

بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری خودرو و بهینه‌سازی چندهدفه شاخص‌های دینامیکی آن

سعید عرفانیان ظروفی^۱، یداله فرزانه^{۲*}، منصور بقائیان^۲

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

^۲ استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران

برجسته‌ها

- برای اینکه شاخص پایداری و واژگونی به صورت هم‌زمان بهبود یابد، از روش ترکیبی تاپسیس و تاگوچی و وزن‌دهی آن‌تروپی استفاده گردیده است.
- ۱۳ پارامتر در ۳ سطح شامل پارامترهای ذاتی و هندسی خودرو و سیستم تعلیق شناسایی شد.
- مشخص شد با افزایش سرعت درصد بهبود کلیه شاخص‌ها کاهش می‌یابد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

*نویسنده مسئول:

ya_farzaneh@mshdiau.ac.ir

کلید واژه‌ها:

واژگونی

پایداری

بهینه‌سازی ترکیبی

تاپسیس

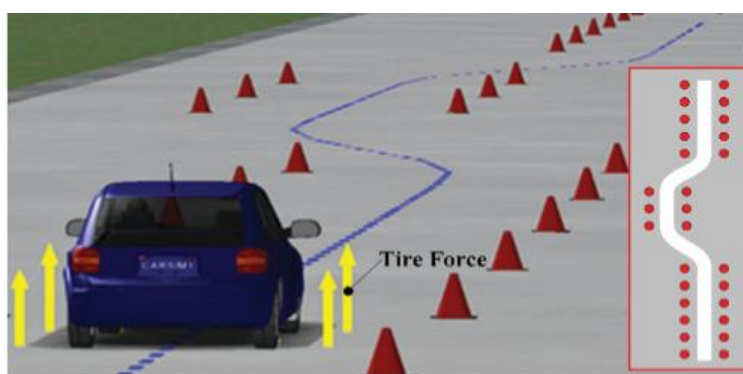
تاگوچی

وزن‌دهی آن‌تروپی

انتقال بار جانبی

شاخص واژگونی

چکیده گرافیکی



چکیده

واژگونی یکی از چالش‌های اساسی در زمینه ایمنی خودرو است که عامل درصد زیادی از خسارات جانی و مالی در تصادفات جاده‌ای است. در بعضی از موارد می‌توان میزان احتمال وقوع واژگونی را کاهش داد ولی شاخص‌های دیگر مانند پایداری خودرو تحت‌الشعاع 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 وزن‌دهی آن‌تروپی 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 وزن‌دهی آن‌تروپی 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 و مشخص شد با افزایش سرعت درصد بهبود کلیه شاخص‌ها کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

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 نیروهای 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 ایلدری [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 وزن‌دهی آن‌تروپی استفاده کردند و طی آن فاکتورهای موردنظر را بهبود دادند. رانگو جیانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از روش تاپسیس وزن‌دهی آن‌تروپی اقدام به بهینه‌سازی نمودند که باعث بهینه شدن وزن کامیون کمپرسی به میزان ۸۱ کیلوگرم (۳/۷٪) گردید. در اغلب تحقیقات انجام‌شده یک هدف به‌عنوان معیار بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است و یا اهداف انتخابی در جهت یکدیگر فرآیند بهینه‌سازی را انجام می‌دهند. در تحقیق پیش‌رو، 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

خودرو، این ساخته مهم دست بشر، باعث تصادفات می‌شود که پیش‌بینی شده 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 دو دسته 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 خواجه‌پور [۳] با بررسی اتوبوس سه‌محوره 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

۱-۲-۱- 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.

۲-۱-۲- گام دوم: نرمال کردن ماتریس تصمیم

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

۳-۱-۲- 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 آنتروپی شانون محاسبه شده باشد. موزون کردن بسیار ساده است و وزن هر معیار در درایه‌های مربوط به آن معیار ضرب می‌شود.



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی

و تاگوچی انجام شده است. در بخش پایانی جمع‌بندی و نتایج کار ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی

در این پژوهش به منظور 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 به منظور 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 با راهنمایی روش تاگوچی طراحی گردید و در نرم‌افزار کارسیم در مانور استاندارد تغییر مسیر دوبل هریک 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 مورداستفاده 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 موردبررسی و آزمایش قرار گرفتند. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱-۲- روش تاپسیس

روش تاپسیس به‌عنوان یکی از روش 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 وزن‌دهی مناسب احتیاج دارند؛ بنابراین، مدل تاپسیس توانایی پاسخ به تقاضاهای متعدد کاربران را دارد. مراحل استفاده از این روش به شرح ذیل است:

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، صحه‌گذاری و طراحی آزمایش‌ها

در این بخش مدل دینامیکی خودرو، صحه‌گذاری 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 بزرگ این نرم‌افزار را به‌عنوان ابزاری برای طراحی و آزمون انتخاب نموده و نتایج حاصل از این نرم‌افزار را با نتایج واقعی صحت‌سنجی نموده‌اند. در پژوهش مشهدی و همکاران [۲] صحت‌سنجی 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 ارائه شده 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.

۴-۱-۲- گام چهارم: محاسبه ایده‌آل‌های مثبت و منفی

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

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

۵-۱-۲- 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.

۶-۱-۲- گام ششم: محاسبه راه‌حل ایده‌آل

در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل حساب می‌شود.

۲-۲- وزن‌دهی به روش آنتروپی

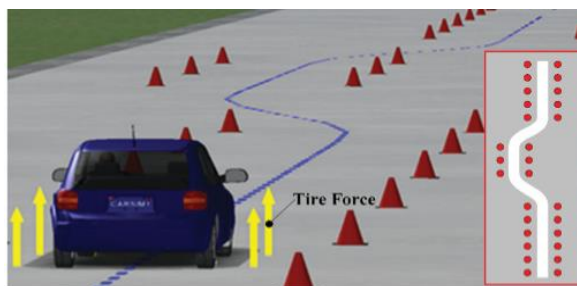
روش آنتروپی در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور ارائه شده است [۱۴]. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است. در یک ماتریس تصمیم‌گیری با m گزینه و n معیار، مراحل این روش به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

در این پژوهش از خودرو کلاس E به عنوان مدل مرجع در نرم افزار کارسیم استفاده شده است. مشخصات و ابعاد در جدول ۱ مشاهده می شود.

