

مروری بر سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری

شایان ناظمی، مسعود مسیح طهرانی*

آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های دینامیکی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*مسئول مکاتبات: masih@iust.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری
سیستم تعلیق خودرو
دینامیک خودرو
جاده‌چسبی
راحتی سواری

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۱۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

در این مقاله ابتدا اهمیت سیستم تعلیق فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد و مزایا و معایب آن مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در این موارد نیاز به داشتن سیستم تعلیق برای خودرو با قابلیت تغییر مشخصات دینامیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و پس از آن مشکل هزینه بالای تولید سیستم تعلیق فعال و سنگینی و نیاز به انرژی زیاد آن‌ها بررسی می‌شود و لزوم وجود این نوع سیستم تعلیق در خودروهای امروزی مطرح می‌شود. سپس تاریخچه کوتاهی از سیستم‌های تعلیق هندسه متغیر مرور می‌شود. پس از آن سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال به طور کامل معرفی می‌شود و انواع مختلف آن و همینطور نحوه کارکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مورد به سیستم‌های تعلیق هندسه متغیر فعال سری تک‌لینک و دولینک پرداخته می‌شود. در ادامه به نتایج استفاده از این سیستم تعلیق که تأثیر زیاد آن بر روی زاویه غلت از موارد مهم اثر این سیستم تعلیق است صحبت می‌شود. پس از آن به موارد پیشنهادی برای مطالعات آینده در زمینه سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال پرداخته می‌شود.

۱ مقدمه

۱.۱ چرا سیستم تعلیق فعال؟

سیستم تعلیق باید در فضای کاری‌ای که در اختیار دارد اتصال چرخ به بدنه را انجام دهد. چند مورد از وظایف سیستم تعلیق در ادامه نام برده می‌شود:

۱. برای مهار وزن خودرو
۲. برای نگهداری راحتی سرنشینان در محدوده مورد قبول
۳. برای کنترل حرکات چرخ و بدنه خودرو
۴. برای بدست آوردن پایداری در زاویه پیچ و زاویه غلت^۱
۵. برای بدست آوردن جاده چسبی با حداقل کردن تغییرات نیروی تایلر در نقطه اتصال

در هر مدلی از خودروها اهمیت وظیفه سیستم تعلیق فرق می‌کند. به طور مثال در خودروهای سواری راحتی سواری^۲ از اهمیت بیشتری برخوردار است. در خودروهای اسپورت، جاده چسبی و کنترل خودرو و همچنین کم بودن جابه‌جایی چرخ اهمیت بیشتری دارد [۱].

از طرفی کنترل حرکت عمودی خودرو که وظیفه سیستم تعلیق است، حیاتی است چرا که علاوه بر افزایش راحتی سرنشین دارای حداقل ۳ ویژگی مهم دیگر می‌باشد:

۱. کم یا حذف کردن حرکات ناشی از تاب و غلت زدن.
۲. کنترل تعادل بین جابه‌جایی وزن بین محور عقب و محور جلو حین دور زدن.

۳. بهبود کنترل نیروی دینامیکی لاستیک.

از بین این ۳ مورد، دومی قابلیت این را دارد در هنگام محدود بودن شرایط پایداری، میزان کنترل پذیری را بهبود ببخشد [۱].

به سبب حساسیت روزافزون اهمیت موارد ذکر شده در خودروهای امروزی، تکنولوژی سیستم تعلیق خودروها در حال بهبود است. در دهه‌های گذشته سیستم تعلیق غیرفعال^۳ دارای بیشترین استفاده در بین خودروهای موجود بوده‌است. منظور از سیستم تعلیق غیرفعال همان سیستم تعلیق عادی خودروها که شامل فنر و کمک‌فنر معمولی است و توانایی تغییر مشخصات دینامیکی سیستم تعلیق خودرو را ندارد، می‌باشد که در اصطلاح به آن سیستم تعلیق غیرفعال می‌گویند. اما استفاده عمده از این نوع سیستم تعلیق بیشتر به خاطر مناسب بودن قیمت تمام شده آن‌ها می‌باشد و نه مکانیزم دینامیکی قدرت‌مند آن‌ها.

