

دانشکده مهندسی مکانیک

گزارش سمینار مهندسی خودرو در گرایش طراحی سیستم‌های دینامیکی

**پارک خودکار یک خودروی مفصلی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق**

نگارش:

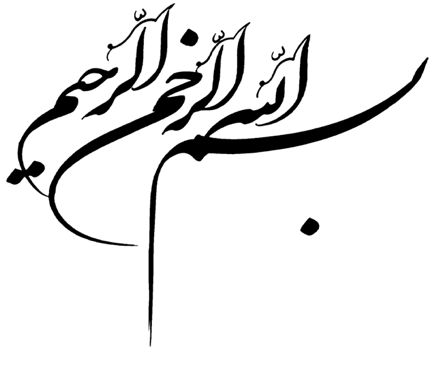
**امیرحسین محمدی**

اساتید راهنما:

**دکتر شهرام آزادی**

**دکتر رضا کاظمی**

تابستان 1404



**چکیده**

**فهرست مطالب**

**فهرست شکل‌ها**

**فهرست جداول**

**فهرست نمادها و اختصارات**

|  |  |
| --- | --- |
| فاصله میان محورهای جلو و عقب در تراکتور | Lt |
| فاصله میان محور عقب تراکتور و محور عقب تریلر | Ls |
| شعاع گردش | R |
| سرعت خودرو | V |
| زاویه فرمان | fδ |
| زاویه لغزش محور جلوی تراکتور | fα |
| زاویه لغزش محور عقب تراکتور | rα |
| زاویه لغزش محور عقب تریلر | αs |
| زاویه مفصلی | Γ |
| سرعت دورانی یا نرخ گردش | zΩ |

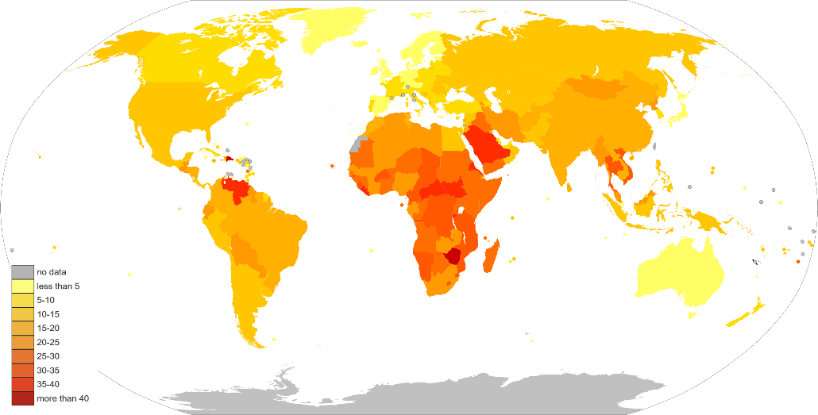
**فصل اول**

مقدمه

# **1- مقدمه**

امروزه بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی[[1]](#footnote-1) و یادگیری ماشین[[2]](#footnote-2) در صنایع گوناگون، ‌به ویژه در حوزه‌های مهندسی، با سرعت چشمگیری در حال گسترش است. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین زمینه‌ها، مهندسی خودرو و توسعه سامانه‌های خودران[[3]](#footnote-3) است که در آن، الگوریتم‌های هوشمند نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد، افزایش ایمنی و ارتقای تجربه کاربری ایفا می‌کنند.

## **1-1- پیش‌زمینه، انگیزه و اهداف**

مطابق با گزارش سازمان جهانی بهداشت[[4]](#footnote-4)، جراحات ناشی از تصادفات جاده‌ای در سال ۲۰۱۶ باعث مرگ حدود 35/1 میلیون نفر در سراسر جهان شده است [1]. یعنی به طور متوسط ​​هر ۲۶ ثانیه یک نفر در جهان به دلایلی مانند سرعت بیش‌ازحد، حواس‌پرتی، مسمومیت و... کشته شده است [2]. شکل 1-1 نرخ تلفات جاده‌ای[[5]](#footnote-5) را در سال 2019 بر اساس کشور، به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت نشان می‌دهد.

شکل 1-1- نرخ تلفات جاده‌ای در سال 2019 بر اساس کشور، به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت [2]

خودروهای خودران[[6]](#footnote-6)، به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های دوران معاصر و جریان پیشرو در صنعت خودرو، نویدبخش دگرگونی بزرگی در سیستم حمل‌ونقل هستند. این فناوری‌ها دارای مزایای چشمگیر و در عین حال چالش‌های عمیقی می‌باشند.

