

بررسی پارامترهای تأثیر گذار بر پایداری خودرو و بهینه‌سازی چندهدفه شاخص‌های دینامیکی آن

(تاریخ دریافت: // تاریخ پذیرش: //)

چکیده

واژگونی یکی از چالش‌های اساسی در زمینه ایمنی خودرو است که باعث درصد زیادی از خسارات جانی و مالی در تصادفات جاده‌ای می‌گردد. در بعضی از موارد می‌توان میزان احتمال وقوع واژگونی را کاهش داد ولی شاخص‌های دیگر مانند پایداری خودرو تحت الشعاع قرار می‌گیرند. به همین جهت در این پژوهش برای اینکه شاخص پایداری و واژگونی به صورت هم‌زمان بهبود یابد، از روش ترکیبی تاپسیس و تاگوچی و وزن دهی آن‌روپی استفاده گردیده است. ابتدا مدل دینامیکی خودرو انتخاب شده است. ۱۳ پارامتر در ۳ سطح شامل پارامترهای ذاتی و هندسی خودرو و سیستم تعلیق شناسایی شد. ۲۷ سری آزمون به روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی تب آماده شد این پارامترها در نرم‌افزار کارسیم ارزیابی و شناسایی شدند. در نهایت با توجه به زاویه‌های نرخ چرخش حول محور Z و زاویه غلت بدنه، ۶ پارامتر مهم به دست آمد. سپس ۶ پارامتری که در مرحله قبل حائز اهمیت بودند را مشخص و مجدداً با روش تاگوچی، تعداد ۲۵ آزمون در ۵ سطح در نرم‌افزار کارسیم و بهینه‌سازی چندهدفه تاپسیس با وزن دهی آن‌روپی انجام شد. نتایج نشان داد روش ترکیبی پیشنهادی در سرعت ۸۰ km/h باعث کاهش شاخص واژگونی به میزان ۲۹٫۲٪، زاویه غلت بدنه به میزان ۲۷٫۴٪، شتاب جانبی به میزان ۱٪ و نرخ زاویه چرخش حول محور Z به اندازه ۱٫۹٪ شده است. مجدداً آزمون‌ها در سرعت‌های مختلف انجام گردید. مشخص شد با افزایش سرعت درصد بهبود کلیه شاخص‌ها کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: واژگونی، پایداری، بهینه‌سازی ترکیبی، تاپسیس، تاگوچی، وزن دهی آن‌روپی، انتقال بار جانبی، شاخص واژگونی

Investigating the Effective Parameters on Vehicle Stability and Multi-objective Optimization of Its Dynamic Indices

(Received:; Accepted)

ABSTRACT

Rollover which causes large amount of deaths and pecuniary damages is one of the basic challenges in vehicle safety. If we can decrease the possibility of rollover in some conditions, probably other important indices are decreased like vehicle stability. It means that some indices are improved through the change of parameters but some of them are not. For this reason, in order to improve rollover and stability indices simultaneously, combined Topsis-Taguchi and Shannon Entropy methods were used in this paper. First, a whole vehicle as a dynamic model was chosen and in order to verify the most important parameters, 13 parameters in 3 levels including geometric and volumetric parameters were verified. 27 series of tests through Taguchi method in Minitab software were prepared and evaluated in Carsim software for obtaining rolling angles and yaw rate around Z axle. Six most important parameters in previous level were distinguished and again 25 tests were conducted through Taguchi method in 5 stages in Carsim Software and multi-objective optimization were conducted. Results showed, suggested method in 80km/h made rollover index, rolling angle, lateral acceleration, and yaw rate around Z axle be decreased as %28.9, %26.2, %0.3, %0.2 respectively. Again the tests were conducted in different speed and showed that the relation between improvement and vehicle speed was inverse.

