

طراحی سیستم برنامه ریز مأموریت دور زدن کامل خودکار خودروی خودران در جاده های باریک و پهن

برنامه ریزی و رفتار خودروهای خودران در یک ساختار سلسله مراتبی به سطوح مختلف استراتژیک، تاکتیک و عملیاتی دسته بندی می شود. در این پژوهش، مطالعه در سطح برنامه ریزی محلی با هدف طراحی سیستم دور زدن خودکار خودرو و با تمرکز بر روش طراحی مسیر و برنامه ریزی مانور تک و چند فرمانه ارائه می گردد. مانور دور زدن کامل به عنوان یک سناریوی متداول در شرایط مورد نیاز، شامل یک یا چند حرکت به جلو و عقب می باشد که در آن بایستی خودرو در موقعیت مناسب در لاین مخالف جاده و با زاویه سر ۱۸۰ درجه ضمن رعایت شرط عدم برخورد در طی انجام حرکت قرار گیرد. بدین منظور نخست، مدل چهار چرخ وسیله نقلیه با هندسه مربوطه، تشریح می گردد. در ادامه بر مبنای کمینه پهنای مجاز جاده استخراج شده، تصمیم متناسب با هدف حداقل تعداد فرمان اتخاذ و برنامه ریزی مانور انجام می شود. سپس طراحی مسیر توسط روش هندسی پیشنهادی با کمان های دایره و تعمیم به دور زدن کامل عقب گرد برای هر موقعیت و جهت اولیه ارائه می گردد. روش پیشنهادی در پژوهش، مزایایی چون هزینه محاسباتی کم و در عین حال قابلیت استفاده برای حالات مختلف وضعیت اولیه خودرو و جاده را دارا می باشد. امکان سنجی دور زدن در تک یا چند مانور در جاده های باریک و پهن بررسی و توسعه داده می شود. نتایج شبیه سازی دور زدن با داده های خودروی نمونه و ارزیابی پیوسته امکان پذیرترین مانور، کارایی رویکرد انتخاب شده برای برنامه ریزی را تأیید می کند. در یک مطالعه موردی برای خودروی سمند، با استفاده از رویکرد پیشنهادی، ضمن برنامه ریزی مناسب انجام شده، کاهش مسافت حدود ۱۱ درصدی برای جاده با پهنای ۱۲ متر نسبت به مسیر طراحی شده یکی از مراجع مشاهده می شود.

سید امیر محمد

مناقب^۱

دانشجوی دکترا

علی غفاری^۲

استاد

واژه های راهنما: خودروی خودران، دور زدن کامل خودکار، برنامه ریزی مانور، طراحی مسیر، دور زدن تک و چند فرمانه

۱- مقدمه

در طول قرن گذشته، صنعت خودرو به پیشرفت قابل توجهی در تولید وسایل نقلیه ایمن، راحت و مقرون به صرفه دست یافته است. بررسی ها نشان می دهد که حوزه های محیط زیست، ایمنی و مباحث مربوط به راحتی سرنشین سه موضوع مهم مورد توجه شرکت های خودروسازی است [۱]. یکی از راه حل های تحقق این اهداف بهره گیری از مباحث حمل و نقل هوشمند^۳ و سامانه های کمک راننده پیشرفته^۴ است.

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران s.am_managheb@email.kntu.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران ghaffari@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

^۳ ITS (Intelligent Transportation Systems)

^۴ ADAS (Advanced Driver Assistance Systems)

تکنولوژی رانندگی خودکار، امنیت، راحتی و بهره‌وری انرژی را تضمین می‌کند [۲] و با کمک سامانه‌های هوشمند دستیار راننده، می‌توان از ضریب اشتباهات انسانی که سهم زیادی در بروز حوادث دارند؛ کاست. مانور دور زدن خودکار یکی از مانورهای پیچیده در حوزه‌های مختلف رانندگی خودکار شامل تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی مسیر و کنترل می‌باشد [۳]. دورزدن کامل یک نوع خاص از این نوع مانورها می‌باشد و رفتاری است که در آن خودرو در جاده‌های دوطرفه سعی به قرارگرفتن در لاین مخالف نموده و جهت سر وسیله نقلیه به صورت کامل (۱۸۰ درجه) تغییر جهت می‌دهد. این مانور تحت شرایط اضطراری، غیرمنتظره یا درخواست سرنشین اجرا می‌شود. به عنوان مثال، هنگام رانندگی در یک خیابان بن بست، اجتناب از موانع و ترافیک، تغییر مأموریت به یک مأموریت رانندگی با اولویت بالاتر، هدایت مجدد به مقصد جدید و ... انجام این مانور با توجه به شرایط ترافیکی و ابعاد مختلف خودرو و جاده‌ها از مسائل چالش برانگیز در حوزه رانندگی آسان و ایمن می‌باشد که در ادامه با مرور مقالات به آن اشاره می‌شود. به طور کلی دورزدن در انواع شرایط جاده‌ای باریک و پهن برای رانندگان مبتدی سخت و خسته‌کننده می‌باشد و هنگام مانور بایستی مراقب باشند. حتی برای رانندگان باتجربه، این مانور گاهی می‌تواند منجر به خراشیدگی در اتومبیل آن‌ها شود. علاوه بر این، چندین حرکت و تغییر مکان حین انجام مانور می‌تواند باعث افزایش ترافیک شود. در نتیجه، به طور کلی چنین مانوری ممکن است باعث آسیب به اتومبیل شود و برای راننده استرس‌زا باشد. با عنایت به این موارد، دورزدن کامل خودکار می‌تواند به عنوان یک راه حل برای افزایش راحتی و امنیت رانندگان و سرنشینان مطرح شود. در این روش با انجام خودکار و کاهش تغییر موقعیت‌های متعدد و اضافی خودرو هنگام مانور دورزدن، مانور سریع‌تر و راحت‌تر خواهد بود. این امر باعث بهبود جریان ترافیکی و کاهش زمان و استرس در تمام کاربران جاده می‌شود. همچنین سامانه به راننده این امکان را می‌دهد که حتی اگر راننده داخل ماشین نباشد، بتواند دور بزند و اتومبیل خود را در جهت مناسب برای حرکت قرار دهد که خود منجر به صرفه جویی در زمان می‌شود.

به منظور تجاری‌سازی، صرف‌نظر از جنبه‌های حقوقی، دورزدن خودکار باید سریع و قابل پیش‌بینی بوده و انجام این مانور باعث فرسایش زیاد برای تایرها نباشد. لزوم زمان و هزینه محاسباتی و استفاده از حسگرهای کمتر، از نکات قابل ملاحظه در تجاری‌سازی و محدودیت‌های دیگر اضافی برای چنین سیستم کمکی است. با بررسی مقالات، این نکته دریافت می‌شود که جنبه‌هایی از مانور دورزدن در حوزه‌های مختلف ادراک، برنامه‌ریزی، کنترل، ترافیک و ... به عنوان یکی از سناریوهای متداول رانندگی در مناطق روستایی و شهری مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است [۴-۶]. در سطوح بالای خودرانی وسایل نقلیه، خودرو قادر است تا مسافران یا کالا را سوار کرده و بدون نیاز به راننده انسانی به مقصد برود. این ویژگی می‌تواند در یک حوزه طراحی عملیاتی گسترده عمل کند؛ اما فعلاً این ناوگان خودروها محدود به شهرهایی است که در آن‌ها آزمایش شده است. پروژه مانور دورزدن تک و چندفرمانه به طور خاص به عنوان بخشی از خودرانی کامل خودرو توسط شرکت‌های خودروسازی مهم در حال انجام است. نمونه‌هایی از این موارد عبارتند از گوگل کار^۲، نیشان اتونوموس درایو^۳

¹ Automatic Turning Maneuver

² Google Car

³ Nissan Autonomous Drive

ولکس واگن آی دی پایلوت مود^۱ و ولوو اینتلی سیف اتوپایلوت^۲ [۷]. گوگل، به عنوان پیشگام در توسعه وسایل نقلیه خودران، از این مانور به عنوان یکی از پیچیده‌ترین وظایف رانندگی حتی برای رانندگان حرفه‌ای یاد می‌کند و در حال تحقیقات بر روی این مانور فریبنده برای بهبود عملکرد می‌باشد [۸]. در محیط‌های آکادمیک نیز، پژوهش‌های متعددی انجام و مقالاتی ارائه شده است. فرآیند طراحی مسیر و کنترل مانور دورزدن در [۹] صورت گرفته است. در این بررسی به مانور تک‌فرمانه و طراحی مسیر مبتنی بر نتایج آزمایش یک خودروی خاص اکتفا شده است. پژوهش با استفاده از اطلاعات حاصل از آیین‌نامه‌ها و مقررات راهنمایی و رانندگی و نیز تحقیقات انجام شده از آموزشگاه‌ها، داده‌های مرتبط را جمع‌بندی و ارائه می‌کند. پس از آن، مسیرهای مناسب دورزدن خودرو با کمک برازش منحنی در نرم‌افزار و در نظر گرفتن قيود غیرهولونومیک خودرو طراحی و کنترل مود لغزشی برای ردیابی مسیر به خدمت گرفته شده است.

مرجع [۱۰] یک ماژول کنترل جانبی برای مانور دورزدن یو-شکل در سیستم رانندگی خودکار تعاونی وسیله نقلیه-راننده را پیشنهاد می‌کند. در پژوهش آن‌ها، ردیابی مسیر براساس مانور برنامه‌ریز مسیر محلی بلوک عامل کمک‌راننده صورت می‌پذیرد. در ادامه با استفاده از اطلاعات مسیر محلی، موقعیت فعلی خودرو و اطلاعات جهت‌گیری از بلوک عامل، زاویه فرمان هدف تولید می‌گردد. فرآیند کنترل با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی صورت می‌پذیرد.

در [۱۱] از تجربه رانندگان با مهارت‌های رانندگی خوب به عنوان اهداف یادگیری در مانورهای دورزدن یو-شکل و چرخش به راست بهره گرفته شده است. داده‌های آزمون فرمان رانندگان ماهر در این مقاله جمع‌آوری شده است. در ادامه برای دستیابی به کنترل شبیه‌سازی شده توسط انسان، یک برازش غیرخطی برای خط سیر رانندگی رانندگان ماهر انجام شد و عبارت چند جمله‌ای تکه‌ای برای دو حالت چرخش به راست و دوربرگردان حل شد. نتایج حاکی از برتری الگوریتم در کنترل ردیابی با توجه به پارامترهای مشخصه فرمان و راحتی مسافر نسبت به روش‌هایی مانند PID است.

در [۱۲] پلتفرم سخت افزار در حلقه و روشی برای دورزدن یو-شکل توسعه و آزمایش شده است که می‌تواند در خودروهای خودران مورد استفاده قرار گیرد. آن‌ها با استفاده از کنترل پیش بین مدل^۳ برای کنترل ردیابی در سناریو و سرعت‌های مختلف دورزدن یو-شکل بهره بردند. پس از مقایسه نتیجه آن با آزمایش خودرو واقعی، امکان استفاده از پلتفرم مقیاس به عنوان جانشین خودروهای خودران واقعی برای آزمایش اثبات شده است. با توجه به پیش بینی‌های آینده در حوزه حمل و نقل، در مرجع [۱۳] مسئله کنترل دورزدن خودرو در تقاطع‌های جاده نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. دورزدن در تقاطع‌ها با پیشنهاد مدل و الگوریتم مناسب برای سه موضوع اساسی انتخاب لاین هدف، برنامه‌ریزی و محاسبه مسیر، و کنترل و ردیابی خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع از یک الگوی کنترل پیش‌بینی مدل استفاده و شبیه‌سازی در محیط متلب-کارسیم با صحنه‌های تقاطع معمول انجام شده است.

در [۳] به ارائه روشی برای دستیابی به رانندگی خودکار، چارچوب تصمیم‌گیری و حداقل آستانه عرض جاده اشغال شده دورزدن چندفرمانه برای خودروهای خودران با فرض مدل نقطه‌ای خودرو می‌پردازد. ویژگی‌های

¹ Volkswagen I.D. Pilot Mode

² Volvo IntelliSafe Auto Pilot

³ Model Predictive Control (MPC)

هندسی مسیره‌های مرجع مانور دورزدن مدل نقطه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و حداقل عرض عملیات حاصل شده است. در زمینه حرکت وسایل نقلیه (چه داخل چه خارج جاده‌ای)، برنامه‌ریزی در سطوح مختلف قابل انجام است [۱۴]. در سطح جهانی، برنامه‌ریزی مربوط به برنامه‌ریزی راه‌آیین مبدا و مقصد است و اساس فضای کار محدود به نقشه‌های دیجیتالی است که نشان دهنده شبکه جاده‌ای می‌باشد. در سطح محلی، برنامه‌ریزی مربوط به برنامه‌ریزی حرکت هموار با رعایت قیود و دینامیک وسایل نقلیه است که خود می‌تواند شامل بخش‌های مختلف چون طراحی مسیر^۳، برنامه‌ریزی مانور^۴ و ... باشد و چنین طرحی در فضایی محلی برای جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به چشم‌انداز مقاله حاضر تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی مسیر در مسائل رانندگی خودکار و مانورهای مختلف مطرح شده است؛ در این میان روش‌های مبتنی بر استفاده از توابع مرجع^۵ به طور مثال در [۱۵] استفاده شده است. در این مرجع دو پارامتر برای یافتن زمان اجرای دستورات و زاویه فرمان بهینه‌سازی شده است. با این حال عموماً انجام صحیح مانور نتیجه نمی‌شود؛ زیرا این روش‌ها به شدت وابسته به بهره‌ها و پارامترهای انتخاب شده برای توابع هستند.

روش‌های مبتنی بر منطق فازی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای یادگیری منطق انسان در [۱۶-۱۸] به کار گرفته شده است. در این روش‌ها، بعضی خط‌سیرهای مرجع را ارائه می‌دهند؛ و برخی دیگر فقط دستورات مربوط به عملکرد جهت حرکت وسیله نقلیه در هر مرحله فراهم می‌آورند. اگرچه این روش‌ها دارای مزایایی چون استنتاج در سناریوی نامعین، توانایی ترکیب با الگوریتم‌های دیگر، مقابله با عدم قطعیت و عدم دقت در نقشه برداری از محیط هستند، اما به دانش انسان خبره برای یادگیری نیاز دارند و در محیط‌های غیرساختاری و پیچیده، سخت و دارای سرعت همگرایی پایین می‌باشند.

روش‌های مثل دایکسترا^۶ و A^* برای طراحی مسیر از جمله روش‌های مورد استفاده در برخی مراجع است [۱۹ و ۲۰]. این روش‌ها اگرچه برای پیاده‌سازی ساده هستند؛ لکن هزینه محاسباتی و تأثیر نویز حسگرها روی عملکرد زیاد می‌باشد.

روش‌های استفاده از میدان پتانسیل^۷ یا میدان جهت در [۲۱ و ۲۲] معرفی شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان برای مانورهای مختلف مانند دورزدن یا پارک اعمال کرد. با این حال، همگرایی در شرایط پیچیده تضمین نشده است و راه حل به پارامترهای بهینه‌سازی و زمان محاسبه زیادی نیاز دارد.

