

خودرو رباتیک شش چرخ محرک فرمان لغزشی با سیستم تعلیق مفصلی:

معرفی و الزامات طراحی

مریم قصابزاده سریزدی*

استادیار

پژوهشکده فناوری خودرو،

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

mghsaryazdi@aut.ac.ir

سمیه محمدی

دانشجوی مقطع دکتری

پژوهشکده فناوری خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

somayemohamadi@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۲

چکیده

خودروهای فرمان لغزشی دارای سیستم تعلیق مفصلی، قابلیت مانورپذیری بالایی دارند. از جمله کاربردهای خودروهای فرمان لغزشی، حمل بار در شرایط برون جاده‌ای است. سیستم تعلیق مفصلی، اجرای مانورهای عبور از موانع و امکان افقی نگه داشتن بدنه خودرو در عبور از سطح شیب‌دار را فراهم می‌سازد که در خودروهایی با ویژگی حمل تجهیزات حساس حائز اهمیت است. در این مقاله، پس از معرفی این خودرو رباتیک و بیان قابلیت‌های حرکتی آن، الزامات طراحی شامل قیده‌های هندسی و محاسبات انتخاب سیستم رانش بازو و چرخ ارائه می‌گردد. دینامیک مود رباتیکی در جاده افقی در وضعیت‌های غالب خودرو که چهار چرخ هستند، تحلیل می‌شود. در انتها در یک مطالعه موردی، پارامترهای هندسی ارضاء کننده الزامات طراحی انتخاب و همچنین گشتاور رانش بازوی چرخ‌ها محاسبه می‌گردد. مناسب‌ترین نحوه عبور از پله نیز تعیین می‌شود.

واژگان کلیدی: خودرو رباتیک، تمام چرخ محرک، فرمان لغزشی، سیستم تعلیق مفصلی

۱. مقدمه

خودروهای بدون سرنشین تمام چرخ محرک فرمان لغزشی، به عنوان خودروهای نظامی و یا ربات‌های فرمان لغزشی^۱ با با وظیفه کاوشی، حمل بار، مین‌یاب و همچنین لودرهای فرمان لغزشی به کار گرفته می‌شوند [۱]. موارد مذکور بسته به نوع کاربرد دارای چهار، شش یا هشت چرخ هستند. سیستم تعلیق این نوع خودروها به‌طور عمده از نوع

مفصلی^۲ است. در این نوع سیستم تعلیق، چرخ‌های خودرو توسط بازویی به بدنه خودرو متصل می‌شوند. از مزایای قرار دادن این بازوها، می‌توان به مانورپذیری بالای خودرو در انجام حرکات رباتیکی (عبور از پله، مانع، گودال و تونل)، حفظ بدنه خودرو به صورت افقی در عبور از سطح شیب‌دار با اهمیت ویژه در خودروهایی با ویژگی حمل تجهیزات



شکل ۱. ربات Crusher [۴]

نمونه‌ای از ربات فرمان لغزشی با سیستم تعلیق مفصلی، ربات FoxBot، که تولید شرکت آلمانی راین متال است، در شکل ۲ مشاهده می‌شود. از جمله قابلیت‌های این ربات می‌توان به نظارت و جاسوسی از فاصله یک کیلومتری اشاره نمود [۵].



شکل ۲. ربات FoxBot [۵]

خودرو رباتیک چهار چرخ محرک با سیستم تعلیق مفصلی Chainlink Extreme که در شکل ۳ آمده است، طراحی شده توسط کامرون کارلسون، نیز قابلیت عبور از مسیرهای صعب‌العبور را دارد. چرخ‌های این ربات می‌توانند تا یک متر اختلاف ارتفاع داشته باشند [۶].

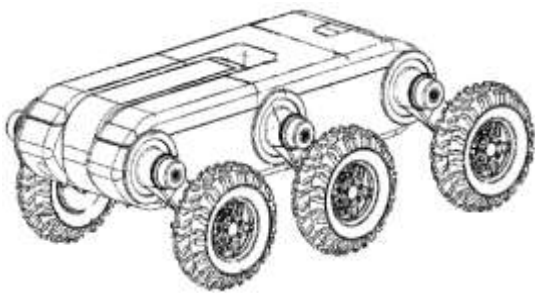
حساس و تغییر ارتفاع خودرو نسبت به سطح زمین اشاره نمود [۲].

با حذف راننده از خودروهای تمام چرخ محرک مستقل^۳، وجود مکانیزم فرمان مزیتی ندارد. اصطلاح "فرمان لغزشی"^۴ به خودروهای فاقد مکانیزم فرمان اطلاق می‌گردد که به علت عدم فرمان‌پذیری چرخ‌ها، حرکت آنها حین چرخش^۵ با لغزش جانبی همراه است. علت استفاده از کلمه فرمان در این اصطلاح، استفاده از راهکار معادل فرمان‌دهی با تنظیم سرعت زاویه‌ای چرخ‌های دو سمت خودرو است. از جمله مزایای خودرو فرمان لغزشی می‌توان به مانورپذیری بالا، دسترسی به شعاع دوران کوچک و حتی دور درجاً^۶ (برخلاف هندسه فرمان آکرمن) و فشرده و سبک نمودن خودرو با حذف مکانیزم فرمان اشاره نمود [۳]. معایب آن، دنبال نکردن دقیق مسیر در خودروهای بدون سرنشین و در نتیجه، نیاز به سنسور دقیق تعیین موقعیت و همچنین سایش چرخ‌ها است. اما در کاربردهای برون جاده‌ای^۷ و همه جا رو^۸، مسئله سایش حائز اهمیت نیست. در ادامه، سه نمونه از خودروهای رباتیک فرمان لغزشی با سیستم تعلیق مفصلی معرفی می‌گردند. خودرو رباتیک Crusher که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، توسط دانشگاه کارنگی ملون ایالت متحده آمریکا به سفارش آژانس پروژه‌های پیشرفته دفاعی (دارپا) در سال ۲۰۰۶ طراحی شده است. از جمله قابلیت‌های این خودرو، حرکت در مسیرهای صعب‌العبور مانند عبور از پله با ارتفاع ۱/۲ متری، عبور از شیب طولی ۴۰ درجه و شیب عرضی ۳۰ درجه و عبور از نهرها، حرکت با بیشینه سرعت ۴۲ کیلومتر بر ساعت، دور درجاً، تغییر ارتفاع بدنه و حمل بار تا ۳۶۰۰ کیلوگرم است [۴].