از مهمترین مزیت‌های سامانه‌های خودران می‌توان به کاهش قابل توجه تصادفات جاده‌ای اشاره کرد؛ زیرا عامل انسانی به عنوان اصلی‌ترین دلیل بروز حوادث رانندگی حذف می‌شود. همچنین این فناوری می‌تواند تحرک و استقلال قابل توجهی را برای سالمندان و افراد دارای محدودیت‌های حرکتی ایجاد نماید. بسیاری از افراد دارای معلولیت قادر به اشتغال به فعالیت‌های شغلی هستند که دسترسی به حمل‌ونقل مستقل می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی آنان ایفا کند [3].

از سوی دیگر، این فناوری‌ها می‌توانند به کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط زیست کمک شایانی کنند. خودروهای خودران معمولاً به صورت بهینه و با مصرف انرژی کارآمد طراحی می‌شوند. همچنین زمینه‌ساز ایجاد شیوه‌های نوین حمل‌ونقل عمومی شده و می‌توانند منجر به کاهش چشمگیر تعداد خودروهای شخصی شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهند یک خودروی شخصی به طور متوسط بیش از نود و پنج درصد از زمان خود را در حالت پارک شده سپری می‌کند [3].

با این حال، توسعه فناوری‌های مربوطه، با چالش‌های متعددی نیز روبرو است که انجام آن را دشوار می‌سازند. ایجاد سامانه‌ای که بتواند با دقتی فراتر از انسان عمل کند نیازمند پیشرفت‌های بسیاری است. شرایط جوی نامساعد مانند برف و باران شدید، جاده‌های بدون علامت‌گذاری مناسب، رفتارهای غیرقابل پیش‌بینی عابران پیاده، رخ دادن رویدادهای نادر از جمله موانع پیش‌روی این فناوری‌ها هستند. به بیان دیگر از یک فناوری خودران انتظار می‌رود در برابر عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌‌ها[[7]](#footnote-7)، عملکرد[[8]](#footnote-8) (کارایی) مطلوبی را از خود نشان دهد و در برابر ورودی‌های ناخواسته، مقاوم[[9]](#footnote-9) باشد [3]. در غیر این‌صورت ممکن است عواقب جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد.

مسائل پیچیده اخلاقی و حقوقی نیز حائز اهمیت بوده و بایستی مورد توجه قرار گیرند، از جمله اینکه در موقعیت‌های اجتناب‌ناپذیر تصمیم‌گیری حقوقی به چه صورت است و مسئولیت حوادث احتمالی بر عهده چه کسی خواهد بود [3].

پارک‌کردن به عنوان یکی از دشوارترین وظایف رانندگی شناخته می‌شود، زیرا راننده ضمن نیاز به یافتن و تعیین محل پارک، لازم است مانورهای معکوس و حرکت به سمت عقب را برای قراردادن خودرو در محل مورد نظر انجام دهد که با احتمال تصادف نیز همراه است [4].

پارک خودروهای سنگین مفصلی[[10]](#footnote-10) (تجاری) ، به دلیل ابعاد بزرگ، مانورپذیری محدود، وجود نقاط کور گسترده، درجات آزادی بیشتر و دینامیک غیرهولونومیک[[11]](#footnote-11)، یکی از پیچیده‌ترین و پرخطاترین عملیات برای رانندگان محسوب می‌شود و به مراتب از خودروهای سواری دشوارتر است. یکی از نمونه‌های کاربردی فناوری‌های خودران، توسعه سیستم‌های پارک اتوماتیک[[12]](#footnote-12) (خودکار) می‌باشد که می‌توانند در خودروهای مفصلی به منظور رفع چالش مذکور، به کار روند.

توسعه سیستم‌های پارک خودکار آسان نیست. ابتدا خودرو باید محیط و موانع را به منظور یافتن فضای پارک شناسایی کند. سپس به طور خودکار توانایی برنامه‌ریزی برای حرکت و طراحی مسیر را خواهد داشت و در نهایت قادر به ردیابی مسیر و دنبال کردن حرکات برنامه‌ریزی شده متوالی و اطمینان از قرار گرفتن خودرو در موقعیت نهایی خواهد بود [4].

با توجه به مزایای گسترده فناوری‌های خودران و چالش‌های خاص پارک خودروهای مفصلی، این پایان‌نامه با هدف طراحی و توسعه یک سامانه هوشمند برای پارک خودکار این خودروها ارائه می‌شود تا گامی در جهت کاهش خطای انسانی، افزایش ایمنی و بهینه‌سازی عملیات حمل و نقل بردارد.