Keywords: roll over, stability, combined optimization, Topsis, Taguchi, Shanon Entropy, lateral load transfer, roll over index

۱- مقدمه

خودرو این ساخته مهم دست بشر باعث تصادفاتی می‌شود که پیش‌بینی شده است در سال ۲۰۳۰ به پنجمین عامل جهانی مرگ‌ومیر تبدیل خواهد شد [۱]. یکی از انواع تصادفات واژگونی است و نسبت به انواع دیگر تصادف بیشتر به مرگ‌ومیر منجر می‌شود. پایداری و عدم واژگونی دو فاکتور مهم دینامیکی خودرو بوده که تحت تأثیر عواملی مختلفی هستند. عدم ایجاد پایداری می‌تواند، در مانورهای بحرانی باعث ایجاد حرکات غلتشی و چرخشی شدید شود. برای سنجش پایداری خودرو، از شاخص‌هایی مانند نرخ چرخش حول محور عمودی و شتاب جانبی خودرو استفاده شده است. واژگونی به دودسته‌ی ناشی از برخورد خودرو به موانع و مستقل از برخورد به موانع تقسیم‌بندی می‌شود [۲]. در نوع دوم با بهبود پارامترهای مربوطه، به شرط اینکه دیگر پارامترها هم بهبود یابند، واژگونی کاهش پیدا خواهد کرد. برای سنجش وضعیت واژگونی از شاخص‌هایی مانند غلت بدنه و انتقال بار جانبی استفاده می‌شود.

محققین زیادی برای پیدا کردن معیارهای مناسب برای توصیف پایداری و واژگونی خودرو فعالیت کردند. مشهدی و همکاران [۲] معیاری را ارائه دادند که توانایی پیش‌بینی زمان واژگونی در شرایط و سرعت‌های مختلف را دارد. جین و خواجه پور [۳] با بررسی اتوبوس سه محوره به‌عنوان مدل، شاخص واژگونی جدیدی به دست آوردند که می‌تواند میزان وقوع واژگونی را به‌صورت مؤثری ارزیابی کند. کاظمیان و همکاران [۴] دینامیک خودروی SUV را بررسی کردند و شاخص جدیدی را برای به دست آوردن دو نوع واژگونی ارائه دادند. ژو و همکاران [۵] از اندازه‌گیری هشدار TTR شبکه عصبی برای هشدار خطر واژگونی استفاده کردند و با کمک آن میزان انحراف و زاویه جانبی لغزش را کاهش دادند. لی و همکاران [۶] از شاخص واژگونی LTR استفاده کردند و با بهبود آن به شاخص IPLTR دست یافتند که با آن احتمال واژگونی را می‌توان پیش‌بینی کرد. باردیرو و همکاران [۷] مرکز واژگونی را با توجه به ماهیت به سه دسته تفکیک نمودند و مشخص کردند این مراکز چگونه بر عملکرد خودرو تأثیر می‌گذارد. پریدا و همکاران [۸] به ادغام نیروی پیشگیری از واژگونی در تعلیق‌های فعال خودرو

