

## روش‌های تنظیم ارتفاع خودرو با استفاده از تعلیق بادی

مسعود مسیح طهرانی\*

استادیار  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
masih@iust.ac.ir

حسین ناظمیان

دانشجوی کارشناسی ارشد  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
h.nazemian1995@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹

## چکیده

تنظیم ارتفاع در وسایل نقلیه سبک و سنگین برای اهدافی از قبیل بهبود کیفیت سواری، افزایش پایداری، جلوگیری از برخورد کف خودرو به زمین، کاهش نیروی پسا و غیره به کار گرفته می‌شود. در این مقاله، سیستم تعلیقی که وظیفه تغییر ارتفاع خودرو را برعهده دارد از نوع بادی است. در تعلیق بادی به جای فنر مارپیچ از بالشتک‌های بادی استفاده می‌شود. در ادامه دو مدل تجربی و تئوری آورده شده که خواص ترمودینامیکی گاز داخل فنر را مدل‌سازی می‌کند و سپس به مدل‌سازی دینامیکی خودرو پرداخته می‌شود. با معرفی کنترل‌کننده مد لغزشی می‌توان به صحت عملکرد این کنترل‌کننده پی‌برد. زیرا با استفاده از این کنترل‌کننده و شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزارهای متلب سیمولینک و کارسیم<sup>۱</sup> می‌توان متوجه شد که تغییر ارتفاع خودروها در حالت تراز انجام می‌شود. در تنظیم ارتفاع به علت وجود بارهای نامتوازن بر روی فنرهای بادی باعث می‌شود خودرو نتواند موقع تغییر ارتفاع در حالت تراز بماند. برای حل این مشکل شیرهای سلونوئیدی در هر فنر به صورت 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 گرفته است؛ می‌توان متوجه شد که الگوریتم کنترلی مد لغزشی می‌تواند این تغییر ارتفاع را کنترل کند و خودرو در حالت تراز باقی بماند.

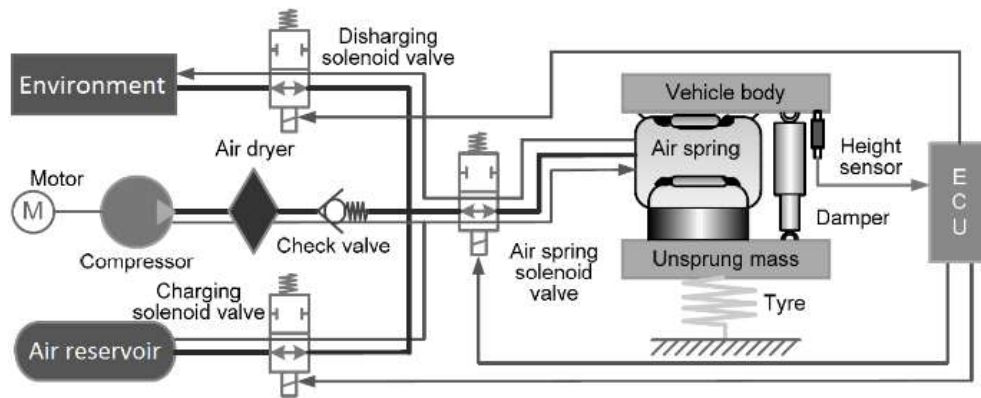
**واژگان کلیدی:** تعلیق بادی، کنترل‌کننده مد لغزشی، تنظیم ارتفاع، دینامیک خودرو، روش‌های کنترلی، کنترل‌کننده فازی

## ۱. مقدمه

فربندی شده، فنر، کمک فنر و جرم فنر بندی نشده<sup>۵</sup> تشکیل شده است. سیستم تعلیق خودرو دو وظیفه مهم را بر عهده دارد که یکی جذب نوسانات و ارتعاشات وارد به چرخ‌ها بر اثر ناهمواری‌های جاده و دیگری تماس مؤثر لاستیک چرخ‌ها با سطح جاده است.

سیستم تعلیق<sup>۲</sup> یا فربندی، قسمتی از خودرو است که باعث می‌شود نوسانات حاصل از حرکت خودرو بر روی سطوح ناهموار به جرم معلق<sup>۳</sup> که شامل اتاق، شاسی<sup>۴</sup>، متعلقات و سرنشینان است؛ وارد نشود. سیستم تعلیق از جرم

**۲. تنظیم ارتفاع با استفاده از سیستم تعلیق بادی**  
 با توجه به شکل ۱، می‌بینید که یک موتور الکتریکی، کمپرسور<sup>۱۰</sup> را به حرکت درمی‌آورد و کمپرسور، هوا را از درون یک فیلتر که رطوبت هوا را می‌گیرد عبور می‌دهد. سپس از شیر یک‌طرفه<sup>۱۱</sup> می‌گذرد. این شیر نمی‌گذارد هوا به صورت برعکس وارد کمپرسور هوا شود. با توجه به باز و بسته بودن شیرهای سلونوئیدی<sup>۱۲</sup> که توسط مرکز کنترل خودرو فرمان می‌گیرند، هوا از طرف کمپرسور یا به‌طور مستقیم وارد فنر بادی و یا وارد مخزن هوا می‌شود و یا به هوای آزاد تخلیه می‌شود و این کاملاً 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<sup>۱۳</sup> 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 [۴].



شکل ۱. شمای کلی سیستم تعلیق بادی [۵]

در سیستم تعلیق خودرو همیشه دو مقوله مورد بحث بوده است: یکی کیفیت سواری دادن<sup>۶</sup> و دیگری قابلیت هدایت و کنترل<sup>۷</sup>، که این دو مرتباً در تضاد با یکدیگرند. به عبارت دیگر، بهبود یکی باعث بروز اشکال در دیگری می‌شود. تغییر ارتفاع در خودروهای سنگین به‌طور فزاینده وجود دارد ولی اکثر این خودروها از سیستم تعلیق غیرفعال<sup>۸</sup> برخوردارند [۱].