پیشرفت در تولید باتری‌ها و روند صعودی تکنولوژی در ماشین‌های الکتریکی^۴ شرایط را برای سیستم تعلیق فعال^۵ بهبود بخشیده‌اند. تعداد زیادی جایگزین برای عمل‌گر فعال هیدرولیکی در حال مطالعه یا ساخت می‌باشد. برای درک بهتر نقاط قوت سیستم تعلیق فعال نیاز است که با یک مشکل جدی سازندگان خودرو در زمینه سیستم تعلیق آشنا بود، این مشکل این است که سیستم تعلیق خودرو نیاز به برقراری تعامل میان چند پارامتر حیاتی در خودرو را دارد که معمولاً در تقابل باهم هستند. این پارامترها در سیستم تعلیق به طور عمده در کیفیت سواری و جاده‌چسبی^۶ خلاصه می‌شوند. سیستم‌های تعلیق فعال و نیمه‌فعال^۷ برای تعامل بهتر بین نیازمندی‌های سیستم تعلیق،

¹vehicle roll ²ride comfort ³passive suspension ⁴electric cars ⁵active suspension ⁶road holding ⁷semi-active suspension

مناسب هستند.

با توجه به افزایش ارزش روزافزون صنعت خودرو دلایل زیادی برای افزایش محبوبیت این سیستم‌های تعلیق فعال وجود دارد، همینطور که کاهش قیمت سنسورها و قطعات الکترونیکی و افزایش درخواست استفاده‌کنندگان از دلایل محبوب بودن آنها است.

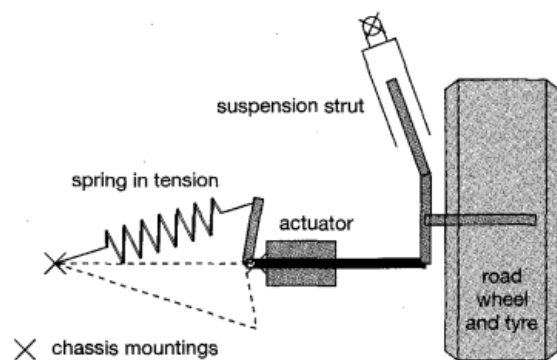
۲.۱ ایرادات سیستم تعلیق فعال

در سیستم‌های تعلیق مدرن که شامل سیستم تعلیق فعال یا نیمه‌فعال می‌شود، توانایی‌های جذابی مانند تغییر ارتفاع خودرو، تغییر در ضریب سفتی^۸ و ضریب میرایی^۹ فنر^{۱۰} و کمک‌فنر^{۱۱} وجود دارد. لازم به ذکر است که این توانایی‌ها باعث تطبیق بهتر عملکرد خودرو روی دست‌اندازها و در سرپیچ‌ها و بهبود جاده چسبی خودرو که باعث فرمان‌پذیری بهتر خودرو است، می‌شود [۲]. اما مشکل هزینه بالای تمام‌شده عمده سیستم‌های تعلیق مدرن سازندگان را در استفاده از آنها به ویژه در محصولات اقتصادی خود دچار تردید می‌کند [۳].

۲ تاریخچه سیستم تعلیق هندسه متغیر

ایده تعلیق هندسه متغیر فعال^{۱۲} با اینکه متعلق به سال‌های اخیر است اما بخش زیادی از آن برگرفته از ایده‌هایی قدیمی بوده است. مثلاً یک مدل موتورسیکلت در سال ۱۹۵۶ میلادی برای تعلیق عقبش بازوهای داشت که همانند تاب جهت عوض می‌کردند، با اینکار نسبت حرکت چرخ به حرکت فنر به صورت دستی متغیر بود. اوپراتور آن ابتدا مکانیزم را آزاد میکرد و سپس جهت را تغییر میداد و دوباره آن را قفل می‌کرد.

