-\theta_0)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(m_s + m_u) l_B}{m_s m_u l_c^2 + m_u^2 l_c^2 \sin^2(-\theta_0)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial f_1}{\partial z_r} & 0 & \frac{\partial f_2}{\partial z_r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_t l_c \sin^2(-\theta_0)}{m_s l_c + m_u l_c \sin^2(-\theta_0)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{m_s k_t l_c \cos(-\theta_0)}{m_s m_u l_c^2 + m_u^2 l_c^2 \sin^2(-\theta_0)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

با در نظر گرفتن روابط فوق، هندسه تعلیق به صورت پارامتری و وابسته به نقاط نقاط سخت سیستم تعلیق بدست می‌آید. تئوری پلتفرمی و الگوریتم ارایه شده، سیستم تعلیق را به گونه‌ای طراحی می‌کند که بیشترین اشتراک در هندسه سیستم تعلیق در پلتفرم‌های مختلف خودرو ارایه شود. به عبارت دیگر در این مقاله الگوریتمی نوین ارایه می‌شود که سیستم تعلیق مک‌فرسون را برای کلاس‌های مختلف خودرو ارایه کند.

۳- طراحی برمبنای پلتفرم با استفاده از بهینه سازی

الگوریتم طراحی پلتفرم مشترک برای یک خانواده محصول باید سازشی بین عملکرد هر محصول و میزان استفاده از المان‌ها و زیر ساختارهای مشترک در پلتفرم بیابد. از این رو یافتن روش بهینه سازی که بر مبنای آن بتوان مقادیر هر یک از متغیرها را یافت از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

می‌آید. V ، D و T انرژي جنبشی، انرژي پتانسیل و انرژي میرای سیستم می‌باشد. این معادلات به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$T = \frac{1}{2}(m_s + m_u) \dot{z}_s^2 + \frac{1}{2} m_u l_c^2 \dot{\theta}^2 + m_u l_c \cos(\theta - \theta_0) \dot{\theta} \dot{z} \\ V = \frac{1}{2} k_s \left[2a_1 - b_1 (\cos \alpha' + \cos(\alpha' - \theta)) - 2 \left(a_1^2 - a_1 b_1 \right. \right. \\ \left. \left. (\cos \alpha' + \cos(\alpha' - \theta)) + b_1^2 \cos \alpha' \cos(\alpha' - \theta) \right)^{1/2} \right] + \\ \frac{1}{2} k_t \left[z_s + l_c (\sin(\theta - \theta_0) - \sin(-\theta_0)) - z_r \right]^2 \quad (7)$$

$$D = \frac{1}{2} c_p \left[\frac{b_1 \sin(\alpha' - \theta) \dot{\theta}}{2(a_1 - b_1 \cos(\alpha' - \theta))^{1/2}} \right]^2 \quad (8)$$

k_t و k_s ضریب سختی تایر و فنر می‌باشد. در انتها معادلات حرکت

به صورت زیر بدست می‌آید.

$$(m_s + m_u) \ddot{z}_s + m_u l_c \cos(\theta - \theta_0) \ddot{\theta} - \\ m_u l_c \sin(\theta - \theta_0) \dot{\theta}^2 + k_t (z_s + l_c \sin(\theta - \theta_0) \\ - \sin(-\theta_0) - z_r) = -f_d \quad (9)$$

$$m_u l_c^2 \ddot{\theta} + m_u l_c \cos(\theta - \theta_0) \ddot{z}_s + \\ \frac{c_p b_1^2 \sin(\alpha' - \theta) \dot{\theta}}{4(a_1 - b_1 \cos(\alpha' - \theta))} + k_t l_c \cos(\theta - \theta_0) \\ (z_s + l_c \sin(\theta - \theta_0) - \sin(-\theta_0) - z_r) \\ - \frac{1}{2} k_s \sin(\alpha' - \theta) \left[b_1 + \frac{d_1}{4(a_1 - b_1 \cos(\alpha' - \theta))^{1/2}} \right] \\ = -l_B f_a \quad (10)$$

به گونه ای که

$$c_1 = a_1^2 - a_1 b_1 \cos(\alpha' + \theta_0) \\ d_1 = a_1 b_1 - b_1^2 \cos(\alpha' + \theta_0) \quad (11)$$

حال به معرفی متغیرهای حالت به صورت زیر می‌پردازیم:

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [z_s \ \dot{z}_s \ \theta \ \dot{\theta}]^T \quad (12)$$

معادلات بالا به صورت زیر در خواهد آمد.

$$\dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, f_a, z_r, f_d) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, f_a, z_r, f_d) \quad (13)$$

به گونه ای که:

$$f_1 = \frac{1}{D_1} \left[m_u l_c^2 \sin(x_3 + \beta) x_4^2 - \frac{1}{2} k_s \sin(\alpha' - x_3) \right. \\ \left. \cos(x_3 + \theta_0) g(x_3) + c_p h(x_3) \dot{\theta} - \right. \\ \left. k_t l_c \sin^2(x_3 - \theta_0) z(0) + l_B f_a \cos(x_3 - \theta_0) - l_c f_d \right] \\ f_2 = -\frac{1}{D_2} \left[m_u^2 l_c^2 \sin(x_3 - \theta_0) \cos(x_3 - \theta_0) x_4^2 + \right. \\ \left. (m_s + m_u) c_p h(x_3) x_4 - \frac{1}{2} (m_s + m_u) k_s \times \right. \\ \left. \sin(\alpha' - x_3) g(x_3) + m_s k_t l_c \cos(x_3 - \theta_0) z(0) \right. \\ \left. + (m_s + m_u) l_B f_a - m_u l_c \cos(x_3 - \theta_0) f_d \right] \quad (14)$$

$$D_1 = m_s l_c + m_u l_c \sin^2(x_3 - \theta_0) \\ D_2 = m_s m_u l_c^2 + m_u^2 l_c^2 \sin^2(x_3 - \theta_0) \quad (15)$$

$$h(x_3) = \frac{b_1^2 \sin^2(\alpha' - x_3)}{4(a_1 - b_1 \cos(\alpha' - x_3))} \\ g(x_3) = b_1 + \frac{d_1}{(c_1 - d_1 \cos(\alpha' - x_3))^{1/2}} \quad (16)$$

$$\underbrace{0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 1}_{\text{ژن‌های کنترل اشتراک}} \quad \underbrace{U_{11} \quad c_2 \quad U_{31} \quad \dots \quad c_n}_{\text{متغیرهای طراحی برای محصول اول}} \quad \underbrace{U_{1p} \quad c_2 \quad U_{3p} \quad \dots \quad c_n}_{\text{متغیرهای طراحی برای محصول } p}$$

شکل ۲- کروموزوم جدید برای بهینه‌سازی پلتفرم

جهت طراحی برای خانواده محصول، تابعی تعریف می‌شود تا الگوریتم ژنتیک حاصل به‌سوی بیشینه کردن میزان اشتراکات بین محصولات مختلف پلتفرم سوق پیدا کند. با کمینه شدن این تابع تغییرات هریک از متغیرها در کل خانواده محصول کاهش می‌یابد، که این به معنای افزایش پارامترهای مشترک است. PFPF به‌صورت زیر و با استفاده از پارامتر pvar تعریف می‌شود:

$$p \text{ var}_j = \frac{\text{var}_j}{x_j} \quad (22)$$

که در آن:

$$\text{var}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{p}} \quad (23)$$

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^p x_{ij}}{p}$$

که در آن x_{ij} مقدار مربوط به i امین متغیر طراحی و i امین محصول در خانواده محصول است.

$$PFPF = \sum_{j=1}^n p \text{ var}_j \quad (24)$$

استفاده از PFPF به‌عنوان یک تابع سبب می‌شود که الگوریتم ژنتیک، متغیرها را به سمت نزدیک شدن به هم سوق دهد. علاوه بر آن تغییرات هریک از پارامترها در بین محصولات مختلف مینیمم شود.

۳-۱- پلتفرم مورد استفاده برای یافتن مقادیر بهینه طراحی

برای تعیین داده‌های عددی مورد استفاده در این مقاله از یک خانواده محصول که بر روی یک پلتفرم مشترک گسترش داده شده‌اند، استفاده باید کرد. با توجه به اینکه شرکت رنو برای ساخت خانواده محصول تندر ۹۰ از ماژول‌های مشترک استفاده کرده است، از مقادیر عددی مربوط به خودروهای تندر ۹۰ (به‌عنوان خودروی کلاس D)، خودروی رنو ساندرو (به‌عنوان خودروی کلاس B)، خودروی رنو داستر (به‌عنوان خودروی کلاس SUV کوچک)، خودروی ون Dacia و Dokker (به‌عنوان خودروی کلاس MPV) و خودروی وانت تندر ۹۰ استفاده شده است. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به این ۵ خودرو آورده شده است.