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 دویل سنجیده می شوند. نوع و مشخصات جاده در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۶]. آزمایش DLC در اغلب پژوهش ها جهت ارزیابی پایداری و واژگونی خودرو استفاده می شود. سرعت خودرو نیز در این تست ۸۰ km/hr است.



شکل (۳): آزمون استاندارد تغییر مسیر دویل و نیروهای

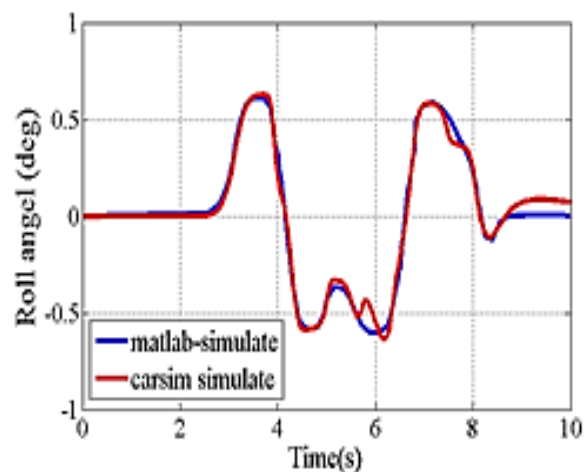
وارد به تایر [۱۶]

۲-۴- فاکتورها و سطوح انتخابی

۲-۴-۱- 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 پژوهش ها قبلی هم استفاده شده است ولی هم زمان 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 می شوند. برای بررسی تمامی سطوح پارامترها نیاز به $(level^{factor} = 13^3 = 2197)$ آزمایش است، ولی با کمک روش تاگوچی تعداد آزمایش ها به ۲۷ مورد کاهش می یابد. در واقع مزیت روش تاگوچی کاهش تعداد آزمایش ها به حداقل مقدار ضروری است. برای به دست

به منظور اعتبارسنجی و نشان دادن کارایی نرم افزار کارسیم، مقایسه آن با مدل هفت درجه آزادی انجام شده است. مشخصات ورودی برای شبیه سازی در نرم افزار کارسیم مشابه مدل هفت درجه آزادی در نظر گرفته شده است و غلت بدنه به عنوان نمونه از مجموعه نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با مشاهده شکل ۲ می توان نتیجه گرفت که خروجی به دست آمده زاویه غلت مدل هفت درجه آزادی رفتار مشابه با نرم افزار کارسیم دارد و در صد خطای آن به میزان ۳/۳۳٪ است.



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

جدول (۱): مشخصات ابعادی خودرو [۱۶]

پارامتر	مقدار
۱ فاصله اکسل عقب و جلو (mm)	۳۰۴۸
۲ فاصله مرکز جرم از خط فنربندی شد (mm)	۵۹۰
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 توو (deg)	۰/۲
۱۳ عرض تایر (mm)	۲۲۵

حول محور Z موردبررسی قرار گرفته است، فاصله طولی دو محور عقب و جلو بیشترین تأثیر و ارتفاع خودرو از زمین و فاصله مرکز جرم از محور جلو به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم هستند. همچنین زاویه‌های توو و کینگ پین دارای کمترین تأثیر در این شاخص هستند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از میان ۱۳ پارامتر تعداد شش پارامتر با بالاترین تأثیرگذاری برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند. پارامترهای مؤثر بر واژگونی خودرو شامل:

- فاصله عرضی دوچرخ: بیشترین تأثیر در ۱۳ پارامتر انتخابی را بر واژگونی خودرو دارد.
 - وزن خودرو: دومین پارامتر مهم و تأثیرگذار بر واژگونی خودرو، وزن آن است.
 - ارتفاع مرکز جرم: این پارامتر که نشان‌دهنده فاصله مرکز ثقل خودرو تا زمین است سوم پارامتر مهم است.
- پارامترهای مؤثر بر پایداری خودرو:

- فاصله طولی دو محور عقب و جلو: مؤثرترین پارامتر در پایداری خودرو، فاصله بین دو محور جلو و عقب خودرو است.
- ارتفاع خودرو از سطح زمین: دومین پارامتر مؤثر بر پایداری ارتفاع خودرو از سطح زمین است.
- فاصله مرکز جرم از محور جلو: یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در تغییر پایداری خودرو، فاصله مرکز جرم از محور چرخ‌های جلو است.

۲-۴-۳- آزمایش‌های اصلی

در این مرحله برای به دست آوردن پارامتری که به‌صورت هم‌زمان بایستی بهینه گردد، ۶ پارامتر در ۵ سطح مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش فاکتورهای موردبررسی در پایداری و واژگونی خودرو، مشخصات هندسی و وزن؛ مقادیر تعیین‌شده در آزمایش اولیه در پنج سطح $(\pm 1.0\%)$ و $(\pm 2.0\%)$ تغییر یافته است که در جدول ۲ مشاهده می‌شوند.

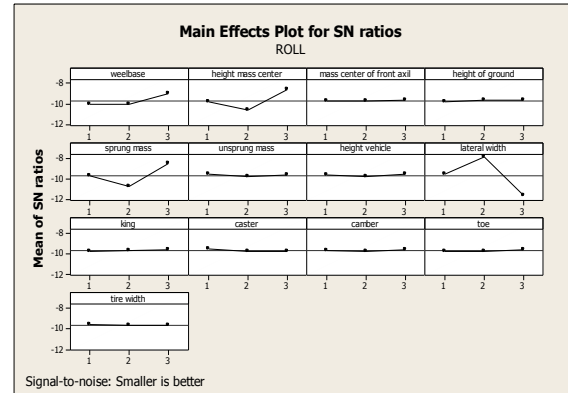
۲-۴-۴- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در این مرحله نیاز به $(level^{factor} = 6^5 = 15625)$ آزمایش است. آزمایش از نظر وقت و هزینه مقرون‌به‌صرفه

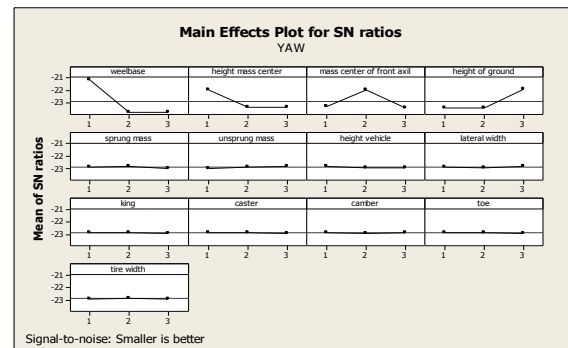
آوردن تأثیر هر یک از پارامترها آزمایش‌ها در نرم‌افزار کارسیم انجام می‌شود.

