کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در مهندسی مکانیک
1st National Conference in Mechanical Engineering
Tehran 2018
ISC ۹۶۱۸۰-۲۱۳۰۲

تنظیم ارتفاع خودرو با استفاده از سیستم تعلیق بادی به کمک کنترل کننده مود لغزشی

حسین ناظمیان [*۱]، حسن خدادوست[۲].

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم وصنعت ایران

h.nazemian1995@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم وصنعت ایران

Hasan.khodadoost@yahoo.com

خلاصه

تنظیم ارتفاع در خودرو برای اهدافی از قبیل بهبود کیفیت سواری، افزایش پایداری، جلوگیری از برخورد کف خودرو به زمین، کاهش نیروی مقاومت هوا و غیره بکار گرفته می‌شود. در این مقاله، سیستم تعلیقی که وظیفه تغییر ارتفاع خودرو را برعهده دارد از نوع بادی می‌باشد، در تعلیق بادی به جای فنر مارپیچ از بالشتک‌های بادی استفاده می‌شود. در ای مقاله دو مدل تجربی و تئوری در مورد سیستم تعلیق بادی آورده شده است که خواص ترمودینامیکی گاز داخل فنر را مدل‌سازی می‌کند، سپس با طراحی بلوک کنترلی حالت مد لغزشی رفتار دینامیکی خودرو که تغییر ارتفاع، زاویه غلت و تاب می‌باشد، می‌توان کنترل کرد. در تنظیم ارتفاع به علت وجود بارهای نامتوازن بر روی فنرهای بادی خودرو نمی تواند موقع تغییر ارتفاع به حالت تراز بماند، برای حل این مشکل شیرهای سلونئیدی در هر فنر به‌صورت مستقل با فرکانس‌های مشخصی باز و بسته می‌شوند که خودرو از حالت تراز بودن درحین تغییر ارتفاع خارج نشود. با مشاهده نمودارهای رفتار دینامیکی خودرو که در نرم‌افزار کارسیم انجام گرفته‌است، می‌توان متوجه شد که الگوریتم کنترلی مد لغزشی می‌تواند این تغییر ارتفاع را کنترل کند و خودرو در حالت تراز باقی بماند.

کلمات کلیدی:

تعلیق بادی، سیستم تعلیق بادی، فنر بادی، کنترل مد لغزشی، تنظیم ارتفاع، مدل‌سازی خواص ترمودینامیکی

۱. مقدمه

سیستم تعلیق یا فنربندی، قسمتی از خودرو است که باعث می‌شود نوسانات حاصل از حرکت خودرو برروی سطوح ناهموار به جرم معلق که شامل اتاق، شاسی، متعلقات و سرنشینان وارد نشود. سیستم تعلیق از جِرم فنربندی شده، فنر، کمک فنر و جِرم فنربندی‌نشده تشکیل شده‌است. سیستم تعلیق خودرو دو وظیفه مهم را برعهده دارد که یکی جذب نوسانات و ارتعاشات وارد به چرخ‌ها بر اثر ناهمواری‌های جاده و دیگری تماس مؤثر لاستیک چرخ‌ها با سطح جاده است. در سیستم

[*] **Corresponding author:** دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم های دینامیکی خودرو

Email: h.nazemian1995@gmail.com

تعلیق خودرو همیشه دو مقوله مورد بحث بوده: یکی کیفیت سواری دادن و دیگری قابلیت هدایت و کنترل، که این دو مرتباً در تضاد با یکدیگرند. به عبارت دیگر، بهبود یکی باعث بروز اشکال در دیگری می‌شود.[۶-۱]

سیستم تعلیق را می‌توان از چند دیدگاه به انواع مختلفی تقسیم کرد که یکی از این دیدگاه‌ها بررسی سیستم تعلیق از نظر فعالیت آن و چگونگی فعال بودن آن است، سیستم تعلیق از نظر فعالیت به چهارگونه غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و البته تنظیم‌شونده تقسیم می‌شود:

- سیستم تعلیق غیرفعال:

سیستم تعلیق غیرفعال که با نام Passive Suspension شناخته می‌شود، در اکثر خودروهای امروزی دیده می‌شود. این سیستم تشکیل شده از تعدادی میله صلب و اتصالات در کنار فنر برای جذب ضربات وارده و همچنین کمک فنر برای میرا کردن تکان‌های ناشی از ورود ضربه است و چون این سیستم همیشه در یک وضعیت ثابت و بی‌ارتباط با وزن و شرایط خودرو عمل می‌کند، به آن غیرفعال می‌گویند. ساده‌ترین راه برای معرفی این سیستم در این است که این نوع تعلیق تنظیمات ندارد و بر اساس فشاری که به بخش‌های مختلف آن وارد می‌شود، تغییراتی می‌کند. مهم‌ترین ایراد این سیستم‌ها در این است که با توجه به فشار واردشده تغییر می‌کنند و این تغییر می‌تواند در کارکرد آنها و هندلینگ خودرو اثر منفی بگذارد. اما در عوض ساده بوده و هزینه‌های تعمیر و طراحی و نگهداری پایینی دارند.[۶-۱]

- سیستم تعلیق خودتنظیم‌شونده:

مهم‌ترین ویژگی موجود در این سیستم‌ها در این است که می‌توانند با کمک سنسورهایی که دارند، بر اساس فشاری که به آنها وارد می‌شود، ارتفاع خودرو را در یک حالت پایدار نگه دارند. ضمن اینکه در این سیستم‌ها راننده نیز می‌تواند اقدام به تنظیم ارتفاع خودرو کند. این سیستم در ابتدا با کمک نیرو و تجهیزات پنوماتیکی روی کار آمد و بعد از اینکه مشکلات این سیستم‌ها پدیدار شد، تعلیق‌های تنظیم‌شونده به سمت مدل‌های ترکیبی از هیدرولیک و پنوماتیک که هیدروپنوماتیک نام دارند، پیش رفت. سیستم‌های هیدروپنوماتیکی نیز قابلیت کنترل بیشتری دارند و هم دریافت و میرا شدن ضربات در آنها به نحو بهتری صورت می‌گیرد که منجر به افزایش لذت سواری و همچنین خوش فرمانی خودرو می‌شود. امروزه این سیستم در بسیاری از خودروهای لوکس شرکت‌های خودروسازی دیده می‌شود، این سیستم تعلیق به نام self-Leveling Suspension شناخته می‌شود.[۶-۱]

- سیستم تعلیق نیمه‌فعال:

این سیستم تعلیق نیز که نام آن Semi Active Suspension است، شبیه به نمونه‌های تنظیم‌شونده بوده با این تفاوت که امکان استفاده از پیش‌فرض‌هایی برای تنظیم سیستم تعلیق در آن مهیا شده است. به این معنی که راننده می‌تواند براساس خواست خود اقدام به انتخاب حالت‌های مختلف برنامه‌ریزی شده سیستم تعلیق کند تا به این صورت سفتی و نرمی کمک فنرها تنظیم شود. این سیستم امروزه در اکثر خودروهای سواری روز دنیا موجود است که منجر به یک سواری خوب منطبق با نیازهای راننده می‌شود. در این سیستم تعلیق نیز از کمک فنرهای هیدروپنوماتیک استفاده می‌شود که میزان فعالیت و نحوه کارکرد آنها توسط یک پردازشگر مرکزی کنترل خواهد شد. در این گونه خودروها، فعالیت سیستم تعلیق بر اساس اینکه روی چه میزان از رانندگی راحت یا رانندگی اسپرت تنظیم شده است، تغییر می‌کند و معمولا متناسب با آن، شدت و حساسیت عملکرد فرمان نیز دچار تغییراتی می‌شود تا حس اسپرتی رانندگی یا در مقابل آن حس یک رانندگی راحت بیشتر شبیه‌سازی و القا شود.[۶-۱]

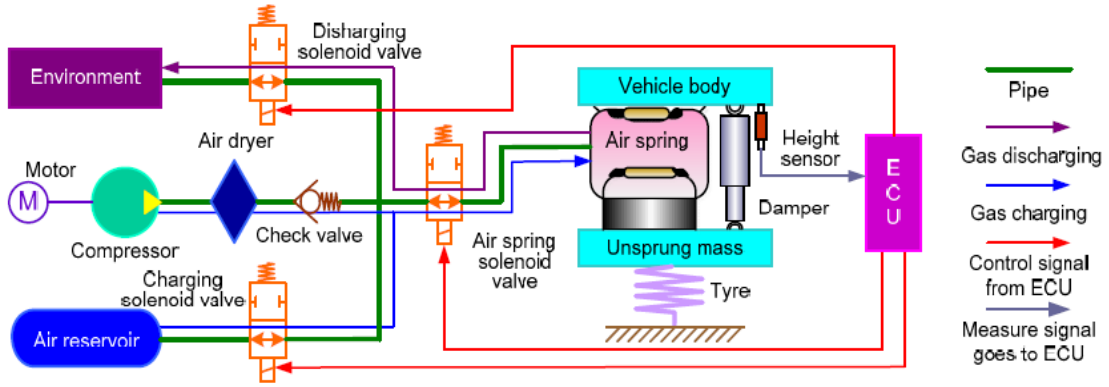
- سیستم تعلیق فعال:

در سیستم تعلیق فعال یاActive Suspension ، به طور مداوم نیروهایی که از بیرون به سیستم وارد می‌شوند، بررسی شده و براساس آنها به نحوی که کنترل و پایداری خودرو همیشه در وضعیت مطلوبی قرار داشته باشد، سیستم تنظیم می‌شود. به این معنی که حتی نحوه فعالیت و میزان سفتی یا نرمی یک کمک فنر از بین چندین کمک فنر خودرو می‌تواند متفاوت با بقیه باشد تا به این شکل سیستم تعلیق خودرو همیشه در حالتی فعال باقی بماند. در این سیستم که بسیار مدرن و پیشرفته است، نیروی عملگر همان نیروی هیدرولیکی است.[۷]

یکی از زیرشاخه های سیستم تعلیق نیمه فعال، تعلیق بادی می‌باشد. تعلیق بادی یک نوع از سیستم‌های تعلیق می‌باشد که توسط یک کمپرسور از طریق موتور الکتریکی یا احتراقی تغذیه می‌شود. کمپرسور، هوا را به سمت بالن‌های مرتجعی که معمولا از الیاف مقاوم پلاستیکی ساخته‌شده‌اند، هدایت می‌کند، فشار هوا باعث باد شدن این بالن‌ها می‌شود و می‌تواند بدنه را از روی محورها بلند کند. فنر بادی بجای فنر معمولی تعلیق در ماشین‌های سواری قرار می‌گیرد و همین‌طور به طور رایج در ماشین‌های سنگین، اتوبوس، کامیون، تریلر و قطار مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف تعلیق بادی تامین راحتی کیفیت سواری و تنظیم ارتفاع است.[۶-۱]

۲. تنظیم ارتفاع با استفاده از سیستم تعلیق بادی:

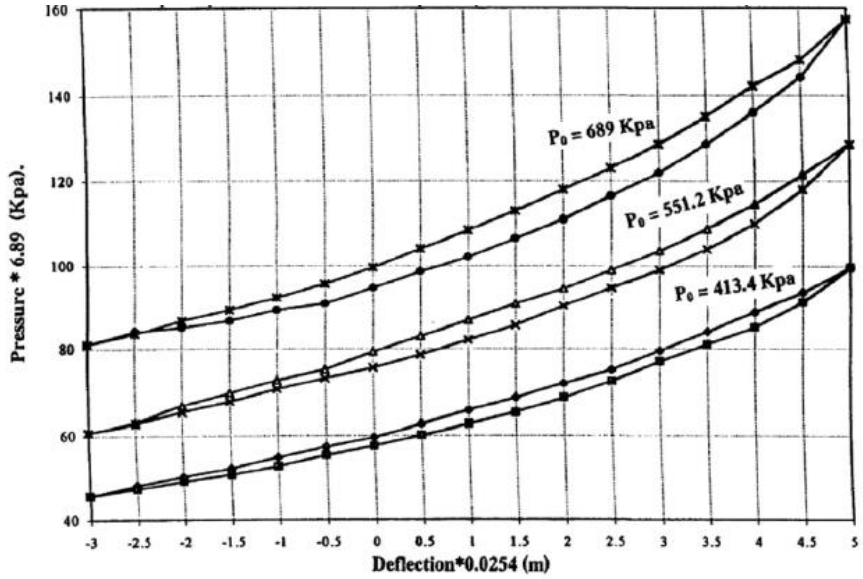
با توجه به شکل زیر، می‌بینید که یک موتور الکتریکی کمپرسور را به حرکت درمی‌آورد و کمپرسور، هوا را از درون یک فیلتر که رطوبت هوا را می‌گیرد عبور می‌دهد، سپس از شیر یکطرفه می‌گذرد این شیر نمی‌گذارد هوا به صورت وارونه وارد کمپرسور هوا شود. با توجه به باز و بسته بودن شیرهای سلونوئیدی که توسط مرکز کنترل خودرو فرمان می‌گیرند، هوا از طرف کمپرسور یا به‌طور مستقیم وارد فنر بادی می‌شود یا وارد مخزن هوا می‌شود و یا به هوای آزاد تخلیه می‌شود و این کاملا بستگی به شرایط باز و بسته بودن شیرهای سلونوئیدی دارد. یک سنسور ارتفاع روی بدنه قرار دارد تا ارتفاع بدنه تا زمین را محاسبه کند و این مقدار را به مرکز کنترل خودرو می‌دهد. مرکز کنترل خودرو سیگنال ورودی از سنسور ارتفاع را پردازش می‌کند و با باز و بسته کردن شیرها وضعیت خودرو را به حالت مطلوب می‌رساند.[۷]