رویکرد دیگر، روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای مسیر می‌باشد که این روش‌ها ضمن ایجاد یک مسیر بدون برخورد توسط یک برنامه‌ریز هندسی سطح پایین، از یک روش بهینه‌سازی برای کاهش طول مسیر استفاده می‌کند. سپس، این مسیر برای ایجاد یک مسیر مجاز تقسیم‌بندی می‌شود. اغلب، این روش‌ها مسیرهای انحنای پیوسته‌ای مثل بهره‌گیری از منحنی کلوئوئید^۸ را معرفی و ارائه می‌کنند [۲۳]. این روش‌ها می‌توانند برای حل مسائل مرتبط با عدم برخورد و قیود غیرهولونیک مفید باشند؛ اما عموماً برای مسائل خاص مانند

¹ Global

² Rout planning

³ Path planning

⁴ Maneuver planning

⁵ Reference function

⁶ Dijkstra

⁷ Potential field

⁸ Clothoid curve

دورزدن کامل که به طور مثال نیازمند ایجاد مجموعه‌ای از حرکات جلو یا عقب است، بسیار پیچیده و ناسازگار می‌باشند و از محدودیت‌ها و قیود حرکت صرفنظر می‌کند.

روش‌های هندسی مبتنی بر کمان‌های دایره‌ای مجاز از خط‌سیرهای با معادلات هندسی ساده استفاده می‌کند. در [۲۴] یک مسیر بدون برخورد با ترکیب کمان‌های دایره با خط مستقیم ایجاد می‌شود تا وسیله نقلیه در یک یا چند حرکت با فرض برآوردن قیود حرکتی وسیله نقلیه مانور را انجام دهد.

از آنجا که به طور کلی روش هندسی در کاربرد صنعتی سازگاری خوبی دارد؛ در پژوهش حاضر، مسئله دورزدن کامل با رویکرد خاصی از این روش در چندین بررسی با هر موقعیت و جهت اولیه از اتومبیل برای دور زدن در جاده‌های باریک و پهن پیشنهاد و توسعه داده می‌شود.

با توجه به مرور انجام گرفته، این نکته دریافت می‌شود که در پژوهش‌های پیشین عمدتاً مسئله دورزدن تک‌فرمانه یو-شکل مورد بررسی قرار گرفته است و در مراجع اشاره مختصری به دورزدن چندفرمانه آن هم با فرضیات ساده شونده مانند مدل نقطه‌ای خودرو شده است. همچنین شرایط خاص و محدود کننده در شروع مانور در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر علاوه بر ارائه چارچوب و پایه تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مانور تک یا چندفرمانه با هندسه کامل مستطیلی خودرو مبتنی بر مسیرهای مرجع، امکان طراحی مسیر مطلوب با هر موقعیت و جهت‌گیری اولیه خودرو را فراهم می‌نماید.

- برنامه‌ریزی مانور تک و چندفرمانه بدون ساده‌سازی‌های متداول مقالات (مانند مدل نقطه‌ای) با در نظرگیری ابعاد کامل مستطیلی خودرو و جاده انجام گرفته است. این بررسی می‌تواند مبنا و معیار تصمیم‌گیری سطح تاکتیکی مانور دورزدن مبتنی بر مسیرهای مرجع در خودروی خودران قرار گیرد که براساس اطلاعات نوی‌سندگان برای نخستین بار با این کیفیت مطرح شده است.

- در ادامه طراحی مسیر برای خودرو انجام گرفته است که دارای مزایایی نسبت به پژوهش‌های پیشین این حوزه می‌باشد. از جمله اینکه رویکرد مطرح شده، برای هر موقعیت و جهت اولیه خودرو پاسخگو می‌باشد. این ویژگی می‌تواند در بخش‌های بعد و اجرای مانور برای هر زمان که خودرو با توقف اضطراری متوقف شود؛ کمک‌کننده باشد. حداکثر فضای عرضی در دسترس جاده برای قرارگیری در موقعیت مناسب لاین مخالف مورد استفاده قرار گرفته است. روش پیشنهادی در عین حال هزینه محاسباتی اندکی را به سیستم اعمال می‌کند. همچنین توسعه دورزدن کامل هندسی برای شرایطی که فرآیند با مانور رو به عقب آغاز می‌شود، ارائه و مزایا و معایب آن بیان شده است.

- حداقل عرض جاده برای دورزدن در حالت‌های تک و چندفرمانه محاسبه و امکان‌پذیری^۱ مانور و شرایط اجرای کمان‌های دایره‌ای نیز با دقت مطالعه و تبیین شده است.

با توجه به مطالب بیان شده، در بخش بعدی، دورزدن کامل خودکار تشریح شده است. بخش سوم جزئیات روش برنامه‌ریزی مسیر هندسی پیشنهادی و امکان‌پذیری مانورهای مختلف را بیان می‌کند. در بخش چهارم، به بحث در مطالعه موردی حالات مختلف برنامه‌ریزی مسیر و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شرایط مختلف جاده و خودرو اختصاص یافته است. در نهایت، بخش نتیجه‌گیری، موارد را جمع‌بندی و خلاصه می‌کند.

^۱ Feasibility

۲- تشریح دور زدن کامل خودکار

با هدف تشریح مفصل‌تر مسئله دورزدن کامل خودکار و تمرکز پژوهش حاضر، در ادامه تعریف مسئله و بخش‌های مختلف عملکرد دورزدن کامل به صورت دقیق‌تر آورده می‌شود.

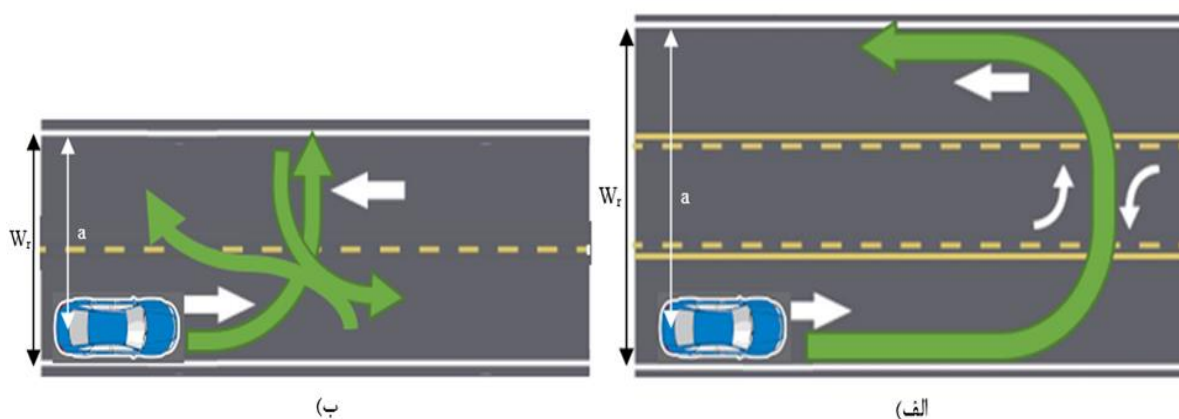
۲-۱- بیان مسئله دور زدن کامل خودکار

شکل (۱) شماتیکی از دور زدن کامل تک و چندفرمانه در شرایط جاده‌ای باریک و پهن را نشان می‌دهد. نقطه P به عنوان نقطه میانی محور عقب خودرو معرفی می‌شود. a فاصله جانبی از نقطه P تا مرز مجاز جاده در لاین مخالف است و $W_a = W_r - (W_v/2 + d_s)$ عرض کامل مجاز جاده است که منطقه فعالیت وسیله نقلیه را محدود می‌کند. W_v پهنای بدنه خودرو و d_s فاصله استاندارد ابتدایی از مرز جاده مطابق قوانین راهنمایی رانندگی است که بسته به محل دورزدن می‌تواند مدنظر قرار بگیرد یا به طور کلی به صورت حاشیه اطمینانی لحاظ گردد. سایر موارد در جدول (۱) معرفی شده است.

۲-۲- عملکرد دور زدن کامل خودکار

فرایند دورزدن خودکار را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد [۲۵]: ادراک، برنامه‌ریزی، و کنترل. بخش ادراک، به منظور تشخیص ابعاد جاده، محل دور زدن و برآورد وضعیت و جهت وسیله نقلیه در مقایسه با این محل است.

امروزه تجهیزات اندازه‌گیری داخلی مانند رمزگذارهای زاویه‌ای در خودروهای مدرن وجود دارد. این خودروها به سیستم ترمز ضد قفل^۵ مجهز هستند که از رمزگذارها برای اندازه‌گیری سرعت چرخ‌ها استفاده می‌کنند. زاویه فرمان نیز معمولاً در دسترس است. غیر از این وسایل، بسته به نیاز و کاربرد می‌توان حسگرهایی به وسیله نقلیه اضافه کرد که البته ممکن است قیمت و پیچیدگی ماژول دور زدن خودکار را افزایش دهد.



شکل ۱- شماتیک دور زدن کامل: الف) تک فرمانه جاده پهن ب) سه فرمانه جاده باریک

¹ Perception

² Planning

³ Control

⁴ Encoder

⁵ ABS (Anti-lock Braking System)

حسگرهای اکستروسیپتیو^۱ مثل اولتراسونیک یا استفاده از دوربین‌های متصل به خودرو و پردازش تصویر از این جمله است [۲۶]. این بخش با کسب اطلاعات محیط اطراف، فرآیند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی را ممکن می‌سازد و از طرفی ایمنی وسیله نقلیه را به کمک بازخورد وضعیت فراهم می‌نماید. در مراحل پیشرفته‌تر می‌توان زیرساخت‌های هوشمندی را در جاده‌ها برای شناسایی وضعیت خودرو و جاده در نظر گرفت. در این پژوهش فرض بر این است که کلیه اطلاعات محیطی توسط سیستم ادراک در اختیار است.

بخش دوم در فرآیند دورزدن، برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و محاسبه خط سیر مورد نیاز برای دورزدن کامل است. نتیجه این بخش، می‌تواند الگوریتم‌های تصمیم‌گیری، مختصات دقیق مسیر در یک سیستم مرجع یا مجموعه اطلاعات دیگری باشد که برای دورزدن خودرو کافی است و موضوع مقاله حاضر می‌باشد.

بخش نهایی به کنترل می‌پردازد و اجرای مانورها را برعهده دارد. اجرای مانورها را می‌توان با استراتژی‌های مختلف کنترلی مانند کنترل تعقیب مسیر، کنترل فازی، مود لغزشی یا ... انجام داد که بررسی آن در اهداف پژوهش حاضر نیست. امروزه عموماً پردازش‌گرهای مرتبط با عملگرهای گاز، ترمز و فرمان، از پیش در وسایل نقلیه وجود دارند؛ اما ممکن است به اصلاحات تکمیلی نرم افزاری نیاز داشته باشند. به طور خلاصه شتاب توسط موتور با واحد کنترل موتور^۲ فراهم می‌شود؛ و ترمز از سیستم ترمز با برنامه پایداری الکترونیکی^۳ یا حسابگر ترمز ضدقفل حاصل می‌شود. فرمان دادن به وسیله نقلیه نیز به طور خودکار توسط ستون فرمان و یک حسابگر فرمان الکترونیکی انجام می‌گردد.

لازم به ذکر است به طور موازی، در هر لحظه، اگر به توقف اضطراری نیاز باشد، اجرای مانورها متوقف می‌شود. این اتفاق به طور مثال در حالتی که فاصله تا لبه جاده یا مانع (بسته به دقت حسگرها) خیلی کم باشد یا مثلاً در شرایط ناگهانی زیرساخت هوشمند یا راننده دستور توقف بدهد؛ نیاز است. در این حالت، به صورت اضطراری درخواست سرعت صفر به وسیله نقلیه ارسال می‌شود. با توقف وسیله نقلیه و پس از رفع مشکل، می‌توان مانورها را مجدداً با بازتولید مسیر آغاز و مانور دورزدن را تکمیل نمود.

۳- دور زدن با رویکرد پیشنهادی

در این بخش، جزئیات طراحی مسیری ایمن و متناسب با شرایط جاده و خودرو بیان و امکان‌پذیری آن بررسی می‌گردد. این مسیر با استفاده از کمان‌های دایره‌ای و مشخصات خودرو ایجاد شده و قادر به شروع عملیات دورزدن با هر موقعیت و جهت اولیه خودرو می‌باشد.

۳-۱- تعاریف اولیه و سینماتیک

مانور دورزدن کامل یک حرکت کم سرعت است. در نتیجه، فرمان آکرمن^۴ با چرخیدن چهار چرخ بدون لغزش، در اطراف مرکز آنی دوران^۵ $C_i(nitiat)$ ، $C_{jl}(eft)$ ، $C_{jr}(ight)$ ، $C_f(inal)$ به ترتیب برای فرمان شروع، چندمین فرمان

^۱ Exteroceptive sensor

^۲ ECU

^۳ ESP

^۴ Ackerman

^۵ ICR

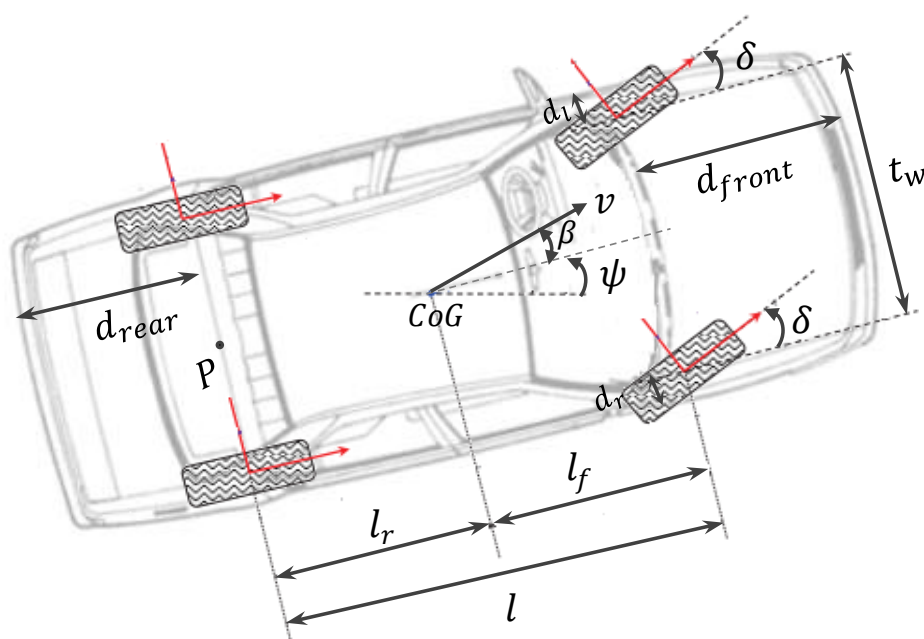
چپ، چندمین فرمان راست و فرمان پایان در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت شعاع‌های مختلف چرخش محاسبه می‌شود. با در نظر گیری P به عنوان مرکز محور عقب می‌توان نوشت [۲۷]:

$$R_p = \frac{l}{\tan(\delta)} \quad (1)$$

واضح است شعاع از نقاط واقع در محور طولی تقارن خودرو با فرمان راست یا چپ متفاوت نیست، یعنی $R_{pl} = R_{pr}$. با این حال، این شعاع برای دیگر نقاط متفاوت است و در آن می‌توان شعاع‌ها را با توجه به جهت فرمان‌دادن، روابط هندسی و قضیه فیثاغورث به عنوان نمونه به صورت (۲) نوشت:

$$R_{Al} = \sqrt{\left(R_p + \frac{t_w}{2} + d_r\right)^2 + (l + d_{front})^2} \quad (2)$$

همین‌طور برای گوشه سمت راست عقب خودرو، شعاع چرخش $R_{Dl} = \sqrt{\left(R_p + \frac{t_w}{2} + d_r\right)^2 + d_{rear}^2}$ می‌باشد. سایر شعاع‌ها به همین شکل قابل استنباط می‌باشد. حداکثر زاویه فرمان راست و چپ برابر فرض می‌شود و مرتبط با کمینه شعاع‌های مختلف، مثلاً R_{pmin} می‌باشد. نمادهای مورد استفاده و شماتیکی از مدل‌سازی سینماتیکی برای خودرو با ابعاد مستطیلی چهارچرخ در شکل (۲) ارائه شده‌اند. مختصات مرکز جرم، زاویه فرمان، انحراف بدنه و سایر پارامترها در شکل (۲) به طور واضح و با جزئیات مشخص می‌باشد. توضیحات این پارامترها در جدول (۱) آورده شده است. در ادامه $C(C, R)$ به عنوان دایره‌ای با مرکز C و شعاع R معرفی می‌شود. همچنین برای سادگی نوشتاری $R_{min} = R_{pmin}$ فرض می‌گردد.