امروزه در خودروهای لوکس سواری برای بهبود کیفیت سواری، افزایش پایداری، جلوگیری از برخورد کف خودرو به زمین و کاهش نیروی پسا<sup>۹</sup> از مکانیزم تغییر ارتفاع استفاده می‌کنند. تغییر ارتفاع با استفاده از سیستم تعلیق انجام می‌شود. از جمله سیستم‌های تعلیقی که وظیفه تغییر ارتفاع را دارند، سیستم تعلیق بادی [۲] و هیدرولیکی [۳] است. در این مقاله تمرکز بر روی تغییر ارتفاع با استفاده از سیستم تعلیق بادی فعال است.

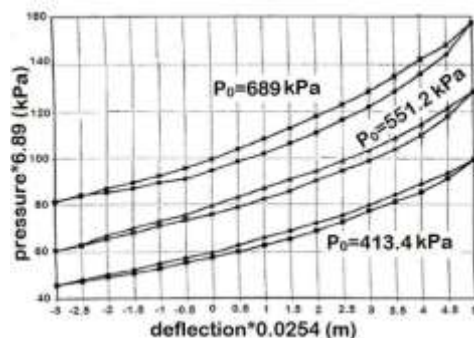
### ۳. روابط حاکم بر فنر بادی

برای کنترل کردن پارامترهای مربوط به دینامیک خودرو، به روابط حاکم بر فنر بادی احتیاج است. زیرا پر و خالی شدن فنر بادی باعث می‌شود رفتار دینامیکی خودرو شکل بگیرد. در ادامه روابط تجربی و تئوری برای بیان رفتار گاز درون فنر بادی آورده شده است.

### ۳-۱. روابط تجربی

آزمایشات انجام شده بر روی گاز محبوس شده در فنر رابطه بین فشار هوای داخل فنر و تغییر شکل فنر را در شکل ۲ نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۲ می‌توان به غیرخطی بودن سیستم پی برد. نه تنها این سیستم غیرخطی است بلکه تفاوت در مسیر فشرده شدن یا آزاد

شدن آن فنر هم محسوس است. بنابراین این سیستم دارای هیستریزیس<sup>۱۴</sup> است.



شکل ۲. نمودار تغییرات فشار برحسب تغییر طول فنر در فشارهای

مختلف اولیه [۶]

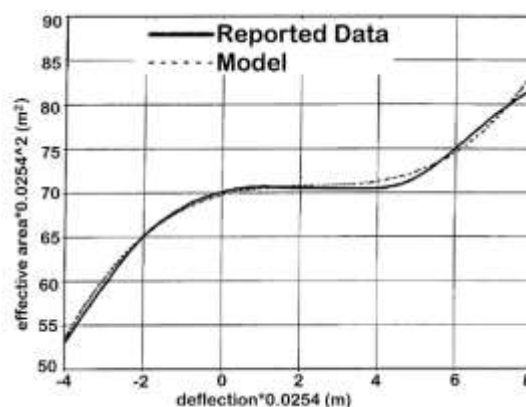
$$P(x, t) = \left[ \frac{P_0 V_0}{(V_0 - A_E(x)x(t))} \right] \quad (۱)$$

در فرمول ۱ فشار لحظه‌ای،  $P_0$  فشار اولیه گاز،  $V_0$  حجم اولیه گاز،  $A_E$  سطح مقطع مؤثر پیستون و  $x$  تغییر طول فنر است.

نیرو وارده از فنر بادی، حاصل ضرب فشار نسبی در سطح مقطع مؤثر است که در رابطه ۲ می‌بینید.

$$F = (P - P_a)A_E \quad (۲)$$

تغییرات سطح مقطع نسبت به تغییر طول آورده شده است که در شکل ۳ می‌بینید [۶].



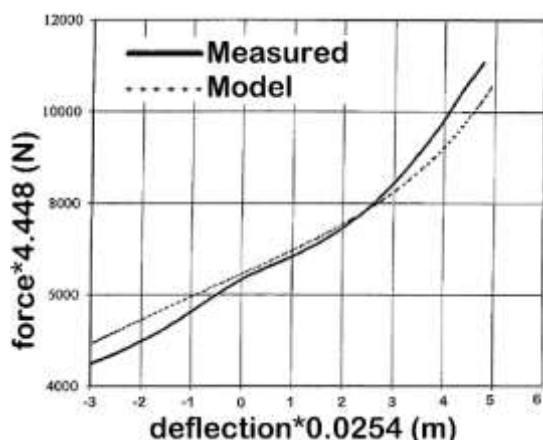
شکل ۳. نمودار تغییرات سطح مقطع مؤثر برحسب تغییر طول

فنر [۶]

فرمول ۳ با استفاده از مطابقت چندجمله‌ای<sup>۱۵</sup> با داده‌های استخراج شده به دست آمده است.

$$A_E = 0.045 + 0.000748x - 0.0003x^2 + 0.0000437x^3 \quad (۳)$$

حاصل ضرب دو نمودار فشار و سطح مقطع مؤثر نمودار، نیرو فنر را شکل می‌دهد که در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. نمودار تغییرات نیرو برحسب تغییر طول فنر [۶]

### ۲-۳. روابط تئوری

در مدل تئوری، گاز مورد استفاده در فنرهای بادی از قانون پلی‌تروپیک پیروی می‌کند. در نتیجه فرمول‌های مربوط به فرایند پلی‌تروپیک آورده شده است. این نوع مدل‌سازی، خطی است [۵]. گازهایی در فرایند پلی‌تروپیک<sup>۱۶</sup> عمل می‌کنند که نسبت انتقال گرما به کار روی آن سیستم ثابت است [۷]. فرایند آدیاباتیکی<sup>۱۷</sup> فرایندی است که ایزوله است و به گرما اجازه خروج نمی‌دهد و یا به قدری سریع اتفاق می‌افتد که گرما فرصت انتقال را پیدا نمی‌کند [۸]. روابط حاکم بر روی فنر در ذیل آورده شده است [۹].

$$P_1 V_1^m = P_0 V_0^m \quad (۴)$$

حاصل ضرب فشار نسبی در سطح مقطع فنر به دست می‌آید. با مشتق‌گیری رابطه ۵ نسبت به جابه‌جایی، سختی فنر در رابطه ۶ به دست می‌آید.