چرخ بیان می‌گردد. نظر به اینکه بازوها تنها در مود رباتیکی دوران دارند، گشتاور رانش بازو باید با بررسی این مود محاسبه شود. برای محاسبه گشتاور رانش چرخ‌ها نیز، با توجه به اینکه سرعت چرخ در مود خودرویی بسیار بالاتر از مود رباتیکی است، این مود ملاک انتخاب موتور چرخ قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی برای یک مطالعه موردی در نرم‌افزار متلب^۱ نیز در بخش ششم ارائه می‌گردد.

۲. قابلیت‌های حرکتی خودرو

شکل شماتیک یک خودرو بدون سرنشین شش چرخ محرک فرمان لغزشی دارای سیستم تعلیق مفصلی در شکل ۴ نشان داده شده است. این خودرو دارای دو مود خودرویی و رباتیکی است. مود خودرویی شامل عبور از جاده آسفالت، شوسه و لغزنده افقی، دارای شیب طولی و شیب عرضی با چهار یا شش چرخ است. خودرو در این مود حرکتی، باید توانایی عبور از دست‌اندازها و چاله‌های معمولی را بدون تغییر موقعیت بازو و با سرعت بالا داشته باشد. خودرو در مود رباتیکی از پله، مانع، گودال و تونل با سرعت پایین همراه با تغییر موقعیت بازو روی جاده افقی حرکت می‌نماید. حین اجرای مانور رباتیکی، خودرو عمدتاً روی چهار چرخ قرار می‌گیرد. البته ممکن است به صورت لحظه‌ای روی سه چرخ نیز قرار بگیرد.



شکل ۴. شکل شماتیک خودرو رباتیکی [۲]

در ادامه نحوه اجرای مانورهای رباتیکی عبور از پله، مانع، گودال و تونل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳. ربات Chainlink Extreme [۶]

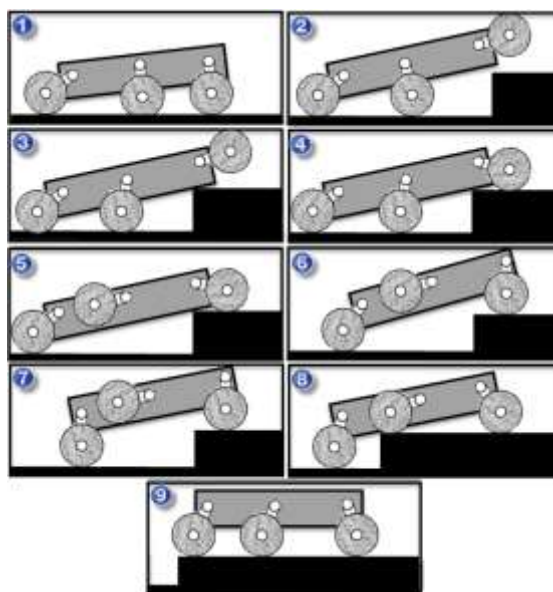
مقالات ارائه شده در زمینه خودرو تمام چرخ محرک فرمان لغزشی با سیستم تعلیق مفصلی به مدل‌سازی دینامیک خودرو شش چرخ در مود خودرویی شامل چرخش خودرو یا بررسی حرکات قائم در تحلیل راحتی سفر پرداخته‌اند. معادلات چرخش این خودرو در سال ۲۰۰۹ [۱] استخراج و صحنه‌گذاری شده است. مدل دینامیک طولی و عرضی این خودرو با در نظر گرفتن نیروهای تماسی غیرخطی چرخ با زمین در سال ۲۰۱۷ [۷] ارائه گردیده است. معادلات خطی و غیرخطی دینامیک قائم این خودرو در سال ۲۰۱۸ [۸] استخراج شده است. صحنه‌گذاری مدل دینامیک قائم خطی با نرم‌افزار ادمز^۲ نیز در سال ۲۰۱۷ [۹] انجام شده است. در این پژوهش با تمرکز بر خودرو رباتیکی شش چرخ محرک فرمان لغزشی با سیستم تعلیق مفصلی، ضمن تشریح قابلیت‌های حرکتی خودرو و قیده‌های هندسی، روابط دینامیکی حاکم بر آن حین انجام مانور در مود رباتیکی استخراج می‌شود که تاکنون در هیچ مقاله‌ای به آن پرداخته نشده است.

در بخش حاضر، مقدمه‌ای از موضوع مورد بررسی و پیشینه کار بیان شد. در بخش دوم، خودرو رباتیکی مورد بررسی در این مقاله و قابلیت‌های حرکتی آن معرفی می‌شود. در بخش‌های سوم تا پنجم، الزامات طراحی خودرو شامل قیده‌های هندسی و محاسبات انتخاب سیستم رانش بازو و

۲-۱. عبور از پله

مراحل مانور عبور از پله در شکل ۵ نمایش داده شده است. مراحل مختلف اجرای این مانور عبارت است از:

- (۱) دوران بازوی چرخ عقب به سمت عقب و زاویه گرفتن خودرو،
- (۲) دوران بازوی چرخ جلویی تا زاویه بیشینه به سمت جلو،
- (۳) حرکت خودرو به سمت جلو تا برخورد کف بدنه به پله و دوران بازوی چرخ میانی به سمت عقب،
- (۴) قرارگیری چرخ جلویی روی پله،
- (۵) دوران بازوی چرخ میانی به سمت عقب تا زاویه بیشینه،
- (۶) دوران بازوی چرخ جلویی به سمت عقب تا عمود شدن آن بر زمین،
- (۷) دوران بازوی چرخ عقبی به سمت جلو تا عمود شدن آن بر زمین،
- (۸) حرکت خودرو به سمت جلو تا برخورد کف بدنه به پله، قرارگیری چرخ میانی روی پله و سپس دوران بازوی چرخ جلویی به سمت جلو،
- (۹) دوران بازوی چرخ میانی به سمت جلو و حرکت رو به جلوی خودرو تا قرارگیری چرخ عقبی روی پله.