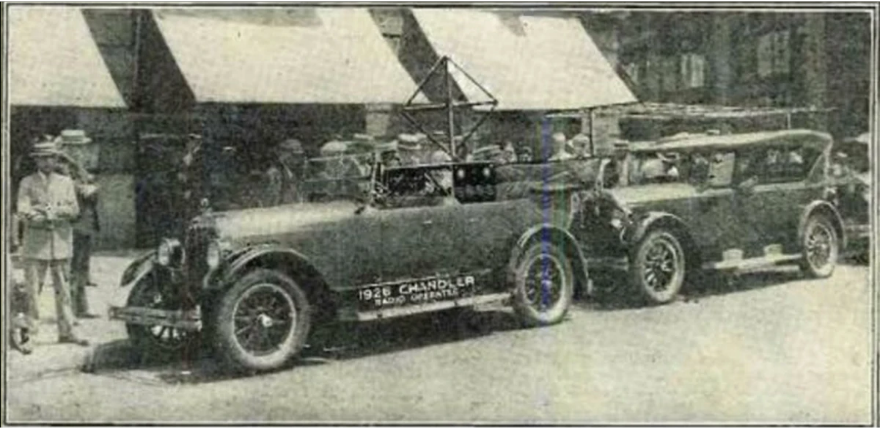
این فصل در ادامه نگاهی مختصر به تاریخچه خودروهای خودران دارد و ضمن بررسی اولیه روش‌ها و ایده‌های کاربردی به همراه مزایا و محدودیت‌های آن‌ها، بخشی از اهداف مسأله را بیان می‌کند.

## **2-1- تاریخچه خودروهای خودران و سامانه‌های کمک‌راننده پیشرفته**

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، پارک اتوماتیک یک خودروی مفصلی، نمونه‌ای از کاربردهای مورد استفاده در سامانه‌های خودران می‌باشد و نه‌تنها مستقل از آن‌ها نیست بلکه هم‌پوشانی بسیار دارد. لذا پیش از تشریح مسأله و واکاوی جزئیات آن، ارائه پیش‌زمینه‌ای از مبانی خودروهای خودران و فعالیت‌های پیشین در این عرصه ضروری به نظر می‌رسد.

ایده ساخت خودروهای خودران که قادر به درک محیط و انجام عملیات رانندگی بدون مداخله انسانی باشند، از دیرباز یکی از آرمان‌های کلیدی و بلندمدت در حوزه‌های مهندسی مکانیک، خودرو، مکاترونیک، رباتیک و سایر حوزه‌های مرتبط بوده است.

اولین خودروی بدون راننده در سال 1925 میلادی توسط شرکت محصولات کنترل رادیویی هودینا[[13]](#footnote-13) در نیویورک به صورت عمومی به نمایش درآمد. این پروژه که در شکل 1-2 قابل مشاهده است، اعجوبه آمریکایی[[14]](#footnote-14) نام داشت و یک خودروی کنترل از راه دور بود که خودروی دارای راننده دیگری را با استفاده از امواج رادیویی دنبال می‌کرد [5 و 6]. در سال‌های بعد ایده‌ها و مفاهیمی توسط جنرال موتورز[[15]](#footnote-15) در نمایشگاهی[[16]](#footnote-16) در سال 1939 مطرح شدند که منجر به ساخت برخی از نمونه‌های اولیه مبتنی بر زیرساخت‌های اختصاصی تا دهه 1970 گشتند [5].



شکل 1-2- اعجوبه آمریکایی در سال 1925 [6]

در سال 1986 تحولی اساسی در توسعه خودروهای خودران مستقل رخ داد که متکی به زیرساخت‌های اختصاصی نبودند. تیم ناولب[[17]](#footnote-17) در دانشگاه کارنگی ملون در آمریکا و همزمان تیم ارنست دیکمنز[[18]](#footnote-18) در اروپا و آلمان اقدام به توسعه فناوری‌های نوآورانه مبتنی بر رویکرد‌های ماژولار[[19]](#footnote-19) و یادگیری پایان‌به‌پایان[[20]](#footnote-20) کردند که حوزه‌هایی مانند هوش مصنوعی، بینایی کامپیوتر[[21]](#footnote-21)، شبکه‌های عصبی مصنوعی[[22]](#footnote-22) و یادگیری تقلیدی[[23]](#footnote-23) را شامل می‌شدند. لازم به ذکر است پیاده‌سازی این پروژه‌ها عمدتا روی خودروهای نیمه‌سنگینی مانند ون و مینی‌بوس انجام گرفت [5]. شکل 1-3 اولین پروژه تیم ناولب را نشان می‌دهد.