شکل ۲- شماتیک مدل ابعاد مستطیلی چهارچرخ خودرو

با توجه به محدوده سرعت انجام این مانور در معابر شهری، از مدل سینماتیکی^۱ غیرخطی خودرو و ابعاد چهارچرخ استفاده شده است. معادلات زمان پیوسته غیرخطی بیانگر مدل سینماتیکی عبارتند از [۲۷]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\psi + \beta) \\ \dot{y} &= v \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} &= \frac{v}{l_r} \sin(\beta) \end{aligned} \quad (۳)$$

و زاویه لغزش نمایش داده شده به صورت (۴) بیان می‌گردند.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \tan(\delta) \right) \quad (۴)$$

استفاده از مدل با ابعاد مستطیلی چهارچرخ خودرو (شکل (۲)) بدون ساده‌سازی‌های معمول در ارزیابی‌ها، از ویژگی‌های پژوهش حاضر است.

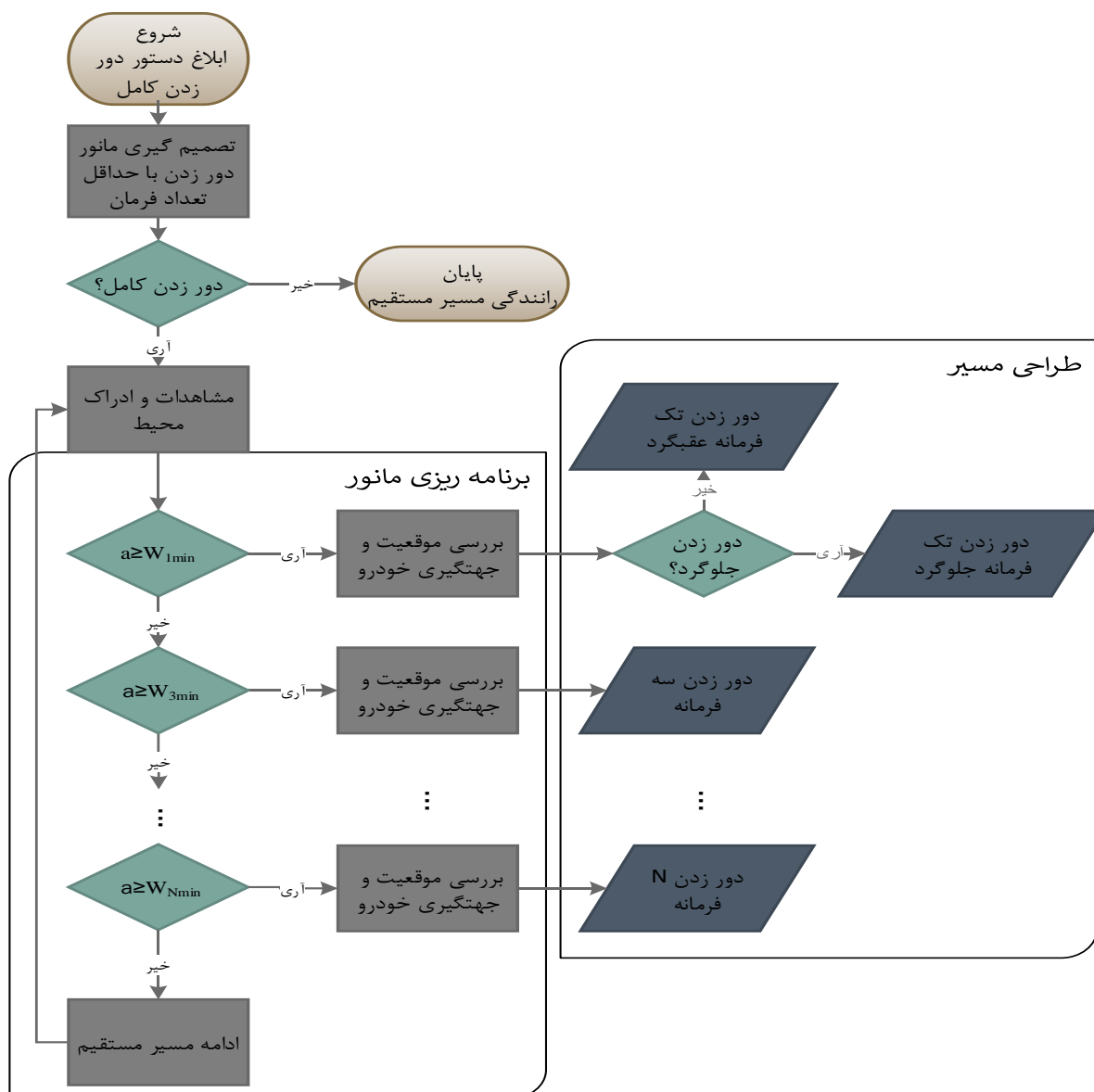
۳-۲- راهبرد

فرض می‌شود خودمختاری وسیله نقلیه بتواند ضرورت دورزدن را با توجه به شرایط ترافیکی، ابعاد وسیله نقلیه، موانع و یا دستور سرنشین تعیین کند. بدین معنا که به نحوی، فرمان دورزدن کامل ابلاغ شده است. پس از تأیید درخواست، اندازه عرض جاده W_r و فاصله جانبی a بین P و مرز جاده (جدول یا خطوط کنار جاده) و موقعیت و جهت‌گیری اولیه خودرو توسط حسگرهای ادراک خودرو اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه باید تصمیم‌گیری متناسب با شرایط جاده و خودرو اخذ گردد که به طور کلی ترجیح بر انتخاب کمترین تعداد فرمان برای دورزدن می‌باشد [۲۸]. شکل (۳) روندنمای بخش برنامه ریزی با فرض لزوم انجام مانور از محل ابلاغ دستور را نشان می‌دهد.

جدول ۱- توضیح پارامترهای مدل چهارچرخ خودرو

پارامتر	توضیحات	پارامتر	توضیحات
x, y	مختصات مرکز جرم خودرو	$l_f(l_r)$	فاصله مرکز جرم خودرو تا اکسل‌های جلو(عقب)
ψ	زاویه سر خودرو نسبت به دستگاه اینرسی	t_w	پهنای ترک
v	سرعت مرکز جرم خودرو	δ	زاویه فرمان چرخ‌های جلو
$d_l(d_r)$	فاصله مرکز چرخ‌های سمت چپ(راست) خودرو با سمت چپ(راست) بدنه	$d_{front}(d_{rear})$	فاصله محور جلو(عقب) تا جلو(عقب) بدنه خودرو

¹ Kinematic model



شکل ۳- روندنمای بخش برنامه‌ریزی مانور دورزدن با هدف حداقل تعداد فرمان

۳-۳- مانور دور زدن با یک حرکت (فرمان)

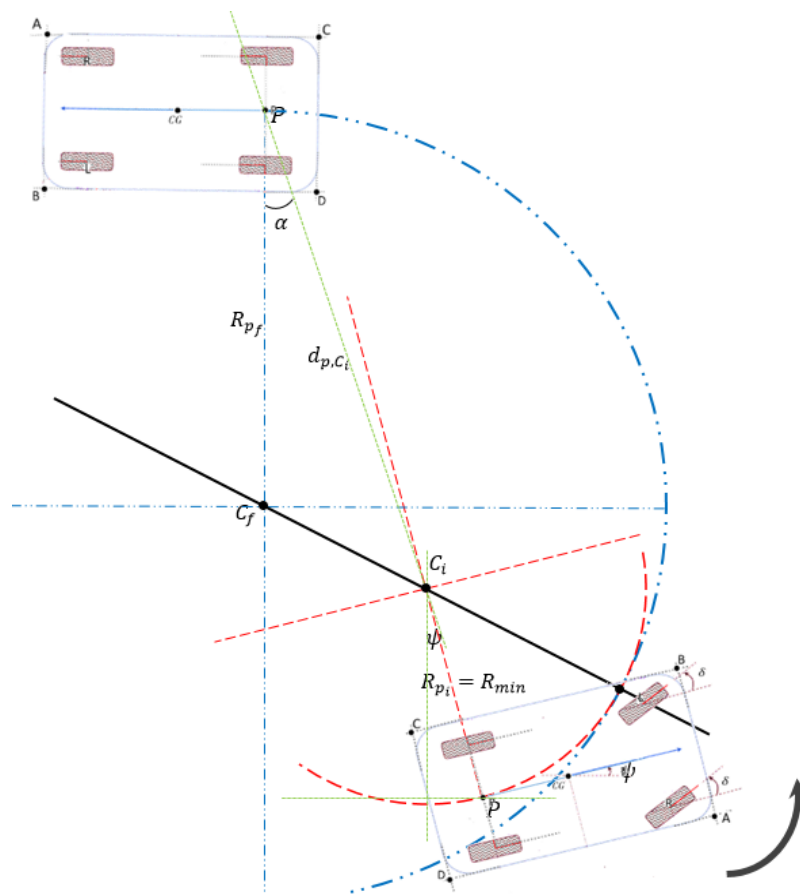
یک تلاش یا تک مانور به صورت توالی حرکات بدون تغییر علامت سرعت تعریف می‌شود. نخست فرض بر این است که محل اجرا به اندازه کافی برای دورزدن کامل با تک مانور بزرگ است و فاصله بین وسیله نقلیه و مرز جاده، در انتهای مانور، به گونه‌ای است که برای روانی جریان ترافیکی از همه ظرفیت جاده استفاده شده است. در این شرایط، فرض می‌شود مشابه رفتار رانندگان، مانور دورزدن کامل جلوگرد با قفل کامل فرمان (بیشینه زاویه فرمان) آغاز گردد؛ سپس در شرایط مناسب با توجه به ابعاد جاده و ویژگی‌های خودرو، چرخ‌های جلو با زاویه مناسبی که بعداً محاسبه می‌گردد، در سمت فضای داخل جاده (سمت چپ) هدایت می‌شود. حرکت ادامه می‌یابد تا خودرو در نقطه مطلوب لاین مخالف قرار گیرد و در مسیر جاده رانندگی کند. این امر، مسیری را در دو کمان دایره ایجاد می‌کند که توسط یک نقطه مماس به هم متصل می‌شوند.

در این روش، مسیری با شعاع کمان دایره دوم، بزرگتر یا برابر با حداقل شعاع ایجاد می‌گردد که یکی از مزایای آن، زاویه فرمان کمتر و استهلاک کمتر تایرها است. مزیت دیگر استفاده مطلوب از فضای کامل جاده است. به علاوه، این مسئله امکان محاسبه یک مانور جدید را در هر لحظه بدون جای‌گیری مجدد وسیله نقلیه در موقعیت اولیه فراهم می‌کند، این مسئله به طور مثال هنگامی که مسیر اجرا شده وسیله نقلیه در عمل با مسیر محاسبه شده متفاوت باشد، رخ می‌دهد. روش پیشنهادی با هر موقعیت و جهت اولیه برای خودرو قابل اجراست. در ادامه، روش ایجاد چنین مسیری ارائه می‌شود. کمان اول دایره‌ای، دورزدن با بیشینه زاویه فرمان است، اما کمان دوم باید دایره نخست را به موقعیت مطلوب انتهایی خودرو در لاین دیگر متصل کند.

از آنجا که اولین کمان دایره با شعاع کمینه است و با توجه به محل شناخته شده خودرو در انتهای مانور دورزدن، مختصات C_i می‌تواند منتج گردد. در این بخش، نقطه P در طی کمان دایره $C(C_i, R_{min})$ سیر می‌کند. برای کمان دایره دوم، جستجوی $C(C_f, R_{P_f})$ انجام می‌گیرد که در آن نقطه P از نقطه مماس روی $C(C_i, R_{min})$ تا نقطه انتهایی، حرکت می‌کند.

با اعمال تئوری الکاشی [۲۹] برای مثلث PC_iC_f (شکل (۴)) می‌توان نوشت:

$$R_{P_f} = \frac{d_{P,C_i}^2 - R_{min}^2}{2d_{P,C_i} \cos \alpha - 2R_{min}} \quad (5)$$



شکل ۴- مانور تک‌فرمانه جلوگرد با زاویه اولیه مثبت سر خودرو نسبت به راستای جاده

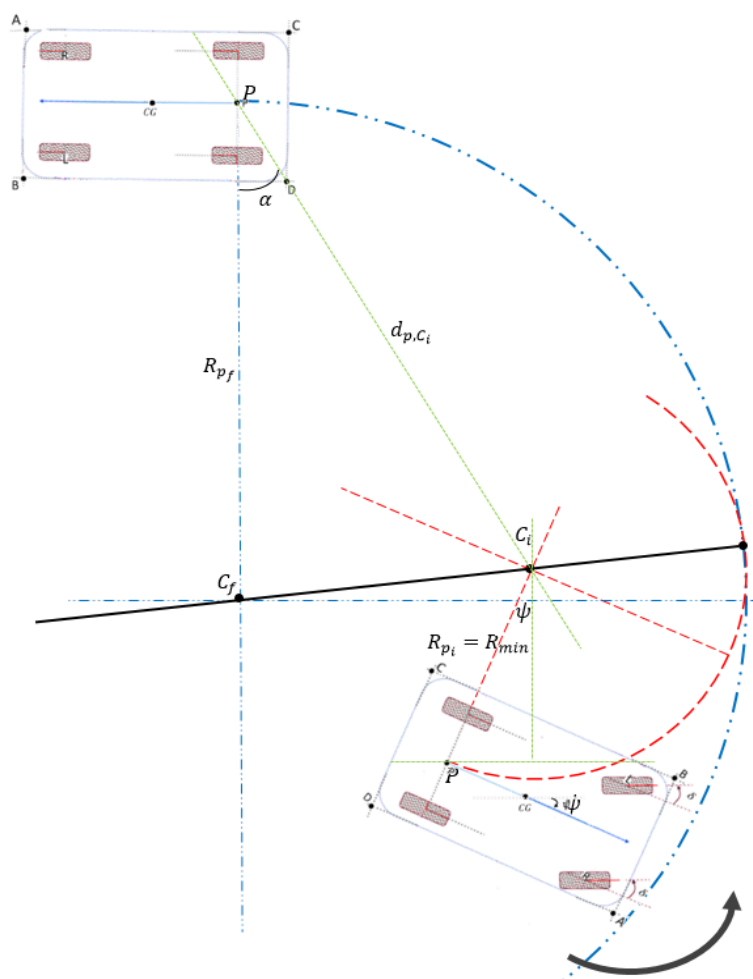
که در آن $\alpha = \arccos\left(\frac{y_{p_f} - y_{c_i}}{d_{p,c_i}}\right)$. در نتیجه زاویه فرمان به صورت (۶) حاصل می شود.

$$\delta = \arctan(l/R_{p_f}) \tag{۶}$$

به طور مشابه برای وضعیت زاویه اولیه منفی نسبت به راستای جاده، طراحی مسیر به صورت شکل (۵) می باشد. در روش پیشنهادی، مانور دورزدن می تواند بلافاصله بدون نیاز به تغییر موقعیت و جابه جایی آغاز شود. دقت شود در این روش، صرفا دستیابی به کوتاهترین مسیر مدنظر نیست، بلکه هدف طی مسیری با بهره گیری از تمام ظرفیت جاده و حداقل آسیب به تایرها در عین مناسب بودن طول مسیر می باشد.