که در مانور خشن عمل می‌کند و چرخ‌هایی که از سطح جاده بلند شده‌اند پرداخته و بر اساس الگوریتم پیشنهادی نشان دادند که نیروهایی وابسته به زمان بوده و واژگونی را تثبیت می‌کند. عطایی و همکاران [۹] با بررسی واژگونی در خودروهای برقی شاخصی را ارائه دادند که میزان تأثیر آن در موقعیت‌های مختلف واژگونی را نشان می‌دهد. پژوهشگران علاوه بر معیارهای سنجش پایداری و واژگونی، سعی نموده‌اند با استفاده از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، به تعیین پارامترهای مختلف خودرو برای بهبود شاخص‌های پایداری و واژگونی بپردازند. سعیدی [۱۰] برای افزایش پایداری جانبی خودرو در مانورهای بحرانی از یک سیستم کنترل غیرخطی استفاده نموده است. الهامی و ایلدیری [۱۱] به بهینه‌سازی سیستم تعلیق یک خودروی شنی به منظور رسیدن به پایداری مناسب، پرداختند. پپ جیانگ و وانگ [۱۲] از روش ترکیبی تاگوچی و وزن دهی آنتروپی استفاده کردند و طی آن فاکتورهای موردنظر را بهبود دادند. رانگاو جیانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از روش تاپسیس وزن دهی آنتروپی اقدام به بهینه‌سازی نمودند که باعث بهینه شدن وزن کامیون کمپرسی به میزان ۸۱ کیلوگرم (۳.۷٪) گردید. در اغلب تحقیقات انجام شده یک هدف به‌عنوان معیار بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است و یا اهداف انتخابی در جهت یکدیگر فرآیند بهینه‌سازی را انجام می‌دهند. در تحقیق پیش رو، بهینه‌سازی هم‌زمان شاخص‌های پایداری و واژگونی در نظر گرفته شده است. این دو معیار به نحوی عمل می‌کنند که با بهبود یکی از آن‌ها، معیار دیگر می‌تواند از حالت بهینه خارج شود. برای انجام فرآیند بهینه‌سازی شش پارامتر مهم از میان ۱۳ پارامتر اولیه شناسایی شدند و از روش ترکیبی تاگوچی و تاپسیس برای بهینه‌سازی هم‌زمان شاخص‌های پایداری و واژگونی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با کاهش هم‌زمان واژگونی پایداری خودرو نیز بهبود می‌یابد. در این مقاله، ابتدا به معرفی روش پیشنهادی، معیارها، شاخص‌ها و مدل‌سازی طراحی آزمایش‌ها پرداخته شده است. در بخش بعد، بهینه‌سازی با استفاده از روش تاپسیس و تاگوچی انجام شده است. در بخش پایانی جمع‌بندی و نتایج کار ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی

شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

۲-۱- روش تاپسیس

روش تاپسیس به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه، امروزه در رتبه‌بندی مفاهیم مختلف در علوم گوناگون جایگاه ویژه‌ای دارد. مدل تاپسیس در حل مسائل چندمعیاره بر روش‌های دیگر برتری دارد. این مدل به ورودی‌های دقیق و محدود برای تصمیم‌گیری‌های سازنده و مناسب نیازمند است و شاخص‌ها نیز به وزن دهی مناسب احتیاج دارند؛ بنابراین، مدل تاپسیس توانایی پاسخ به تقاضاهای متعدد کاربران را دارد. مراحل استفاده از این روش به شرح ذیل است:

گام اول- تشکیل ماتریس تصمیم

در روش تاپسیس با استفاده از n معیار به ارزیابی m گزینه پرداخته می‌شود؛ بنابراین به هر گزینه بر اساس هر معیار امتیازی داده می‌شود. این امتیازات می‌تواند بر اساس مقادیر کمی و واقعی باشد یا اینکه کیفی و نظری باشد. در هر صورت باید یک ماتریس تصمیم $m \times n$ تشکیل شود.

گام دوم- نرمال کردن ماتریس تصمیم

مانند سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ماتریس تصمیم باید نرمال شود. برای نرمال‌سازی مقادیر از روش برداری استفاده می‌شود.

گام سوم- تشکیل ماتریس تصمیم نرمال موزون

گام بعدی تشکیل ماتریس نرمال موزون بر اساس وزن معیارها است؛ بنابراین باید از قبل اوزان معیارها با استفاده از تکنیکی مانند AHP یا آنترویی شانون محاسبه شده باشد. موزون کردن بسیار ساده است و وزن هر معیار در درایه‌های مربوط به آن معیار ضرب می‌شود.

گام چهارم- محاسبه ایده آل‌های مثبت و منفی

محاسبه PIS و NIS گام بعدی است. در این گام برای هر شاخص یک ایده آل مثبت و یک ایده آل منفی محاسبه می‌شود.