شکل 1-3- ناولب 1 [5]

در دهه 2000، سازمان پروژه‌های پیشرفته دفاعی[[24]](#footnote-24) (دارپا) مسابقاتی را برگزار کرد که به بروز پیشرفت‌هایی در این حوزه و رواج فناوری‌های مهمی مانند لیدار چندپرتویی[[25]](#footnote-25) منجر گشت. در ادامه، در سال 2009 گوگل[[26]](#footnote-26) با استخدام افرادی خبره از مسابقات دارپا پروژه‌های خودران خود را آغاز کرد و در دهه بعدی پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه بینایی ماشین و یادگیری عمیق[[27]](#footnote-27) فراهم آمد [5]. این پیشرفت‌ها زمینه‌ساز توسعه پروژه‌هایی با پتانسیل تجاری‌سازی مانند خودرو ویمو[[28]](#footnote-28) توسط گوگل و سایر پروژه‌ها توسط شرکت‌های دیگر مانند تسلا[[29]](#footnote-29)، اوبر[[30]](#footnote-30) و مرسدس[[31]](#footnote-31) در سال‌های بعد شد.

تاریخچه کامل خودروهای خودران مفصل و گسترده است و بیان تمامی جزئیات آن از اهداف پایان‌نامه خارج است. فناوری‌های امروزی حاصل سال‌ها تحقیق، توسعه و کسب تجربه می‌باشند. با این وجود تا به امروز حوادث جبران‌ناپذیری نیز رخ داده‌اند و برخی از پروژه‌ها با شکست مواجه شده‌اند. لذا تجاری شدن فناوری‌های خودران بسیار چالش‌برانگیز است.

سیستم کمک‌راننده پیشرفته[[32]](#footnote-32)، به مجموعه‌ای از سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها در مسیر رسیدن به یک خودرو کاملا خودران (در صورت تحقق) یا به بیان دیگر به هر سامانه‌ای که به راننده در رانندگی و پارک‌کردن کمک کند اطلاق می‌شود [7].

از سال 2014 سیستم‌های کمک‌راننده و سیستم‌های رانندگی خودکار[[33]](#footnote-33)، توسط انجمن بین‌المللی مهندسان خودرو[[34]](#footnote-34) در 6 سطح[[35]](#footnote-35)، از سطح صفر (بدون فناوری خودران[[36]](#footnote-36)) تا سطح 5 (کاملا خودران[[37]](#footnote-37)) طبقه‌بندی شده‌اند [5 و 8]. تعاریف، کاربردها و جزئیات مربوط به این سطوح در استاندارد ارائه شده توسط انجمن قابل دسترسی هستند [8]. خلاصه‌ای از اطلاعات مربوطه در جدول 1-1 آمده است. همچنین در یک دسته‌بندی کلی‌تر، سطوح صفر تا 2 را رانندگی تحت نظارت[[38]](#footnote-38) و سطوح بعدی را رانندگی بدون نیاز به نظارت[[39]](#footnote-39) معرفی می‌کنند [5].

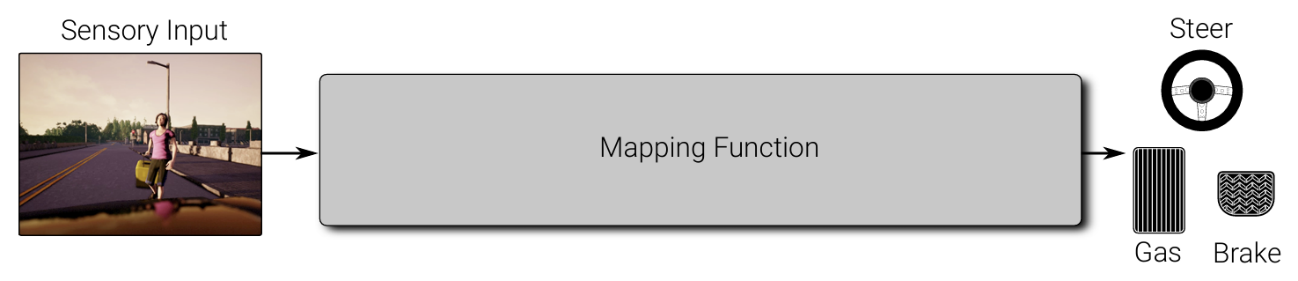
جدول 1-1- سطوح و مراتب سامانه‌های رانندگی خودکار [3، 5 و 8]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| معیار | سطح صفر | سطح 1 | سطح 2 | سطح 3 | سطح 4 | سطح 5 |
| عنوان | بدون رانندگی خودکار[[40]](#footnote-40) | همیار راننده[[41]](#footnote-41) | رانندگی خودکار جزئی[[42]](#footnote-42) | رانندگی خودکار مشروط[[43]](#footnote-43) | رانندگی خودکار سطح بالا[[44]](#footnote-44) | رانندگی خودکار کامل[[45]](#footnote-45) |
| نقش راننده | هدایت و کنترل کامل خودرو | نظارت مداوم بر سامانه، کنترل مداوم طولی یا عرضی خودرو | نظارت مداوم بر سامانه، عملکرد بدون نیاز به لمس دائم فرمان | نظارت و کنترل محافظه‌کارانه | بی‌نیاز از دخالت راننده در شرایط مشخص | - |
| نقش سامانه | - | کنترل طولی یا عرضی خودرو | کنترل طولی و عرضی خودرو در شرایط مشخص | کنترل طولی و عرضی خودرو در شرایط مشخص، شناسایی محدودیت‌های عملکردی و هشدار به راننده | هدایت و کنترل کامل خودرو در شرایط مشخص | هدایت و کنترل کامل خودرو |
| نمونه | خودروی معمولی بدون سامانه رانندگی خودکار | کروز کنترل تطبیقی[[46]](#footnote-46) | سامانه‌های کمکی در بزرگراه[[47]](#footnote-47) | سامانه رانندگی خودکار در ترافیک[[48]](#footnote-48) | سامانه پارک خودکار[[49]](#footnote-49) | خودروی کاملا خودران |