شروع جدی سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال را می‌توان زمانی عنوان کرد که در سال ۱۹۹۸ میلادی شارپ^{۱۳} آن را معرفی نمود. نمونه سیستم تعلیق پیشنهادی او در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: سیستم تعلیق پیشنهادی از سوی شارپ [۴].

در این طرح، از مکانیزم مخروطی استفاده شده است. برای تغییر میزان شرکت نیروی فنر در تعلیق، این سیستم در واقع یک مخروط مجازی را با فنر درست می‌کند به طوری که سر پهن مخروط با چرخش ۳۶۰ درجه همراه است اما نوک مخروط ثابت است. شارپ در مقاله‌ای که در سال ۱۹۹۸ میلادی چاپ کرد، این سیستم را به‌طور کامل معرفی کرد [۴]. هدف کلی این بود

که نیروی میرایی با زاویه به بدنه خودرو وارد شود که مقدار آن قابل کنترل باشد. این سیستم میزان کنترل روی سیستم تعلیق را بالا می‌برد و در عین حال در صورت شکست سیستم خطرآفرین نمی‌باشد. خلاصه‌ای از پیشرفت تکنولوژی در زمینه سیستم تعلیق در زیر مشاهده می‌شود:

- در سال ۱۹۵۰ میلادی مطالعات روی سیستم تعلیق نیمه فعال و فعال شروع شد.
- تا سال ۱۹۸۰ میلادی سیستم‌های تعلیق فعال و نیمه‌فعال به صورت عملی روی خودروها استفاده نشد.
- در دهه ۸۰ تا ۹۰ قرن ۱۹ میلادی خودروسازهای اروپایی و ژاپنی از تعلیق فعال و نیمه‌فعال در برخی از مدل‌های خود استفاده کردند.
- تا سال ۲۰۰۰ میلادی که پیشرفت خوبی در زمینه ساخت واشرها و سنسورها انجام شد، سیستم تعلیق فعال نیز بیش از پیش استفاده می‌شد. در این برهه اهداف سیستم تعلیق روی ضدشیرجه^{۱۴} و ضدچمباتمه^{۱۵} بودن خودرو و سواری راحت و پایین آوردن مقدار فرکانس طبیعی مجاز تمرکز داشت [۵].
- در ۲ دهه بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی استفاده و مطالعه روی سیستم تعلیق فعال و تا حدی نیمه‌فعال افزایش چشم‌گیری پیدا کرد [۶].
- در سال ۲۰۰۷ میلادی در یک مطالعه در اروپا مشخص شد که حدود ۲۰ درصد مالکان خودرو در اروپا حاضر به پرداخت مبلغی حداکثر تا ۱۷۰۰ یورو اضافه جهت برخورداری از سیستم تعلیق نیمه فعال بر روی خودروهایشان هستند [۷].
- تاکنون هنوز هم استفاده از سیستم تعلیق فعال به دلیل قیمت گران و پیچیده بودن سیستم آن‌ها محدود است [۴].

۳ سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال

سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال یکی از همین سیستم‌های تعلیق مدرن است که در سال‌های اخیر مورد تحقیقات در زمینه خودروهای سبک سواری قرار گرفته است. این سیستم تعلیق دارای پتانسیل زیادی برای جایگزینی سیستم‌های تعلیق عادی می‌باشد. علت آن‌هم دارا بودن نقاط قوت زیاد و هزینه کم است. نمونه ساخته شده این سیستم تعلیق در شکل ۲ دیده می‌شود.



شکل ۲: نمونه آزمایشگاهی سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع [۷].