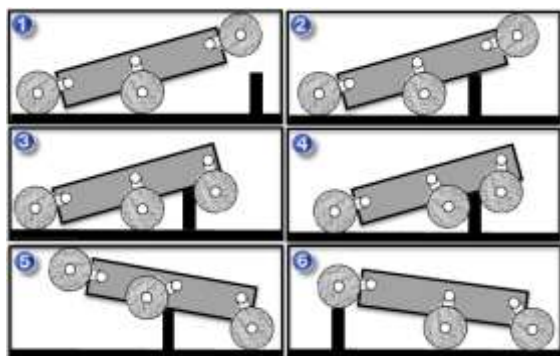


شکل ۵. مراحل عبور از پله

۲-۲. عبور از مانع

مراحل مانور عبور از مانع در شکل ۶ نشان داده شده است. مراحل مختلف اجرای این مانور عبارت است از:

- (۱) دوران بازوی چرخ عقب تا زاویه بیشینه به سمت عقب و زاویه گرفتن بدنه خودرو نسبت به سطح زمین و سپس دوران بازوی چرخ جلویی تا زاویه بیشینه به سمت جلو،
- (۲) حرکت خودرو به سمت جلو تا برخورد کف بدنه به مانع،
- (۳) قرارگیری چرخ جلویی روی مانع،
- (۴) دوران بازوی چرخ جلویی به سمت عقب و همچنین دوران بازوی چرخ میانی به سمت جلو تا تکیه به مانع،
- (۵) استفاده از نیروی ترکشن چرخ عقب و دوران بازوهای چرخ میانی و جلویی برای انتقال خودرو به سمت دیگر مانع و سپس دوران بازوی چرخ جلویی به سمت جلو،
- (۶) قرارگیری خودرو روی چرخ‌های جلویی و میانی و حرکت به سمت جلو تا قرارگیری چرخ عقبی روی زمین.



شکل ۶. مراحل عبور از مانع

۲-۳. عبور از گودال

مراحل مانور عبور از گودال در شکل ۷ نمایش داده شده است. مراحل مختلف اجرای این مانور عبارت است از:

- (۱-۲) دوران بازوی چرخ‌های میانی و جلویی به سمت جلو و دوران بازوی چرخ عقبی به سمت عقب،
- (۳) قرارگیری زاویه‌دار بدنه روی چرخ‌های میانی و عقبی،
- (۴) حرکت خودرو به سمت جلو تا افتادن چرخ میانی داخل گودال و قرارگیری چرخ جلویی در سمت دیگر گودال،

۳. قیدهای هندسی

الزامات طراحی خودرو رباتیک مد نظر در مود خودرویی عبور از شیب طولی و شیب عرضی با بدنه افقی و در مود رباتیک عبور از پله، مانع و گودال و همچنین حفظ کمینه فاصله کف خودرو از زمین (توانایی عبور از تونل) می‌باشند. نمایی از خودرو به همراه پارامترهای هندسی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. شعاع چرخ R ، طول بازو L ، زاویه بازو با راستای قائم α ، عرض بدنه W ، فاصله عمودی مفصل بازو از کف خودرو B ، فاصله مفصل دو بازو مجاور D ، ارتفاع کف خودرو از زمین h ، فاصله عمودی مرکز جرم از کف خودرو G و فاصله عرضی چرخ‌ها A است.



شکل ۹. نمایش پارامترهای هندسی خودرو [۱۰]

در این بخش، ارتباط پارامترهای هندسی خودرو با یکدیگر براساس الزامات طراحی بیان می‌شود.

۳-۱. عبور از بیشینه شیب عرضی با بدنه افقی

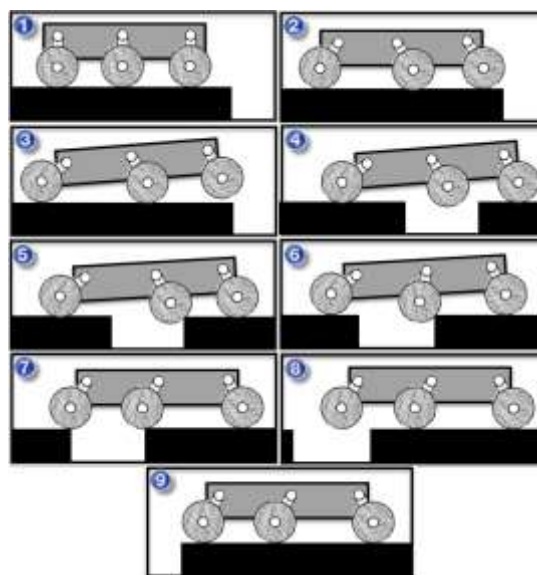
با توجه به الزام افقی بودن بدنه خودرو در عبور از شیب عرضی، برای دسترسی به امکان عبور از بیشترین شیب، چرخ‌های یک سمت خودرو با زاویه بازوی صفر درجه قرار می‌گیرند. با افزایش زاویه بازوی چرخ‌های سمت دیگر خودرو، امکان عبور خودرو از شیب‌های بالاتر مهیا می‌گردد. نمایش خودرو روی شیب عرضی با بیشینه شیب γ_{max} در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق این شکل، برای ارضاء شرط عبور از بیشینه شیب عرضی با بدنه افقی باید قید هندسی زیر برقرار باشد:

(۵) حرکت خودرو به سمت جلو تا برخورد چرخ میانی به مانع،

(۶-۷) دوران بازوی چرخ میانی به سمت عقب تا قرارگیری چرخ میانی روی زمین،

(۸) حرکت خودرو به سمت جلو و قطع تماس چرخ عقبی با زمین و حرکت به سمت جلو روی چرخ‌های جلویی و میانی،

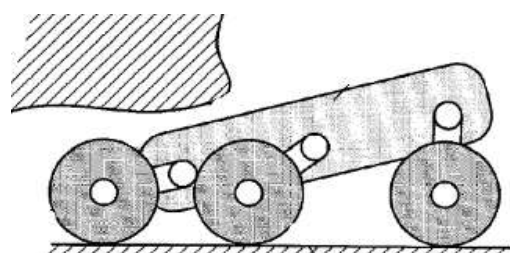
(۹) قرارگیری همه چرخ‌ها روی زمین در سمت دیگر گودال.



شکل ۷. مراحل عبور از گودال

۲-۴. عبور از تونل

مانور عبور از تونل در شکل ۸ نشان داده شده است. این مانور با شش چرخ روی زمین اجرا می‌شود. برای اجرای این مانور، خودرو باید توانایی خوابیدن و بلند شدن روی شش چرخ را با تغییر زاویه بازوهای خود داشته باشد.