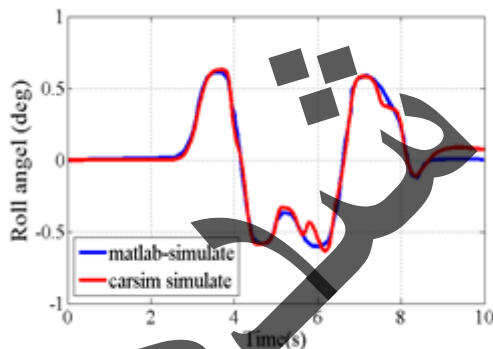
برای معیارهایی که بار مثبت دارند ایده آل مثبت بزرگ‌ترین مقدار آن معیار است. برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده آل منفی کوچک‌ترین مقدار آن معیار است. برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده آل مثبت کوچک‌ترین مقدار آن معیار است. برای معیارهایی که بار منفی دارند ایده آل منفی بزرگ‌ترین مقدار آن معیار است.

در این پژوهش به‌منظور بهبود هم‌زمان دو شاخص واژگونی و پایداری از روش ترکیبی تاپسیس تاگوچی استفاده شده است. برای بهبود هم‌زمان پایداری و واژگونی ابتدا ۱۳ پارامتر شامل پارامترهای هندسی خودرو، زاویه‌های سیستم تعلیق و وزن انتخاب شده است و به‌منظور طراحی آزمایش‌ها پارامترها در سه سطح، با افزایش و کاهش ۱۰٪ اندازه اسمی انتخاب شدند. برای اینکه بتوان میزان تأثیر هر یک از پارامترها را به دست آورد، ۲۷ آزمایش بارهنمایی روش تاگوچی طراحی گردید و در نرم‌افزار کارسیم در مانور استاندارد تغییر مسیر دویل هر یک از آن‌ها انجام شد. سپس پارامترهایی که حائز اهمیت بیشتری بودند جهت مرحله بعد انتخاب شد. چهار پارامتر در بخش شاخص پایداری و چهار پارامتر در بخش شاخص واژگونی حائز بیشترین تأثیر بوده که با توجه به اشتراک دو پارامتر ۶ پارامتر انتخاب و برای مرحله بعدی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله بعد شش پارامتری که از آزمایش قبل بیشترین تأثیر را داشتند در ۵ سطح $\pm 20\%$ طی ۲۵ آزمون در نرم‌افزار کارسیم مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.



بزرگ این نرم‌افزار را به‌عنوان ابزاری برای طراحی و آزمون انتخاب نموده و نتایج حاصل از این نرم‌افزار را با نتایج واقعی صحت سنجی نموده‌اند. در پژوهش مشهدی و همکاران [۲] صحت سنجی با نرم‌افزار کارسیم صورت گرفته است. همچنین رات و همکاران [۱۵] موقعیت صحیح واژگونی خودرو با وجود نواقص حس‌گر را سنجیدند و میزان اعتبار نمودار ارائه‌شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی خودرو کارسیم تعیین شد. عطایی و همکاران [۹] نیز به‌منظور سنجش میزان واژگونی خودرو شاسی‌بلند و مقایسه آن از کارسیم کمک گرفته است.

به‌منظور اعتبار سنجی و نشان دادن کارایی نرم‌افزار کارسیم، مقایسه آن با مدل هفت درجه آزادی انجام شده است. مشخصات ورودی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار کارسیم مشابه مدل هفت درجه آزادی در نظر گرفته شده است و غلت بدنه به‌عنوان نمونه از مجموعه نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با مشاهده شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که خروجی به‌دست‌آمده زاویه غلت مدل هفت درجه آزادی رفتار مشابه با نرم‌افزار کارسیم دارد و در صد خطای آن به میزان ۳/۳۳٪ است.