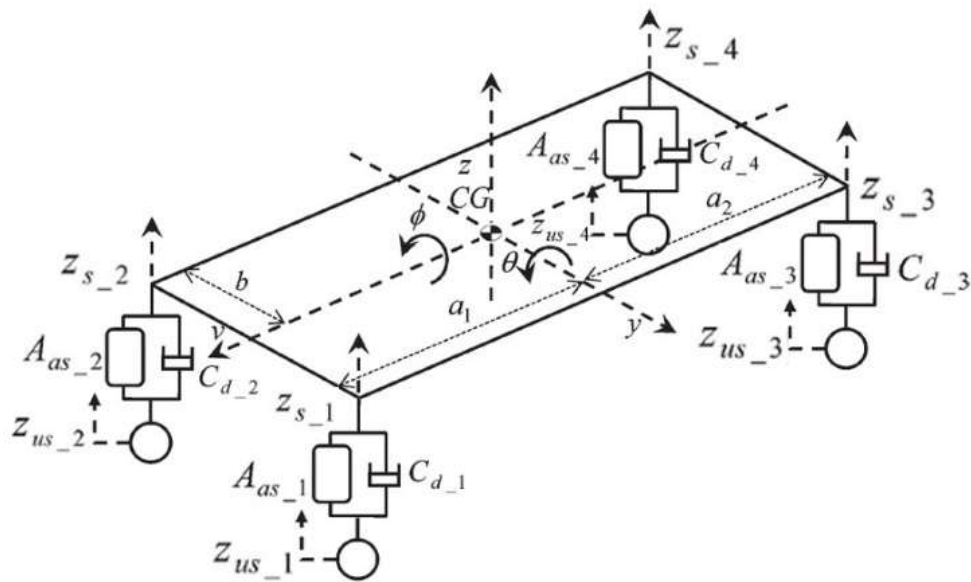
#### ۴. روابط حاکم بر دینامیک خودرو

برای کنترل کردن رفتار دینامیکی خودرو نیاز به داشتن روابط حاکم بر دیاگرام آزاد خودرو است. روابط دینامیکی خودرو بستگی به مدل ساده شده خودرو دارد. در مقالات مختلف از مدل‌های ساده شده مختلفی استفاده می‌شود [۱۰]. یکی از مدل‌های ساده شده را در شکل ۵ می‌بینید.

$$F = (P_1 - P_a)A = \left[ P_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^m - P_a \right] A \quad (5)$$

$$K_0 = (P_1 - P_a) \frac{dA}{ds} + A \frac{dp_1}{ds} + \frac{A_0^2 m P_0}{V_0} \quad (6)$$

که در آن  $P$  فشار گاز،  $V$  حجم گاز،  $m$  ضریب پلی‌تروپیک،  $A$  سطح مقطع مؤثر،  $P_a$  فشار هوا و  $K_0$  سختی فنر است. در رابطه ۴ وضعیت فشار با توجه به تغییرات حجم مشخص می‌شود که ضریب پلی‌تروپیک هم در آن دخیل است در رابطه ۵ نیروی فنر است که از



شکل ۵. دیاگرام آزاد خودرو مدل صفحه‌ای [۲]

روابط نیوتونی برای دیاگرام آزاد شکل ۵ در ادامه آورده شده است.

$$\ddot{z} = \frac{1}{M_s} [p_{as_1} A_{as_1} + p_{as_2} A_{as_2} + p_{as_3} A_{as_3} + p_{as_4} A_{as_4} - C_{d_1} \dot{z}_{as_1} - C_{d_2} \dot{z}_{as_2} - C_{d_3} \dot{z}_{as_3} - C_{d_4} \dot{z}_{as_4} - M_s g] \quad (7)$$

### ۵. روش کنترلی مد لغزشی برای تنظیم ارتفاع

بعد از آن که روابط بین خواص ترمودینامیکی هوای داخل فنر و رفتار دینامیکی خودرو برقرار شد، نیاز است با تغییر خواص ترمودینامیکی فنر، رفتار دینامیکی خودرو را کنترل کرد.

از جمله روش‌های کنترلی که برای تنظیم ارتفاع به کار می‌رود: روش مد لغزشی<sup>۱۸</sup> [۲]، فازی<sup>۱۹</sup> [۱۱]، شبکه عصبی<sup>۲۰</sup> [۱۲]، پیش‌بین<sup>۲۱</sup> [۱۳]، مقاوم<sup>۲۲</sup> [۱۴]، اچ بی‌نهایت<sup>۲۳</sup> [۱۵]، هیبریدی<sup>۲۴</sup> [۱۶]، اسکای‌هوک<sup>۲۵</sup> [۱۷] و غیره است. در این مقاله در مورد کنترل مد لغزشی به صورت مفصل‌تر صحبت 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 [۲۰-۱۸]. به‌طور مثال اگر خودرو وارد یک محیط بیرون جاده‌ای شد ارتفاع آن زیاد شود یا اگر در اتوبان وارد شد و سرعت خودرو نیز زیاد بود برای حفظ تعادل بهتر خودرو ارتفاع نیز باید کم شود در جدول ۱ می‌بینید که ارتفاع مطلوب را در هر حالتی شرح می‌دهد [۲].

جدول ۱. ارتفاع دلخواه محورهای خودرو در حالت‌های متفاوت

[۲]

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

در نتیجه باید هنگام تغییر حالت‌های مذکور، ارتفاع خودرو را هم تغییر داد. بنابراین چون نیروها در چهار طرف خودرو

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{I_v} [bp_{as_1}A_{as_1} - bp_{as_2}A_{as_2} + bp_{as_3}A_{as_3} - bp_{as_4}A_{as_4} - bC_{d_1}\dot{z}_{as_1} + bC_{d_2}\dot{z}_{as_2} - bC_{d_3}\dot{z}_{as_3} + bC_{d_4}\dot{z}_{as_4}] \quad (۸)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I_y} [-a_1p_{as_1}A_{as_1} - a_1p_{as_2}A_{as_2} + a_2p_{as_3}A_{as_3} + a_2p_{as_4}A_{as_4} + a_1C_{d_1}\dot{z}_{as_1} + a_1C_{d_2}\dot{z}_{as_2} - a_2C_{d_3}\dot{z}_{as_3} - a_2C_{d_4}\dot{z}_{as_4}] \quad (۹)$$