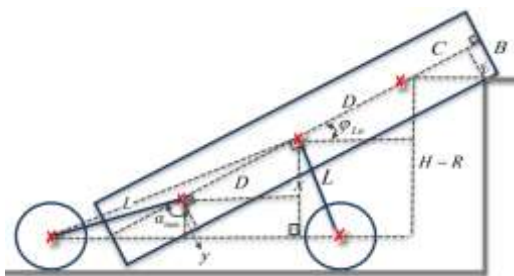


شکل ۸. عبور از تونل [۲]

فاصله عمودی محل برخورد بدنه به پله از زمین خواهد بود که براساس پارامترهای هندسی شکل ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$H_{\max} = L \cos \varphi_{Lo} + D \sin \varphi_{Lo} + R \quad (3)$$

$$+ (C - E) \sin \varphi_{Lo} - B \cos \varphi_{Lo}$$



شکل ۱۱. عبور خودرو از پله: برخورد کف بدنه به پله

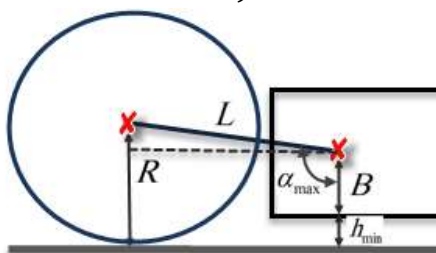
۳-۳. توانایی عبور از بیشینه عرض گودال

بیشینه عرض گودال قابل عبور برابر مفصل دو بازوی مجاور، فاصله D در شکل ۹، در نظر گرفته می‌شود.

۳-۴. حفظ کمینه ارتفاع خودرو از زمین

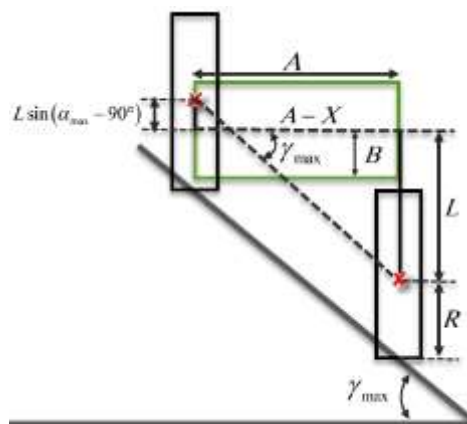
کمینه فاصله کف خودرو از زمین در زاویه بیشینه بازو، طبق شکل ۱۲، رخ می‌دهد. با توجه به این شکل، فاصله عمودی مرکز چرخ از زمین (شعاع چرخ) براساس کمینه ارتفاع کف بدنه از زمین، فاصله عمودی مفصل بازو از کف خودرو، طول بازو و زاویه آن قابل بیان است. در نتیجه، قید زیر برای حصول کمینه ارتفاع مجاز کف خودرو از زمین به دست می‌آید:

$$h_{\min} = R - B - L \sin(\alpha_{\max} - 90^\circ) \quad (4)$$



شکل ۱۲. کمینه ارتفاع کف خودرو از زمین

$$\tan \gamma_{\max} = \frac{L}{A} (1 + \sin(\alpha_{\max} - 90^\circ)) \quad (1)$$



شکل ۱۰. خودرو روی بیشینه شیب عرضی

۳-۲. توانایی عبور از بیشینه ارتفاع پله یا مانع

در عبور از پله، بازوی چرخ‌های عقب خودرو با بیشترین زاویه و بازوی چرخ‌های میانی با زاویه صفر قرار می‌گیرند. نمایی از خودرو در عبور از بیشینه ارتفاع پله در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ϕ_{Lo} زاویه بدنه نسبت به سطح جاده، فاصله محل برخورد کف بدنه با پله از جلوی خودرو، C فاصله مفصل بازوی کناری از لبه بدنه و H ارتفاع پله است. طبق شکل ۸، زاویه بدنه نسبت به افق برابر است با:

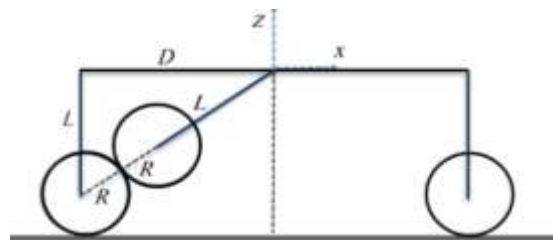
$$\tan \varphi_{Lo} = \frac{L(1 - \cos \alpha_{\max})}{D + L \sin \alpha_{\max}} \quad (2)$$

طبق مانور عبور از پله توضیح داده شده در بخش قابلیت‌های حرکتی خودرو (مورد ۲ شکل ۵)، بیشینه ارتفاع پله مجاز باید به اندازه‌ای باشد که زمانی که بازوی چرخ عقب در زاویه بیشینه و بازوی چرخ میانی به صورت عمود بر بدنه قرار گرفت، با حرکت رو به جلوی خودرو، کف بدنه به لبه پله برخورد نماید. با در نظر گرفتن فاصله E لبه بدنه از لبه پله طبق شکل ۱۱، بیشینه ارتفاع مجاز پله برابر

۳-۵. قید دوران کامل بازو

مطلوب است در حالتی که یک چرخ خودرو به صورت قائم بر زمین قرار دارد، چرخ مجاور بدون تداخل با این چرخ بتواند به طور کامل از زمین بلند شود و بازوی آن حول مفصل دوران کند. طبق شکل ۱۳ که در حالت مرزی تماس چرخ‌های مجاور حین دوران بازو) رسم شده است، قید نامساوی هندسی زیر به مسئله افزوده می‌شود:

$$(2R + L)^2 \leq D^2 + L^2 \quad (۵)$$



شکل ۱۳. توانایی دوران کامل هر بازو

۴. محاسبات انتخاب سیستم رانش بازو

در این بخش، پس از بیان فرضیات، محاسبه زاویه بدنه و سپس بار روی چرخ‌ها، گشتاور رانش بازو (گشتاور مورد نیاز دوران بازو) قابل استفاده برای انتخاب موتور آن محاسبه می‌گردد. تعیین این گشتاور نیازمند تحلیل دینامیکی بازو و یا به عبارت دیگر محاسبه نیرو و گشتاورهای وارد بر مفصل بازو حین دوران آن است. بدین منظور، بدترین مانور حرکتی برای بازو که عبور از پله است، تحلیل می‌شود. طبق شکل ۵ به نظر می‌رسد در وضعیت‌های ۶ و ۷، بیشترین گشتاور برای رانش بازو مورد نیاز است، چراکه خودرو با دوران بازو باید بتواند وزن خود را بالا بکشد.

۴-۱. فرضیات

فرضیات مورد استفاده در مدل‌سازی عبارتند از:

- مود رباتیکی تنها بر روی جاده صاف با شیب طولی صفر اجرا می‌گردد.