۲-۴-۲- پیدا کردن پارامترهای تأثیرگذار

به‌منظور پیدا نمودن پارامترهای تأثیرگذار، نسبت سیگنال به نویز پارامترها برای شاخص‌ها انتخابی موردبررسی قرار گرفته است. نتایج در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۴): رتبه پارامترهای تأثیرگذار در زاویه غلت بدنه



شکل (۵): رتبه پارامترهای تأثیرگذار در نرخ دوران حول

محور Z بدنه

هر چقدر شیب خط بیشتر باشد، آن پارامتر تأثیر بیشتری در بین پارامترها دارد. در شاخص غلت بدنه، پارامترهای فاصله 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، به‌بیان‌دیگر می‌توان گفت با تغییر مقادیر عرض تایر، تغییر محسوسی در شاخص مورد ارزیابی به وجود نیامده و شیب نمودار مربوطه بسیار ناچیز است. همچنین در شکل ۵ شاخص پیچیدن خودرو

۳- بهینه‌سازی

۳-۱- بهینه‌سازی با استفاده از روش تاپسیس و آنتروپی

در این مطالعه به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای مؤثر بر پایداری و واژگونی، چرخش حول محور Z، زاویه غلتش بدنه، شتاب جانبی و انتقال بار جانبی در نظر گرفته شده است، در واقع جهت کمینه کردن این چهار معیار، از روش تاپسیس استفاده شده است.

مقادیر ماتریس وزین با استفاده از مقادیر ماتریس نرمالایز و وزن به دست آمده از روش آنتروپی جدول ۴ به دست خواهد آمد. خروجی حاصل از آزمایش‌ها طبق آرایه‌های متعامد L25، تشکیل‌دهنده ماتریس تصمیم‌گیری در روش تاپسیس هستند، بعد از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری ماتریس نرمالایز به صورت جدول ۴ به دست آورده می‌شود. برای به دست آوردن تأثیر اهمیت معیارها، مقدار وزن گزینه‌ها از روش آنتروپی به دست آمده است. همین‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مقادیر وزنی برای چرخش حول محور Z، زاویه غلتش بدنه، شتاب جانبی خودرو و شاخص واژگونی انتقال بار جانبی به ترتیب ۰/۰۰۰۵٪، ۰/۰۰۱۷٪، ۰/۰۴۷٪ و ۰/۵۲٪ اختصاص یافته است.

هدف روش تاپسیس، دور شدن از ایده‌آل منفی و نزدیک شدن به ایده‌آل مثبت است. ایده‌آل مثبت مینم مقدار از ماتریس وزین و ایده‌آل منفی ماکزیمم مقدار از ماتریس وزین است. این مقادیر در جدول ۶ مشاهده می‌شود. فاصله هر گزینه تا ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی در جدول ۷ مشاهده می‌شود. به این ترتیب بالاترین مقادیر رتبه نخست و پایین‌ترین مقادیر مشخص می‌شوند. با بررسی این جدول می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش ۲۰ بهترین و آزمایش ۱۲ بدترین پاسخ می‌باشند.

۳-۲- بهینه‌سازی به روش تاگوچی

برای به دست آوردن ترکیبی بهینه از ضریب نزدیکی نسبی از محاسبه میانگین ضریب نزدیکی نسبی در روش تاگوچی

نیست؛ بنابراین رای به دست آوردن حداکثر اطلاعات از حداقل آزمایش‌ها از روش تاگوچی استفاده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تعداد آزمون‌های موردنیاز به ۲۵ آزمایش کاهش می‌یابد. به منظور بهینه‌سازی چندهدفه، نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مطابق با آرایه‌های متعامد استاندارد L25 برای پایداری و واژگونی چرخش حول محور عمودی (yaw rate) و زاویه غلتش بدنه (ϕ)، شتاب جانبی (ay) و شاخص واژگونی انتقال بار جانبی به صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود. انتقال بار جانبی عددی بین -۱ تا ۱ بوده و در مواقع حرکت مستقیم خودرو این عدد صفر بوده و زمانی که یکی از چرخ‌ها از زمین بلند شود مقدار -۱ یا ۱ است. لازم به ذکر است که کم‌ترین مقادیر حاصل از نتایج به منظور بهینه‌سازی فاکتورها برای رسیدن به پایداری و واژگونی موردنظر است.

$$LTR = \frac{2h}{t_w} \left[\frac{a_y}{g} + \sin \phi \right] \quad (1)$$

جدول (۲): فاکتورهای ورودی و سطوح استفاده‌شده در آزمایش‌های ثانویه

	اصلی	+۲۰٪ اصلی	-۱۰٪ اصلی	+۱۰٪ اصلی	پارامتر
Roll	۱۲۸۰	۱۹۲۰	۱۴۴۰	۱۷۶۰	Lateral Width
	۱۳۳۲/۴	۱۹۸۳/۶	۱۴۸۷/۷	۱۸۱۸/۳	Sprung Mass
	۴۷۲	۷۰۸	۵۳۱	۶۴۹	Height Mass Center
Yaw	۲۴۳۸/۴	۲۶۵۷/۶	۲۷۳۳/۲	۲۳۵۲/۸	Wheelbase
	۴۰۰	۶۰۰	۴۵۰	۵۵۰	Height of Ground
	۱۱۲۱/۶	۱۶۸۲/۴	۱۲۶۱/۸	۱۵۴۲/۲	Mass Center of Front Axel

داده‌اند مؤثرترین سطوح در بهینه‌سازی هم‌زمان پایداری و واژگونی هستند. مقدار دلتا نیز از تفاوت بین حداکثر و حداقل میانگین ضریب نزدیکی نسبی در هر فاکتور محاسبه می‌شود به طوری که بالاترین نقطه‌ها در هر فاکتور، سطوح بهینه هستند.