شکل ۱. شمای کلی سیستم تعلیق بادی

۳. روابط حاکم برسیستم بادی:

آزمایشات انجام شده بر روی گاز محبوس شده در فنر رابطه بین فشار هوای داخل فنر و تغییر شکل فنر را در شکل زیر نمایش می‌دهد. در شکل زیر می‌توان به غیرخطی بودن سیستم پی‌برد، نه‌تنها این سیستم غیرخطی است بلکه تفاوت در مسیر فشرده شدن یا آزاد شدن آن فنر هم محسوس است، بنابراین این سیستم دارای هیسترزیس است.[۹]



شکل۲. نمودار تغییرات فشار برحسب تغییر طول فنر در فشارهای مختلف اولیه

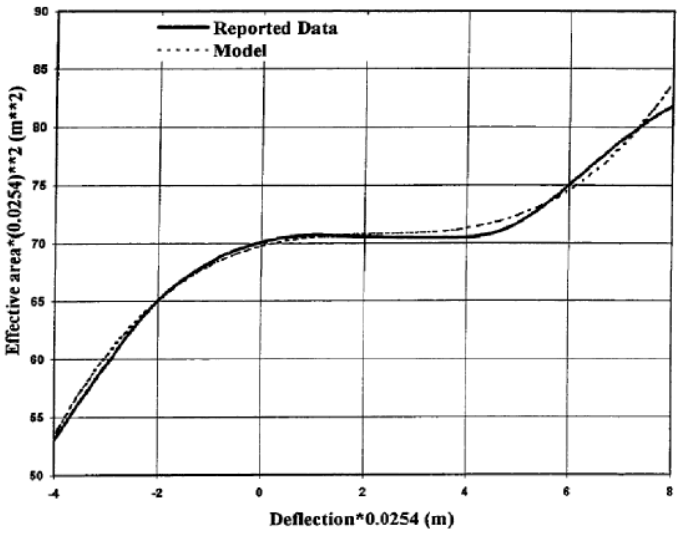
$$P(x,t) = \left[\frac{P_{\cdot}V_{\cdot}}{(V_{\cdot} - A_E(x)x(t))}\right] \quad (۱)$$

در فرمول بالا($P(x,t)$ فشار لحظه‌ای، $P_{\cdot}$ فشار اولیه گاز، $V_{\cdot}$ حجم اولیه گاز، A_E سطح مقطع موثر پیستون و x تغییر طول فنر است.

نیرو وارده از فنر بادی، حاصل‌ضرب فشار نسبی در سطح مقطع موثر است که در رابطه زیر می‌بینید.[۹]

$$F = (P - P_a)A_E \quad (۲)$$

جدول تغییرات سطح مقطع نسبت به تغییر طول آورده شده‌است که در شکل زیر می‌بینید.