الف) امکان پذیری کمان دایره ای دوم

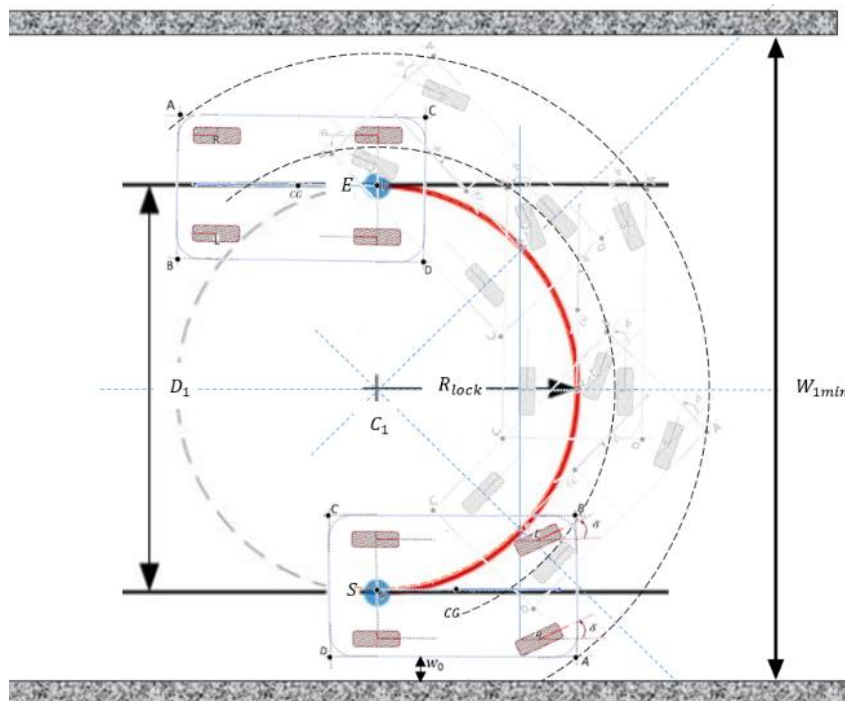
یک شرط امکان پذیری اجرای مانور دورزدن ارائه شده، مجاز بودن کمان دایره ای دوم یعنی $C(C_f, R_{p_f})$ است. به عبارت دیگر مانور وقتی مجاز است که $R_{p_f} \geq R_{min}$ که در آن حداقل رعایت می شود و از طرفی به گونه ای خودرو می تواند هر زاویه فرمان کوچکتر از بیشینه ممکن را اجرا کند. همچنین با توجه به مانور دورزدن جلوگیری از لزوم برقراری رابطه $x_{p_f} < x_{c_i}, y_{p_f} > y_{c_i}$ واضح است. در صورتی عدم ارضاء شرایط، جابه جایی موقعیت خودرو از نقطه اولیه به نقطه مطلوب دارای شرایط، انجام می پذیرد.



شکل ۵- مانور تک فرمانه جلوگیری با زاویه اولیه منفی نسبت به راستای جاده

(ب) امکان‌سنجی دور زدن در یک مانور
 امکان‌پذیری دور زدن با یک مانور (تک‌فرمان) به اندازه عرض جاده، ابعاد و ویژگی‌های خودرو مشروط است. در این بخش امکان‌سنجی دور زدن با یک مانور با استفاده از حداقل عرض جاده مورد نیاز W_{1min} (تک‌فرمانه) مبتنی بر مسیرهای مرجع بهینه استخراج می‌گردد. این مسئله بر اساس دایره‌های هندسی برای دستیابی وسیله نقلیه به وظیفه دور زدن کامل است، نشان داده می‌شود. با توجه به لزوم حداقل تعداد فرمان در امکان-سنجی، فرض می‌شود هدایت فرمان‌دادن به سمت چپ یا راست به صورت قفل کامل با شعاع چرخش R_{lock} حین رانندگی به جلو یا عقب انجام می‌شود؛ که در آن R_{lock} از مشخصات ارائه شده توسط تولیدکننده خودرو قابل محاسبه و دسترسی است. علاوه بر این، فرض می‌گردد مرزهای سمت چپ و راست دو خط موازی و درک شده توسط خودرو یا به صورت جداول کنار جاده هستند که باید مأموریت دور زدن کامل در داخل این منطقه عملیاتی شود. واضح است در صورتی که پهناى جاده، برابر و یا بیشتر از W_{1min} باشد، انجام یک چرخش یو-شکل از موقعیت و جهت فعلی امکان‌پذیر است. به منظور تعیین حداقل عرض مورد نیاز در مانور تک‌فرمانه W_{1min} ساده‌ترین مورد برای حالت جهت‌گیری اولیه صفر در شکل (۶) نشان داده شده است. دقت شود مسیر مرجع مفهومی متفاوت از مسیرهای طراحی شده در قسمت‌های پیشین است.
 در صورتی که زاویه فرمان ثابت باشد، مسیر مرجع دور زدن یو-شکل به صورت کمان نیم‌دایره با شعاع r رفتار می‌کند. با هدایت فرمان در موقعیت قفل کامل ($r = R_{lock}$) در حین دور زدن، حداقل آستانه عرض جاده W_{1min} برای انجام یک دور زدن یو-شکل می‌تواند به صورت (۷) بدست آید.

$$W_{1min} = R_A + R_{lock} + \left(\frac{W_v}{2} + w_0\right) \quad (7)$$

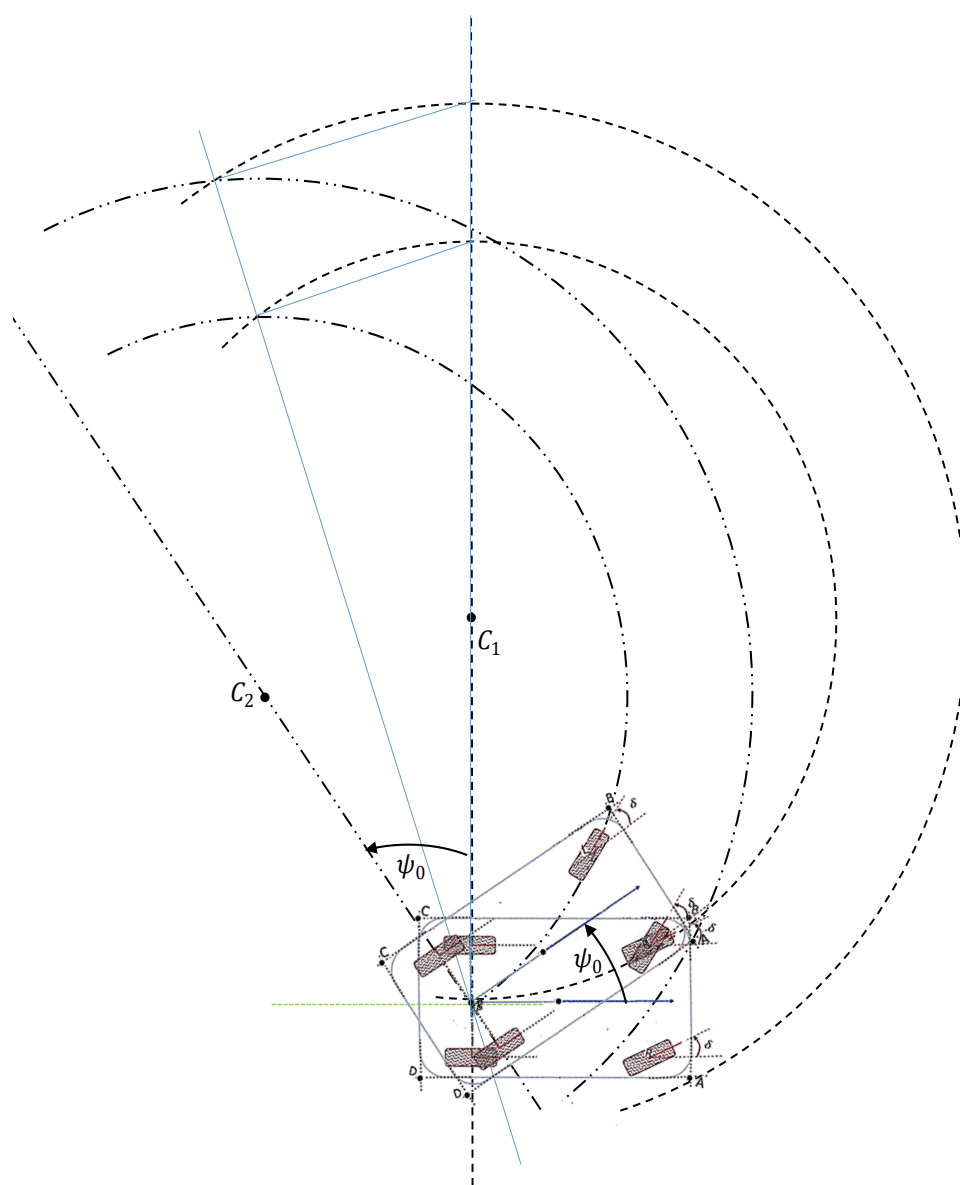


شکل ۶- مسیر مرجع عرض کمینه دور زدن تک فرمانه

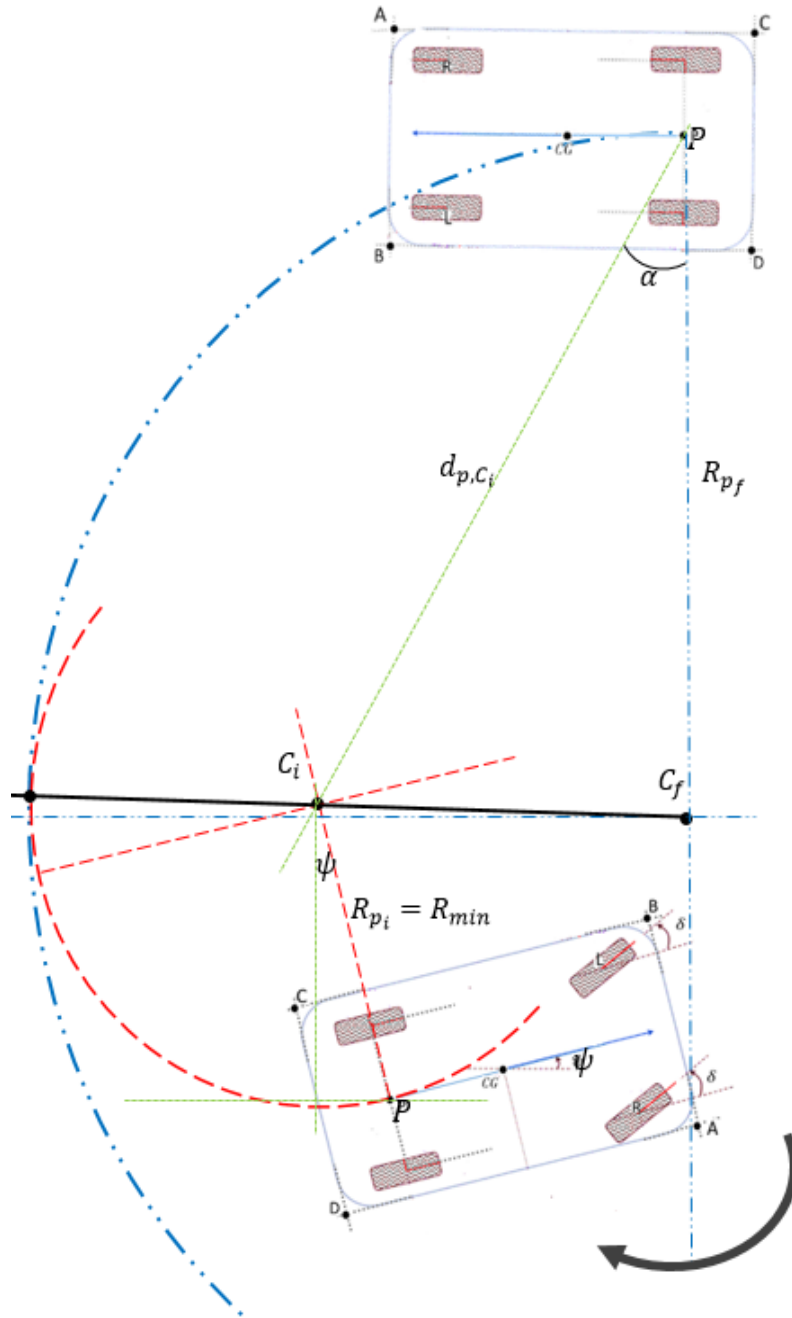
که در آن $R_A = \sqrt{\left(R_{lock} + \frac{t_w}{2} + d_r\right)^2 + (l + d_{front})^2}$ و w_0 هر فاصله آغازین از مرز جاده اعم از فاصله استاندارد d_s یا فواصل دیگر می باشد. در صورت زاویه اولیه غیرصفر (چه مثبت چه منفی)، محاسبه حداقل عرض جاده و امکان سنجی دورزدن تک فرمانه برای دور زدن جلوگرد و عقبگرد، با استفاده از مسیرهای مرجع دایره‌ای با مراکز مشخص شده و شعاع‌های R_A و R_{lock} (شکل (۷)) قابل استنباط است. این مسئله در بخش شبیه‌سازی بررسی شده است.

ج) تعمیم به دورزدن تک‌فرمانه عقب‌گرد

روش ارائه شده پیشنهادی در دورزدن کامل عقب‌گرد، هنگامی که دستور دورزدن به هر دلیلی به خودرو ابلاغ گردد و فضای جلو خودرو منطقه ممنوعه بوده یا به اندازه کافی برای دورزدن باز نباشد؛ می‌تواند تعمیم داده شود. در این حالت، فرض می‌گردد خودرو به صورت معکوس دورزدن کامل با کمان‌های دایره‌ای مشخص شده در شکل (۸) و در نهایت اتصال به موقعیت انتهایی واقعی خودرو، با حرکت به عقب مانور را انجام دهد.



شکل ۷- محاسبه عرض کمینه دور زدن تک فرمانه زاویه غیرصفر

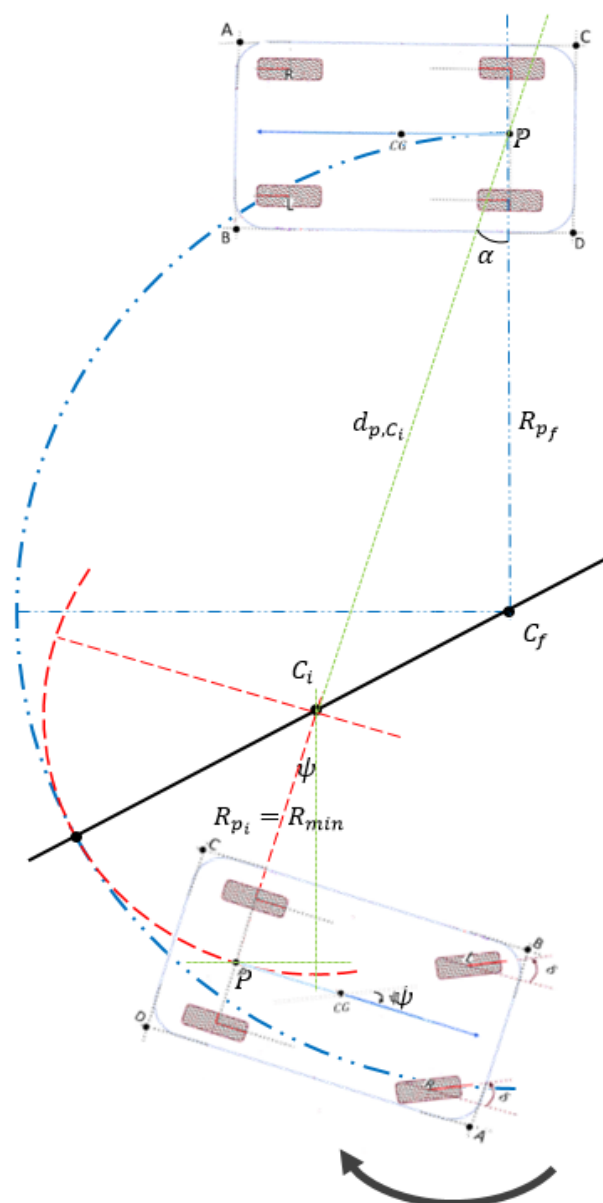


شکل ۸- مانور تک فرمانه عقب گرد با زاویه اولیه مثبت سر خودرو نسبت به راستای جاده

در این حالت روابط مشابه قبل برای مثلث PC_iC_f بازنویسی می شود:

$$R_{P_f} = \frac{R_{min}^2 - d_{P,C_i}^2}{2R_{min} - 2d_{P,C_i}\cos\alpha} \quad (8)$$

که در آن $\alpha = \arccos\left(\frac{y_{P_f} - y_{C_i}}{d_{P,C_i}}\right)$ و زاویه فرمان مشابه قبل به صورت $\delta = \arctan(l/R_{P_f})$ حاصل می شود. در ادامه برای وضعیت زاویه اولیه منفی نسبت به راستای جاده، طراحی مسیر دورزدن عقبگرد به صورت شکل (۹) می باشد.