استفاده شده است؛ این مقادیر طبق معادلات ۲ و ۳ به دست می‌آیند.

$$F_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_i \quad (2)$$

$$\Delta F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\} - \{F_1, F_2, \dots, F_n\} \quad (3)$$

مقدار میانگین ضریب نزدیکی نسبی در جدول ۸ مشاهده می‌شوند. مقادیری که بیشترین مقدار را به خود نسبت

جدول (۳): نتایج بر اساس آرایه استاندارد L25

Index Rollover	پارامتر										ردیف
	پاسخ				roll						
LTR	Roll	Ay	Yaw rate	Mass center of front axel	Height of ground	wheelbase	Height mass center	Sprung mass	Lateral width		
۰/۰۵۸	۲/۲۵	۰/۳۹۱	۱۰/۷۴	۱۴۰۲	۵۰۰	۳۰۴۸	۵۹۰	۱۶۵۳	۱۶۰۰	۱	
۰/۰۷۲	۲/۸	۰/۳۹۴	۱۰/۶	۱۵۴۲/۲	۵۵۰	۳۳۵۲/۸	۶۴۹	۱۸۱۸/۳	۱۶۰۰	۲	
۰/۰۴۶	۱/۷۶	۰/۳۸۴	۱۰/۸۳	۱۲۶۱/۸	۴۵۰	۲۷۴۳/۲	۵۳۱	۱۴۸۷/۷	۱۶۰۰	۳	
۰/۰۸۹	۳/۴۴۸	۰/۳۹۷	۱۰/۴۴	۱۹۲۰	۶۰۰	۳۶۵۷/۶	۷۰۸	۱۹۸۳/۶	۱۶۰۰	۴	
۰/۰۳۸	۱/۴۱۷	۰/۳۹۵	۱۰/۹۵	۱۲۸۰	۴۰۰	۲۴۳۸/۴	۴۷۲	۱۳۲۲/۴	۱۶۰۰	۵	
۰/۰۵۶	۲/۱	۰/۳۹	۱۰/۹	۱۲۸۰	۶۰۰	۲۷۴۳/۲	۶۴۹	۱۶۵۳	۱۷۶۰	۶	
۰/۰۴۴	۱/۸۵	۰/۳۹۴	۱۰/۵۶	۱۴۰۲	۴۰۰	۳۶۵۷/۶	۵۳۱	۱۸۱۸/۳	۱۷۶۰	۷	
۰/۰۶۵	۲/۱۹۹	۰/۴۱۴	۱۰/۷۳	۱۵۴۲/۲	۵۰۰	۲۴۳۸/۴	۷۰۸	۱۴۸۷/۷	۱۷۶۰	۸	
۰/۰۳۸	۱/۷۶	۰/۳۹۴	۱۰/۷۸	۱۲۶۱/۸	۵۵۰	۳۰۴۸	۴۷۲	۱۹۸۳/۶	۱۷۶۰	۹	
۰/۰۴۳	۱/۴۷۸	۰/۳۸۳	۱۰/۶۱	۱۹۲۰	۴۵۰	۳۳۵۲/۸	۵۹۰	۱۳۲۲/۴	۱۷۶۰	۱۰	
۰/۰۶۴	۲/۵۳	۰/۴۱۹	۱۰/۷۹	۱۹۲۰	۵۵۰	۲۴۳۸/۴	۵۳۱	۱۶۵۳	۱۴۴۰	۱۱	
۰/۱۰۵	۳/۸۲۵	۰/۳۹۸	۱۰/۷۹	۱۲۸۰	۴۵۰	۳۰۴۸	۷۰۸	۱۸۱۸/۳	۱۴۴۰	۱۲	
۰/۰۴۸	۱/۸۹۹	۰/۳۸۹	۱۰/۶۹	۱۴۰۲	۶۰۰	۳۳۵۲/۸	۴۷۲	۱۴۸۷/۷	۱۴۴۰	۱۳	
۰/۰۸۱	۳/۳۱۸	۰/۳۹۶	۱۰/۷۸	۱۵۴۲/۲	۴۰۰	۲۷۴۳/۲	۵۹۰	۱۹۸۳/۶	۱۴۴۰	۱۴	
۰/۰۷۴	۲/۴	۰/۳۹۱	۱۰/۶۴	۱۲۶۱/۸	۵۰۰	۳۶۵۷/۶	۶۴۹	۱۳۲۲/۴	۱۴۴۰	۱۵	
۰/۰۵۵	۱/۹۸	۰/۳۹۴	۱۰/۶۹	۱۲۶۱/۸	۴۰۰	۳۳۵۲/۸	۷۰۸	۱۶۵۳	۱۹۲۰	۱۶	
۰/۰۳۱	۱/۳۲	۰/۳۸۶	۱۰/۶۹	۱۹۲۰	۵۰۰	۲۷۴۳/۲	۴۷۲	۱۸۱۸/۳	۱۹۲۰	۱۷	
۰/۰۴	۱/۴۴۳	۰/۳۹۲	۱۰/۶۹۵	۱۲۸۰	۵۵۰	۳۶۵۷/۶	۵۹۰	۱۴۸۷/۷	۱۹۲۰	۱۸	
۰/۰۵۳	۲/۱۵۷	۰/۳۹۳	۱۰/۸۹	۱۴۰۲	۴۵۰	۲۴۳۸/۴	۶۴۹	۱۹۸۳/۶	۱۹۲۰	۱۹	
۰/۰۳۲	۱/۱	۰/۳۸	۱۰/۶۸	۱۵۴۲/۲	۶۰۰	۳۰۴۸	۵۳۱	۱۳۲۲/۴	۱۹۲۰	۲۰	
۰/۰۶۳	۲/۶	۰/۳۹۲	۱۰/۵۳	۱۵۴۲/۲	۴۵۰	۳۶۵۷/۶	۴۷۲	۱۶۵۳	۱۲۸۰	۲۱	
۰/۰۹۷	۳/۷۳	۰/۳۹۲	۱۰/۹	۱۲۶۱/۸	۶۰۰	۲۴۳۸/۴	۵۹۰	۱۸۱۸/۳	۱۲۸۰	۲۲	
۰/۰۹۸	۳/۲۸	۰/۳۸۸	۱۰/۶۵	۱۹۲۰	۴۰۰	۳۰۴۸	۶۴۹	۱۴۸۷/۷	۱۲۸۰	۲۳	
۰/۰۸۷	۳/۶۷	۰/۴	۱۰/۶۷	۱۲۸۰	۵۰۰	۳۳۵۲/۸	۵۳۱	۱۹۸۳/۶	۱۲۸۰	۲۴	
۰/۱۰۹	۳/۳۵	۰/۳۹۲	۱۰/۷۱	۱۴۰۲	۵۵۰	۲۷۴۳/۲	۷۰۸	۱۳۲۲/۴	۱۲۸۰	۲۵	