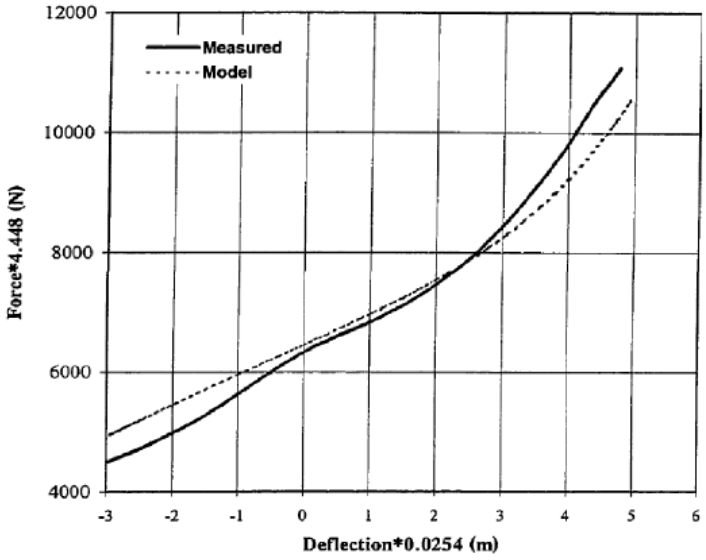


شکل۳. نمودار تغییرات سطح مقطع موثر برحسب تغییر طول فنر

فرمول زیر با استفاده از مطابقت چند جمله‌ای با داده های استخراج شده بدست آمده است.[۹]

$$A_E = ۰.۰۴۵ + ۰.۰۰۰۷۴۸ - ۰.۰۰۰۳x^2 + ۰.۰۰۰۰۴۳۷x^3 \quad (۳)$$

حاصل ضرب دو نمودار فشار و سطح مقطع موثر نمودار، نیرو فنر را شکل نشان می‌دهد که در شکل زیر آورده شده‌است.[۹]



شکل۴. نمودار تغییرات نیرو برحسب تغییر طول فنر

۴. روش تئوری:

در مدل تئوری، گاز مورد استفاده در فنرهای بادی از قانون پلی‌تروپیک پیروی می‌کند. فلذا فرمول‌های مربوط به فرآیند پلی‌تروپیک آورده شده است. این نوع مدل‌سازی، خطی می‌باشد. گازهایی در فرآیند پلی‌تروپیک عمل می‌کنند که نسبت انتقال گرما به کار روی آن سیستم ثابت باشد و می‌بایست ضریب پلی‌تروپیکی آن توسط آزمایش بدست بیاید. فرآیند آدیاباتیک فرآیندی است که ایزوله می‌باشد و به گرما اجازه خروج نمی‌دهد و یا بقدری سریع اتفاق می‌افتد که گرما فرصت انتقال را پیدا نمی‌کند. روابط حاکم بر روی فنر آورده شده‌است.[۱۰]

$$P_1 V_1^m = P_0 V_0^m \quad (۴)$$

$$F = (P_1 - P_a)A = \left[P_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^m - P_a\right] A \quad (۵)$$

$$K_0 = \frac{dF}{ds} = (P_1 - P_a)\frac{dA}{ds} + A\frac{dp_1}{ds} + \frac{A^2 m P_0}{V_0} \quad (۶)$$

که در آن P فشار گاز، V حجم گاز، m ضریب پلی‌تروپیک، A سطح مقطع موثر و P_a فشار هوا می‌باشد.

۵. روش کنترلی برای تنظیم ارتفاع

بعد از آن‌که روابط بین خواص ترمودینامیکی هوای داخل فنر و رفتار دینامیکی خودرو برقرار شده‌است نیاز است با تغییر خواص ترمودینامیکی فنر رفتار دینامیکی خودرو را کنترل کرد.

از جمله روش‌های کنترلی که برای تنظیم ارتفاع بکار می‌رود: روش حالت مد لغزشی، فازی، شبکه عصبی، پیش‌بین و غیره می‌باشد. در این مقاله مود کنترل استفاده شده است.

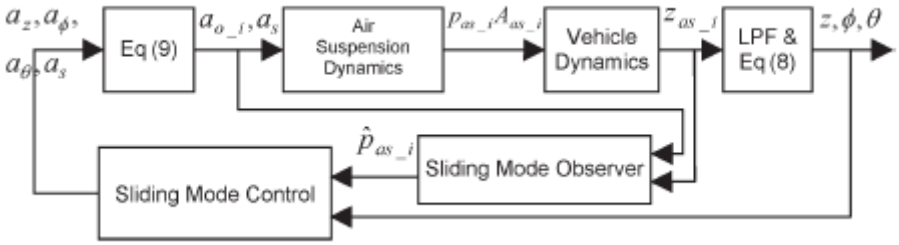
سیستم کنترلی تعلیق بادی با تغییر دادن ارتفاع بدنه در جهت خوش سواری و فرمان‌پذیری بهتر خودرو استفاده می‌شود، برای ایجاد حالت مطلوب برای راننده در هنگام رانندگی می‌بایست در شرایط مختلف ارتفاع خودرو را تغییر داد. به‌طور مثال اگر خودرو وارد یک محیط بیرون‌جاده‌ای شد ارتفاع آن زیاد شود یا اگر در اتوبان وارد شد و سرعت خودرو هم نیز زیاد بود برای حفظ تعادل بهتر خودرو ارتفاع نیز باید کم شود در جدول زیر می‌بینید که ارتفاع مطلوب را در هر حالتی شرح می‌دهد.[۱۱]