$$find : \{x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{j,i}\}, x_{cc} = \{x_{cc,j}\}$$

$$min : f(x) = \{\sum f_1, \sum f_2, \dots\}$$

subject to :

A : platform constraints

B : every product constraints

where $i = 1, \dots, \text{number of products}$

& $j = 1, \dots, \text{number of variables}$

روش بهینه‌سازی خانواده محصول با استفاده از الگوریتم ژنتیک احتمال دستیابی به نقاط بهینه‌تر را افزایش می‌دهد. زیرا در فضای جستجو برای یافتن نقاط بهینه عملکردی، تمام حالات ممکن را بررسی می‌کند. تعداد تمامی پلتفرم‌های ممکن برای بررسی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\binom{n}{n} + \binom{n}{n-1} + \dots + \binom{n}{2} + \binom{n}{1} + \binom{n}{0} = 2^n \quad (21)$$

برای بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای یافتن تمامی حالت‌های ممکن، باید یک‌رشته کروموزوم به طول $n \times p$ در نظر گرفته شود که بیان‌گر در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن برای خانواده محصول است. در اینجا n نمایانگر تعداد متغیرهای طراحی و p نمایانگر تعداد محصولات در خانواده محصول است. به‌بیان‌دیگر با در نظر گرفتن این کروموزوم به الگوریتم ژنتیک این اجازه داده می‌شود که هریک از متغیرها هر مقدار دلخواهی را اتخاذ کنند. این امر به این معنی است که هیچ کنترلی برای ایجاد متغیرهای مشترک وجود ندارد. برای این منظور به ابتدای رشته کروموزومی به تعداد متغیرهای طراحی (n) یک رشته کروموزوم کنترلی اضافه می‌شود. هریک از قسمت‌های این کروموزوم کنترلی به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که نمایانگر یک متغیر طراحی خاص باشند و می‌توانند تنها یکی از دو مقدار صفر و ۱ را اتخاذ نمایند. مقدار صفر به معنی وجود عدم اشتراک به ازای آن متغیر طراحی خاص بین محصولات مختلف خانواده محصول است. در صورتی که در رشته کروموزوم کنترلی به ازای یک متغیر طراحی خاص عدد یک باشد، به معنی آن است که در بین تمام محصولات خانواده محصول، متغیر طراحی متناظر یک متغیر مشترک است. کروموزوم کنترلی همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است به ابتدای کروموزوم اضافه می‌گردد. طول کروموزوم با احتساب ژن‌های کنترل‌کننده اشتراک در بین خانواده محصول برابر با $n \times (p+1)$ است. پس از معرفی کروموزوم به‌صورت بالا، لازم است تا تغییراتی در روش بهینه‌سازی NSGA-II صورت گیرد تا به‌صورت بهینه‌سازی پلتفرمی تغییر یابد.

۲-۳- بهینه سازی برای خانواده محصول

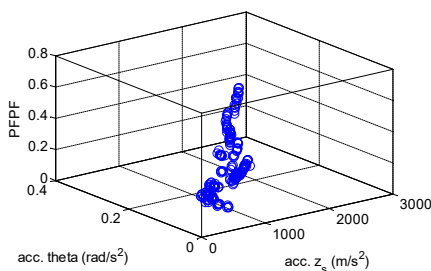
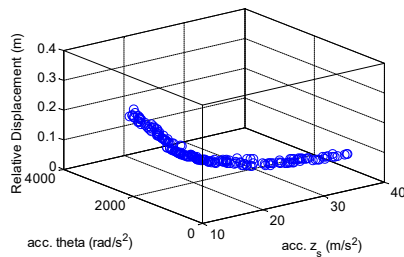
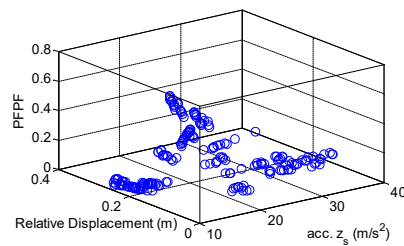
• تابع هدف بهینه سازی