شکل ۹- مانور تک‌فرمانه عقب‌گرد با زاویه اولیه منفی سر خودرو نسبت به راستای جاده

اگر مانع یا محدودیتی در فضای جلو و عقب خودرو نباشد، بهتر است دور زدن جلوگرد یا عقب‌گرد بر مبنای زاویه اولیه خودرو تصمیم‌گیری شود؛ واضح است انجام مانور جلوگرد برای زاویه اولیه مثبت سر خودرو و مانور عقب‌گرد برای زاویه اولیه منفی مناسب‌تر و با فرمان‌دهی کمتر قابل انجام است.

۳-۴- مانور دورزدن با چند حرکت (فرمان)

با وجود اینکه دورزدن یو-شکل نسبت به سایر مانورهای دورزدن کامل ارجحیت دارد، اما ممکن است این مانور در سناریوهای رانندگی خاصی مناسب یا امکان‌پذیر نباشد. این مسئله هنگامی اتفاق می‌افتد که جاده مسیر رانندگی و ابعاد عرض مجاز آن برای دور زدن و معکوس کردن جهت سر خودرو کمتر از W_{1min} باشد. به عبارت دیگر هنگامی که عرض محل دور زدن از حداقل عرض مانور تک‌فرمانه کوچکتر بوده اما به طور کلی محل دورزدن ظرفیت چرخش وسیله نقلیه را داشته باشد، دورزدن می‌تواند توسط چندین مانور انجام شود.

در این مقاله، تصور می‌شود که اتومبیل با چند تلاش دور زدن رو به جلو را انجام می‌دهد، اما این امر به راحتی برای دورزدن رو به عقب قابل تعمیم است. با توجه به شرایط، یک ضرورت برای شروع مانور دورزدن چندفرمانه، این است که ابتدا وسیله نقلیه با مانور تغییر خط توقف به موقعیت استاندارد موازی نسبت به مرز جاده تغییر مکان دهد. سپس، خودرو باید یک سری چرخش به جلو و عقب را برای دورزدن در محل انجام دهد. در نهایت، وسیله نقلیه باید موازی لاین دیگر جاده باشد.

الف) تعداد تلاش (فرمان)

در طی مجموعه‌ای از حرکتهای جلو و عقب، وسیله نقلیه از لحاظ عرضی فاصله موجود بین دو مرز جاده (خطوط یا جداول) را پوشش می‌دهد. با توجه به مقررات ترافیکی دست راست^۱ در اغلب کشورها، در طی فاصله اول، فرمان به سمت چپ و در فاصله دوم، فرمان به راست است. برای به حداکثر رساندن جابجایی جانبی و تعداد کمتر فرمان، زاویه فرمان چپ و راست باید حداکثر و برابر باشد. مجموع تعداد تلاش‌ها و حرکات جلو و عقب با توجه به ابعاد جاده و ویژگی‌های خودرو در ادامه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ب) قیود و خصوصیات هندسی

در این قسمت برخی ویژگی‌های هندسی برای ادامه پژوهش تشریح می‌گردد. شعاع چرخش خودرو و مسیر رانندگی با فرمان دادن (به عنوان مثال زاویه فرمان آکرمن در مدل سینماتیکی) کنترل می‌شود. با فرمان ورودی به صورت سیگنال فرمان قفل کامل هنگام دورزدن، مسیرهای مرجع کمان‌های دایره‌ای با شعاع R_{lock} تولید می‌شود. با توجه به توضیحات، سه ویژگی و قید مربوط به هندسه عبارتند از:

۱- دو دایره مؤید تکه‌های مسیر متوالی در نقطه T "ماس" هستند. این نقطه به منظور جهت‌گیری معکوس چرخش اتومبیل در نقطه انتقال حرکات آدر نظر گرفته و در اشکال نشان داده شده است. آنچه مسلم است؛ در این نقطه وسیله نقلیه متوقف شده و فرمان دادن به جهت مخالف به صورت کامل قفل می‌شود. از این رو، مراکز دو دایره نسبت به هم تا نقطه انتقال حرکت متقارن هستند.

۲- با هدف پیدا کردن باریکترین و حداقل عرض عملیات مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری، اجرای یک دور زدن چندفرمانه باید حداکثر استفاده را از فضای موجود بدست آورد. به عبارت دیگر، حرکات رو به جلو و عقب خودرو در هر مرحله تا حدی که قیود وسیله نقلیه و جاده اجازه می‌دهد؛ صورت پذیرد.

۳- مسیرهای مرجع دورزدن N فرمانه برای حداقل عرض جاده، توسط N کمان از N دایره مختلف شکل می‌گیرد، به طوری که N یک عدد فرد است.

ج) امکان‌سنجی دور زدن سه فرمانه

برای دستیابی به مأموریت دورزدن کامل در وضعیت جاده باریک‌تر از W_{1min} ، خودرو باید قبل از عبور از حاشیه چپ جاده متوقف شود و یک فرمان معکوس ایجاد و به سمت عقب حرکت کند اما از مرز راست جاده عقب‌تر نرود. در این هنگام اتومبیل توقف دوم را انجام و یک حرکت چرخشی رو به جلو دیگر را انجام می‌دهد تا مانور دورزدن کامل را به پایان برساند (هنگامی که فاصله جانبی تا مرز چپ جاده بتواند بقیه مانور دورزدن کامل را پوشش دهد). این مانور به عنوان دورزدن سه فرمانه شناخته می‌شود.

¹ Right-hand traffic regulation

² Transition point

با توجه به توضیحات ذکر شده، مسیر مرجع دورزدن سه فرمانه متشکل از کمان‌های سه دایره با شعاع R_{lock} می‌باشد. شکل (۱۰) سناریوی باریکترین عرض جاده را برای انجام دورزدن سه فرمانه (W_{3min}) مبتنی بر مسیرهای مرجع را نشان می‌دهد. T_1 و T_2 نقاط توقف وسیله نقلیه (یعنی نقاط انتقال) در مرزهای چپ و راست جاده و C_1, C_2 و C_3 مراکز دایره‌های مرجع هستند. لازم به ذکر است با توجه به شرایط توضیح داده شده نقاط C_1 ، End (با نماد E در شکل)، $Start$ (با نماد S در شکل) و C_3 در یک خط قرار دارند که عمود بر جهت جاده است. برای محاسبه W_{3min} می‌توان نوشت:

$$|\overline{C_1S}| = |\overline{C_3E}| = R_{lock} \Rightarrow |\overline{C_1E}| = |\overline{C_3S}| = R_{lock} - D_3 \quad (9)$$

با توجه به رابطه (۹)، شرایط خودرو در نقاط انتقال و خصوصیات مثلث‌های هم‌نهشت^۱، فواصل جانبی از سمت چپ و راست و نیز حداقل عرض جاده تعیین می‌گردد. این رابطه در (۱۰) آورده می‌شود:

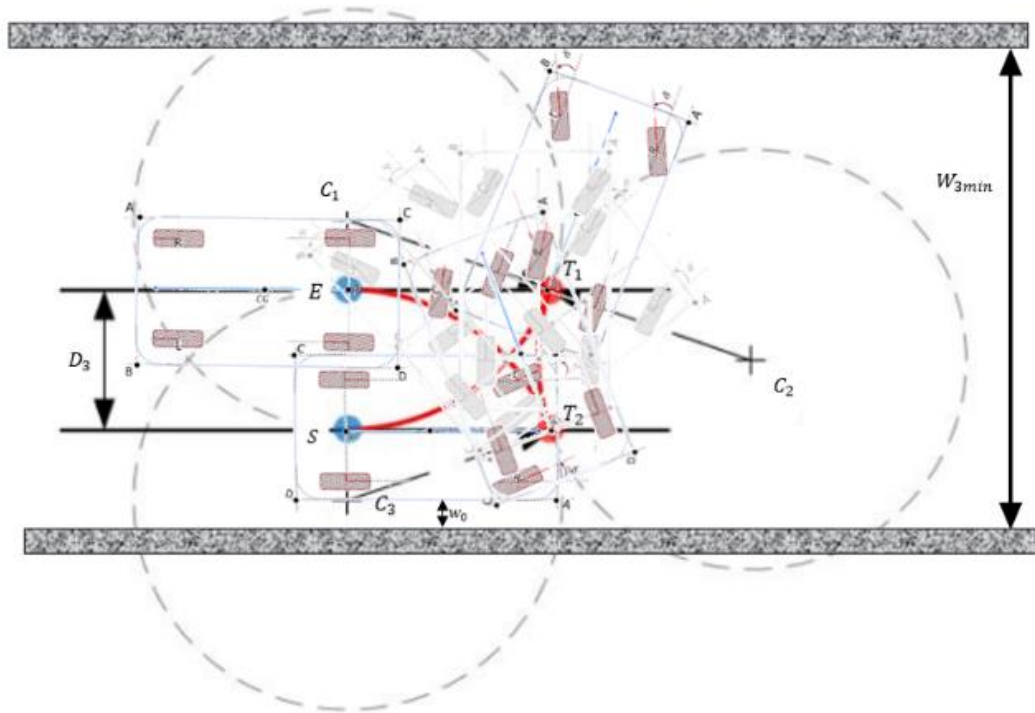
$$W_{3min} = \text{Max} \left(\frac{W_v}{2} + w_0 + \frac{2R_{lock}}{3} + \left(\sqrt{\left(\frac{t_w}{2} + d_l \right)^2 + (l + d_{front})^2} \right) \sin(\psi_{3T_1} + \alpha) , \right. \\ \left. \left(\sqrt{\left(\frac{t_w}{2} + d_l \right)^2 + (d_{rear})^2} \right) \sin(\psi_{3T_2} - \beta) + \frac{2R_{lock}}{3} + \left(\sqrt{\left(\frac{t_w}{2} + d_l \right)^2 + (l + d_{front})^2} \right) \sin(\psi_{3T_1} + \alpha) \right) \quad (10)$$

ترم $2R_{lock}/3$ در رابطه، همان مقدار D_3 در شکل (۱۰) می‌باشد. روابط مربوط به زوایا در (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

$$\psi_{3T_1} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{3}\right)$$

$$\gamma_f = \arcsin\left(\frac{\frac{t_w}{2} + d_l}{\sqrt{\left(\frac{t_w}{2} + d_l\right)^2 + (l + d_{front})^2}}\right) \quad (11)$$

¹ Congruent triangles



شکل ۱۰- مسیر مرجع جهت عرض کمینه دور زدن سه فرمانه

و برای حرکت چرخشی رو به عقب

$$\psi_{3T2} = \pi - \psi_{3T1}$$

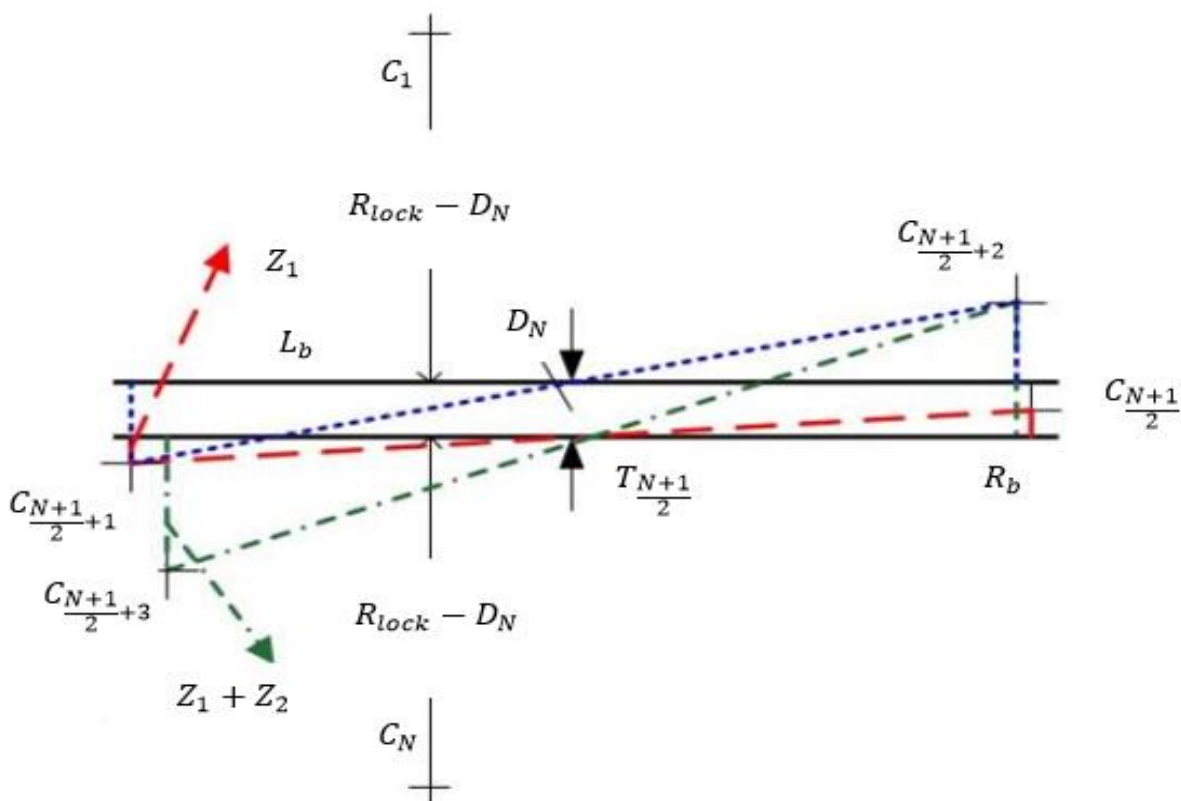
(۱۲)

$$\gamma_r = \arcsin\left(\frac{\frac{t_w}{2} + d_l}{\sqrt{\left(\frac{t_w}{2} + d_l\right)^2 + (d_{rear})^2}}\right)$$

γ_r و γ_f به ترتیب زوایای ثابت انحراف گوشه‌های جلو و عقب خودرو نسبت به خط مرکزی خودرو هستند.