مطابق با تعاریف و اطلاعات ارائه شده، سامانه پارک خودکار یک خودروی مفصلی که موضوع اصلی مورد بررسی در این پایان‌نامه است، یک فناوری سطح 4 محسوب می‌شود و با وجود پیچیدگی بسیار، از جنبه‌های تجاری و فنی، اجرای آن چالش‌برانگیز است.

## **3-1- رویکردهای رانندگی خودکار[[50]](#footnote-50)**

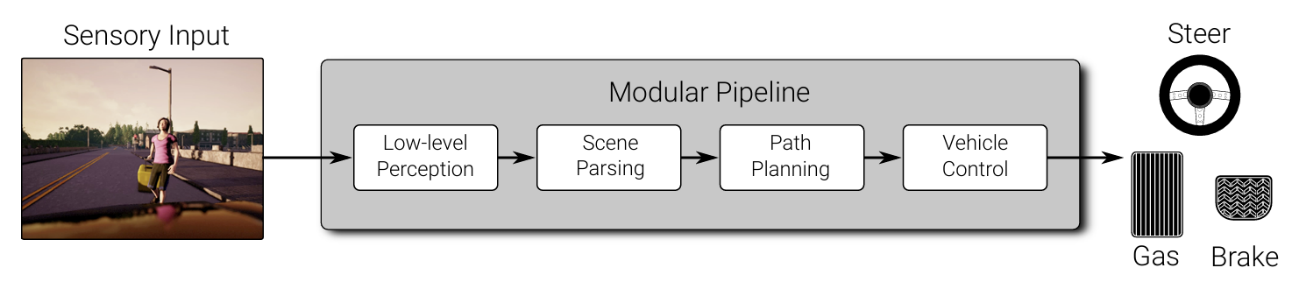
منظور از رویکردهای رانندگی خودکار روش‌هایی است که جهت توسعه سامانه‌های خودکار به کار می‌روند. دیاگرام موجود در شکل 1-4 نحوه عملکرد کلی یک سامانه خودکار را نشان می‌دهد. سنسورها محیط اطراف را شناسایی نموده و ورودی‌های لازم را دریافت می‌کنند. این ورودی‌ها لازم است توسط رویکردی مناسب به فرامین کنترلی[[51]](#footnote-51) تبدیل شوند تا خروجی مطلوب[[52]](#footnote-52) حاصل گردد. لذا رویکرد مورد استفاده، یک تابع نگاشت[[53]](#footnote-53) است که ورودی‎های سنسور[[54]](#footnote-54) را به فرمان کنترلی مطلوب تبدیل می‌کند یا به بیان دیگر، یک استراتژی کنترلی است که می‌تواند مجموعه‌ای از کنترل‌کننده‌ها[[55]](#footnote-55) را شامل شود.



شکل 1-4- دیاگرام سیستم کنترلی یک سامانه رانندگی خودکار [3]

رویکردهای موجود در توسعه سامانه‌های خودکار را می‌توان به طور کلی در یکی از 3 دسته رویکرد ماژولار، یادگیری پایان‌به‌پایان و درک مستقیم[[56]](#footnote-56) قرار داد [3 و 5]. هر کدام از این رویکردها، ویژگی‌های خاص همراه با مزایا و معایبی دارند که در ادامه توضیحاتی در این باره ارائه شده است.