که  $I$  ممان اینرسی،  $M_s$  جرم فنربندی شده،  $\theta$  زاویه تاب،  $\phi$  زاویه غلت،  $p_{as_i}$  فشار درون هر فنر،  $A_{as_i}$  سطح مقطع مؤثر هر فنر،  $Z_{as_i}$  تغییرات طول هر فنر و  $a_1$ ،  $a_2$  و  $b$  ابعاد هندسی مدل خودرو است که در شکل ۵ معین شده است. رابطه ۷ با نوشتن قانون دوم نیوتون در راستای عمودی به‌دست می‌آید و در رابطه ۸ و ۹ گشتاورهای ایجاد شده حول محور غلت و تاب خودرو آورده شده است که نرخ سرعت زاویه‌ای تاب و غلت را معلوم می‌کند. در نتیجه خروجی سیستم به صورت غلت، تاب و جهش خواهد بود که تمام این خروجی‌ها به یکسری پارامترهای ثابت مانند خواص هندسی خودرو و جرم خودرو و پارامترهای متغیری مانند فشار داخل فنر بادی، ضرایب استهلاک و سطح مقطع مؤثر بستگی دارد. در این مقاله در مورد کنترل فشار هوای داخل فنرهای بادی اشاره شده است که می‌توان خروجی‌ها را کنترل کرد [۲].

که فنرهای بادی قرار دارند متغیر هستند. در هنگام تغییر ارتفاع، بدنه خودرو به موازات سطح افقی بالا یا پایین نمی‌رود و یک زاویه غلت<sup>۲۶</sup> و تاب<sup>۲۷</sup> نامطلوب می‌گیرد. بنابراین می‌بایست به یک حالت کنترل شده، فنرهای بادی را پر و خالی کرد که در این فرایند زاویه غلت و تاب نزدیک به صفر شود.

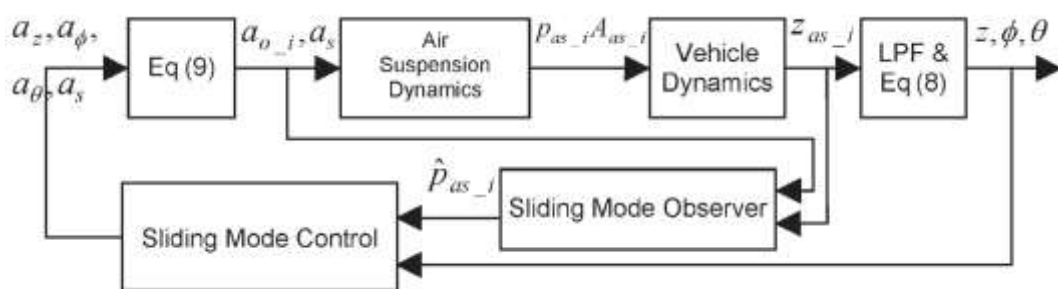
بنابراین یک روش الگوریتمی کنترلی به نام مد لغزشی طراحی شده است که می‌تواند بر شرایط غیرخطی بودن<sup>۲۸</sup> و عدم قطعیت<sup>۲۹</sup> سیستم غلبه کند. علاوه بر این الگوریتم، یک الگوریتم مجزا دیگری هم طراحی شد که مقدار فشار هوا در هر سیلندر بادی را تخمین می‌زند.

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 نگه داشت و علاوه بر حفظ پایداری، نیروی پسا را به حداقل خود می‌رساند و زمانی که خودرو در مسیرهای خارج جاده‌ای 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 مشخصه‌ها 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.

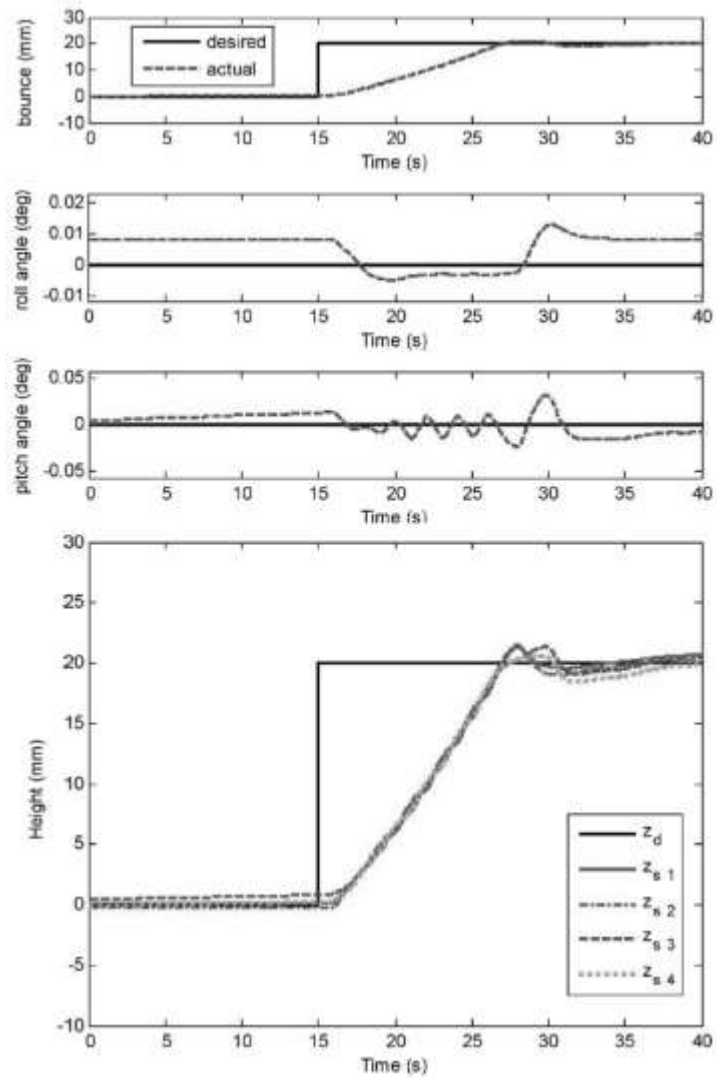
تغییر ارتفاع خودرو با تغییر طول فنرهای بادی امکان‌پذیر است. کنترل تنظیم ارتفاع به علت پیچیدگی رفتار سیال و غیرخطی بودن پارامترهای آن کار بسیار پیچیده‌ای است. در نتیجه به الگوریتم کنترلی قدرتمندی نیازمند است. الگوریتم کنترلی که پیشنهاد می‌شود، الگوریتم کنترلی مد لغزشی است.