شکل (۲): زاویه غلت بدنه دو مدل نرم‌افزار کارسیم و مدل هفت درجه خودرو

در این پژوهش از خودرو کلاس E به‌عنوان مدل مرجع در نرم‌افزار کارسیم استفاده شده است. مشخصات و ابعاد در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول (۱): مشخصات ابعادی خودرو [۱۶]

مقدار	پارامتر	
۳۰۴۸	فاصله اکسل عقب و جلو (mm)	۱
۵۹۰	فاصله مرکز جرم از خط فنربندی شد (mm)	۲

گام پنجم- فاصله از ایده‌آل‌های مثبت و منفی در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل حساب می‌شود. فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه خواهد شد.
گام ششم - محاسبه راه‌حل ایده‌آل
در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل حساب می‌شود.

۲-۲- وزن دهی به روش آنتروپی

روش آنتروپی در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور ارائه شده است [۱۴]. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. در یک ماتریس تصمیم‌گیری با m گزینه و n معیار، مراحل این روش به شرح زیر است:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم در تکنیک آنتروپی با استفاده از n معیار به ارزیابی m گزینه پرداخته می‌شود. بنابراین به هر گزینه بر اساس هر معیار امتیازی داده می‌شود. این امتیازات می‌تواند بر اساس مقادیر کمی و واقعی باشد یا اینکه کیفی و نظری باشد. در هر صورت باید یک ماتریس تصمیم $m \times n$ در تشکیل شود
گام دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم در این مرحله انجام می‌گیرد.

گام سوم: تعیین آنتروپی هر شاخص
گام چهارم: تعیین عدم اطمینان یا درجه انحراف هر شاخص
گام پنجم: تعیین وزن هر شاخص

۳-۲- مدل‌سازی، صحت‌گذاری و طراحی آزمایش‌ها

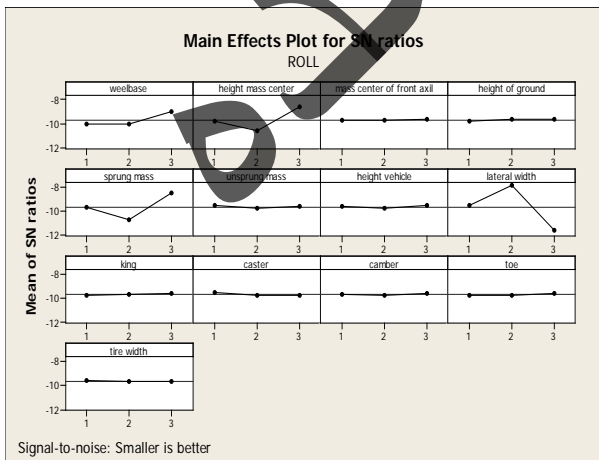
در این بخش مدل دینامیکی خودرو، صحت‌گذاری مدل، معیارهای دینامیکی و همچنین پارامترهای انتخابی موردتوجه قرار گرفته است. نحوه انتخاب آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی نیز توضیح داده شده است.

در پژوهش‌های بسیاری جهت مدل‌سازی دینامیکی خودرو از نرم‌افزار کارسیم استفاده شده است. نرم‌افزار کارسیم بیش از ۱۵۰ پایگاه داده دارد که مدل‌های استاندارد خودرو، آزمون‌های مختلف در زمینه فرمان‌پذیری، سواری، کنترل پایداری در این نرم‌افزار وجود دارد. بسیاری از خودروسازان

شده است ولی همزمان با هم مورد سنجش قرار نگرفتند. ۱۳ پارامتر انتخابی در جدول ۱ معرفی شدند و برای بررسی تأثیر آن‌ها دینامیک خودرو به مقدار $\pm 10\%$ اندازه اسمی در سه سطح تغییر داده می‌شوند. برای بررسی تمامی سطوح پارامترها نیاز به $(level^{factor} = 13^3 = 2197)$ آزمایش است ولی با کمک روش تاگوچی تعداد آزمایش‌ها به ۲۷ مورد کاهش می‌یابد. در واقع مزیت روش تاگوچی کاهش تعداد آزمایش‌ها به حداقل مقدار ضروری است. برای بدست آوردن تأثیر هر یک از پارامترها آزمایش‌ها در نرم افزار کارسیم انجام می‌شود.