### **1-3-1- رویکرد ماژولار**

 رویکرد ماژولار یک روش کلاسیک، استاندارد و مرسوم‌ترین روش توسعه سیستم‌های رانندگی خودکار در صنعت است که هدف آن، تقسیم پروژه و اهداف کنترلی به اجزا یا ماژول‌های کوچکتر می‌باشد [5]. بدین ترتیب هر کدام از ماژول‌ها به صورت مستقل و جداگانه توسعه داده می‌شوند و در نهایت با یکدیگر ادغام می‌گردند. شکل 1-5 ساختار کلی این رویکرد را نشان می‌دهد.

شکل 1-5- رویکرد ماژولار [3]

هر کدام از ماژول‌های نشان داده شده در شکل 1-5 وظیفه مشخصی دارند که خلاصه‌ای از آن‌ها، در جدول 1-2 آمده است.

جدول 1-2- وظایف کلی ماژول‌ها در رویکرد ماژولار [3]

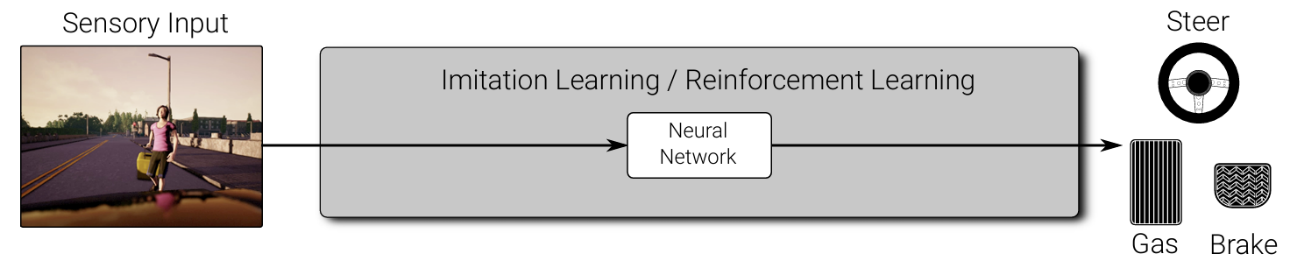
|  |  |
| --- | --- |
| ماژول | نقش |
| درک سطح پایین[[57]](#footnote-57) | تشخیص اشیا[[58]](#footnote-58) و اجزای محیط |
| تجزیه صحنه[[59]](#footnote-59) | تجزیه و تفسیر روابط و استخراج قوانین میان شناسایی و تصمیم‌گیری[[60]](#footnote-60) |
| برنامه‌ریزی یا طراحی مسیر[[61]](#footnote-61) | طراحی مسیر مناسب حرکت خودرو |
| کنترل خودرو[[62]](#footnote-62) | طراحی کنترل‌کننده و استخراج فرامین کنترلی به منظور ردیابی و دنبال کردن مسیر |

استفاده از این رویکرد مزایایی را به همراه دارد. ماژول‌ها توسط تیم‌های مختلفی می‌توانند توسعه داده شوند و فرآیند توسعه کامل محصول به اجزای کوچکتر و ساده‌تر تبدیل می‌گردد. از طرفی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این رویکرد تفسیر‌پذیری[[63]](#footnote-63) بالا می‌باشد و تمام مراحل مربوط به تشخیص، تصمیم‌گیری، طراحی مسیر و استراتژی کنترلی توسط انسان قابل تحلیل و با قواعد منطق سازگار هستند. همچنین با توجه به آنکه کنترل‌کننده‌ها عمدتا مبتنی بر مدل[[64]](#footnote-64) طراحی می‌شوند، در شرایط بحرانی، پایداری[[65]](#footnote-65) سیستم دینامیک[[66]](#footnote-66) با توجه به معیارهای پایداری موجود در تئوری کنترل تضمین می‌گردد.

در تقابل با مزایای مورد بررسی، رویکرد ماژولار معایبی نیز دارد. عملکرد مستقل و غیریکپارچه ماژول‌ها، اولویتی را میان وظایف به ویژه در مرحله درک سطح پایین لحاظ نمی‌کند. در حالی که تمام اشیا و موانع موجود در صحنه، سهم یکسانی در مهم‌ترین وظیفه که رانندگی خودکار است ندارند. مشکل دیگری که در این رویکرد وجود دارد، اهمیت دسترسی به نقشه‌های با کیفیت و ابعاد بالا[[67]](#footnote-67) می‌باشد که جمع‌آوری داده‌ها و ساخت این نقشه‌ها دشوار و پرهزینه است.