شیرهای سلونوئیدی که در اینجا به کار رفته‌اند یا به طور کامل باز هستند یا کاملاً بسته و حالت بینابین ندارند بنابراین می‌بایست از تکنیک مدولاسیون پهنای فازی<sup>۳۰</sup> استفاده کرد که رفتار دیجیتالی بودن آنها را به آنالوگ بودن تغییر می‌دهد. با سه پارامتر فرضی مساحت باز بودن شیرها تعیین می‌شود. تغییر مساحت باز بودن شیرها با تکنیک مدولاسیون پهنای فازی امکان‌پذیر است [۲]. در شکل ۶ بلوک کنترلی مربوطه را می‌بینید.

خروجی این بلوک کنترلی رفتار دینامیکی خودرو است 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 می‌شود و این کنترل در نرم‌افزار کارسیم آورده شده است [۲].

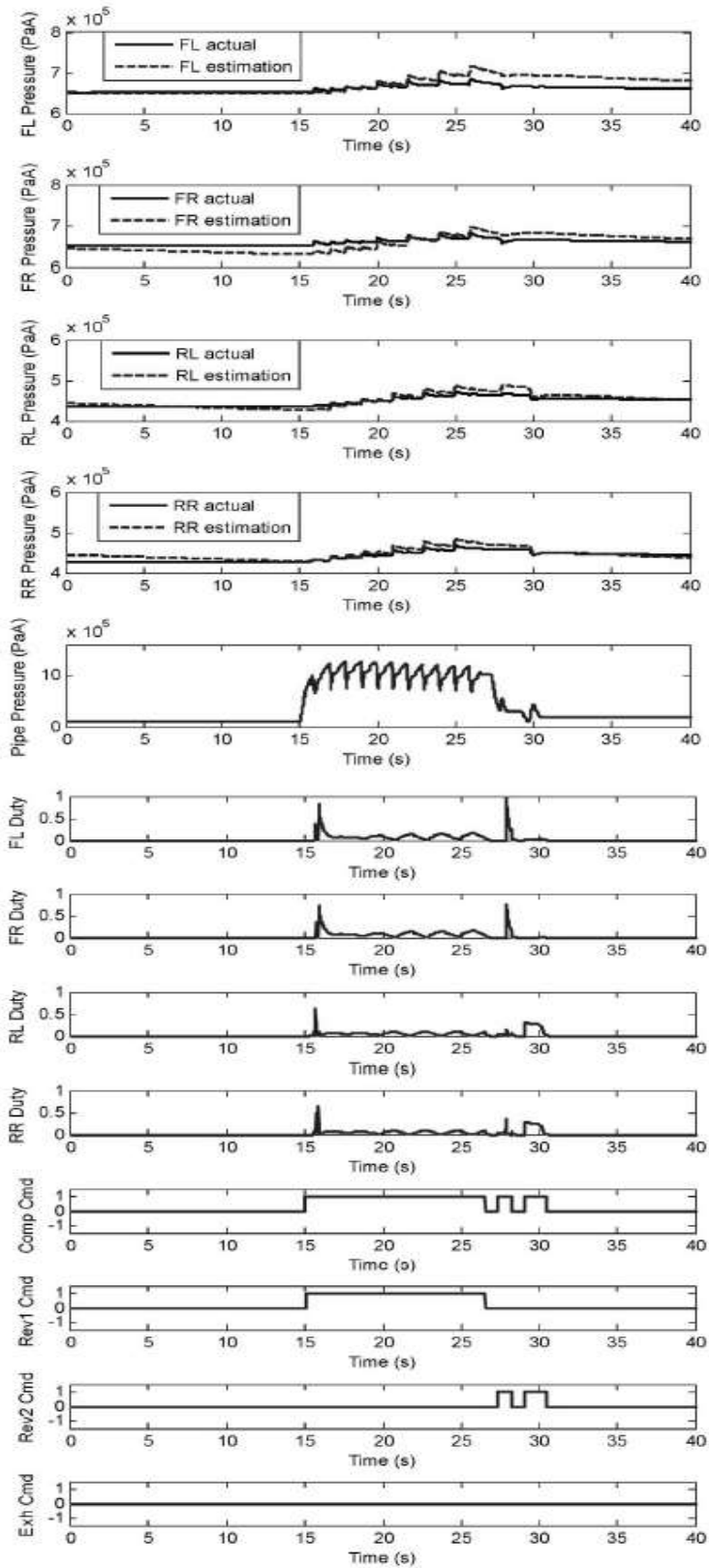


شکل ۶. بلوک کنترلی مد لغزشی [۲]



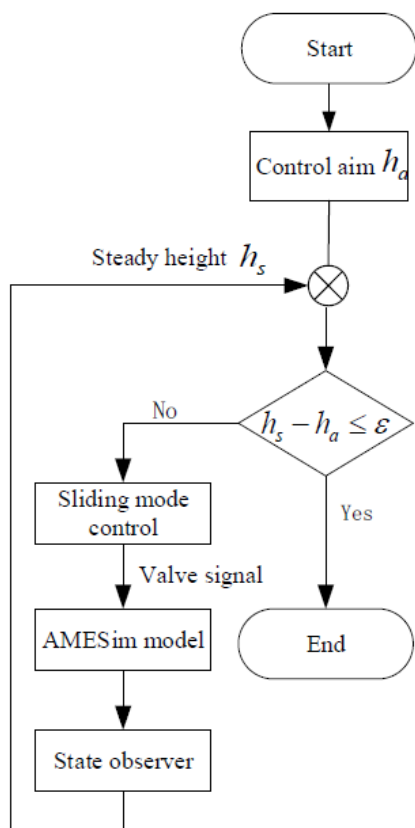
شکل ۷. نمودار غلت، تاب و ارتفاع خودرو بر حسب زمان [۲]

اگر نگاهی به زاویه غلت و تاب در شکل ۷ بیاندازید خواهید دید این زوایا در حین افزایش ارتفاع، بسیار کوچک و مطلوب هستند. در شکل ۸ نحوه فعال شدن عملگرها را می‌توان دید [۲].