(د) دورزدن N فرمانه

تاکتیک عملیاتی دورزدن N فرمانه مشابه دورزدن سه فرمانه، دورزدن پنج فرمانه و... است؛ حرکت اتومبیل با چرخش رو به جلو از یک موقعیت خاص شروع می‌شود و به صورت تکراری جهت سر خودرو از طریق تغییر جهت‌های متعدد به جلو و عقب در فضای مجاز تنظیم می‌گردد (یعنی بین مرز چپ و راست جاده) و در نهایت چرخش باقیمانده مانور توسط حرکت چرخشی رو به جلو و بدون تجاوز به مرز چپ جاده انجام می‌شود. طبق توضیحات دورزدن یو-شکل و سه فرمانه، قواعدی مشاهده و حاصل شد که می‌توان از آن‌ها برای یافتن باریک‌ترین عرض عملیاتی W_{Nmin} در فرآیند امکان‌سنجی و تصمیم‌گیری دورزدن N فرمانه و حل مسئله استفاده نمود.



شکل ۱۱- مسیر مرجع دور زدن N فرمانه

مسیرهای مرجع با N قطعه کمان به همراه توزیع مراکز متوالی دوایر C_1 تا C_N مبنای بررسی قرار می‌گیرند (شکل (۱۱)). با توجه به الگوی دور زدن تک و سه فرمانه و با فرض نامگذاری حاشیه راست^۱ و چپ^۲ فاصله مبنا (D_N) به ترتیب به صورت R_b و L_b می‌توان نوشت:

$$\overline{C_1 C_N} \perp \text{Road Direction} \quad \text{و} \quad |R_b C_{\frac{N+1}{2}}| = |L_b C_{\frac{N+1}{2}}| = \frac{D_N}{2} \quad (13)$$

از طرف دیگر، مختصات دو مرکز متوالی، نسبت به نقطه انتقالشان متقارن هستند. به طور مثال:

$$|\overline{T_{\frac{N+1}{2}} C_{\frac{N+1}{2}}}| = |\overline{T_{\frac{N+1}{2}} C_{\frac{N+1}{2}+1}}| = R_{lock} \quad (14)$$

با فرض فواصل جانبی به صورت $|C_{\frac{N+1}{2}+1} R_b| = Z_1$ & $|C_{\frac{N+1}{2}+1} C_{\frac{N+1}{2}+3}| = Z_2$ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\frac{N+1}{2}} R_b C_{\frac{N+1}{2}} &\cong \Delta T_{\frac{N+1}{2}} R_b C_{\frac{N+1}{2}+1} \Rightarrow |R_b C_{\frac{N+1}{2}}| = Z_1 \xrightarrow{\text{equ. (13)}} Z_1 \\ &= D_N/2 \end{aligned} \quad (15)$$

¹ D_N Right boundary

² D_N Left boundary

به علاوه برای مثلث دیگر

$$\Delta T_{\frac{N+1}{2}+1} L_b C_{\frac{N+1}{2}+2} \cong \Delta T_{\frac{N+1}{2}+1} L_b C_{\frac{N+1}{2}+1} \Rightarrow |L_b C_{\frac{N+1}{2}+2}| = Z_1 + D_N \quad (۱۶)$$

همچنین

$$\Rightarrow |R_b C_{\frac{N+1}{2}+2}| = |R_b C_{\frac{N+1}{2}+3}| = Z_1 + 2D_N \quad \& \quad |R_b C_{\frac{N+1}{2}+3}| = Z_1 + Z_2 \quad (۱۷)$$

با توجه به روابط ، رابطه بین Z_2 و D_N را می توان در (۱۸) بیان کرد.

$$Z_2 = 2D_N \quad (۱۸)$$

فرآیندهای فوق به صورت بازگشتی برای محاسبه فاصله های جانبی بین هر دو مرکز مجاور از $C_{\frac{N+1}{2}+1}$ تا C_N حاصل شده اند. بنابراین فاصله جانبی از C_N تا مرز راست D_N به صورت (۱۹) محاسبه می گردد:

$$|C_N R_b| = R_{lock} - D_N = Z_2 \left[\frac{N - \left(\frac{N+1}{2} + 1 \right)}{2} \right] + Z_1 \quad (۱۹)$$

با استفاده از روابط معادلات (۱۵)، (۱۸) و (۱۹)، فاصله جانبی مبنای باریکترین عرض اشغال شده از دورزدن چند فرمانه برحسب شعاع قفل کامل R_{lock} و تعداد فرمان به صورت (۲۰) حاصل می گردد. اعتبار پارامتر D_N منتج شده را می توان با مقایسه آن با نتایج D_3, D_1 و ... محاسبه شده در روابط قبلی تایید نمود.

$$D_N = \frac{2R_{lock}}{N} \quad (۲۰)$$

ه) تعمیم به دورزدن چندفرمانه عقب گرد

روش توضیح داده شده ، به سادگی به دور زدن رو به عقب قابل گسترش است. مشابه قبل، مانور از حرکات جلو و عقب تشکیل می شود. حرکت به سمت مرز لاین مخالف به معنای فرمان دادن حداکثری به سمت چپ و سپس حرکت به عقب تا رسیدن به مرز است. به همین صورت حرکت معکوس به معنای فرمان حداکثر به سمت راست و سپس حرکت به جلو تا نزدیک شدن به مانع عقب یا مرز جاده لاین موافق است.

۳-۵- پیاده سازی نرم افزاری و روش حل

به منظور پیاده سازی دورزدن خودکار خودرو و تأمین ایمنی مسیر لازم است ابتدا شرایط مرزهای دقیق جاده در محل دورزدن، موقعیت و جهت گیری خودرو نسبت به آن محل و موقعیت موانع (در صورت وجود در جلو

یا عقب خودرو) توسط حسگرهای موجود تعیین شوند (اطلاعات اکستروسپیتو). با مشخص شدن این اطلاعات در مختصات $X - Y$ ، مراحل تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی مانور و طراحی مسیر مطلوب با فرض لزوم انجام مانور از محل ابلاغ دستور (در پژوهش حاضر) انجام می‌گردد. بدین منظور مطابق روندنمای معرفی شده در بخش‌های پیشین، تصمیم‌دورزدن با چه تعداد فرمان (هدف حداقل تعداد فرمان) اتخاذ می‌گردد. این کار با توجه به اطلاعات حاصل از حسگرها و روابط استخراج شده‌ی حداقل عرض جاده (W_{Nmin}) در مانورهای مختلف تک تا چندفرمانه و کدنویسی مربوطه در نرم‌افزار متلب صورت می‌گیرد. پس از برنامه‌ریزی نوع مانور، در صورت برنامه‌ریزی مانور تک‌فرمانه، طراحی مسیر با حداکثر زاویه فرمان یعنی قفل کامل فرمان (R_{lock}) آغاز می‌گردد. بدین ترتیب، با داشتن این اطلاعات و در نظر داشتن زاویه فرمان شروع (δ_{start}) و نیز روابط حاکم بر قيود حرکتی خودرو مقادیر شعاع کمان (R_{Pi})، مرکز آنی دوران (C_i)، مختصات (P_i) و جهت‌گیری اولیه خودرو (ψ_i) در دسترس است. پس از برنامه‌ریزی مانور صورت گرفته با توجه به فاصله استاندارد و مناسب قرارگیری خودرو در لاین مخالف به منظور استفاده از فضای کامل در دسترس جاده، مختصات P_f و جهت‌گیری خودرو در آن وضعیت (که به شکل موازی جاده ($\psi_f = \pi (rad)$) می‌باشد) قابل دستیابی است. در ادامه مطابق روابط حاکم بر قيود حرکتی خودرو و مشخص بودن فاصله (d_{p,C_i}) بین مرکز آنی دوران و مختصات انتهای مانور از محاسبات جبری، پارامترهای شعاع گردش مورد نیاز (R_{Pf}) و به دنبال آن مختصات مرکز کمان دوم (C_f) با روابط استخراج شده، قابل محاسبه است. اندازه طول کمان‌های دایره‌ای و تعیین محل تماس، با حل معادله غیرخطی حاصل از معادلات کمان‌ها و فاصله جانبی استاندارد محل قرارگیری نهایی خودرو محاسبه می‌گردد. روش‌های عددی متنوعی وجود دارد که می‌توان برای حل معادله غیرخطی استفاده نمود. در این پژوهش، از روش ناحیه اعتبار استفاده شده است [۳۰] که در دستور fsolve نرم‌افزار متلب نیز اعمال شده است. مسیر نهایی، ایمن، منعطف و متشکل از دو کمان دایره مماس می‌باشد که قادر به انتقال خودرو در شرایط و محیط‌های پیچیده می‌باشد. معادلات دیفرانسیل حرکت خودرو نیز با روش رانگ کوتا مرتبه چهار قابل حل می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی، بحث و اعتبارسنجی

در این بخش مقاله، با استفاده از مشخصات فنی خودرو و شبیه‌سازی کامپیوتری، روند برنامه‌ریزی و طراحی مسیر دورزدن رویکرد پیشنهادی در نرم‌افزار متلب نشان داده شده است. برای تأیید کارایی و صحت عملکرد برنامه‌ریزی پیشنهادی و با توجه به ماهیت بخش برنامه‌ریزی، شبیه‌سازی قرارگیری خودرو در سناریوهای مختلف شامل موقعیت و جهت‌گیری‌های اولیه گوناگون و در جاده‌های با پهنای متفاوت، و ارزیابی نتایج صورت پذیرفت. نتایج حاصل بیانگر برنامه‌ریزی مانور و طراحی مسیر مناسب و دستیابی به هدف دورزدن خودرو به لاین مخالف با الزامات طراحی مورد نیاز دارد. همچنین مقایسه‌ای بین رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر و مرجع [۹] انجام گرفت. در [۹] با استفاده از داده‌های رانندگی واقعی و نتایج آزمایش‌های تجربی دورزدن اقدام به طراحی مسیر برای مانور دورزدن تک فرمانه با خودروی سمند در جاده‌های با پهنای مختلف نموده است. به منظور مقایسه پارامترها و مشخصات فنی خودروی سمند و پهنای جاده ۱۲ متر، برای شبیه‌سازی با رویکرد پیشنهادی مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته (شکل (۱۲))،

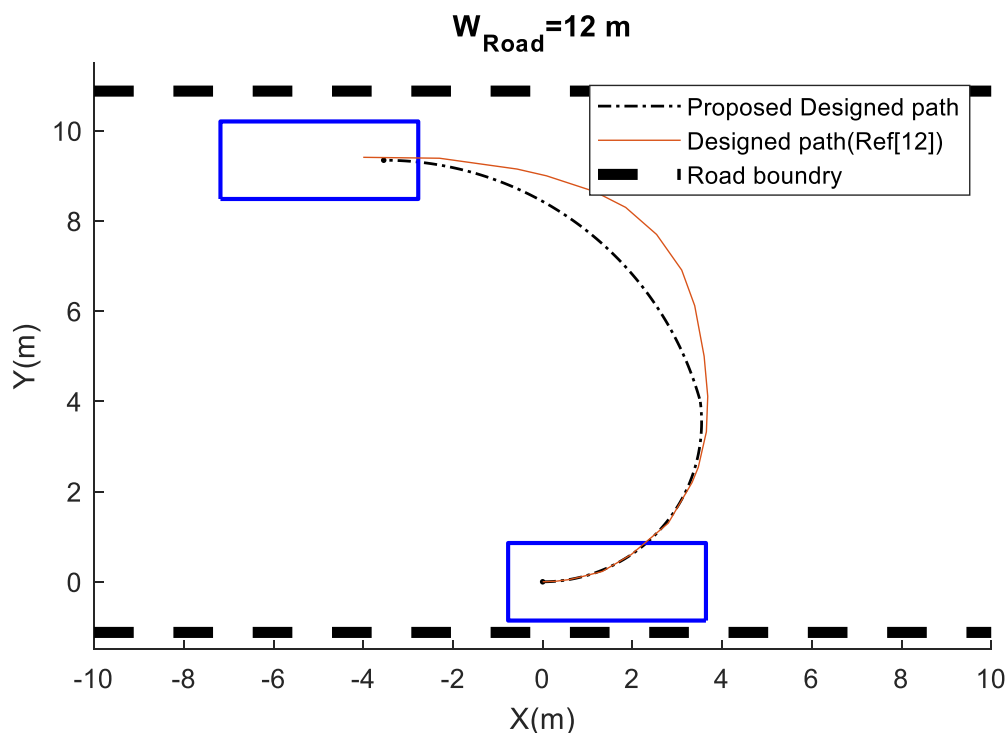
¹ Trust-Region Method

مشاهده می‌شود طراحی مسیر با هدف دور زدن تک‌فرمانه و قرارگیری خودرو در موقعیت و جهت‌گیری لازم در لاین مخالف، به شکل مناسبی در مقایسه با مسیر طراحی شده و برازش شده داده‌های آزمایش تجربی صورت گرفته و موقعیت و وضعیت نهایی استاندارد خودرو در لاین مخالف حاصل شده است. علت اختلاف ایجاد شده در بخش دوم حرکت به دلیل عدم توانایی محاسبه کاملاً دقیق راننده در اجرای مانور، مسئله‌ای طبیعی است و در رویکرد پیشنهادی، طول مسیر کوچکتری نسبت به مسیر طراحی شده با آزمایش‌های تجربی منتج شده است.

در این مقایسه موردی، با توجه به مشخصات خودرو، جاده و مانور، کاهش مسافت حدود ۱۱ درصدی نتیجه شده است که البته با افزایش پهنای جاده (۱۴ و ۱۶ متر در [۹])، این درصد کاهش طول، بهبود (افزایش) می‌یابد. این مسئله می‌تواند در کاهش زمان انجام مانور مؤثر باشد.

۴-۱- پارامترهای خودرو

پارامترهای انتخاب شده برای شبیه‌سازی حالت‌های مختلف طراحی مسیر و برنامه‌ریزی مانور، پارامترهای یکی از خودروهای شرکت خودروسازی رنو به نام زوئی^۱ مطابق جدول (۲) می‌باشند [۳۱ و ۳۲]. علت این انتخاب طراحی جدید و کاربردهای عمدتاً شهری این وسیله نقلیه متناسب با چشم انداز پژوهش حاضر و اطلاعات در دسترس آن است؛ اما می‌تواند پارامترهای هر خودروی دیگری جایگزین گردد. حداکثر سرعت فرمان انتخاب شده [۳۲] برای مانور دورزدن $v_{\delta} = 20 \text{ }^{\circ}/s$ در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار متلب برای سناریوهای مختلف انجام گرفته است.