۲-۴-۲- پیداکردن پارامترهای تأثیرگذار

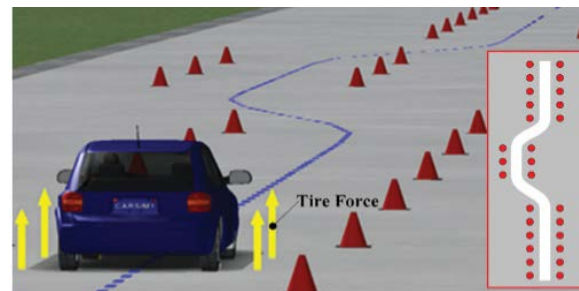
به منظور پیدا نمودن پارامترهای تأثیر گذار، نسبت سیگنال به نویز^۲ پارامترها برای شاخص‌ها انتخابی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. هر چقدر شیب خط بیشتر باشد، آن پارامتر تأثیر بیشتری در بین پارامترها دارد. در شاخص غلت بدنه، پارامترهای فاصله ی عرضی تایر بیشترین تأثیر و وزن فنربندی شده و ارتفاع مرکز جرم به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم هستند. همچنین عرض تایر و فاصله مرکز جرم از محور جلو دارای کمترین تأثیر در این شاخص هستند، به بیان دیگر می‌توان گفت با تغییر مقادیر عرض تایر، تغییر محسوسی در شاخص مورد ارزیابی به وجود نیامده و شیب نمودار مربوطه بسیار ناچیز است.



شکل (۴): رتبه پارامترهای تأثیرگذار در زاویه غلت بدنه همچنین در شکل ۵ شاخص پیچیدن خودرو حول محور Z

۳	فاصله مرکز جرم از اکسل جلو (mm)	۱۴۰۲
۴	ارتفاع خودرو از سطح زمین (mm)	۵۰۰
۵	جرم فنربندی شده (kg)	۱۶۵۳
۶	جرم فنربندی نشده (kg)	۹۰
۷	ارتفاع خودرو (mm)	۱۴۸۰
۸	فاصله عرضی دوچرخ (mm)	۱۶۰۰
۹	کینگ پین (mm)	۷,۹۱
۱۰	کستر (deg)	۳,۴۱
۱۱	کمبر (deg)	۰,۱۴
۱۲	تو (deg)	۰,۲
۱۳	عرض تایر (mm)	۲۲۵

برای سنجش شاخص پایداری از چرخش حول محور Z و نرخ شتاب جانبی خودرو و برای سنجش واژگونی از نرخ زاویه غلتش بدنه و شاخص واژگونی انتقال بار جانبی استفاده شده است. این معیارها توسط حرکت خودرو در تست تغییر مسیر دابل سنجیده می‌شوند. نوع و مشخصات جاده در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۶]. آزمایش DLC^۱ در اغلب پژوهش‌ها جهت ارزیابی پایداری و واژگونی خودرو استفاده می‌شود. سرعت خودرو نیز در این تست ۸۰ km/hr است.



شکل (۳): آزمون استاندارد تغییر مسیر دابل و نیروهای وارده به تایر. [۱۶]

۲-۴-۲- فاکتورها و سطوح انتخابی

۲-۴-۲-۱- آزمایش اولیه

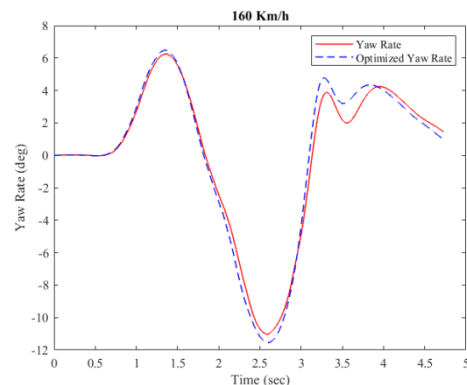
ابتدا ۱۳ پارامتر شامل پارامترهای هندسی خودرو، زاویه های سیستم تعلیق و وزن انتخاب شده است. از همه پارامترهای انتخابی در مراجع و پژوهش‌ها قبلی هم استفاده