- عبور از پله، مانع، گودال و تونل تحت مانورهای حرکتی خاصی انجام می‌پذیرد. مزیت مانور مورد استفاده، هم‌زمانی تقریبی حرکت بازوها به منظور صرفه‌جویی در زمان اجرای مانور می‌باشد.
- ابتدا با دوران موتور بازوها، زاویه دلخواه به آنها داده می‌شود. سپس با تثبیت بازو توسط مکانیزم قفل‌کن، در صورت نیاز به پیشروی، حرکت چرخ آغاز می‌گردد.
- با توجه به سرعت پایین خودرو حین انجام مانور در مود رباتیکی، برای کاهش حجم محاسبات و جلوگیری از پیچیدگی روابط، حرکت خودرو در این مود به صورت استاتیکی (شتاب صفر) مدل می‌شود.
- فرض می‌شود چرخ‌های روبه‌روی اندازه زاویه بازوی یکسان دارند و با هم به آستانه لغزش می‌رسند.
- چرخ با یک دیسک و بازو با میله تقریب زده می‌شود.
- از نیروهای تماسی چرخ با زمین صرف نظر می‌گردد.

۴-۲. محاسبه زاویه بدنه

زاویه بدنه در عبور از پله یا مانع برای چرخ‌های جلویی و عقبی روی زمین طبق شکل ۱۴ محاسبه می‌گردد. زاویه بدنه برای سایر حالات نیز به طور مشابه قابل محاسبه است. $\varphi_{Lo,S}$ زاویه بدنه نسبت به افق است.

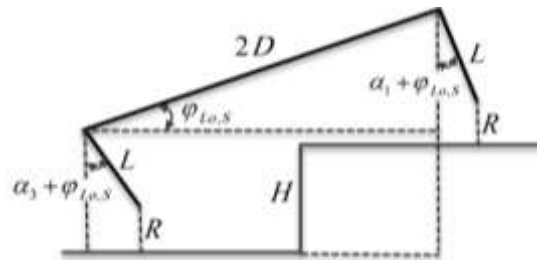
$$\begin{aligned} \varphi_{Lo,S} &= \tan^{-1} \frac{P}{Q} + \sin^{-1} \frac{H}{L\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ P &= \cos \alpha_1 - \cos \alpha_3 \\ Q &= \frac{2D}{L} + \sin \alpha_1 - \sin \alpha_3 \end{aligned} \quad (۶)$$

در عبور از پله یا مانع، قید عدم تداخل چرخ‌های بلند شده با زمین با رابطه زیر بیان می‌شود:

در این بخش، بار روی چرخ‌ها برای حالتی که چرخ‌های جلویی و عقبی روی زمین قرار دارند، محاسبه می‌گردد. نمایی از نیروهای وارد بر خودرو در دو حالت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نیروی تماسی برای چرخ‌ها که بازوی آن در حال دوران است، چنانچه چرخ قفل شده باشد، نیروی اصطکاک ایستایی و در غیر این صورت نیروی مقاومت غلتشی است.

برای چرخ دیگر، نیروی تماسی، نیروی اصطکاک ایستایی است. حین دوران بازوی چرخ جلویی (شکل ۱۵-الف)، بار روی چرخ‌ها با روابط زیر، حاصل از برابری گشتاور حول نقطه تماس چرخ عقبی با زمین و تعادل نیروها در راستای عمودی، محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) \\ < L \cos(\alpha_2 + \varphi_{Lo}) + D \sin \varphi_{Lo} - H \end{aligned} \quad (7)$$



شکل ۱۴. زاویه بدنه - مود ربایتیکی - عبور از پله

۳-۴. بار روی چرخ‌ها

برای محاسبه بار روی چرخ‌ها، حرکت هر بخش جداگانه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

$$N_1 \begin{pmatrix} L \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + 2D \cos \varphi_{Lo} \\ -L \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) - H(f_R \text{ or } \mu_s) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$= rMg(-L \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) + D \cos \varphi_{Lo})$$

$$+ rMg(\delta_x \cos \varphi_{Lo} - \delta_z \sin \varphi_{Lo})$$

$$+ m_W g \begin{pmatrix} L(\sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + \sin(\alpha_2 + \varphi_{Lo})) \\ + 3D \cos \varphi_{Lo} - 2L \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) \end{pmatrix}$$

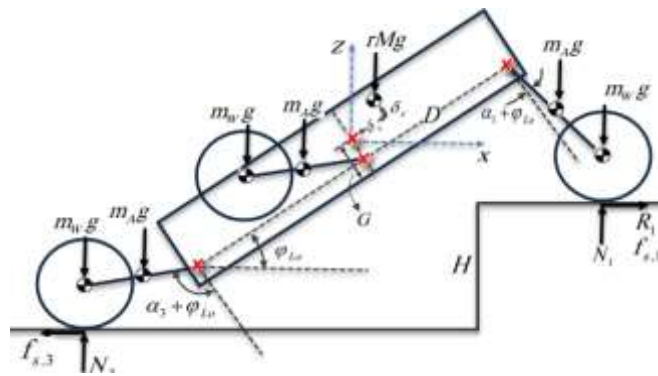
$$+ m_A g \begin{pmatrix} 0.5L \left(\begin{matrix} \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) \\ + \sin(\alpha_2 + \varphi_{Lo}) - \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) \end{matrix} \right) \\ + 3D \cos \varphi_{Lo} - 2L \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) \end{pmatrix}$$

$$N_1 + N_3 = 3(m_A + m_W)g + rMg \quad (9)$$

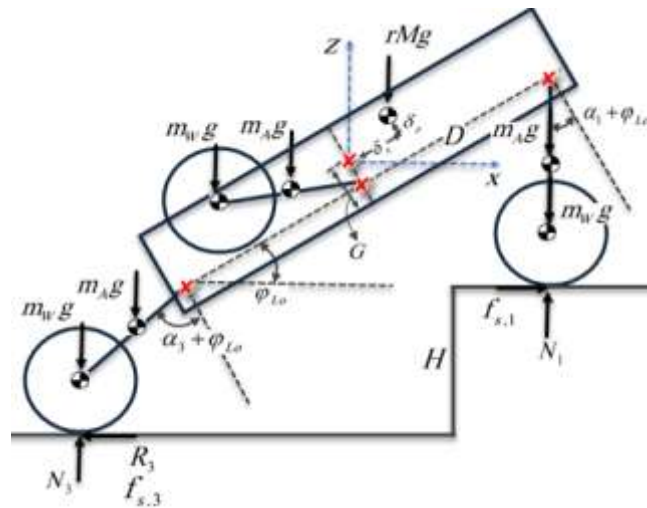
نشان داده شده در شکل پس از تقسیم جرم در راستای عرضی است. حین دوران بازوی چرخ عقبی قابل مشاهده در شکل ۱۵-ب، گشتاور حول نقطه تماس چرخ جلویی با زمین رابطه زیر را نتیجه می‌دهد:

در روابط فوق، N_i نیروی نرمال وارد بر چرخ i ام، f_R ضریب مقاومت غلتشی، μ_s ضریب اصطکاک ایستایی، M جرم بدنه، m_W جرم چرخ، m_A جرم بازو، g شتاب جاذبه، δ_x ، δ_y و δ_z فاصله مرکز هندسی و مرکز جرم بدنه در راستای محورهای بدنه و r کسر جرم خودرو روی سه چرخ

$$\begin{aligned}
& N_3 \left(L \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + 2D \cos \varphi_{Lo} \right) \\
& = rMg(L \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + D \cos \varphi_{Lo}) \\
& - rMg(\delta_x \cos \varphi_{Lo} - \delta_x \sin \varphi_{Lo}) \\
& + mwg \left(2L \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + 3D \cos \varphi_{Lo} \right) \\
& + m_Ag \left(2L \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) + 3D \cos \varphi_{Lo} \right. \\
& \left. - 0.5L \left(\sin(\alpha_2 + \varphi_{Lo}) \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin(\alpha_3 + \varphi_{Lo}) - \sin(\alpha_1 + \varphi_{Lo}) \right) \right)
\end{aligned} \tag{۱۰}$$



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. عبور از پله - محاسبه گشتاور مورد نیاز برای دوران بازو: دوران بازوی (الف) چرخ جلویی (ب) چرخ عقبی

۴-۴. گشتاور رانش بازوها

گشتاور اعمالی به مفصل بازو در محل اتصال آن به بدنه حول محور عرضی، گشتاوری است که باید توسط موتور بازو تأمین گردد و نیروها و سایر گشتاورها باید توسط سازه تحمل شوند. دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک چرخ و

بازوی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. y_{arm} فاصله عرضی مفصل بازو از صفحه میانی چرخ، F_W نیروی وارد بر مفصل رابط چرخ و بازو، F_A و T_A نیرو و گشتاور وارد بر مفصل رابط بازو و شاسی و F_C نیروی تماسی تایلر/جاده است.

نیاز را تأمین نماید. با توجه به سرعت پایین خودرو در مود رباتیکی، الزامات عملیاتی در مود خودرویی شامل حرکت با سرعت مدنظر روی کفی یا سطح شیبدار و همچنین شتابگیری/ترمزگیری با شتاب مطلوب، ملاک انتخاب موتور چرخ قرار می‌گیرد.

ابتدا سرعت و شتاب نامی مورد انتظار از خودرو روی کفی مبنای طراحی قرار می‌گیرد. سرعت دورانی نامی چرخ (خروجی سیستم رانش) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_n = \frac{V_n}{R} \quad (15)$$

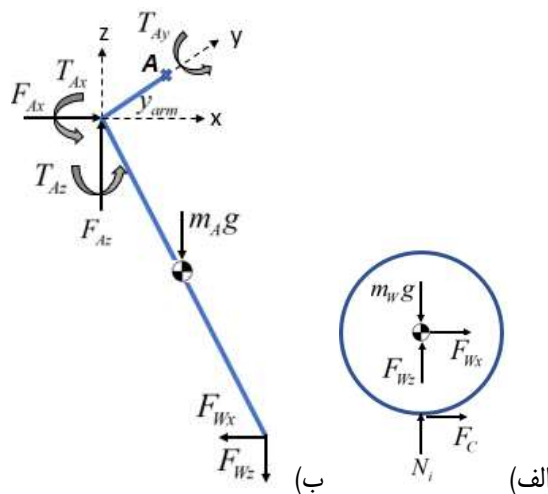
در رابطه فوق، ω_n سرعت دورانی نامی چرخ و V_n سرعت نامی مورد انتظار از خودرو است. گشتاور مورد نیاز موتور برای حرکت با شتاب ثابت نیز با فرض نیروی رانشی برابر برای تمام چرخ‌ها با رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$T_W = \frac{a + g f_R \cos(\gamma) + g \sin(\gamma)}{6} m_W R \quad (16)$$

در رابطه فوق، T_W گشتاور اعمالی توسط سیستم رانش چرخ، a شتاب خودرو، γ زاویه شیب سطح و f_R ضریب مقاومت غلتشی است. با محاسبه دور و گشتاور مورد نیاز طبق روابط فوق، سیستم رانش مناسب انتخاب می‌شود. سپس سرعت و شتاب خودرو روی سطح شیبدار محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است به دلیل قرارگیری سیستم رانش درون چرخ، باید به مسئله جانمایی در انتخاب آن توجه گردد. در صورت عدم ارضای الزامات دینامیکی و جانمایی، باید تعاملی بین خواسته‌ها و سیستم‌های رانش موجود صورت پذیرد.

۶. مطالعه موردی

در بخش حاضر، نتایج شبیه‌سازی معادلات مذکور در بخش‌های ۳ و ۴ در نرم‌افزار متلب ارائه و تحلیل می‌گردد.



شکل ۱۶. دیاگرام آزاد نیروها و گشتاورهای (الف) چرخ (ب) بازو

بازو

طبق شکل ۱۶، نیروی تماسی افقی چرخ با زمین در دو حالت قفل یا آزاد بودن چرخ برابر است با:

$$F_{Wx} = F_C = \begin{cases} \text{Locked: } -f_s = -\mu_s N_i \\ \text{Free: } -R = -f_R N_i \end{cases} \quad (11)$$

برایند نیروهای وارد بر چرخ در راستای عمودی، براینند نیروهای وارد بر بازو و گشتاور وارد بر بازو حول بین A (مفصل رابط بازو و شاسی) به ترتیب برابر است با:

$$F_{Wz} = -N_i + m_W g \quad (12)$$

$$\vec{F}_A = F_{Wx} \hat{i} + (F_{Wz} + m_A g) \hat{j} \quad (13)$$

$$\vec{T}_A = (m_A g + F_{Wz}) y_{arm} \hat{i} + F_{Wx} y_{arm} \hat{k} + \left((0.5 m_A g + F_{Wz}) L \sin(\alpha_i + \varphi_{Lo}) + F_{Wx} L \cos(\alpha_i + \varphi_{Lo}) \right) \quad (14)$$

۵. محاسبات انتخاب سیستم رانش چرخ

در این خودرو رباتیک، سیستم رانش درون چرخ نصب می‌شود^{۱۱} و می‌تواند الکتروموتور به همراه گیربکس و یا هیدروموتور باشد. این سیستم باید بتواند گشتاور و دور مورد