شکل ۱۲- مقایسه مسیر طراحی شده با رویکرد پیشنهادی و مرجع [۹] برای خودرو سمند

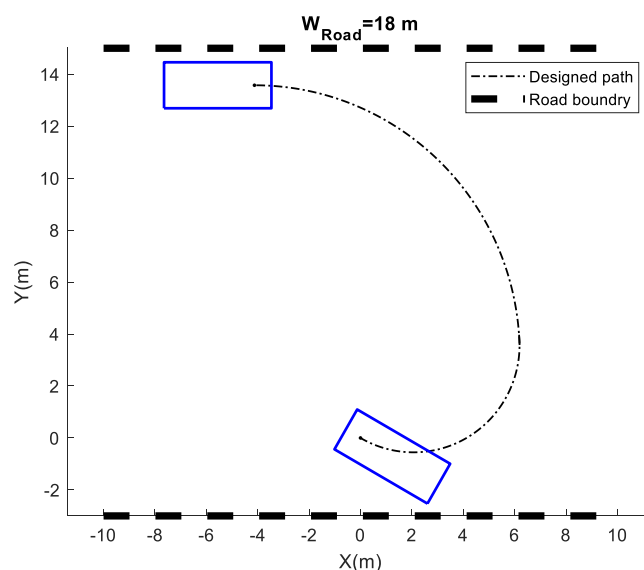
^۱ Renault ZOE

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

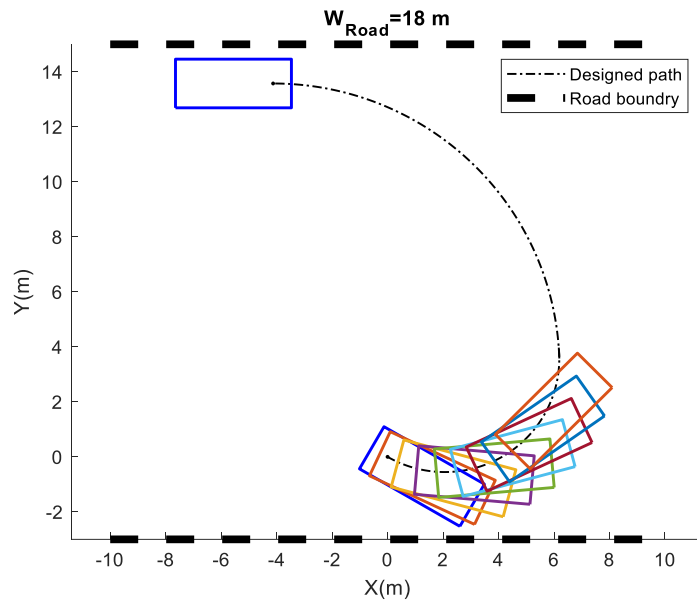
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
l_f	۱/۰۵ m	δ_{max}	۳۳°
l_r	۱/۵۳m	t_w	۱/۵۱ m
d_{front}	۰/۸۴m	m	۱۴۶۸ kg
d_{rear}	۰/۶۶m	d_s	۰/۳ m
d_l, d_r	۰/۱۳ m		

۲-۴- طراحی مسیر تک فرمانه

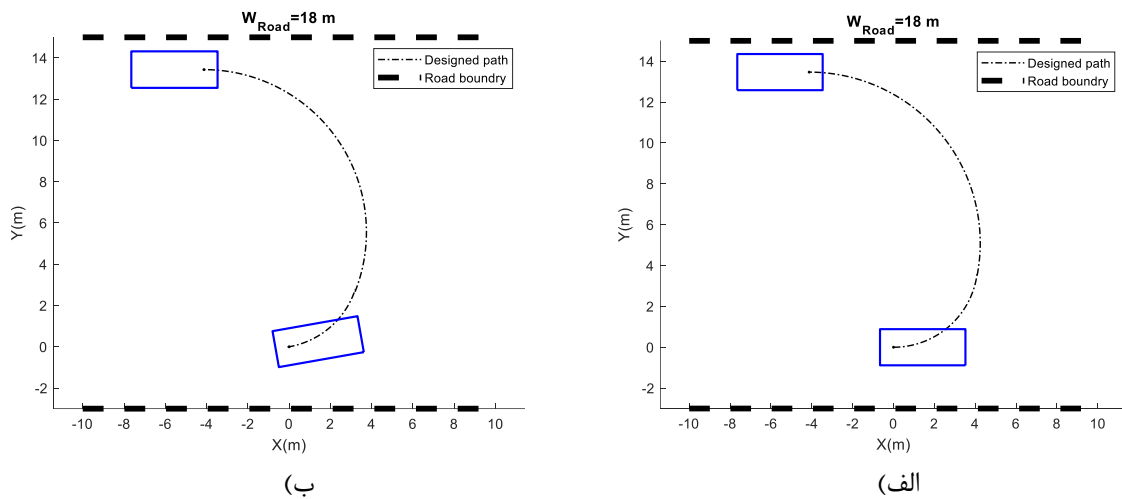
شبیه‌سازی روش پیشنهادی طراحی مسیر در بخش‌های قبل با پارامترها و داده‌های واقعی رانندگی و خودرو در این بخش انجام می‌گردد. برای نمایش کارایی روش، شبیه‌سازی با در نظرگیری حالت زاویه اولیه منفی ۳۰ درجه خودرو آغاز می‌شود. واضح است تحت چنین شرایطی دوزدن تک‌فرمانه عقب‌گرد برای انجام مأموریت مناسب‌تر می‌باشد؛ لکن فرض می‌گردد سیستم تصمیم‌گیری خودرو بنابر دلایلی دوزدن رو به جلو و دقیقاً از شرایط اولیه جاری (بدون تغییر موقعیت و جهت به کنار جاده) را الزام نموده است. از طرفی الزامات شرایط فاصله اولیه تا مرز سمت راست جاده و نیز ظرفیت جاده برای دور زدن تک‌فرمانه رعایت شده است. شبیه‌سازی در جاده با پهنای ۱۸ متر انجام گرفت. همانگونه که از شکل (۱۳) مشخص است؛ با توجه به داده‌های جاده و موقعیت خودرو، انجام مانور با بهره‌گیری از تمام ظرفیت جاده و قرارگیری در مکان استاندارد لاین مخالف کنار جاده صورت پذیرفته است. همچنین مطابق اشاره قبلی، در حالتی که پهنای جاده بزرگتر از مقدار کمینه است، حداقل مسافت طولی طی شده در روش پیشنهادی کمتر از حالت پهنای کمینه می‌باشد. مجدداً تأکید می‌گردد مطابق فرض قبلی حاشیه تا مرز سمت راست جاده با توجه به موقعیت و جهت اولیه اتومبیل پاسخ‌گوی شروع حرکت و انجام مانور می‌باشد. به منظور نمایش بهتر این مسئله در شکل (۱۴) با رنگ‌های مختلف وضعیت خودرو نشان داده شده است.



شکل ۱۳- مسیر طراحی شده دوزدن تک فرمانه جلوگرد تحت زاویه اولیه منفی ۳۰ درجه خودرو

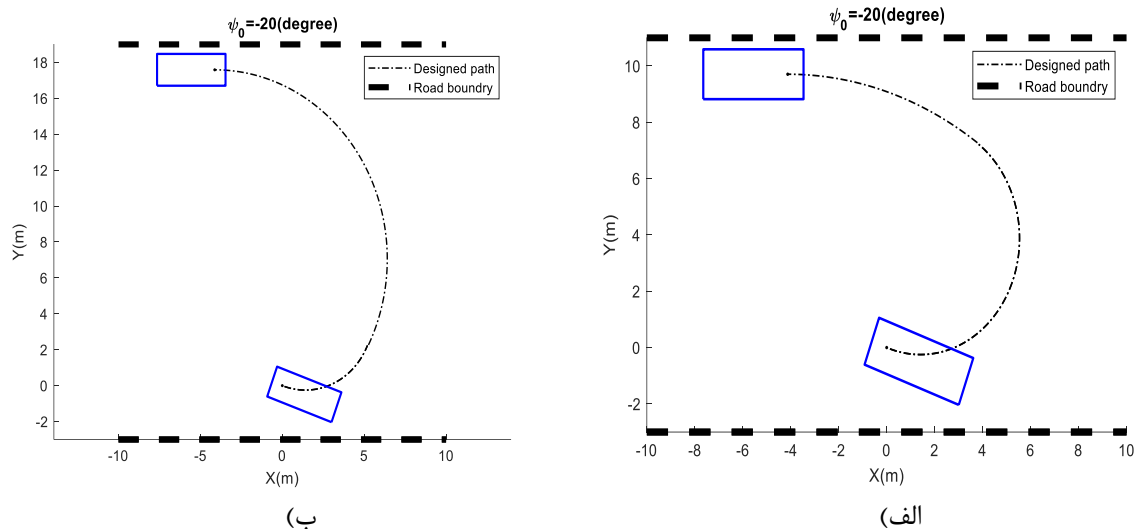


شکل ۱۴- وضعیت خودرو و حاشیه سمت راست اتومبیل در ابتدای مسیر طراحی شده دورزدن تک فرمانه جلوگرد



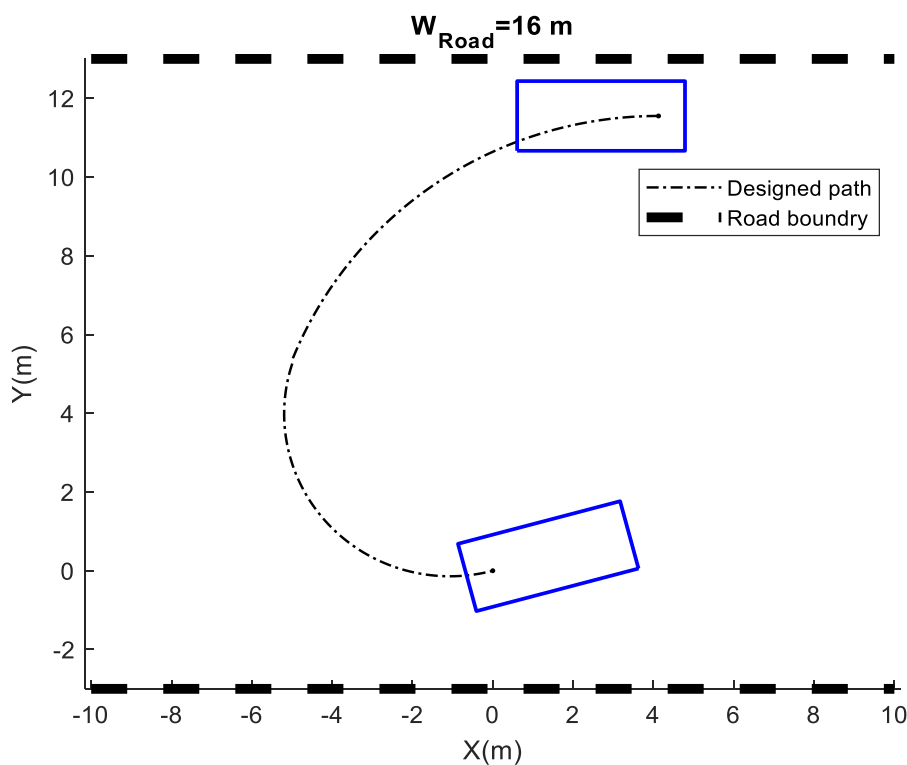
شکل ۱۵- مسیر طراحی شده دورزدن تک فرمانه جلوگرد تحت زاویه اولیه خودرو (الف) ۰ درجه (ب) مثبت ۱۰ درجه

این شبیه‌سازی در جاده با پهنای ۱۸ متر، در حالات زاویه اولیه خودرو صفر و مثبت ۱۰ درجه تکرار شده است (شکل ۱۵)). همانطور که قبلاً اشاره شد در این قسمت فرض می‌گردد به خودرو ابلاغ شده است که دقیقاً از موقعیت اولیه فعلی خود مانور را انجام دهد و مقدمات مانور تغییر خط توقف انجام نگردد. ملاحظه می‌گردد، برنامه‌ریزی مانور دورزدن روبه جلو تحت شرایط زوایای اولیه مختلف به خوبی صورت پذیرفته است. در ادامه برای ارزیابی کارایی روش، دورزدن جلوگرد در جاده‌های با پهنای مختلف (با رعایت شرط پهنای عملیاتی جاده وسیع‌تر از عرض کمینه دورزدن تک فرمانه) مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی برای دو جاده با پهنای ۱۴ و ۲۲ متر با زاویه اولیه منفی ۲۰ درجه اتومبیل انجام شده است. مطابق شکل (۱۶) مشاهده می‌شود بسته به پهنای جاده و برای جاده با پهنای کمتر، در بخش اول حرکت طی مسیر بیشتری با قفل کامل فرمان برنامه‌ریزی می‌شود که قابل انتظار است. اشکال نشان می‌دهند روش ارائه شده برای جاده‌های با پهنای متفاوت که امکان دور زدن تک‌فرمانه در آن‌ها وجود دارد، طراحی مسیر قابل قبولی پیشنهاد داده است.

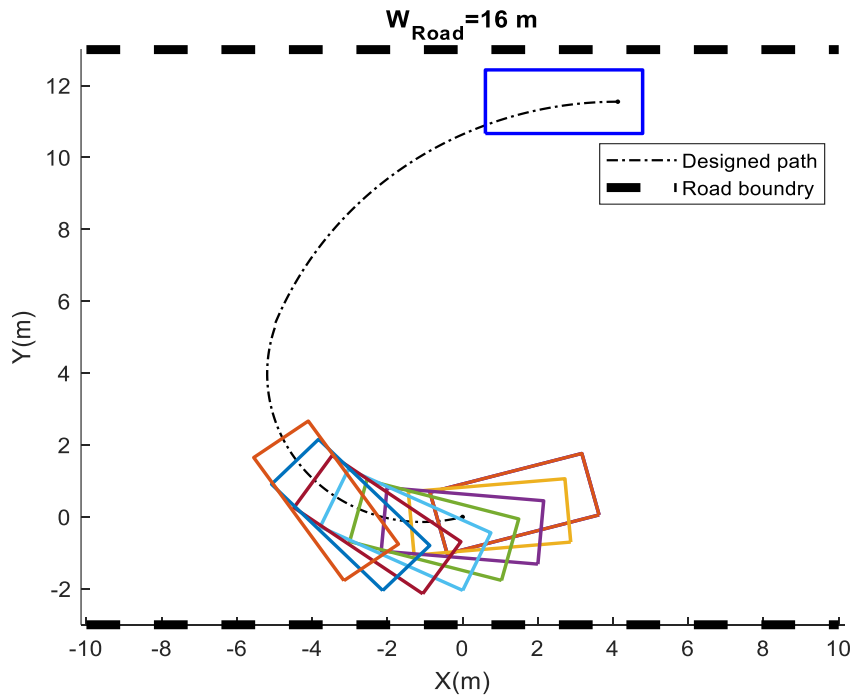


شکل ۱۶- مسیر طراحی شده دورزدن تک فرمانه جلوگرد در جاده‌های با پهنای الف) ۱۴ متر ب) ۲۲ متر

بررسی برنامه‌ریزی مسیر دورزدن تک فرمانه با انجام مانور به صورت عقب‌گرد پیگیری می‌شود. بدین منظور فرض می‌گردد سیستم تصمیم‌گیری سطح تاکتیکی وسیله نقلیه به دلایلی که قبلاً ذکر شد مثل مسدود بودن فضای جلو خودرو یا ... به دور زدن رو به عقب و با شرایط اولیه فعلی فرمان دهد. شکل (۱۷) دور زدن در جاده با پهنای ۱۶ متر و زاویه اولیه سر خودرو مثبت ۱۵ درجه را نمایش می‌دهد. مشابه قبل فرض شده است شرایط فاصله اولیه تا مرز سمت راست جاده و نیز ظرفیت جاده برای دور زدن تک فرمانه رعایت شده است (شکل (۱۸)).



شکل ۱۷- مسیر طراحی شده دورزدن تک فرمانه عقب‌گرد تحت زاویه اولیه مثبت ۱۵ درجه خودرو



شکل ۱۸- وضعیت خودرو و حاشیه سمت راست اتومبیل در ابتدای مسیر طراحی شده دورزدن تک فرمانه عقب‌گرد

۴-۳- حداقل عرض جاده محل دورزدن تک‌فرمانه (جلوگرد و عقب‌گرد)

در این قسمت نمونه‌ای از تصمیم‌گیری مناسب و شرایط لازم انجام مانور تک فرمانه به صورت رو به جلو یا عقب‌گرد ارائه می‌شود. بدین منظور حداقل پهنا برای دورزدن تک‌فرمانه و نیز فضای مورد نیاز جلو اتومبیل در دور زدن جلوگرد و فضای عقب وسیله نقلیه در دورزدن عقب‌گرد توسط مسیر مرجع هندسی تشکیل شده با کمان‌های دایره‌ای مقایسه می‌شود. این مسئله با پارامترهای خودرو داده شده و فرض زاویه اولیه ۳۰ درجه مثبت و منفی نسبت به راستای جاده بررسی می‌گردد.