### **2-3-1- یادگیری پایان‌به‌پایان**

یکی دیگر از رویکرد‌های رانندگی خودکار، روش‌های مبتنی بر یادگیری پایان‌به‌پایان هستند که در بخش تاریخچه اشاره‌ای به آن‌ها شد. هدف از یادگیری پایان‌به‌پایان، توسعه الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است که ورودی خام سنسور را به صورت مستقیم به فرامین کنترلی نگاشت می‌کنند [9].

الگوریتم‌های پایان‌به‌پایان به طور کلی در دو دسته یادگیری تقلیدی و یادگیری تقویتی[[68]](#footnote-68) طبقه‌بندی می‌شوند که در فصل‌های بعد با جزئیات بیشتری بررسی می‌گردند [5 و 9]. یکی از اولین پروژه‌هایی که از یادگیری تقلیدی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در آن استفاده شد، یک خودروی زمینی خودران در یک شبکه عصبی[[69]](#footnote-69) (واژه انگلیسی مخفف شده آن را می‌توان در فارسی اَلوین تلفظ کرد) نام دارد. پیاده‌سازی این پروژه در سال 1988 توسط تیم ناولب و روی ون ناولب انجام گرفت [5 و 10]. ساختار کلی رویکرد پایان‌به‌پایان در شکل 1-6 آمده است.

شکل 1-6- یادگیری پایان‌به‌پایان [3]

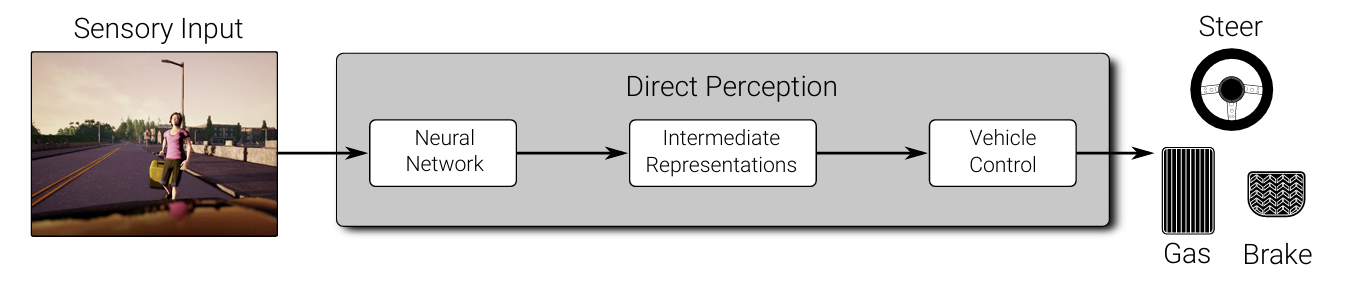
شاید بتوان گفت مهم‌ترین مزیتی که یک الگوریتم پایان‌به‌پایان دارد، تمرکز اصلی آن بر روی بهینه‌سازی وظیفه‌ای است که در واقعیت بیشترین اهمیت را دارد. همان‌گونه که در بخش قبلی اشاره شد، هدف نهایی و مهم‌ترین وظیفه سامانه، رانندگی خودکار است که به عنوان وظیفه اصلی الگوریتم پایان‌به‌پایان در نظر گرفته می‌شود. از طرفی بازدهی در محاسبات نیز افزایش می‌یابد. همچنین بهینه‌سازی مبتنی بر داده[[70]](#footnote-70)، پتانسیل بهبود سامانه را با مقیاس‌بندی داده‌های آموزش[[71]](#footnote-71) دارد و جمع‌آوری داده نسبت به رویکرد ماژولار با هزینه کمتری قابل انجام است [9].

یکی از چالش‌های اساسی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نه تنها در حوزه خودرو‌های خودران، بلکه در زمینه‌های دیگر نیز با آن مواجه هستند، تعمیم‌پذیری[[72]](#footnote-72) است. تعمیم‌پذیری در یادگیری ماشین به توانایی مدل در بروز عملکرد مناسب و دقیق در برابر سناریوها و داده‌هایی اشاره دارد که با آن‌ها آموزش ندیده است. این موضوع با مفاهیم نامطلوبی مانند کم‌برازش و بیش‌برازش در ارتباط است که تمامی این موضوعات در فصل سوم به صورت جداگانه بررسی می‌گردند. در صورتی که یک سامانه رانندگی خودکار تعمیم‌پذیری خوبی نداشته باشد، قوام در کارایی ندارد و در برابر عدم قطعیت و نامعینی‌های مدل نشده در مراحل آموزش و شبیه‌سازی، به ویژه در سناریوهای حساس و بحرانی، عملکرد مناسبی نخواهد داشت.