جدول۱. ارتفاع دلخواه محورها خودرو در حالت‌های متفاوت

حالت	ارتفاع محور جلو	ارتفاع محور عقب
عادی	۰ میلی‌متر	۰ میلی‌متر
اتوبان	۱۵- میلی‌متر	۱۵- میلی‌متر
بیرون‌جاده‌ای	۱۵+ میلی‌متر	۱۵+ میلی‌متر
هنگام بارگذاری	۰ میلی‌متر	۳۰- میلی‌متر
پارکینگ	۱۰- میلی‌متر	۱۰- میلی‌متر

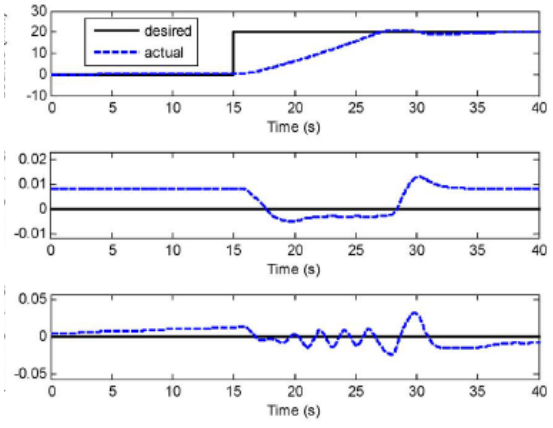
در نتیجه باید هنگام تغییر حالت‌های مذکور، ارتفاع خودرو را نیز تغییر داد. بنابراین چون نیروها در چهار طرف خودرو که فنرهای بادی قرار دارند متغیر می باشد. در هنگام تغییر ارتفاع، بدنه خودرو به موازات سطح افقی بالا یا پایین نمی‌رود و یک زاویه غلت و تاب نامطلوب می‌گیرد. بنابراین می بایست به یک حالت کنترل‌شده، فنرهای بادی را پر و خالی کرد که در این فرایند زاویه غلت و تاب نزدیک به صفر باشد. بنابراین یک روش الگوریتمی کنترلی به نام مد لغزشی طراحی شده‌است که می‌تواند بر شرایط غیرخطی بودن و عدم قطعیت سیستم غلبه کند. علاوه بر این الگوریتم، یک الگوریتم مجزا دیگری هم طراحی شده‌است که مقدار فشار هوا در هر سیلندر بادی را تخمین می‌زند. تغییر ارتفاع در دو حالت دستی و اتوماتیک انجام می‌شود. در سرعت‌های بالا برای حفظ پایداری بیشتر بایستی مرکز جرم را نزدیک به سطح زمین نگه‌داشت و علاوه بر حفظ

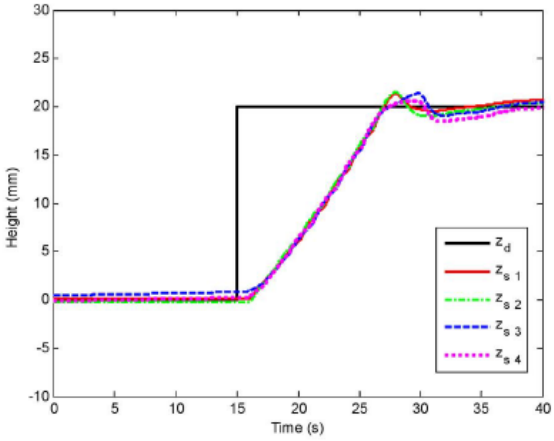
پایداری نیروی پسا را به حداقل خود می‌رساند و زمانیکه خودرو در مسیرهای خارج‌جاده‌ای در حرکت است نیاز به این است که ارتفاع خودرو زیاد شود که سطح جاده به زیر خودرو برخورد نکند. کیفیت سواری و فرمان‌پذیری رابطه عکس با یکدیگر دارند؛ بنابراین با تغییر ارتفاع یکی از مشخصه ها وضعیت بدتری و دیگری وضعیت بهتری پیدا می‌کند. بنابراین سیستم تعلیق فعال باید یک نقطه بهینه برای نگه داشتن دو وضعیت در حالت مطلوب پیدا کند. تغییر ارتفاع خودرو با تغییر طول فنرهای بادی امکان‌پذیر است. کنترل تنظیم ارتفاع به‌علت پیچیدگی رفتار سیال و غیرخطی بودن پارامتر های آن کار بسیار پیچیده‌ای می‌باشد فلذا الگوریتم کنترلی قدرتمندی می‌خواهد. الگوریتم کنترلی که پیشنهاد می‌شود، الگوریتم کنترلی مد لغزشی می باشد. شیرهای سلونوئیدی که در اینجا بکار رفته اند یا بطور کامل باز هستند یا کاملا بسته و حالت بینابین ندارند بنابراین میبایست از تکنیک مدولاسیون پهنای فازی استفاده کرد که رفتار دیجیتالی بودن آنها را به آنالوگ بودن تغییر می‌دهد. با سه پارامتر فرضی مساحت باز بودن شیرها را تعیین می‌کنیم. تغییر مساحت باز بودن شیرها با تکنیک مدولاسیون پهنای فازی امکان پذیر است. در شکل زیر بلوک کنترلی مربوطه را می‌بینید.[۱۲-۱۱]