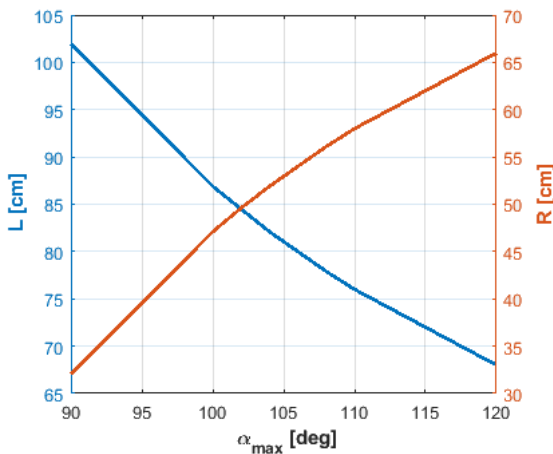
پس از تعیین پارامترهای هندسی خودرو، گشتاور وارد بر مفصل بازو مورد نیاز برای انتخاب موتور آن محاسبه می‌شود.

۶-۱. انتخاب پارامترهای هندسی

پیش از انجام محاسبات و تحلیل‌های مختلف خودرو، لازم است پارامترهای هندسی آن با توجه به قابلیت‌های حرکتی و الزامات عملیاتی توضیح داده شده در بخش‌های ۲ و ۳ تعیین گردد. قابلیت‌های حرکتی مورد انتظار شامل عبور از شیب طولی ۶۰٪، شیب عرضی ۶۰٪ با بدنه افقی، بیشینه ارتفاع پله و مانع برابر ۱ متر و عرض گودال ۱/۵ متر و همچنین حفظ کمینه فاصله کف خودرو از زمین (توانایی عبور از تونل) برابر ۵ سانتی‌متر است. ابتدا طول بدنه و عرض خودرو پیرو الزامات عملیاتی به ترتیب برابر ۴ و ۲ متر انتخاب می‌گردند. با توجه به شکل ۹، عرض خودرو برابر مجموع عرض بدنه، عرض دو تایر و عرض دو بازو (فاصله عرضی مفصل رابط بازو و چرخ و مفصل رابط بازو و شاسی) است. با انتخاب تایر مناسب از میان نمونه‌های موجود در بازار ایران، عرض خودرو تعیین می‌گردد.

طبق بررسی‌های انجام‌گرفته، مانورهای بحرانی اثرگذار بر طول بازو و شعاع چرخ، عبور از شیب عرضی و حفظ کمینه ارتفاع خودرو از زمین هستند. طبق شکل ۱۷، با افزایش بیشینه زاویه بازو، طول بازو کاهش و شعاع چرخ افزایش

می‌یابد. بنابراین برای انتخاب مشخصات هندسی، باید تعاملی بین پارامترها و الزامات عملیاتی صورت پذیرد. پارامترهای منتخب خودرو در جدول ۱ ارائه شده‌اند. علی‌رغم وابستگی ضریب مقاومت غلتشی به سرعت خودرو، طبق مرجع [۸] متوسط این ضریب در کاربرد برون جاده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شعاع چرخ برابر ۴۹/۳ سانتی‌متر، امکان عبور از مانع‌هایی با ارتفاع اندکی بیش‌تر از شعاع چرخ به کمک نیروی ترکشن چرخ‌ها وجود دارد. بنابراین خودرو از مانع ۰/۵ متری در مود خودرویی عبور خواهد کرد.



شکل ۱۷. ارتباط پارامترهای هندسی خودرو: طول بازو شعاع چرخ و بیشینه زاویه بازو

جدول ۱. پارامترهای منتخب خودرو

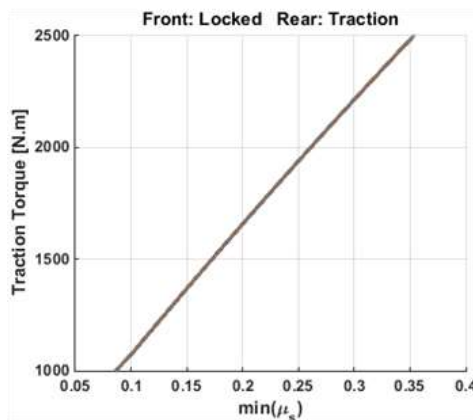
پارامتر	نماد	مقدار	واحد
عرض بدنه	W	۹۰/۲۴	cm
شعاع چرخ	R	۴۹/۳	cm
طول بازو	L	۸۵/۲	cm
فاصله عرضی چرخ‌ها	A	۱۶۹/۱	cm
فاصله عمودی مفصل بازو از کف خودرو	B	۲۸	cm
فاصله مفصل بازوهای کناری از لبه بدنه	C	۳۷	cm
فاصله مفصل دو بازوی مجاور	D	۱۶۳	cm
فاصله عمودی مرکز جرم از کف خودرو	G	۶۰	cm
بیشینه زاویه بازو	α_{max}	۱۰۰	deg
جرم خودرو (شامل بدنه و بار روی آن)	M	۳۰۰۰	kg
جرم چرخ	m_W	۱۰۰	kg
جرم بازو	m_A	۵۰	kg
ضریب مقاومت غلتشی	fR	۰/۱	-
ضریب اصطکاک ایستایی	μ_s	۰/۸	-

۶-۲. گشتاور رانش بازو

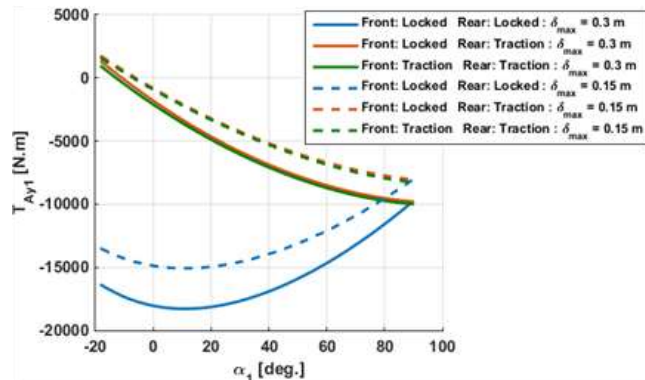
با هدف انتخاب موتور بازو، گشتاور مورد نیاز برای دوران آن تعیین می‌شود. گشتاور رانش بازو، در بحرانی‌ترین وضعیت، حین عبور از پله در وضعیت خودرو روی چرخ‌های جلویی و عقبی محاسبه می‌گردد که می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در این وضعیت، گشتاور رانش بازوی چرخ جلویی بسیار بزرگتر از چرخ عقبی است. راهکاری که برای کاهش گشتاور دوران بازوی جلویی ارائه می‌شود، استفاده از نیروی ترکشن چرخ‌ها است. در این بخش، با محاسبه گشتاور مورد نیاز برای دوران بازوی چرخ جلویی در سه حالت چرخ‌های جلویی و عقبی قفل، چرخ جلویی قفل و استفاده از نیروی ترکشن چرخ عقب و استفاده از نیروی ترکشن هر دو چرخ جلو و عقب، مناسب‌ترین مورد انتخاب می‌گردد.