هدف اصلی در تعیین پارامترهای سیستم تعلیق برای خودروی در دست طراحی، قابلیت‌های بالای هندلینگ و کاهش شتاب عمودی وارده به سرنشین است. برای بهینه کردن این نوع سیستم تعلیق سه تابع هدف در نظر گرفته شده است که شامل، شتاب وارد بر جسم فنربندی شده \ddot{x}_s ، جابجایی نسبی بین جرم فنربندی شده و چرخ جلو (d) و شتاب رول خودرو ($\ddot{\theta}$) می‌باشد. در این روش rms توابع هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد. توابع هدف شتاب وارد بر جسم فنربندی شده و جابجایی نسبی بین جرم فنربندی شده بیانگر خوشسواری خودرو و شتاب رول خودرو بیانگر هندلینگ خودرو می‌باشد. هدف ما در استفاده از این توابع هدف در این مقاله بهبود همزمان خوشسواری و هندلینگ خودرو می‌باشد.

• بازه بهینه سازی

متغیرهای در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی هندسه سیستم تعلیق،

شامل c_p ، k_s ، I_a ، I_b و I_c می‌باشند که به ترتیب ضریب میرایی کمک فنر، ضریب سختی فنر و طول بازوهای سیستم تعلیق می‌باشند. این متغیرها بر مبنای درجه اهمیت آن‌ها در طراحی سیستم تعلیق در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۲ محدوده تغییرات در نظر گرفته شده برای بهینه سازی برای ۵ متغیر طراحی در نظر گرفته شده آورده شده است. با استفاده از مدل هندسی و داده‌های بالا نتایج برای توابع هدف، به صورت جبهه پرتو شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج ناشی از طراحی بر مبنای بیشترین اشتراک در پلتفرم های مختلف در جدول ۳ بیان شده است. همین گونه که در این جدول نمایان است، از ۵ پارامتر طراحی هندسه‌ی تعلیق، تنها طول لینک I_a در کلاس‌های متفاوت خودرو تغییر می‌کند و سایر پارامترها یکسان می‌باشد. شکل ۴ بیان می‌کند که داده‌های بدست آمده ناشی از بهینه‌سازی، سبب بهبود شتاب وارد بر جرم فنربندی شده، شتاب چرخش خودرو و نیز جابجایی نسبی جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده می‌شود.



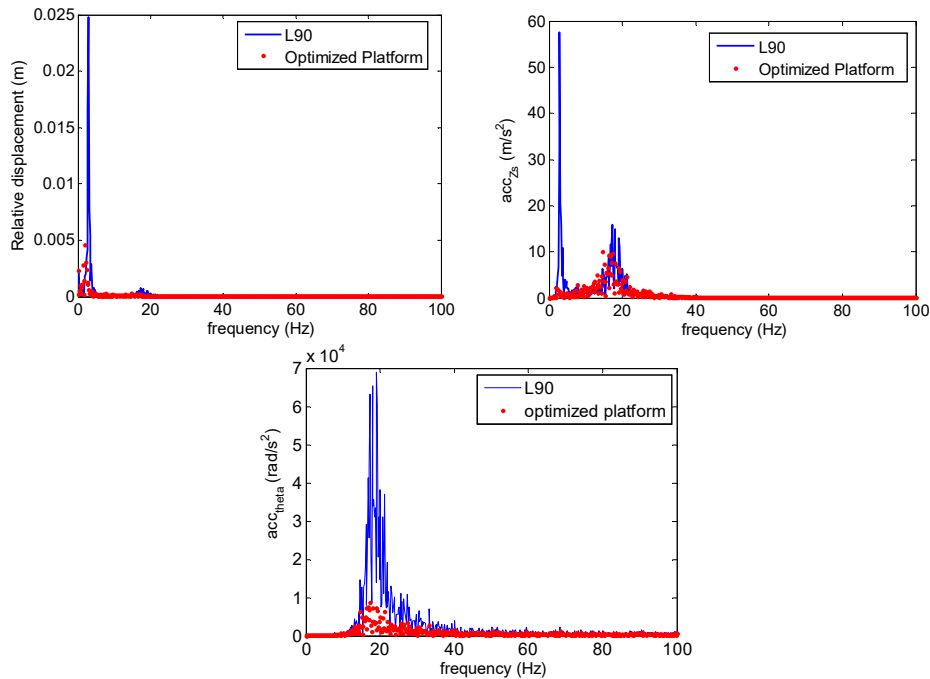
شکل ۳- جبهه اول در بهینه‌سازی برای توابع هدف شتاب جرم فنر بندی شده، شتاب چرخشی تعلیق، جابجایی نسبی جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده و PFPF به صورت سه بعدی