شکل ۸. نمودار تغییرات فشار و فعال و غیرفعال شدن عملگرها [۲]





شکل ۹. فلوچارت حل مسأله توسط فیلتر کالمن [۴]

در شکل ۹ ابتدا مقدار دلخواه ارتفاع مشخص می‌گردد، سپس با مقدار فعلی ارتفاع سنجیده می‌شود، اگر اختلاف این دو از یک حد بسیار کوچک، بیشتر بود عملگر به کار گرفته می‌شود و اندازه دلخواه را تنظیم می‌کند. مقدار سطح باز شدن شیر سلونوئید می‌بایست با کنترل کننده مد لغزشی کنترل شود. سپس با ورود به محیط سیستم و سپس نظاره کردن رفتار سیستم توسط فیلتر کالمن نظاره‌گر خطاهای وارده را اصلاح می‌کند. پی بردن به صحت عملکرد این روش را می‌توان از شکل ۱۰ متوجه شد.

## ۶. روش کنترلی مد لغزشی فازی برای تنظیم ارتفاع

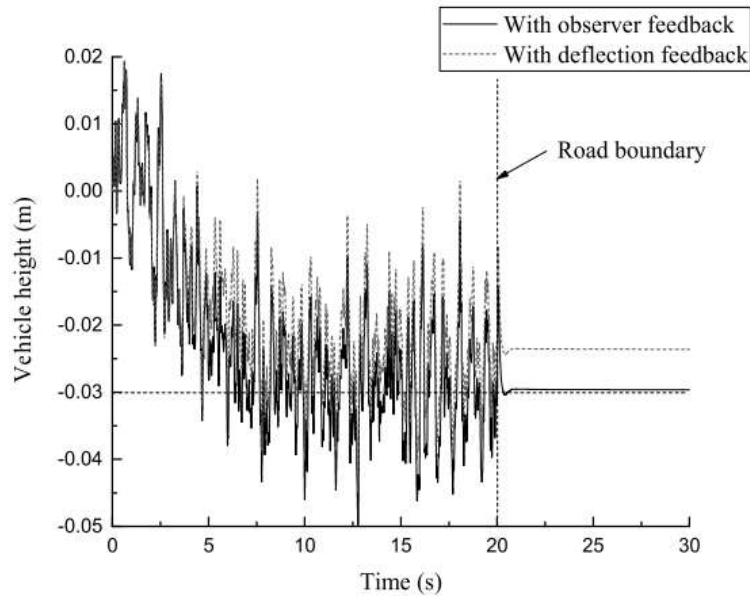
یک قدم پیشرفته‌تر از کنترل کننده مد لغزشی، کنترل کننده مد لغزشی فازی<sup>۳۱</sup> است که رفتار مطلوب دینامیکی خودرو را تضمین می‌کند. تشابهی که با روش کنترلی قبل دارد در کنترل کردن دبی جرمی هوا برای داخل شدن به فنر بادی است. در روش مد لغزشی، چترینگ<sup>۳۲</sup> وجود دارد که مطلوب نیست. با اضافه کردن روش فازی بر روی مد لغزشی چترینگ تا حد زیادی رفع می‌شود [۲۱-۲۳]. چترینگ زمانی اتفاق می‌افتد که در یک دینامیک سریع، بعضی پارامترها مدل نشده‌اند و این پارامترها باعث ایجاد فرکانس‌های مزاحم در پاسخ سیستم می‌شوند [۲۴].

## ۷. روش کنترلی شبکه عصبی برای تنظیم ارتفاع

این روش کنترلی در سال ۲۰۱۷ برای کنترل ارتفاع پیشنهاد شده است. در سیستم تعلیق با داشتن ضریب سختی می‌توان رفتار خودرو را کنترل کرد، اما ضریب سختی فنر بادی غیرخطی است و عدم قطعیت دارد بنابراین نیاز به یک کنترل پیشرفته است که بتواند خواص گاز را در همان لحظه حدس بزند. بنابراین روش شبکه عصبی پیشنهاد می‌گردد [۱۲].

## ۸. روش کنترلی فیلتر کالمن برای تنظیم ارتفاع

این روش کنترلی برای جاده‌های بد کیفیت به خوبی جواب می‌دهد و هدف از استفاده این کنترل کننده، ثابت نگه داشتن ارتفاع خودرو در تحریک‌های مختلف از سوی جاده است. در زیر فلوچارت حل مسأله توسط فیلتر کالمن<sup>۳۳</sup> را می‌بینید [۵].



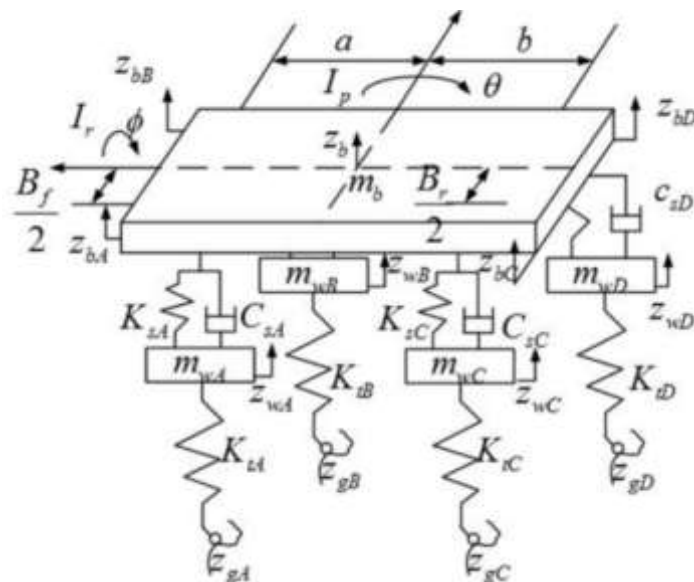
شکل ۱۰. بررسی عملکرد فیلتر کالمن نظاره گر [۴]

مشابه جهش و تاب و مدل یک چهارم خودرو استفاده کرد به این دلیل که زاویه غلت در آن مدل معین نمی‌شود. بنابر کار پیشنهادی که تنظیم زاویه غلت است بهتر است از مدل صفحه‌ای خودرو استفاده کرد. مدل صفحه‌ای خودرو را در شکل ۵ می‌توان دید. اگر مدل صفحه‌ای با در نظر گرفتن تحرکات اجسام غیرمعلق مد نظر است می‌توان از مدل دینامیکی شکل ۱۱ کمک گرفت.