² Signal to noise ration (SNR)

¹ Double Lane Change

جدول (۱۰): درصد بهبود در سرعت های مختلف

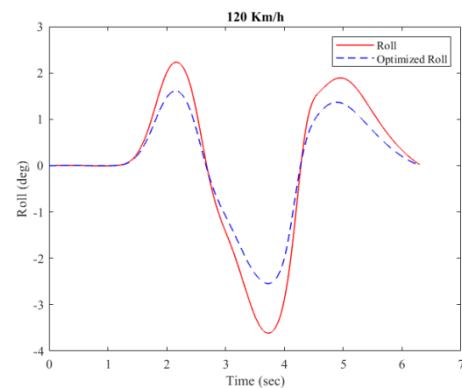
ردیف	سرعت (kg)	yaw rate	ay	roll
آزمایش اولیه	۱۲۰	۱۲,۵۹۸	۰,۶۷۷	۳,۶۱۳
	۱۶۰	۱۱,۰۱۸	۰,۷۱۸	۳,۸۳۲
آزمایش بهینه	۱۲۰	۱۲,۳۴۲	۰,۶۴۸	۲,۵۴۴
	۱۶۰	۱۱,۵۴۴	۰,۷۱۶	۲,۸۰۸
درصد بهبود	۱۲۰	۰,۰۲	۰,۰۴۳	۰,۲۹۶
	۱۶۰	۰,۰۴۸	۰,۰۰۳	۰,۲۶۷



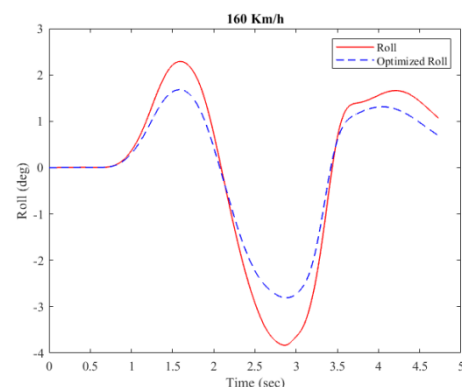
شکل (۱۰): نرخ چرخش حول محور Z در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش پس از شناسایی معیارهای تأثیرگذار بر پایداری و شاخص واژگونی و در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر بر این معیارها، طبق آرایه های متعامد L25 به شبیه‌سازی حرکت خودرو در مانور تغییر مسیر دابل توسط نرم افزار کارسیم پرداخته شد. معیارهای ارزیابی پایداری، شامل نرخ چرخش حول محور Z و شتاب جانبی و وضعیت واژگونی از شاخص‌های غلت بدنه و انتقال بار جانبی استفاده شده است. با توجه به اینکه برای بهینه‌سازی پایداری و شاخص واژگونی چند معیار (هدف) مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین نیاز به روش کمکی هست که توانایی تصمیم‌گیری بر روی چند هدف به طور همزمان را دارا باشد. به این منظور روش تاپسیس و وزندهی آنتروپی استفاده شده است. از نتایج پیداست روش ترکیبی پیشنهادی باعث کاهش شاخص واژگونی به میزان ۲۹,۲٪، زاویه غلت بدنه به میزان ۲۷,۴٪، شتاب جانبی به میزان ۱٪ و نرخ زاویه چرخش حول محور Z ۱,۹٪ سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت گردیده است، بنابراین این روش توانایی بهینه‌سازی چند هدف به‌طور همزمان را دارد به نحوی که میزان احتمال وقوع واژگونی را کاهش و پایداری خودرو را نیز حفظ می‌کند. و با افزایش سرعت در آزمون‌ها میزان بهبود کاهش یافت به طوری که در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نرخ زاویه چرخش حول محور Z به مقدار ۴,۸٪ بدست آمد.