جدول ۱- اطلاعات مربوط به خودروهای مختلف ساخته شده بر روی پلتفرم تندر ۹۰

Pick up	MCV	SUV Duster	Sandero	Sedan	Product
۱۱۵۱	۱۲۰۵	۱۲۹۴	۱۰۱۳	۱۰۶۰	Total Mass
۲۹۰۶	۲۹۰۵	۲۸۷۳	۲۵۸۸	۲۶۳۰	wheelbase
۱۴۶۶	۱۴۸۱	۱۵۸۰	۱۴۸۰	۱۴۸۳	Front track
۱۴۵۸	۱۴۵۸	۱۵۶۳	۱۴۶۹	۱۴۷۰	Rear track

جدول ۲- محدوده تغییرات متغیرهای بهینه سازی

Design Parameter	Lower limit	Upper limit
c_p (Ns/m)	۱۳۵۰	۵۵۰۰
k_s (N/m)	۲۰۰۰۰	۴۴۰۰۰
l_a (m)	۰/۵۵	۰/۷۵
l_b (m)	۰/۲۲	۰/۴۲
l_c (m)	۰/۲۵	۰/۴۵



شکل ۴- نمودار شتاب جرم فربندی شده، شتاب زاویه ای و جابجایی نسبی جرم فربندی شد و جرم فربندی نشده

جدول ۳- مقادیر عددی برای بهینه سازی برای تمام محصولات خانواده محصول با در نظر گرفتن تابع PFPF

شماره محصول	c_c (N.s/m)	k_c (N.m)	l_a (mm)	l_b (mm)	l_c (mm)	شتاب roll (degree/s ²)	شتاب عمودی سرنشین (m/s ²)	جابجایی نسبی جرم فربندی شده و جرم فربندی نشده
۱	۲۸۴۰	۲۳۶۲۷	۶۲۴	۳۵۹	۴۵۰	۰/۱۶۷	۰/۶۶۴۷	۰/۰۰۵۲
۲	↓	↓	۵۹۰	↓	↓	↓	۰/۸۰۲۸	۰/۰۰۵۶
۳	↓	↓	۶۱۹	↓	↓	↓	۰/۶۷۹۵	۰/۰۰۴۶
۴	↓	↓	۶۱۴	↓	↓	↓	۱/۲۵۲۰	۰/۰۰۵۴
۵	↓	↓	۵۶۳	↓	↓	↓	۲/۸۷۳	۰/۰۰۵۵

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا الگوریتمی جهت بهینه سازی پارامترهای یک سیستم تعلیق برای به کارگیری در کلاس های مختلف پرداخته شده است. این مفهوم در حقیقت از بهینه سازی برای بیشینه کردن اشتراکات در یک خانواده محصول، برای کمینه کردن هزینه های تولید و درعین حال حفظ کمیت های مورد انتظار در هریک از محصولات است. به علاوه

پارامترهای تأثیرگذار در تعیین کلاس هر خودروی سواری بر مبنای مطالعات صورت گرفته تعیین شده است، که این پارامترها عمدتاً شامل وزن خودرو و طول خودرو است. از آنجایی که لازم بوده برای بهینه سازی از مدل های ارتعاشی خودرو استفاده شود، وجود ورودی جاده که به حالت واقعی نزدیک باشد، باعث هرچه دقیق تر شدن بهینه سازی ها می گردد. از این رو با استفاده از منابع مختلف پروفیل واقعی جاده تا فرکانس ۱۰۰

[5] Simpson T.W., Jiao J., Siddique Z., Hölttä-Otto K., *Advances in Product Family and Product Platform Design, Methods & Application*, pringer, 2014 .

[6] Tan H., Jiang P., Yao B., Hui X., *Flexible Product Platform Based on Design Parameters'* Springer, pp 7-15, 2011.

[7] Zhongkai L., Zhihong Ch., Yixiong F., Jinyong Y., *An integrated method for flexible platform modular architecture design*, *Journal of Engineering Design*, Vol. 24, No. 1, 2013.