جدول (۴): ماتریس نرمالایز

ردیف	Yaw rate	Ay	Roll	LTR
۱	۱۰/۷۴	۰/۳۹۱	۲/۲۵	۰/۰۵۸۳
۲	۱۰/۶	۰/۳۹۴	۲/۸	۰/۰۷۲۲
۳	۱۰/۸۳	۰/۳۸۴	۱/۷۶	۰/۰۴۶۴
۴	۱۰/۴۴	۰/۳۹۷	۳/۴۴۸	۰/۰۸۹
۵	۱۰/۹۵	۰/۳۹۵	۱/۴۱۷	۰/۰۳۸۳
۶	۱۰/۹	۰/۳۹	۱/۲	۰/۰۵۶۳
۷	۱۰/۵۶	۰/۳۹۴	۱/۸۵	۰/۰۴۳۷
۸	۱۰/۷۳	۰/۴۱۴	۲/۱۹۹	۰/۰۶۴۸
۹	۱۰/۷۸	۰/۳۹۴	۱/۷۶	۰/۰۳۸
۱۰	۱۰/۶۱	۰/۳۸۳	۱/۴۷۸	۰/۰۴۳۵
۱۱	۱۰/۷۹	۰/۴۱۹	۲/۵۳	۰/۰۶۴۱
۱۲	۱۰/۷۹	۰/۳۹۸	۳/۸۲۵	۰/۱۰۵۵
۱۳	۱۰/۶۹	۰/۳۸۹	۱/۸۹۹	۰/۰۴۷۷
۱۴	۱۰/۷۸	۰/۳۹۶	۳/۳۱۸	۰/۰۸۰۵
۱۵	۱۰/۶۴	۰/۳۹۱	۲/۴	۰/۰۷۳۷
۱۶	۱۰/۶۹	۰/۳۹۴	۱/۹۸	۰/۰۵۵۱
۱۷	۱۰/۶۹	۰/۳۸۶	۱/۳۲	۰/۰۳۰۷
۱۸	۱۰/۶۹۵	۰/۳۹۲	۱/۴۴۳	۰/۰۴
۱۹	۱۰/۸۹	۰/۳۹۳	۲/۱۵۷	۰/۰۵۲۵
۲۰	۱۰/۶۸	۰/۳۸	۱/۱	۰/۰۳۲
۲۱	۱۰/۵۳	۰/۳۹۲	۲/۶	۰/۰۶۲۹
۲۲	۱۰/۹	۰/۳۹۲	۳/۷۳	۰/۰۹۶۸
۲۳	۱۰/۶۵	۰/۳۸۸	۳/۲۸	۰/۰۹۸۱
۲۴	۱۰/۶۷	۰/۴	۳/۶۷	۰/۰۸۶۹
۲۵	۱۰/۷۱	۰/۳۹۲	۳/۳۵	۰/۱۰۸۸

جدول (۵): نتایج وزن دهی به روش آنتروپی

ردیف	Yaw rate	Ay	Roll	LTR
Ej	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۹	۰/۹۸۱۹	۰/۹۷۹۸
dj	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۸۱	۰/۰۲۰۲
Wj	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۷	۰/۴۷۱۰	۰/۵۲۶۸

جدول (۶): مقادیر ایده آل مثبت و ایده آل منفی

ردیف	LTR	Roll	Ay	Yaw rate
ایده آل مثبت	۰/۰۴۷۹	۰/۰۴۱۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱
ایده آل منفی	۰/۱۶۹۹	۰/۱۴۲۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱

جدول (۷): امتیاز و رتبه نهایی آزمایش‌ها

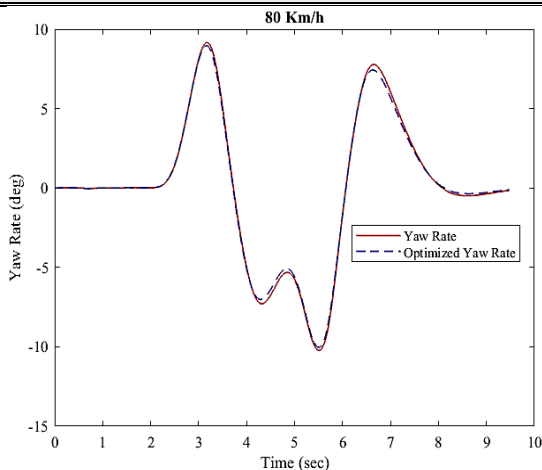
رتبه	رتبه	امتیاز نهایی (d)	فاصله تا ایده آل منفی (-d)	فاصله تا ایده آل مثبت (+d)
۱	۱۳	۰/۶۱۷۵	۰/۰۹۸۳	۰/۰۶۰۹
۲	۱۸	۰/۴۳۱۳	۰/۰۶۸۸	۰/۰۹۰۷
۳	۸	۰/۷۸۱۵	۰/۱۲۴۳	۰/۰۳۴۸
۴	۲۰	۰/۲۱۱۸	۰/۰۳۴۰	۰/۱۲۶۴
۵	۳	۰/۸۹۴۰	۰/۱۴۲۱	۰/۰۱۶۸
۶	۱۲	۰/۶۵۵۵	۰/۱۰۴۲	۰/۰۵۴۸
۷	۷	۰/۷۸۳۹	۰/۱۲۵۶	۰/۰۳۴۶
۸	۱۴	۰/۵۷۶۸	۰/۰۹۱۷	۰/۰۶۷۳
۹	۶	۰/۸۳۲۲	۰/۱۳۴۸	۰/۰۲۷۲
۱۰	۵	۰/۸۴۶۲	۰/۱۳۴۵	۰/۰۲۴۵
۱۱	۱۵	۰/۵۳۲۶	۰/۰۸۵۰	۰/۰۷۴۶
۱۲	۲۵	۰/۰۳۲۷	۰/۰۰۵۲	۰/۱۵۴۹
۱۳	۹	۰/۷۴۹۳	۰/۱۱۹۵	۰/۰۴۰۰
۱۴	۱۹	۰/۲۹۷۵	۰/۰۴۸۱	۰/۱۱۳۶
۱۵	۱۷	۰/۴۸۰۰	۰/۰۷۶۵	۰/۰۸۲۸
۱۶	۱۰	۰/۶۸۳۲	۰/۱۰۸۶	۰/۰۵۰۳
۱۷	۲	۰/۹۴۹۳	۰/۱۵۳۸	۰/۰۰۸۲
۱۸	۴	۰/۸۷۷۷	۰/۱۳۹۵	۰/۰۱۹۴
۱۹	۱۱	۰/۶۷۳۷	۰/۱۰۷۷	۰/۰۵۲۲
۲۰	۱	۰/۹۸۶۶	۰/۱۵۷۲	۰/۰۰۲۱
۲۱	۱۶	۰/۵۳۰۳	۰/۰۸۵۰	۰/۰۷۵۳
۲۲	۲۳	۰/۱۱۸۳	۰/۰۱۹۱	۰/۱۴۲۵
۲۳	۲۲	۰/۱۶۵۳	۰/۰۲۶۴	۰/۱۳۳۱
۲۴	۲۱	۰/۲۱۰۵	۰/۰۳۴۷	۰/۱۳۰۱
۲۵	۲۴	۰/۱۰۷۰	۰/۰۱۷۷	۰/۱۴۸۱