شکل (۱۱): زاویه غلت بدنه در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه



شکل (۱۲): زاویه غلت بدنه در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه

۵- مراجع

1. https://www.who.int/violence_injury_prevention/key_facts/VIP_key_fact_3.pdf
2. Mashadi, Behrooz, and Hamid Mostaghimi. "Vehicle lift-off modelling and a new rollover

نتایج حاصله در جدول ۱۰ خلاصه شده است. می‌توان نتیجه گرفت بهینه‌سازی شاخص چرخش حول محور Z با افزایش سرعت، کاهش یافته ولی شاخص زاویه غلت بدنه عملکرد مطلوب داشته است.

13. Jiang, Rongchao, Shukun Ci, Dawei Liu, Xiaodong Cheng, and Zhenkuan Pan. "A Hybrid Multi-Objective Optimization Method Based on NSGA-II Algorithm and Entropy Weighted TOPSIS for Lightweight Design of Dump Truck Carriage." *Machines* 9, no. 8 (2021): 156.
14. Gray, Robert M. *Entropy and information theory*. Springer Science & Business Media, 2011.
15. Rath, Jagat Jyoti, Michael Defoort, and Kalyana Chakravarthy Veluvolu. "Rollover index estimation in the presence of sensor faults, unknown inputs, and uncertainties." *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17, no. 10 (2016): 2949-2959.
16. Huang, Wei, Pak Kin Wong, Ka In Wong, Chi Man Vong, and Jing Zhao. "Adaptive neural control of vehicle yaw stability with active front steering using an improved random projection neural network." *Vehicle system dynamics* 59, no. 3 (2021): 396-414.
17. detection criterion." *Vehicle system dynamics* 55, no. 5 (2017): 704-724.
3. Zhilin, Jin, Jingxuan Li, Yanjun Huang, and Khajepour Amir. "Study on Rollover Index and Stability for a Triaxle Bus." *Chinese Journal of Mechanical Engineering= Ji xie gong cheng xue bao* 32, no. 1 (2019).
4. Kazemian, Amir Hossein, Majid Fooladi, and Hossein Darijani. "Rollover index for the diagnosis of tripped and untripped rollovers." *Latin American Journal of Solids and Structures* 14 (2017): 1979-1999.
5. Zhu, Bing, Qi Piao, Jian Zhao, and Litong Guo. "Integrated chassis control for vehicle rollover prevention with neural network time-to-rollover warning metrics." *Advances in Mechanical Engineering* 8, no. 2 (2016): 1687814016632679.
6. Li, Haiqing, Yougun Zhao, Haoyu Wang, and Fen Lin. "Design of an improved predictive LTR for rollover warning systems." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 39, no. 10 (2017): 3779-3791.
7. Badru, Ibrahim A. *The three suspension roll centers and their application to vehicle dynamics*. No. 2014-01-0136. SAE Technical Paper, 2014.
8. Parida, Nigam Chandra, Soumyendu Raha, and Anand Ramani. "Rollover-preventive force synthesis at active suspensions in a vehicle performing a severe maneuver with wheels lifted off." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15, no. 6 (2014): 2583-2594.
9. Ataei, Mansour, Amir Khajepour, and Soo Jeon. "Model predictive rollover prevention for steer-by-wire vehicles with a new rollover index." *International Journal of Control* 93, no. 1 (2020): 140-155.
10. Saeedi, Mohammad Amin "An active non-linear steering control system to increase vehicle lateral stability." *Journal of Aerospace Mechanics*, 15, 3, 1398, 47-60 (in persian).
11. Elhami, Mohammad Reza, Eldar, Mohammad, "Analyzing and Optimizing the Suspension of a Sandy Vehicle: Responding to Standard Inputs." *Journal of Aerospace Mechanics*, 1, 3, 1384, (in persian).
12. Jiang, Rongchao, and Dengfeng Wang. *Optimization of suspension system of self-dumping truck using TOPSIS-based Taguchi method coupled with entropy measurement*. No. 2016-01-1385. SAE Technical Paper, 2016.