[8] Al-Zaher A. , ElMaraghy W., *Design Method of Under-body Platform Automotive Framing Systems*, *Procedia CIRP*, Vol. 17, pp. 380-385, 2014.

[9] Fallah M.S., Bhat R., Xie W.F., *New model and simulation of Macpherson suspension system for ride control applications*, *Vehicle Syst. Dyn.*, Vol.47, No. pp. 195–220, 2009.

[10] Sandua C., Andersen E. R., Southward S., *Multibody dynamics modeling and system identification of a quarter-car test rig with McPherson strut suspension*, *Vehicle Syst. Dyn.*, Vol. 49, No. 1, pp. 153–179, 2011.

[11] Hurel J., *Nonlinear Two-Dimensional Modeling of a McPherson Suspension for Kinematics and Dynamics Simulation*, *The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, March 25-27, 2012.

[12] Nemeth B., Gaspar P., *Set-based analysis of the variable-geometry suspension system*, *19th World Congress The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa*. August 24-29, 2014.

[13] Kropac O., Mucka P., *Be careful when using the International Roughness Index as an indicator of road unevenness*, *J. Sound Vib.*, Vol. 287, pp. 989–1003, 2005.

[14] Dodds C. J., Robson J. D., "The description of road surface roughness", *J. Sound Vib*, vol. 31, no. 2, pp. 175–183, 1973.

[15] Shirahatt A.s, *Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding'*, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 30, No. 1.2005.

هرتز بر اساس استاندارد ISO استخراج گردید. از آنجایی که در این مقاله بهینه سازی بر مبنای پلتفرم سیستم تعلیق یک خانواده خودروی سواری به عنوان هدف مقاله در نظر گرفته شده، پس از بسط و گسترش مفهوم پلتفرم و روش بهینه سازی NSGA-II برای این کاربرد، مناسب تشخیص داده شد. سپس با اعمال تغییراتی در نحوه ایجاد جمعیت اولیه، مکانیزم انتخاب و مکانیزم جانشینی نسل در کدهای اولیه، مجموعه کدی تولید شد که به صورت پارامتری قابل استفاده برای هر نوع بهینه سازی بر مبنای پلتفرم باشد. در این نوع طراحی با استفاده از بهینه سازی مشخصات مورد نیاز هر یک از محصولات به عنوان یک قید به مسئله وارد می شود. این کاربرد بدان معناست که علیرغم مشترک گرفتن مقادیر برخی پارامترهای سیستم تعلیق برای تمام محصولات خانواده محصول؛ هر یک از آن ها می توانند الزامات مربوط به آسایش سرنشین و سایر الزامات مربوط به سیستم تعلیق خودرو را برآورده نمایند. در انتها سیستم تعلیقی ارائه می شود که با حفظ بیشترین اشتراک، قابلیت استفاده در کلاس های متفاوت خودرو را دارا می باشد.

۵- نمادها

m_s	جرم فنربندی شده (kg)
m_u	جرم فنر بندی نشده (kg)
c_p	ضریب میرایی کمک فنر (N.s/m)
k_t	ضریب سختی تایر (N.m)
k_s	ضریب سختی فنر (N.m)
z_p	ورودی جاده (mm)
θ	زاویه بازوی کنترلی (degree)
θ_0	زاویه اولیه بازوی کنترلی (degree)
l_a	طول بازوی سیستم تعلیق (شکل ۲) (mm)
l_b	طول بازوی سیستم تعلیق (شکل ۲) (mm)
l_c	طول بازوی سیستم تعلیق (شکل ۲) (mm)
V	انرژی پتانسیل
T	انرژی جنبشی
D	انرژی ناشی از دمپینگ
$w(t)$	تابع نویز سفید
ψ	چگالی نویز سفید
σ^2	تغییرات زبری جاده

۶- مراجع

[1] Simpson T. W., Siddique Z., J., Roger J., *Platform-Based product family development'*, Springer, 2006.

[2] Steven B., Ariel P., *The pure characteristics demand mode'*, *Int. Econ. Rev.*, Vol. 48, No. 4, pp. 1193-1225, 2007.

[3] Timothy W. S., Jianxin J., Siddique Z., *product platform and product family design-methods and applications*, Springer, 2007.

[4] Jaeil P., Timothy W. S. , "Toward an activity-based costing system for product families and product platforms in the early stages of development", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 1. pp. 99-130, 2008.