شکل۵.. بلوک کنترلی مد لغزشی

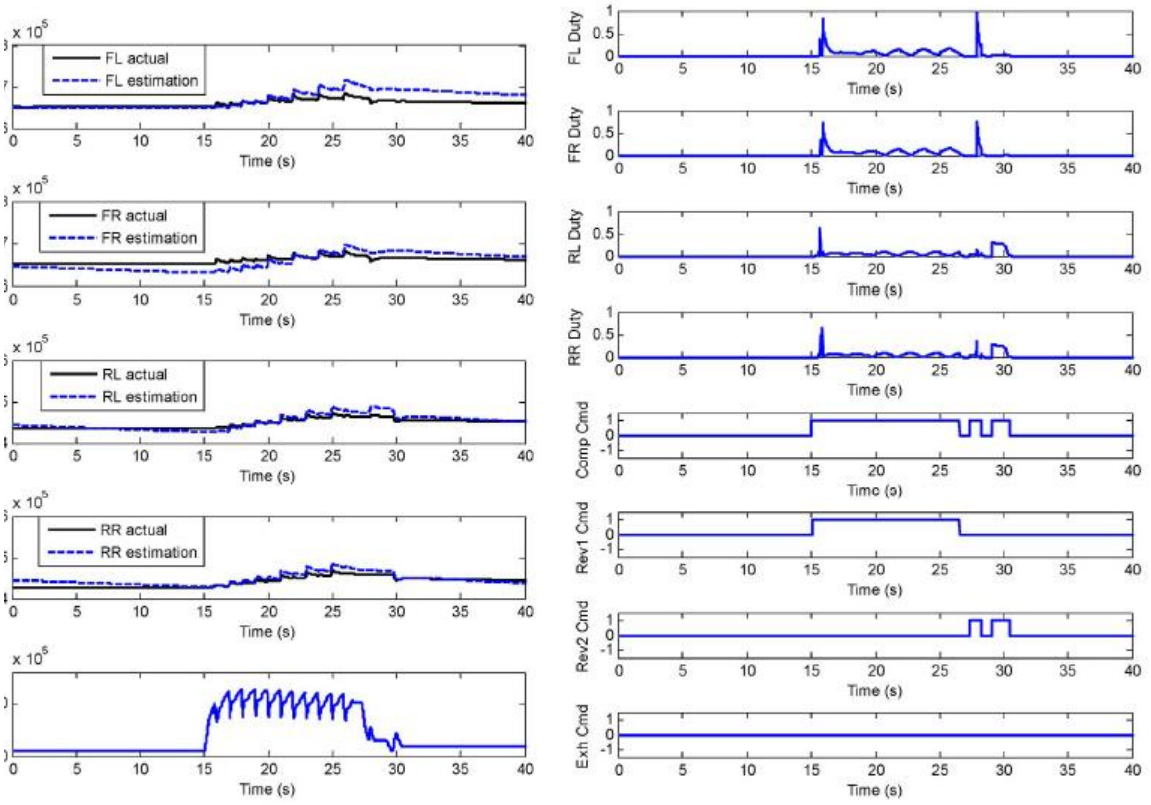
خروجی این بلوک کنترلی رفتار دینامیکی خودرو می‌باشد که بعد از تعیین یک سری مقادیر فرضی وارد بلوک شده و رفتار دینامیکی خودرو را کنترل می‌کند. در تصاویر آورده شده خواهید دید که در حین تغییر ارتفاع در زمان قابل قبول زاویه غلت و تاب بسیار کمی در خودرو ایجاد می شود و این کنترل در خودرو واقعی و در نرم افزار کارسیم آورده شده است و با هم مقایسه شده است.[۱۱]