با توجه به جدول ۸ فاصله عرضی دو چرخ در سطح دوم، وزن خودرو در سطح اول، ارتفاع مرکز ثقل در سطح سوم، فاصله طولی محورها در سطح چهارم، ارتفاع از زمین در سطح اول و فاصله مرکز ثقل از محور جلو در سطح چهارم مقادیر بهینه برای پایداری و واژگونی هستند. همچنین، سطوح بهینه ۲، ۱، ۳، ۴، ۱ و ۴ در هیچ کدام از آزمایش‌های

جانبی متأثر از سرعت و شعاع انحنای مسیر است و از فاکتورهای موردبررسی تأثیر اندکی می‌گیرد. با بررسی نتایج نشان داده شده نرخ چرخش حول محور Z به میزان ۱/۹٪، شتاب جانبی به میزان ۱٪، زاویه غلت بدنه به میزان ۲۷/۴٪ و شاخص واژگونی LTR به میزان ۲۹/۲٪ کاهش یافته است (جدول ۱۰). لازم به ذکر است که شتاب جانبی متأثر از سرعت و شعاع انحنای مسیر است و از فاکتورهای موردبررسی تأثیر اندکی می‌گیرد. به‌منظور تأیید این روش، شاخص‌ها در سرعت‌های ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نیز تست شده‌اند.

جدول (۹): مقایسه پاسخ‌های طراحی پیش‌فرض نسبت به طراحی بهینه

ردیف	آزمایش اولیه		آزمایش بهینه	
Lateral width	۱	۱۶۰۰	۲	۱۷۶۰
Sprung mass	۱	۱۶۵۳	۱	۱۶۵۳
Height mass center	۱	۵۹۰	۳	۵۳۱
Wheelbase	۱	۳۰۴۸	۴	۳۶۵۷/۶
Height of ground	۱	۵۰۰	۱	۵۰۰
Mass center of front axel	۱	۱۴۰۲	۴	۱۶۸۲/۴
Yaw rate	۱۰/۲۲۱	۱۰/۲۲۱		۱۰/۰۲۸
Ay	۰/۴	۰/۴		۰/۳۹۶
Roll	۲/۱۰۵	۲/۱۰۵		۱/۵۲۸
Ltr	۰/۰۵۷۱۶	۰/۰۵۷۱۶		۰/۰۴۰۴۴۸



شکل (۶): نرخ چرخش حول محور Z در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه

روش تاگوچی پیشنهاد نشده؛ اما در روش بهینه‌سازی تاگوچی این سطوح بهینه آزمایش نشده به‌دست آمدند.

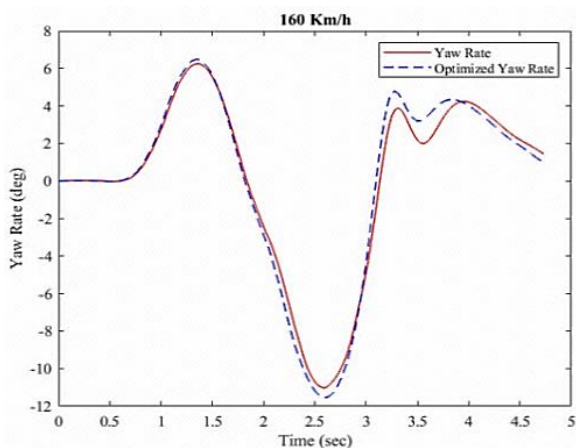
جدول (۸): تأثیر شاخص‌ها بر میانگین ضریب نزدیکی نسبی

level	Lateral width	Sprung mass	Height mass center	Wheel base	Height of ground	Mass center of front axel
۱	۰/۷۲۸۱	۰/۷۸۰۷	۰/۶۹۹۲	۰/۸۱۲۲	۰/۷۳۲۲	۰/۶۸۶۶
۲	۰/۸۰۱۷	۰/۶۷۲۹	۰/۶۹۴۵	۰/۸۵۰۴	۰/۷۲۱۸	۰/۷۳۵۵
۳	۰/۷۲۲۳	۰/۷۵۴۳	۰/۷۸۵۱	۰/۷۵۱۹	۰/۷۲۳۸	۰/۷۱۶۶
۴	۰/۷۹۳۵	۰/۶۸۳۸	۰/۶۲۷۲	۰/۸۶۰۷	۰/۶۹۴۵	۰/۷۴۲۱
۵	۰/۵۴۴۳	۰/۶۹۸۳	۰/۷۸۳۸	۰/۳۱۴۷	۰/۷۱۷۵	۰/۷۱۹۱/۰
Delta	۰/۴۵۷۵	۰/۱۰۷۸	۰/۱۵۷۹	۰/۵۴۶۰	۰/۰۳۷۹	۰/۰۵۵۵
Rank	۲	۴	۳	۱	۵	۵
max	۰/۸۰۱۷	۰/۷۸۰۷	۰/۷۸۵۱	۰/۸۶۰۷	۰/۷۳۲۲	۰/۷۴۲۱