واضح است که زاویه اولیه مثبت یا منفی سر خودرو در عرض کمینه جاده مورد نیاز دورزدن رو به جلو موثر بوده و باعث تفاوت در این مقدار می‌شود. چنانکه مطابق جدول (۳) در شبیه‌سازی مذکور، این اختلاف برای حالت جلوگرد به حدود ۱/۲۵ متر در عرض عملیاتی پهنای جاده مورد نیاز می‌رسد. در حالت عقب‌گرد، به دلیل در نظرگیری مدل چهارچرخ اتومبیل و اندازه مشخصه PD خودرو باعث تفاوت کمتر میان پهنای کمینه جاده در دو حالت زاویه اولیه مثبت و منفی می‌باشد. همچنین حداقل فضای روبرو (مسافت طولی) برای انجام مانور جلوگرد (با فرض حالت حداقل عرض جاده) در حالت زاویه اولیه منفی سر اتومبیل نسبت به مثبت بسیار افزایش داشته و به مقدار حدودی ۸/۲ متر می‌رسد. لازم به ذکر است در روش طراحی مسیر پیشنهادی بخش ۳، حداقل مسافت طولی لازم نسبت به این حالت کمتر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده، زاویه اولیه منفی، شرایط دور زدن رو به جلو را با توجه به بخش طراحی مسیر توضیح داده شده و قیود و محدودیت‌های محل دورزدن، مشکل‌تر می‌کند که مطابق انتظار است.

از نگاه دیگر، حداقل عرض جاده برای زاویه اولیه مثبت در حالت دورزدن جلوگرد در مقایسه با عقب‌گرد حدود ۰/۵ متر کاهش را نشان می‌دهد. این مقایسه برای زاویه اولیه منفی حدود ۰/۹ متر کاهش در حالت عقب‌گرد می‌باشد.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی حداقل عرض جاده و مسافت طولی

	$\psi_0 = +30^\circ$	$\psi_0 = -30^\circ$	$\psi_0 = 0$
W_{min} (جلوگرد)	۱۰/۷۷m	۱۲/۰۲m	۱۱/۱۵m
W_{min} (عقب‌گرد)	۱۱/۲۵m	۱۱/۱۰m	۱۱/۱۵m
L_{min} (جلوگرد)	۴/۰۴m	۸/۱۷m	۶/۱m
L_{min} (عقب‌گرد)	۸/۱۷m	۴/۰۴m	۶/۱m

این بررسی‌ها به طور مثال بیان می‌کند دور زدن عقب‌گرد در حالت زاویه اولیه منفی سر خودرو به لحاظ حداقل عرض جاده و مسافت طولی طی شده مناسب‌تر است. در نتیجه می‌تواند از معیارها در تصمیم‌گیری و گزینش حالت مانور، بوده و انتخاب مناسبی برای انجام مانور و صرفه جویی در زمان باشد: با این وجود، در صورت مناسب بودن فضا و محل دورزدن و عدم محدودیت در آن‌ها، هر کدام از مانورهای دورزدن رو به جلو یا عقب می‌تواند اجرا گردد.

۴-۴- برنامه‌ریزی مانور و تصمیم‌گیری چندفرمانه

در این قسمت برنامه‌ریزی مانور و تصمیم‌گیری سطح تاکتیکی انجام مانور شبیه‌سازی می‌شود. روش اجرای مانور با چندین حرکت ساده است و تعداد فرمان‌ها از هندسه، قیود وسیله نقلیه و ابعاد محل دورزدن قابل محاسبه است و اگر سرنشینی در خودرو حضور داشته باشد، درک و پیش‌بینی مانورهای وسیله نقلیه برای وی آسان است. با این وجود، اگر عرض محل دورزدن بسیار کم باشد، انتقال گوشه‌های جلو و عقب سمت راست وسیله نقلیه، دورزدن در نزدیکی دیواره یا جداول را برای برخی از عرض‌های جاده غیرممکن می‌کند. تعداد مانورها در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش عرض جاده محل دورزدن از یک حد معین، تعداد کل فرمان‌ها خیلی سریع افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند برای سرنشین حاضر در وسیله نقلیه یا برای زمان کل مورد نیاز انجام مانور نامطلوب باشد.

با توجه به جدول (۴) مشخص است می‌توان در محلی بزرگتر از حدود پهنای ۶/۵ متر، در تعداد معقولی از مانور، عمل دورزدن کامل را انجام داد. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد فرمان‌ها پس از حداقل پهنای مشخصی از جاده (حدود ۶/۱ متر) به سرعت افزایش می‌یابد که برای خودرو و سرنشینان ناخوشایند است و بایستی در تصمیم‌گیری لحاظ گردد.

همچنین بر اساس روابط استخراج شده، می‌تواند ارزیابی مداوم امکان‌پذیرترین نوع مانور دورزدن کامل با اولویت تعداد فرمان کمتر در شرایط فعلی جاده و خودرو صورت پذیرد. بدین منظور فرآیند مشاهده و ادراک محیط پس از ابلاغ دستور مانور دورزدن، فعال می‌شود. بنابراین، می‌توان فاصله جانبی از موقعیت فعلی تا مرز سمت مخالف جاده (یعنی a) و عرض کامل جاده را اندازه گرفت و به عنوان متغیرهای شناخته شده برای توابع هدف ارائه داد. با وارد کردن این دو متغیر و حداقل شعاع دورزدن کامل اتومبیل R_{lock} که می‌توان از داده‌های دینامیکی خودرو بدست آورد، الگوریتم قادر به تصمیم‌گیری در مورد فرمان تغییر موقعیت (تغییر خط-توقف به کنار جاده) یا محاسبه و برنامه‌ریزی حداقل تعداد بخش‌های دورزدن N فرمانه است که می‌تواند به مأموریت دورزدن کامل دست یابد.

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی تعداد فرمان‌ها و حداقل عرض جاده

تعداد فرمان	۱	۳	۵	۷
حداقل عرض جاده	۱۱/۱m	۷/۳m	۶/۱m	۶/۰۴m

۵- نتیجه گیری

یک رویکرد کامل از طراحی مسیر و برنامه‌ریزی مانور دورزدن کامل تمام خودکار پیشنهاد شد. وابستگی عملکردی ادراک، برنامه ریزی مسیر و ردیابی خط سیر، توضیح داده شده است و سپس، روش برنامه‌ریزی مسیر و مانور با هدف حداقل تعداد فرمان، برجسته و دقیق شد. در ابتدا روش هندسی پیشنهادی و یک تعمیم به دورزدن کامل عقب‌گرد ارائه شده است. سپس، گسترش آن مسیرها به زوایای اولیه غیرصفر سر خودرو (هر موقعیت و جهت اولیه) برای امکان‌سنجی مانور اضافه شده است. در ادامه برنامه‌ریزی مانور برای امکان دورزدن در چند مانور در جاده‌های باریک و پهن فراهم شده است. شبیه‌سازی و کدنویسی نمونه‌های دورزدن در یک یا چند مانور با استفاده از داده‌های یک وسیله نقلیه واقعی، کارایی رویکرد انتخاب شده برای طراحی مسیر ایمن و منعطف و برنامه‌ریزی مانور وسیله نقلیه را تأیید می‌کند. در حال حاضر، نویسندگان در حال تکمیل مازول کنترل و ردیابی مسیر طراحی شده و ارزیابی با استفاده از نرم‌افزاری چون کارسیم می‌باشند. به عنوان کارهای آینده محققان، مسئله تصمیم‌گیری و دورزدن با حضور سایر وسایل نقلیه و کاربران جاده مورد توجه است.

مراجع

- [1] “HTSM Automotive Roadmap 2020-2030,” Available: <https://www.raivereniging.nl/binaries/content/assets/downloads/htsm-automotive-roadmap-v1.1-signed.pdf>, (2020).
- [2] Guanetti, J., Kim, Y., and Borrelli, F., “Control of Connected and Automated Vehicles: State of the Art and Future Challenges”, Annual Reviews in Control, Vol. 45, pp. 18-40, (2018).
- [3] Chang, C.W., Lv, C., Wang, H., Wang, H., Cao, D., Velenis, E., and Wang, F.Y., “Multi-point Turn Decision Making Framework for Human-like Automated Driving”, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE, October 16-19, Yokohama, Japan, pp. 1-6, (2017).
- [4] Li, X., Sun, Z., Cao, D., He, Z., and Zhu, Q., “Real-time Trajectory Planning for Autonomous Urban Driving: Framework, Algorithms, and Verifications”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, pp. 740–753, (2016).
- [5] Kuwata, Y., Teo, J., Fiore, G., Karaman, S., Frazzoli, E., and How, J.P., “Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving”, IEEE Transaction on Control System and Technology, Vol. 17, pp. 1105–1118, (2009).
- [6] Cheein, F.A.A., Carelli, R., De la Cruz, C., and Bastos-Filho, T.F., “SLAM-based Turning Strategy in Restricted Environments for Car-like Mobile Robots”, IEEE International Conference on Industrial Technology, March 14-17, Via del Mar, Chile, pp. 602-607, (2010).

- [7] Thorn, E., Kimmel, S., and Chaka, M., "A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios," Report No. DOT HS 812 623, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, (2018).
- [8] Google, "Mastering Turning of Car", Retrieved from Google Self-driving Car Project Monthly Report, <https://dl.icdst.org/pdfs/files1/6786717558639e653aae406005326fb3.pdf> (2016).
- [9] Khalili, E., Ghaisari, J., and Danesh, M., "Design and Implementation of an Automatic Car Turning System", *Journal of Control*, Vol. 13, pp. 33-42, (2019).
- [10] Park, M.W., Lee, S.W., and Han, W., "Development of Lateral Control Module for Zone (U-turn) Maneuver of Vehicle/Driver Cooperative Autonomous Driving System", *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, June 1-4, Busan, pp. 908-912, (2016).
- [11] Jiang, H., Tian, H., Hua, Y., and Tang, B., "Research on Control of Intelligent Vehicle Human-simulated Steering System Based on HSIC", *Applied Sciences*, Vol. 9, pp. 905, (2019).
- [12] Xu, Z., Wang, M., Zhang, F., Jin, S., Zhang, J., and Zhao, X., "PaTAVTT: A Hardware-in-the-loop Scaled Platform for Testing Autonomous Vehicle Trajectory Tracking", *Journal of Advanced Transportation*, Special Issue, Vol. 2017, Article ID: 9203251, <https://doi.org/10.1155/2017/9203251>, (2017).
- [13] Ding, Z., Sun, C., Zhou, M., Liu, Z., and Wu, C., "Intersection Vehicle Turning Control for Fully Autonomous Driving Scenarios", *Sensors*, Vol. 21, pp. 3995, <https://doi.org/10.3390/s21123995>, (2021).
- [14] Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W.H., and Deka, L., "Real-time Motion Planning Methods for Autonomous On-road Driving: State-of-the-art and Future Research Directions", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 60, pp. 416-442, (2015).
- [15] Paromtchik, I.E., Garnier, P., and Laugier, C., "Autonomous Maneuvers of a Nonholonomic Vehicle", *Proceedings International Symposium on Experimental Robotics*, June, Heidelberg, Germany, pp. 277-288, (1998).
- [16] Zhao, Y., and Collins Jr, E.G., "Robust Automatic Parallel Parking in Tight Spaces via Fuzzy Logic", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 51, pp. 111-127, (2005).
- [17] Yang, J., Chen, P., Rong, H.J., and Chen, B., "Least Mean P-power Extreme Learning Machine for Obstacle Avoidance of a Mobile Robot", *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, July 24-29, Vancouver, Canada, (2016).
- [18] Tuncer, A., and Yildirim, M., "Dynamic Path Planning of Mobile Robots with Improved Genetic Algorithm", *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 38, pp. 1564-1572, (2012).
- [19] Yalin, C., Liyang, Z., Longbiao, Z., Xiaojiang, S., and Heng, W., "Research on Path Planning of Parking System Based on the Improved Dijkstra Algorithm", *Modern Manufacturing Engineering*, Vol. 6, pp. 63-67, (2017).

- [20] Liu, Y.W., and Wu, H.Q., "Path Planning Based on Theoretical Shortest Distance Variable Weight A* Algorithm", *Computer Measurement and Control*, Vol. 26, pp. 175–178, (2018).
- [21] Ahmed, A.A., Abdalla, T.Y., and Abed, A.A., "Path Planning of Mobile Robot by using Modified Optimized Potential Field Method", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 113, pp. 6-10, (2015).
- [22] Oetiker, M.B., Baker, G.P., and Guzzella, L., "A Navigation-field-based Semi-autonomous Nonholonomic Vehicle-parking Assistant", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, pp. 1106–1118, (2009).
- [23] Farjad Bastani, S., and Khodayari, A., "A Novel Algorithm for Automatic Parallel Parking a Car Based on Continuous-curvature Clothoid Path Planning", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, pp. 341-344, (2018).
- [24] Zhang, J., Shi, Z., Yang, X., and Zhao, J., "Trajectory Planning and Tracking Control for Autonomous Parallel Parking of a Non-holonomic Vehicle", *Measurement and Control*, Vol. 53, pp. 1–17, (2020).
- [25] Zhu, M., Chen, H., and Xiong, G., "A Model Predictive Speed Tracking Control Approach for Autonomous Ground Vehicles", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 87, pp. 138-152, (2017).
- [26] Sivaraman, S., and Trivedi, M.M., "Looking at Vehicles on the Road: A Survey of Vision-based Vehicle Detection, Tracking, and Behavior Analysis", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, pp. 1773-1795, (2013).
- [27] Rajamani, R., "*Vehicle Dynamics and Control*", 2nd Edition, Mechanical Engineering Series, Springer, (2011).
- [28] Managheb, S.A.M., and Ghaffari, A., "Tactical Level Decision Making of Automatic Turning Mission Based on Reference Paths of Autonomous Vehicle", 29th Annual International Conference of the Iranian Association of Mechanical Engineers (ISME), May 25-27, Tehran, Iran, (2021).
- [29] Buysse, M., "Theorems of Euclidean Geometry through Calculus", arXiv Preprint arXiv:2007.00002, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.00002>, (2020).
- [30] Powell, M.J.D., "A Fortran Subroutine for Solving Systems of Nonlinear Algebraic Equations", In Rabinowitz, P., (Editor), *Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations*, Chapter 7, New York, Gordon and Breach, (1970).
- [31] <https://www.renault.co.uk/electric-vehicles/zoe/specifications.html>
- [32] Vorobieva, H., "Design and Validation Method of Control Laws for Automated Vehicle Driving Systems", Ph.D. Thesis, School of Sciences and Engineering, University of Evry-Val-d'Essonne, Versailles, France, (2014).

Abstract

The behavior of self-driving cars is categorized into different strategic, tactical and operational levels in a hierarchical structure. In this research, a study at the local planning level aims to design an automatic turning system and Focus on path and maneuver planning (single and multi-point). The turn around maneuver as a common scenario in the required conditions, includes one or more forward and backward movements, in which the vehicle must be in the proper position in the opposite lane of the road and with a heading angle of 180 degrees. Moreover, the condition of collision avoidance is considered during the maneuver. For this purpose, the four-wheeled model of the vehicle with the relevant geometry is described; Next, on the basis of the deduced minimum permissible road width, a decision is made according to the objective of the minimum number of commands. Then the path design is presented using the proposed geometrical method with circle arcs for each initial position and orientation and generalized to the backward turning. The proposed method has advantages such as low computational cost and can be used for different situations of the initial states of the vehicle. The result of the turning simulation with sample vehicle data and continuous evaluation of the most feasible maneuver confirms the efficiency of the chosen planning approach. In a case study for the Samand car, while proper planning was done, a distance reduction of about 11% for the road with a width of 12 meters is observed compared to the path planned by one of the references.