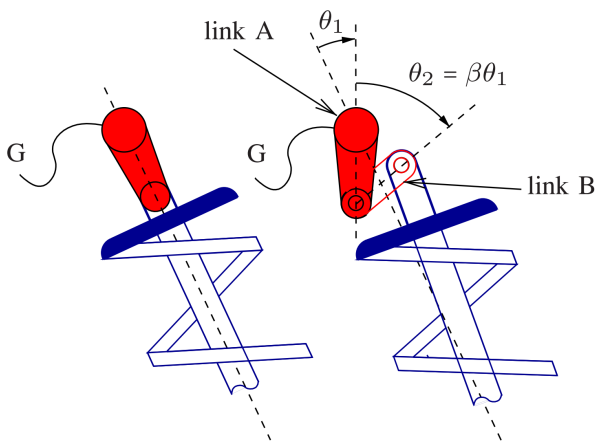
⁸stiffness ⁹damping coefficient ¹⁰spring ¹¹damper ¹²active variable geometry suspension ¹³Sharp ¹⁴anti-dive ¹⁵anti-squat

خود را از سری بودن عملگر خود با فنر و کمک فنر خود گرفته است [۱۲]. ویژگی اصلی این مدل از سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال، مکانیزم سریع و جایگیری کم آن می باشد.

سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری قابلیت تغییر میزان موثر فنریت و میزان موثر نیروی میرایی را دارا می باشد، درحالی که با فنرهای معمولی و کمک فنرهای معمولی کار می کند. سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال این قابلیت را دارد که در عین ارزان تر بودن و سبک تر بودن و درخواست کم تر انرژی بتواند وظایف یک سیستم تعلیق فعال را به خوبی انجام دهد [۱۳].

۲.۳ انواع سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری

سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال به دو صورت تک لینک^{۱۸} و دولینک^{۱۹} ساخته می شود که در شکل ۴ دیده می شوند. در این تصویر، شکل سمت چپ مدل تک لینک و تصویر سمت راست مدل دولینک از این سیستم تعلیق می باشد. در هر دو مورد یک عملگر گردنده به بدنه و نقطه G متصل است که حرکات دورانی را اعمال می کند. در حالت تک لینک فقط یک عضو وظیفه انتقال حرکت دورانی را انجام می دهد اما در حالت دولینک، دو عضو این کار را انجام می دهند [۱۴].



شکل ۴: دو نوع سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری [۵].

ویژگی خودتنظیمی که در هر دو حالت سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری وجود دارد باعث استقلال ارتفاع از بارگذاری می شود که یکی از مطلوب ترین نیازهای سیستم تعلیق در خودرو است [۱۵].

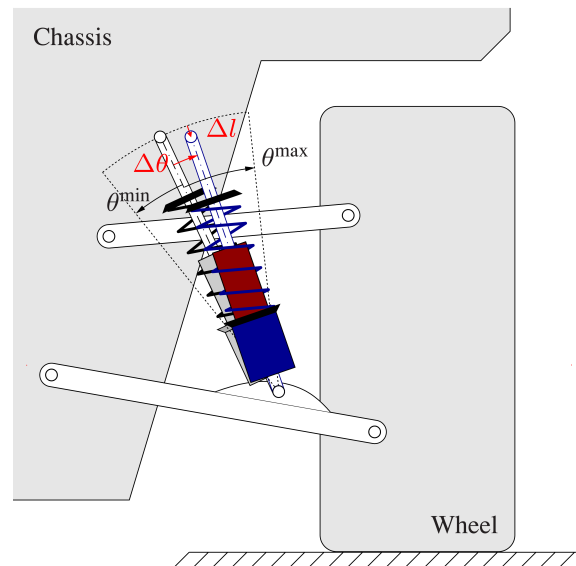
۳.۳ برتری های سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نسبت به دیگر سیستم های تعلیق فعال و غیر فعال

برای چند دهه این به عنوان یک اصل پذیرفته شده است که مطلوب است که میزان میرایی و سفتی کمک فنر و فنر مقادیر متغیری داشته باشند. کنترل لحظه ای مقدار نیروی میرایی کمک فنر در کمک فنرهای معمولی از طریق واشرها به تکنولوژی بالایی احتیاج دارد. از طرف دیگر، برای فنرهایی با سختی متغیر، بهترین تکنولوژی حال حاضر در فنرهای هوایی می باشد اما

سیستم تعلیق هندسه متغیر تمام مشخصات سیستم تعلیق غیرفعال و سیستم تعلیق نیمه فعال را دارا می باشد و یک سیستم مابین این دو پیشنهاد می دهد که در آن یک عملگر الکتریکی-مکانیکی^{۱۶} (در شکل ۲ با عدد ۱ مشخص شده است) به صورت موازی با فنر و کمک فنر سیستم تعلیق در حال کارکرد می باشد.