در شکل ۱۰ می‌توان متوجه شد که عدم استفاده از فیلتر کالمن نظاره گر، یک مقدار اختلاف در رسیدن به مقدار مرجع دارد.

## ۹. مدل و کنترل کننده پیشنهادی

بنابر کاربردی که از سیستم انتظار می‌رود؛ می‌توان مدل مناسبی را انتخاب کرد. مثلاً اگر کنترل زاویه غلت مطرح است بنابراین برای کنترل زاویه غلت نمی‌توان از مدل‌های



شکل ۱۱. مدل صفحه‌ای با در نظر گرفتن تحرکات اجسام غیرمعلق [۲۵]

در مدل‌های سیالاتی، گاز به صورت کامل فرض شده است و در فرایند پلی‌تروپیک قرار دارد و بر همین اساس یکسری رابطه‌ها برای دبی جرمی آورده شده است. مسیر اول بین هوای آزاد و مخزن است که از کمپرسور می‌گذرد و نیاز به استخراج روابط ترمودینامیکی در هنگام عبور از کمپرسور است. یک مسیر دیگر بین مخزن و لوله میانی است که در روابط سیالاتی آورده شده است و در نهایت مسیر بین لوله میانی و فنر بادی که فرایند آن قسمت را آدیاباتیک در نظر می‌گیرند وجود دارد. دلیل آدیاباتیک بودن آن هم به علت واکنش سریع فنر در باد شدن و خالی شدن است. با داشتن روابط حاکم بر گاز و دینامیک خودرو در بخش تعلیق می‌توان برای ایجاد زاویه غلت فرکانس باز و بسته شدن شیرهای سلونوئید را محاسبه کرد تا زاویه غلت مطلوب را ایجاد کند.

با بررسی روش‌های کنترلی فوق می‌توان متوجه شد هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند. به‌طور مثال روش کنترلی پیش‌بین نیاز به سنسورهای گران قیمت دارد و خطای آن زیاد است ولی اگر این دو مشکل را نداشت می‌توانست یکی از روش‌های کنترلی مناسب انتخاب شود. زیرا قادر بود قبل از ورود اغتشاش به سیستم آنها را شناسایی کند. بنابراین این روش کنترلی می‌تواند بهتر شود و این بستگی به قدرتمند شدن سنسورها دارد. از این بابت که هنوز نمی‌توان به صورت مؤثر از روش کنترلی پیش‌بین استفاده کرد بهتر است روش‌های دیگر را جایگزین کرد. البته باید متذکر شد این روش مخصوص کنترل ارتعاشات در هنگام گذر از یک سطح ناهموار است ولی اگر بخواهیم ارتفاع را کنترل کنیم؛ روش‌های دیگری نیاز است. برای تنظیم ارتفاع ابتدا سنسورهای فاصله‌سنج فاصله‌های بین جرم معلق، غیرمعلق و زمین را اندازه‌گیری می‌کنند و سپس از طریق ورودی‌های جاده یا راننده فاصله خودرو تا زمین را تنظیم می‌کنند. کاربردی که سیستم

تعلیق دارد فقط کنترل ارتعاشات نیست؛ بلکه می‌تواند بدنه خودرو را هم برای مقاصد خاصی به صورت عمودی جابه‌جا کند. با بررسی خروجی‌هایی که در روش‌های کنترلی به‌دست آمد روش کنترلی مد لغزشی فازی عملکرد بهتری داشته است و تاکنون نیز این روش در خیلی از سیستم‌ها مورد استفاده است و هنوز از این روش استقبال می‌شود و همچنین در انجام کارهای اخیر علمی به‌طور گسترده از این روش استفاده شده است.

استفاده از کنترل‌کننده‌های شبکه عصبی یک رویکرد به سمت جلو است و مستلزم مطالعات زیاد است.

#### ۱۰. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در مطالب بالا مشاهده کردید، هدف مقاله تنظیم ارتفاع به منظور اهداف آورده شده در جدول ۱ بود. تغییر ارتفاع در سیستم تعلیق بادی غیرفعال دارای مشکلاتی است. عمده‌ترین مشکل آن حالت غیرتراز خودرو در هنگام تغییر ارتفاع است. در سیستم تعلیق بادی غیرفعال، روی شیرهای سلونوئیدی هیچ کنترلی وجود ندارد بنابراین موقع پر و خالی شدن فنرهای بادی، به‌طور منظم و هم‌زمان خالی و پر نمی‌شوند و این باعث می‌شود خودرو از حالت تراز هنگام تغییر ارتفاع خارج شود بنابراین با داشتن روابط سیالاتی گاز داخل فنر بادی و روابط دینامیکی خودرو می‌توان پارامترهای خروجی دینامیکی را کنترل کرد. روش کنترلی پیشنهادی، کنترل‌کننده مد لغزشی فازی است. برای صحت‌سنجی عملکرد این نوع کنترل‌کننده نتایج عملکرد آن را در شکل ۷ می‌توان دید. در شکل ۷ خودرو تغییر ارتفاع می‌دهد بدون آنکه زوایای غلت و تاب آن نامطلوب شود. در ادامه تحقیقات می‌توان با استفاده از روابط موجود و کنترل‌کننده مد لغزشی برای مقاصد راحتی سرنشین در سر پیچ زاویه غلت را کنترل کرد و تغییر ارتفاع و زاویه تاب را محدود نمود.