نمودار گشتاور مورد نیاز برای دوران بازوی چرخ جلویی برحسب زاویه این بازو برای سه حالت مذکور در شکل ۱۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در صورت قفل نمودن چرخ جلویی و استفاده از نیروی ترکشن چرخ عقبی، بیشینه گشتاور مورد نیاز دوران بازوی چرخ جلویی به شدت کاهش می‌یابد. این نمودار برای بیشینه فاصله مرکز جرم از مرکز هندسی برابر ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر رسم شده است. بیشینه گشتاور مورد نیاز برای دوران بازو، با فرض بیشینه فاصله مرکز جرم و هندسی خودرو برابر ۱۵ سانتی‌متر، حدود ۸ کیلو نیوتن متر و با فرض بیشینه فاصله مرکز جرم و هندسی خودرو برابر ۳۰ سانتی‌متر، حدود ۱۰ کیلو نیوتن متر است. این مقادیر باید ملاک انتخاب موتور بازو قرار گیرند. با قفل نمودن چرخ‌های جلویی و استفاده از نیروی ترکشن چرخ‌های عقبی، امکان لغزش چرخ‌های جلویی وجود

چرخ جلویی افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌گردد که اعمال ترکشن کوچک توسط چرخ‌های عقبی، علاوه بر کمک به دوران بازوی چرخ‌های جلویی با اعمال گشتاور کمتر توسط موتور آن بازو، احتمال لغزش چرخ را نیز کاهش خواهد داد.



شکل ۱۹. کمترین مقدار ضریب اصطکاک مجاز بر حسب گشتاور ترکشن - مود رباتیکی



شکل ۱۸. بهبود گشتاور مورد نیاز برای دوران بازوی چرخ جلویی در عبور از پله

در مود رباتیکی خودرو، بحرانی‌ترین مانور که عبور از پله است، برای محاسبه گشتاور موتور بازو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها در حالات مختلف اجرای این مانور نشان داد در وضعیتی که چرخ جلویی بالای پله و چرخ عقبی پایین پله قرار دارد، با قفل نمودن بازوی چرخ جلویی توسط مکانیزم قفل کن و اعمال ترکشن توسط موتور چرخ عقب می‌توان گشتاور تأمینی موتور بازو را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در ادامه کار، کنترل زاویه بهینه بازوها برای انجام مانورهای مختلف حرکتی با هدف به حداقل رساندن نیروها و گشتاورهای بحرانی و همچنین دینامیک دورزنی خودرو می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، خودرو رباتیکی شش چرخ محرک فرمان لغزشی دارای سیستم تعلیق مفصلی و قابلیت‌های حرکتی آن در مود رباتیکی معرفی گردید. الزامات طراحی سینماتیکی با در نظر گرفتن قیدهای هندسی و روش انتخاب سیستم رانش بازو و چرخ ارائه شد. همچنین ضمن معرفی چند نمونه از این خودروها، مروری کوتاه بر مقالات ارائه شده در این زمینه انجام شد. در ادامه، معادلات دینامیک خودرو در مود رباتیکی استخراج گردید. در بخش مطالعه موردی، ابتدا پارامترهای هندسی خودرو با در نظر گرفتن قیود مختلف هندسی حاکم بر مسئله، انتخاب شد.

۸. مأخذ

- [1] Kang, Juyong, Wongun Kim, Kyongsu Yi, and Soungyong Jung., "Skid steering based maneuvering of robotic vehicle with articulated suspension", *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems* 2, no.2009-01-0437, 2009, pp.645-652.

- [2] Beck, Michael S., Jon T. Stinchcomb, Wendell H. Chun, Donald W. Nimblett, James E. Tomlin, and Kevin L. Conrad, "Vehicle having an articulated suspension and method of using same", U.S. Patent 8,672,065, issued March 18, 2014.
- [3] Ni, Jun, Jibin Hu, and Xueyuan Li, "Dynamic modelling, validation and handling performance analysis of a skid-steered vehicle", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol.230, no.4, 2016, pp.514-526.
- [4] Carnegie Mellon Today, www.cmu.edu/cmnews/extra/060428_crusher.html Viewed at apprile 2020.
- [5] FoxBot Small Unmanned, Autonomous Ground Vehicle, https://defense-update.com/20060502_foxbot.html Viewed at apprile 2020.
- [6] Extreme Oddity – Chainlink 4×4 Will Take It Where Other Rock Crawlers Cannot Go www.throttlextreme.com/extreme-oddity-chainlink-4x4-will-take-rock-crawlers-cannot-go/ Viewed at apprile 2020.
- [7] Ni, Jun, and Jibin Hu. "Dynamic modelling and experimental validation of a skid-steered vehicle in the pivotal steering condition," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol.231, no.2, 2017, pp.225-240.
- [8] Tavoosi, Vahid, Javad Marzban Rad, and Ramazan Mirzaei, "Vertical Dynamics Modeling and Simulation of a Six-Wheel Unmanned Ground Vehicle", *International Journal of Automotive Engineering*, Vol.8, no.2, 2018, pp.2709-2729.
- [9] Chen, Si, Xueyuan Li, Junjie Zhou, Wei Wu, Shihua Yuan, and Shuxian Liu, "Modelling the vertical dynamics of unmanned ground vehicle with rocker suspension," In *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, IEEE, 2017, pp. 370-375.
- [10] HMMWV M1114 UAH (Up-Armored Humvee) Up-Armored HMMWV Armament Carrier Vehicle Image (pic2.), www.militaryfactory.com/imageviewer/ar/pic-detail.asp?armor_id=115&sCurrentPic=pic2, Viewed at apprile 2020.

پی نوشت:

1. Skid-Steering Mobile Robots (SSMB)
2. Articulated suspension
3. Independent all-wheel drive (AWD)
4. Skid-steering
5. Turning
6. Zero-radius/Point turning
7. Off-road
8. All-Terrain Vehicle (ATV)
9. MSC ADAMS Software
10. MATLAB
11. Motor in wheel