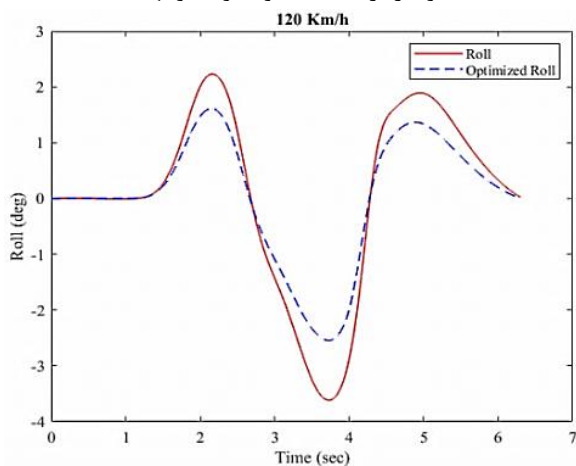
۳-۳- بررسی نتایج

برای بررسی بهینه‌سازی پایداری و واژگونی به‌طور هم‌زمان، از تست تغییر مسیر دابل با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت در نرم‌افزار کارسیم استفاده شده است. جدول ۹ سطوح فاکتورهای پیش‌فرض با سطوح فاکتورهای بهینه را مقایسه نموده است. همچنین شکل‌های ۶ تا ۸ شاخص‌ها را قبل و بعد از بهینه‌سازی در نرم‌افزار کارسیم نشان می‌دهند. با بررسی نتایج نشان داده شده نرخ چرخش حول محور Z به میزان ۱/۹٪، شتاب جانبی به میزان ۱٪، زاویه غلت بدنه به میزان ۲۷/۴٪ و شاخص واژگونی LTR به میزان ۲۹/۲٪ کاهش یافته است (جدول ۱۰). لازم به ذکر است که شتاب

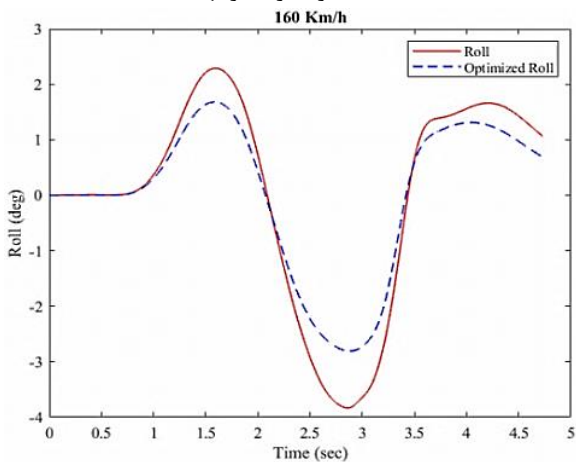
شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج را در این سرعت‌ها نشان می‌دهند.



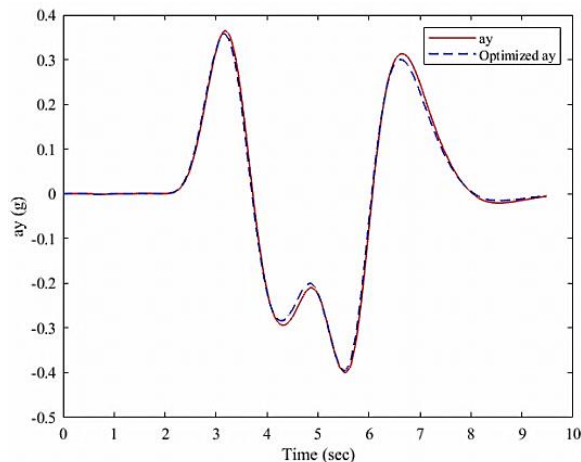
شکل (۹): نرخ چرخش حول محور Z در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه



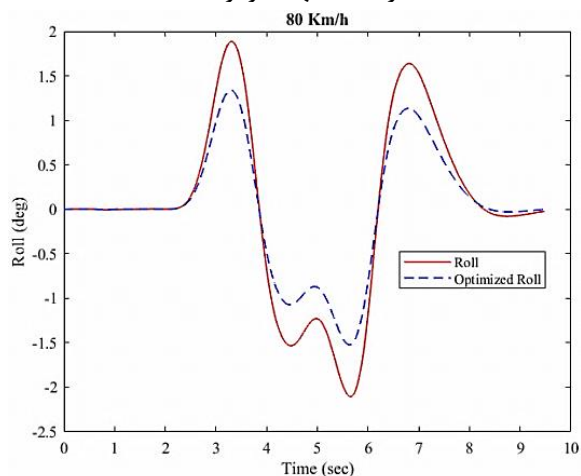
شکل (۱۰): زاویه غلت بدنه در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه



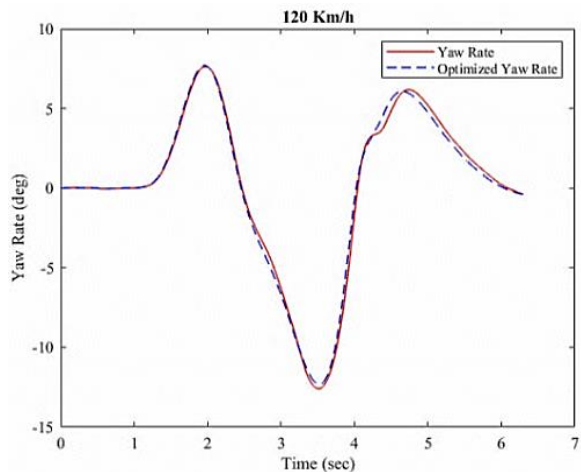
شکل (۱۱): زاویه غلت بدنه در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه



شکل (۷): بهبود شتاب جانبی در سرعت ۸۰ کیلومتر در وضعیت بهینه و اولیه



شکل (۸): زاویه غلت بدنه در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه



شکل (۹): نرخ چرخش حول محور Y در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت نمونه اولیه و بهینه

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٪- به دست آمد.