- [1] Air suspension, [https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_suspension](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_suspension), (2019, August 10)
- [2] Kim, Hyunsup, and Hyeongcheol Lee, "Height and leveling control of automotive air suspension system using sliding mode approach", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, Vol.60, no.5, pp.2027-2041.
- [3] Ikemoto, Hiroyuki, Shuuichi Buma, Toshio Aburaya, Takashi Yonekawa, Toshio Onuma, Tsukasa Watanabe, and Toshiaki Hamada, "Hydraulic active suspension system for a vehicle performing vehicle height feedback control", *U.S. Patent 5,162,995*, issued November 10, 1992.
- [4] Wang, Ming, Sizhong Chen, and Yuzhuang Zhao, "Investigation on vehicle height control algorithm based on UKF observer", In *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, 2016, pp.822-827.
- [5] Sun, XiaoQiang, Long Chen, ShaoHua Wang, and Xing Xu, "Vehicle height control of electronic air suspension system based on mixed logical dynamical modelling", *Science China Technological Sciences*, 2015, Vol.58, no.11, pp.1894-1904.
- [6] Muluka, Venu. "Optimal suspension damping and axle vibration absorber for reduction of dynamic tire loads." Master Thesis, Concordia University, 1998.
- [7] Polytropic process, [https://en.wikipedia.org/wiki/Polytropic\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Polytropic_process), (2019, August 10)
- [8] Adiabatic process, [https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_process), (2019, August 10)
- [9] Ogawa, Kazuo, Kunihiro Satoh, and Takaaki Enomoto, "Development of damping control system for air suspension", *JsAE Review*, 1996, Vol.17, no.3, pp.322-324.
- [10] Li, Zhong-Xing, Jian-Yu Huang, Hong Jiang, and Hong-Tao Xue, "Game Control of Multi-agent Damper System for Laterally Interconnected Air Suspension", *Journal of Applied Science and Engineering*, 2018, Vol.21, no.2, pp.241-252.
- [11] Xie, Zhengchao, Pak Kin Wong, Jing Zhao, Tao Xu, Ka in Wong, and Hang Cheong Wong, "A noise-insensitive semi-active air suspension for heavy-duty vehicles with an integrated fuzzy-wheelbase preview control", *Mathematical Problems in Engineering* 2013.
- [12] Hung, San-Shan, Chia-Ning Hsu, Chang-Chou Hwang, and Wen-Jan Chen, "Based on Artificial Neural Network to Realize K-Parameter Analysis of Vehicle Air Spring System", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing 2017, Vol.86, no.1, p.012023.
- [13] Mehra, Raman K., Jayesh N. Amin, Karl J. Hedrick, Carlos Osorio, and Srinivasan Gopalasamy, "Active suspension using preview information and model predictive control", In *Proceedings of the 1997 IEEE international conference on control applications*, IEEE, 1997, pp.860-865.
- [14] Sun, Weichao, Zhengli Zhao, and Huijun Gao, "Saturated adaptive robust control for active suspension systems" *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2012, Vol.60, no.9, pp.3889-3896.
- [15] Yamashita, M., K. Fujimori, C. Uhlik, R. Kawatani, and H. Kimura, "H/sub infinity/control of an automotive active suspension", In *29th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 1990, pp.2244-2250.
- [16] Yang, Jann N., and Anil K. Agrawal, "Semi-active hybrid control systems for nonlinear buildings against near-field earthquakes", *Engineering structures*, 2002, Vol.24, no.3, pp.271-280.
- [17] Emura, Junichi, Shinobu Kakizaki, Fumiyuki Yamaoka, and Michiya Nakamura, "Development of the semi-active suspension system based on the sky-hook damper theory", *SAE transactions*, 1994, pp.1110-1119.

- [18] Hirose, Masanori, Seiichi Matsushige, Shuichi Buma, and Kohji Kamiya, "Toyota electronic modulated air suspension system for the 1986 Soarer", *IEEE Transactions on industrial electronics*, 1988, Vol.35, no.2, pp.193-200.
- [19] Kawagoe, Kenji, Hideo Ito, and Masatsugu Yokote, "Height control system for automotive suspension system with vehicle driving condition dependent variable target height", *U.S. Patent 5,083,275*, issued January 21, 1992.
- [20] C. Yuexia, C. Long, W. Ruochen, X. Xing, S. Yujie, and L. Yanling, "Modeling and test on height adjustment system of electrically-controlled air suspension for agricultural vehicles," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 40–47, 2016.
- [21] Sun, Xiao-Qiang, Ying-Feng Cai, Chao-Chun Yuan, Shao-Hua Wang, and Long Chen, "Fuzzy sliding mode control for the vehicle height and leveling adjustment system of an electronic air suspension", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, Vol.31, no.1, p.25.
- [22] Ozkop, Emre, Ismail H. Altas, H. Ibrahim Okumus, and Adel M. Sharaf, "A fuzzy logic sliding mode controlled electronic differential for a direct wheel drive EV", *International Journal of Electronics*, 2015, Vol.102, no.11, pp.1919-1942.
- [23] Lin, Jionggang, Ka Wai Eric Cheng, Zhu Zhang, Norbert C. Cheung, and Xiangdang Xue, "Adaptive sliding mode technique-based electromagnetic suspension system with linear switched reluctance actuator", *IET Electric Power Applications*, 2014, Vol.9, no.1, pp.50-59.
- [24] Utkin, Vadim, and Hoon Lee, "Chattering problem in sliding mode control systems", In *International Workshop on Variable Structure Systems, IEEE 2006, VSS'06*, pp.346-350.
- [25] Zepeng, Gao, Nan Jinrui, Liu Lian, and Xu Xiaolin, "Research on air suspension control system based on fuzzy control", *Energy Procedia*, 2017, Vol.105, pp.2653-2659.

پی نوشت:

1. CarSim
2. Suspension System
3. Sprung Mass
4. Chassis
5. Unsprung Mass
6. Ride comfort
7. Handling
8. Passive Suspension System
9. Drag Force
10. Compressor
11. Check Valve
12. Solenoid Valves
13. ECU
14. Hysteresis
15. Curve Fitting
16. Polytropic Process
17. Adiabatic Process
18. Sliding Mode Control(SMC)
19. Fuzzy
20. Neural Network
21. Predictive
22. Robust
23. H-Infinity
24. Hybrid
25. Sky-hook
26. Roll angle
27. Pitch Angle
28. Nonlinearity

- 
29. Uncertainty
  30. PWM
  31. Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)
  32. Chattering
  33. Unscented Kalman Filter(UKF)