شکل۶. نمودار غلت، تاب و ارتفاع خودرو برحسب زمان

افزایش ارتفاع از صفر به دو سانتیمتر در حدود ۲۶ ثانیه به طول می‌انجامد . اگر نگاهی به زاویه غلت و تاب بیاندازید خواهید دید این زوایا در حین افزایش ارتفاع، بسیار کوچک هستند و مطلوب می‌باشند. در شکل زیر نحوه فعال شدن عملگرها را می‌توان دید.[۱۱]



شکل۷. نمودار تغییرات فشار و فعال و غیرفعال شدن عملگرها

۶. نتیجه‌گیری

به‌طورکلی خودروهایی که دارای تنظیم ارتفاع می‌باشند از سیستم تعلیق بادی استفاده می‌کنند. نحوه عملکرد سیستم تعلیق بادی بحث شد و روابط ترمودینامیکی فنر به‌صورت تجربی و تئوری آورده شد. تغییر خواص ترمودینامیکی گاز داخل فنر باعث تغییر در میزان پارامترهای دینامیکی خودرو از قبیل تغییر ارتفاع، زاویه غلت و تاب می‌شود که این مرتبط با هندسه و مدل خودرو دارد. خودرو در حالت‌های مختلف ارتفاع خود را تنظیم می‌کند. شیرهای سلونئیدی بکار رفته در سیستم تعلیق به صورت دیجیتالی عمل می‌کنند. هم‌چنین فعال بودن تعلیق باعث می‌شود فنریت فنر بادی را نیز کنترل کند تا دامنه ارتعاشات را محدود کند. تاکنون سیستم‌های زیادی معرفی شدند که فعال می‌باشند و هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. در سیستم تعلیق بادی ارزان بودن یک مزیت به‌حساب می‌آید.

۷. مراجع

1. Iman, M., Esfahani, M., & Mosayebi, M. (2010). Optimization of Double Wishbone Suspension System with Variable Camber Angle by Hydraulic Mechanism. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 4
2.Yao, G. Z., Yap, F. F., Chen, G., Li, W. H., & Yeo, S. H. (2002). MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system. Mechatronics, 12(7), 963–973.
3.Fischer, D., & Isermann, R. (2004). Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. Control Engineering Practice, 12(11), 1353–1367.
4. Karnopp, D., Crosby, M. J., & Harwood, R. A. (1974). Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. Journal of Engineering for Industry, 96(2), 619.
5. Guo, D. L., Hu, H. Y., & Yi, J. Q. (2004). Neural Network Control for a Semi-Active Vehicle Suspension with a Magnetorheological Damper. Modal Analysis, 10(3), 461–471.
6.R. S. Sharp and D. A. Crolla, "Road vehicle suspension system design-a review," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 16, no. 3, pp. 167–192, 1987.
7.I. Martins, M. Esteves, F. P. Da Silva, and P. Verdelho, "Electromagnetic hybrid active-passive vehicle suspension system," in *Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th*, 1999, vol. 3, pp. 2273–2277.
8.X. Sun, L. Chen, S. Wang, and X. Xu, "Vehicle height control of electronic air suspension system based on mixed logical dynamical modelling," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 58, no. 11, pp. 1894–1904, 2015.
9.Z. Xie, P. K. Wong, J. Zhao, T. Xu, K. I. Wong, and H. C. Wong, "A noise-insensitive semi-active air suspension for heavy-duty vehicles with an integrated fuzzy-wheelbase preview control," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, 2013.
10.I. Jang, H. Kim, H. Lee, and S. Han, "Height control and failsafe algorithm for closed loop air suspension control system," in *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS'07. International Conference on*, 2007, pp. 373–378.
11.H. Kim and H. Lee, "Height and leveling control of automotive air suspension system using sliding mode approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 2027–2041, 2011.
12. Fischer, D. and Isermann, R., 2004. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. Control engineering practice, 12(11), pp.1353-1367.