۱.۳ نحوه کار سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری

شکل ۳ نمونه سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری [۸] را به تصویر می کشد. این سیستم از طریق تغییر در زاویه θ عمل می کند. نقطه G به بدنه خودرو متصل می شود و نقطه F به نقطه بالایی سیستم تعلیق اتصال می یابد. مکانیزم این سیستم تعلیق قادر به کنترل حرکات یک سر کمک فنر است، که این حرکات باعث تغییر نحوه زاویه گیری و تغییر در ارتفاع سیستم تعلیق می شود [۹].



شکل ۳: نمونه سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری [۵].

ایده اصلی برای تعلیق هندسه متغیر این است که این تغییر زاویه به طور خودکار و به صورت دائم انجام پذیرد [۱۰]. نتایج بالقوه این ایده عبارتند از سبک و کوچک شدن میراگرها و مصرف انرژی پایین در عین داشتن توانایی زیاد سیستم تعلیق و همینطور کنترل رول خودرو، کنترل پیچ خودرو^{۱۷} و اگر لازم بود بهبود رفتار ارتعاشاتی بدنه خودرو [۱۱]. یک روش سریع برای تحقق این هدف اتصال نقطه انتهایی فنر و کمک فنر به یک عملگر خطی است که می تواند موقعیت آن را در یک مسیر افقی کنترل کند. تغییر در هندسه سیستم تعلیق به هر شکلی که باشد، روی چند پارامتر تأثیر می گذارد که عبارتند از:

- تغییر در نیروی موثر کمک فنر به سبب تغییر در طول آن؛
 - تغییر در مشخصات موثر کمک فنر بر اثر تغییر زاویه اتصال آن به بدنه خودرو.
- نوعی از این سیستم تعلیق وجود دارد که نوع سری آن نام دارد. این نوع، نام

¹⁶electro-mechanical actuator ¹⁷vehicle pitch ¹⁸single-link ¹⁹dou-link

۱.۴ جمع‌بندی و پیشنهادها

نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که با توجه به نیاز صنعت خودروسازی به تکنولوژی پیشرفته‌تری از سیستم تعلیق، انجام تحقیقات روی سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال می‌تواند آینده مهمی در صنعت خودروسازی داشته باشد [۴].

از طرفی برای تحقیقات آتی و کارهای باقی مانده پیشنهاد می‌شود که کار روی انواع مختلف مدل‌سازی این سیستم تعلیق و انجام آزمایش و تحلیل در گونه‌های مختلف خودرو و شرایط مختلف جاده انجام پذیرد [۲۱].

همچنین کار کردن روی نحوه کنترل کردن سیستم با این نوع سیستم تعلیق و تحلیل انواع کنترل‌کننده روی این سیستم در شرایط مختلف چرخ و خودرو و جاده پیشنهاد می‌شود [۲۲، ۲۳].

از طرفی مسئله استفاده از نوع عمل‌گر در خودروهای مختلف می‌تواند زمینه خوبی برای تحلیل سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال باشد [۲۴].

در موارد سازه‌ای مطالعه روی جنس اتصالات سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال و همین‌طور جنس پوسته آن می‌تواند زمینه تحقیقاتی مناسبی برای آینده این سیستم تعلیق باشد [۱۸].