۵- مراجع

- [1] https://www.who.int/violence_injury_prevention/key_facts/VIP_key_fact_3.pdf
- [2] Mashadi B, Mostaghimi H. Vehicle lift-off modelling and a new rollover detection criterion. *Vehicle system dynamics*. 2017;55(5):704-24.
- [3] Jin Z, Li J, Huang Y, Khajepour A. Study on rollover index and stability for a triaxle bus. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019;32(1):1-15.
- [4] Kazemian AH, Fooladi M, Darijani H. Rollover index for the diagnosis of tripped and untripped rollovers. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14:1979-99.
- [5] Zhu B, Piao Q, Zhao J, Guo L. Integrated chassis control for vehicle rollover prevention with neural network time-to-rollover warning metrics. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016;8(2):1687814016632679.
- [6] Li H, Zhao Y, Wang H, Lin F. Design of an improved predictive LTR for rollover warning systems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017;39(10):3779-91.
- [7] Badiru IA. The three suspension roll centers and their application to vehicle dynamics. *SAE Technical Paper*; 2014. Report No.: 0148-7191.
- [8] Parida NC, Raha S, Ramani A. Rollover-preventive force synthesis at active suspensions in a vehicle performing a severe maneuver with wheels lifted off. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014;15(6):2583-94.
- [9] Ataei M, Khajepour A, Jeon S. Model predictive rollover prevention for steer-by-wire vehicles with a new rollover index. *International Journal of Control*. 2020;93(1):140-55.
- [10] Saeedi MA. An active non-linear steering control system to increase vehicle lateral stability. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2019;15(3):47-60 (in Persian).
- [11] Elhami MR, Eldar M. Analyzing and Optimizing the Suspension of a Sandy Vehicle:

جدول (۱۰): درصد بهبود هر یک از شاخص‌ها

پارامتر	LTR	Roll	Ay	Yaw rate
درصد بهبود	۲۹/۲٪	۲۷/۴٪	۱/۰٪	۱/۹٪

نتایج حاصله در جدول ۱۱ 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.

جدول (۱۱): درصد بهبود در سرعت‌های مختلف

ردیف	Roll	Ay	Yaw rate	سرعت
آزمایش اولیه	۳/۶۱۳	۰/۶۷۷	۱۲/۵۹۸	۱۲۰
	۳/۸۳۲	۰/۷۱۸	۱۱/۰۱۸	۱۶۰
آزمایش بهینه	۲/۵۴۴	۰/۶۴۸	۱۲/۳۴۲	۱۲۰
	۲/۸۰۸	۰/۷۱۶	۱۱/۵۴۴	۱۶۰
درصد بهبود	۰/۲۹۶	۰/۰۴۳	۰/۰۲	۱۲۰
	۰/۲۶۷	۰/۰۰۳	-۰/۰۴۸	۱۶۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از شناسایی معیارهای تأثیرگذار بر پایداری و شاخص واژگونی و در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر بر این معیارها، طبق آرایه‌های متعامد L25 به شبیه‌سازی حرکت خودرو در مانور تغییر مسیر دویل توسط نرم‌افزار 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) موردبررسی قرار گرفته است؛ بنابراین نیاز به روش کمکی هست که توانایی تصمیم‌گیری بر روی چند هدف به‌طور هم‌زمان را دارا باشد. به این منظور از روش تاپسیس و وزن‌دهی آنروپی 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

Responding to Standard Inputs. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2005;1(3) (in Persian).

[12] Jiang R, Wang D. Optimization of suspension system of self-dumping truck using TOPSIS-based Taguchi method coupled with entropy measurement. *SAE Technical Paper*; 2016. Report No.: 0148-7191.

[13] Jiang R, Ci S, Liu D, Cheng X, Pan Z. A hybrid multi-objective optimization method based on NSGA-II algorithm and entropy weighted TOPSIS for lightweight design of dump truck carriage. *Machines*. 2021;9(8):156.

[14] Gray RM. *Entropy and information theory*: Springer Science & Business Media; 2011.

[15] Rath JJ, Defoort M, Veluvolu KC. Rollover index estimation in the presence of sensor faults, unknown inputs, and uncertainties. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 2016;17(10):2949-59.

[16] Huang W, Wong PK, Wong KI, Vong CM, Zhao J. Adaptive neural control of vehicle yaw stability with active front steering using an improved random projection neural network. *Vehicle system dynamics*. 2021;59(3):396-414.



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

Saeid Erfanian Zorofi¹, Yadollah Farzaneh^{2*}, Mansour Bagaieian²

¹ MSc, Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

HIGHLIGHTS

- To improve rollover and stability indices simultaneously, combined Topsis-Taguchi and Shannon Entropy methods were used.
- 13 parameters in 3 levels including geometric and volumetric parameters were verified.
- It was found that with increasing speed, the improvement percentage of all indicators decreases.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 23 September 2021

Received in revised form: 26 October 2021

Accepted: 27 November 2021

Available online: 10 January 2022

*Correspondence:

ya_farzaneh@mshdiau.ac.ir

How to cite this article:

S.E. Zorofi, Y. Farzaneh, M. Bagaieian. investigating the effective parameters on vehicle stability and multi-objective optimization of its dynamic indices. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(2):37-50.

Keywords:

Roll over

Stability

Combined optimization

TOPSIS

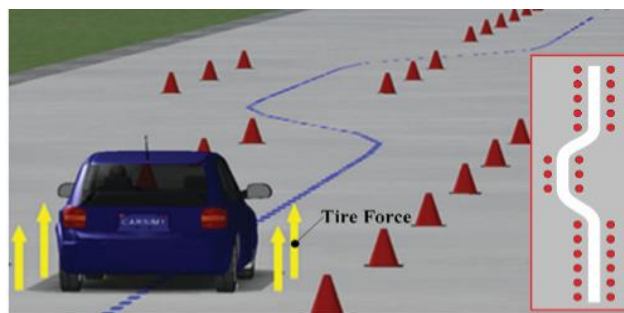
Taguchi

Shanon entropy

Lateral load transfer

Roll over index

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Rollover which causes a large number 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, 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 to verify the most important parameters, 13 parameters in 3 levels including geometric and volumetric parameters were verified. 27 series of tests through the Taguchi method in Minitab software were prepared and evaluated in Carsim software for obtaining rolling angles and yaw rate around the Z axle. The six most important parameters in the previous level were distinguished and again 25 tests were conducted through the Taguchi method in 5 stages in Carsim Software and multi-objective optimization was conducted. Results showed the 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 at different speeds and it was found that with increasing speed, the improvement percentage of all indicators decreases.