مراجع

- [1] Arana, C, Evangelou, S A, and Dini, D. Pitch angle reduction for cars under acceleration and braking by active variable geometry suspension. pp. 4390-4395, 2012.
- [2] Watanabe, Y and Sharp, R S. Mechanical and Control Design of a Variable Geometry Active Suspension System. *Vehicle System Dynamics*, 32(2-3):217-235, aug 2010.
- [3] Watanabe, Y and Sharp, R S. Mechanical and Control Design of a Variable Geometry Active Suspension System. *Vehicle System Dynamics*, 32(2-3):217-235, aug 1999.
- [4] Arana, Carlos, Evangelou, Simos A., and Dini, Daniele. Car attitude control by series mechatronic suspension. 19:10688-10693, 2014.
- [5] Arana, Carlos, Evangelou, Simos A., and Dini, Daniele. Series active variable geometry suspension for road vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1):361-372, 2015.
- [6] Remirez, Carlos Arana. Active Variable Geometry Suspension for Cars. *Imperial College London Electrical in Electronic and Mechanical Engineering Departments Control*, (September):3-48, 2015.
- [7] Evers, Willem-jan, Knaap, Albert Van Der, Besselink, Igo, and Nijmeijer, Henk. Analysis of a Variable Geometry Active Suspension. pp. 350-355, 2007.
- [8] Sabaneh, Omar A.O., Faris, Waleed F., Okasha, Mohamed, and Hasbullah, Faried. A mixed control system for active suspension for off-road vehicles. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 12(2):101, 2016.
- [9] Németh, B and Gáspár, P. Independent wheel steering control based on VGS. 2016.

آن‌ها همچنان از ضعف‌هایی مانند پاسخ کند و سنگینی تجهیزات رنج می‌برند [۱۶].

سیستم تعلیق نیمه‌فعال همان المان‌های سیستم تعلیق غیرفعال را دارد با این فرق که توانایی تغییر میزان نیروی میرایی را از طریق تغییر در آرایش و اشراها یا تغییر غلظت مایع میراگر را دارد. سیستم‌های تعلیق فعال راهکار بسیار مقرون به صرفه‌تر و انعطاف‌پذیرتری هستند [۱۷].

قیمت سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال هم‌اکنون توسط بسیاری از خریداران خودرو قابل پرداخت است اما سیستم تعلیق فعال به سبب گرانی تجهیزات خود فقط در خودروهای لوکس قابل استفاده است. سیستم تعلیق فعال از مشخصات دینامیکی بهتری نسبت به سیستم تعلیق نیمه‌فعال و غیرفعال بهره می‌برد و با بهبود بخشیدن به تضاد بین کیفیت سواری و جاده‌چسبی عمل‌کرد بهتری دارد اما قیمت عمل‌گرها، هزینه ساخت، پیچیدگی و مشکلات جانمایی هنوز هم از مشکلات این سیستم تعلیق به حساب می‌آیند [۱۸].

برتری‌های عمده سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری نسبت به سیستم‌های تعلیق عادی و فعال در ادامه جمع‌آوری شده‌اند.

۱. افزایش قابل صرف‌نظر جرم فربندی نشده
۲. کارکرد به صورت سری با فنر و کمک‌فنر
۳. اطمینان به سیستم در صورت شکست سیستم تعلیق
۴. نیاز به انرژی پایین
۵. به‌طور کامل الکتریکی-مکانیکی بودن.
۶. متکی به سیستم‌های الکترونیکی موجود بودن [۱۲].

۴ نتیجه‌گیری

تحقیقات نشان داده‌است که نتایج استفاده از سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری به طور عمده‌ای روی عمل‌کرد خودرو در تست‌های مختلف تأثیر گذاری مثبتی داشته‌است. در ادامه چند مورد از نتایج تحقیقات ذکر می‌شوند:

- سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال نوع سری توانسته است که میزان زاویه غلت را در گردش با شتاب $0.9g$ شتاب گرانشی زمین در میزان صفر نگه دارد. در شتاب‌های بالاتر گردش، میزان زاویه غلت به ازای هر یک g افزایش شتاب گردش، به میزان $1/3$ درجه می‌باشد.
- تا میزان شتاب‌گیری $0.9g$ ، رفتار دینامیکی خودرو تغییر نمی‌کند اما از آن به بعد به سبب اینکه لینک به انتهای خود رسیده‌است، رفتار سیستم تعلیق هندسه متغیر فعال مانند سیستم تعلیق غیرفعال می‌باشد [۱۹].
- این سیستم تعلیق در کنترل زاویه غلت بسیار خوب عمل کرده اما در کنترل زاویه تاب به خوبی زاویه غلت عمل نکرده است اما می‌تواند میزان تاب را در همه شرایط زیر 0.2 درجه نگه دارد.
- تأثیری در جلوگیری از میزان شتاب‌گیری افقی ندارد.
- تا میزان 30 درصد از چمباتمه و شیرجه جلوگیری کرده است.
- تا 21 درصد از میزان تغییر شکل لاستیک جلوگیری می‌کند [۲۰].

- [10] Németh, Balázs and Gáspár, Péter. Nonlinear analysis and control of a variable-geometry suspension system. *Control Engineering Practice*, pp. 279–291, apr.
- [11] Arana, Carlos, Evangelou, Simos A., and Dini, Daniele. Series Active Variable Geometry Suspension application to comfort enhancement. *Control Engineering Practice*, 59(November 2016):111–126, 2017.
- [12] Cheng, Cheng, Evangelou, Simos A., Arana, Carlos, and Dini, Daniele. Active Variable Geometry Suspension robust control for improved vehicle ride comfort and road holding. *Proceedings of the American Control Conference*, 2015-July(c):3440–3446, 2015.
- [13] Németh, B, Fényes, D, Gáspár, P, and Bokor, J. Control design of an electro-hydraulic actuator for variable-geometry suspension systems. pp. 180–185, 2017.
- [14] Baghaeian, Mansour and Akbari, Ali Akbar. Adaptive interval type-2 fuzzy logic systems for vehicle handling enhancement by new nonlinear model of variable geometry suspension system. *Journal of Vibroengineering*, 19(6):4498–4515, sep 2017.
- [15] Lee, U K, Lee, S H, Han, C S, Hedrick, K, and Català, A. Active geometry control suspension system for the enhancement of vehicle stability. 222(6):979–988, jun 2008.
- [16] Fányes, D, Németh, B, and Gáspár, P. Optimal control design of a variable-geometry suspension with electro-hydraulic actuator. pp. 337–342, 2017.
- [17] Yu, Min, Evangelou, Simos A., and Dini, Daniele. Model Identification and Control for a Quarter Car Test Rig of Series Active Variable Geometry Suspension. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):3376–3381, 2017.
- [18] Fényes, D, Németh, B, and Gáspár, P. Handling of zero-crossing problems in the design of variable-geometry suspension control. pp. 237–242, 2016.
- [19] Fallah, M S, Bhat, R, and Xie, W F. New nonlinear model of macpherson suspension system for ride control applications. pp. 3921–3926, 2008.
- [20] Németh, B and Gáspár, P. Control Design of Variable-Geometry Suspension Considering the Construction System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(8):4104–4109, 2013.
- [21] Goodarzi, Avesta, Oloomi, Ehsan, and Esmailzadeh, Ebrahim. Design and analysis of an intelligent controller for active geometry suspension systems. *Vehicle System Dynamics*, 49(1-2):333–359, 2011.
- [22] Bansal, Ankit. Design and Analysis of Robust H-infinity Controller. 2013.
- [23] Arana, C, Evangelou, S A, and Dini, D. Series Active Variable Geometry Suspension Application to Chassis Attitude Control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(1):518–530, 2016.

[۲۴] اکبری، علی اکبر و بقائیان، منصور. بهبود پایداری خودرو با کنترلر مقاوم تطبیقی فازی و مدل جدید سیستم تعلیق هندسه متغیر. صفحات ۳۷-۴۶، ۱۳۹۵.