از دیگر عیوب این رویکرد می‌توان به تفسیرپذیری پایین اشاره کرد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین عمدتا علت مشخصی را برای اجرای یک تصمیم، مبتنی بر قواعد منطق، ریاضی یا فیزیک حاکم بر مسأله ارائه نمی‌دهند. لذا گاهی با اصطلاحی تحت عنوان جعبه سیاه[[73]](#footnote-73) به کار می‌روند.

با توجه به پیشرفت‌هایی که امروزه در حوزه‌های مرتبط با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین حاصل شده‌اند، توجه‌ها در حوزه رانندگی خودکار، بیش از پیش به سمت رویکردهای یادگیری پایان‌به‌پایان جلب شده‌اند و رشد سریعی در این زمینه اتفاق افتاده است. این حوزه به دلیل در دسترس بودن مجموعه داده‌های[[74]](#footnote-74) در مقیاس بزرگ، ارزیابی حلقه بسته و نیاز روزافزون به الگوریتم‌های رانندگی خودکار برای عملکرد مناسب در سناریوهای چالش‌برانگیز، رونق گرفته است [9]. رویکرد انتخابی در حل مسأله مورد بررسی در این پایان‌نامه، یادگیری پایان‌به‌پایان مبتنی بر یادگیری تقویتی است.

### **3-3-1- درک مستقیم**

 بیشتر منابع، رویکردهای رانندگی خودکار را از دید نحوه تصمیم‌گیری، در دو دسته ماژولار و یادگیری پایان‌به‌پایان که پیشتر مورد بررسی قرار گرفتند طبقه‌بندی می‌کنند. با این حال رویکرد دیگری نیز وجود دارد که از نظر مفهومی به یادگیری پایان‌به‌پایان نزدیک است و در بسیاری از موارد به عنوان زیرمجموعه‌ای از آن در نظر گرفته می‌شود. درک مستقیم، همان‌گونه که در شکل 1-7 مشاهده می‌شود، دارای یک مرحله بازنمایی میانی[[75]](#footnote-75) است که وظیفه آن تولید سرنخ‌های سطح میانی تفسیرپذیر است [9].

شکل 1-7- درک مستقیم [3]

می‌توان گفت این رویکرد ترکیبی از رویکرد ماژولار و یادگیری پایان‌به‌پایان یا بین آن دو است. با این حال به سمت یادگیری پایان‌به‌پایان متمایل است؛ زیرا عملکرد آن مبتنی بر داده می‌باشد با این تفاوت که هدف یادگیری در آن متفاوت با یادگیری پایان‌به‌پایان است.

از مزایای این رویکرد می‌توان به وجود بازنمایی‌های فشرده و در نتیجه تفسیرپذیری بهتر در مقایسه یا یادگیری پایان‌به‌پایان اشاره کرد. از طرفی توسعه کنترل‌کننده غیریکپارچه، مشابه چالش موجود در رویکرد ماژولار، هدف اصلی رانندگی خودکار را به صورت بهینه پوشش نمی‌دهد. همچنین طراحی بازنمایی‌های میانی به ویژه در سناریوهای گسترده دشوار است.

## **4-1- مقدمه‌ای بر سنسورها**

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی ملاحظه شد، در سامانه‌های رانندگی خودکار، سنسورها نقشی جداناپذیر دارند. سامانه‌های رانندگی خودکار به مجموعه‌ای از سنسورها مانند دوربین‌ها[[76]](#footnote-76)، کیلومترشمار چرخ[[77]](#footnote-77)، سنسورهای ناوبری و فاصله‌یابی صوتی[[78]](#footnote-78) (سونار) مانند اولتراسونیک[[79]](#footnote-79)، فناوری‌های آشکارسازی و فاصله‌یابی رادیویی[[80]](#footnote-80)(رادار) و آشکارسازی و فاصله‌یابی نوری[[81]](#footnote-81) (لیدار) متکی هستند [5].

دوربین‌ها به دلیل هزینه کم و عملکرد غیرفعال[[82]](#footnote-82)، به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که سنسورهای فاصله‌یابی، اطلاعات هندسی ضروری را ارائه می‌دهند. انواع مختلفی از دوربین‌ها وجود دارند. در کنار دوربین‌های متعارف[[83]](#footnote-83)، دوربین‌های همه‌جهته[[84]](#footnote-84)، میدان دید ۳۶۰ درجه‌ای را برای پوشش‌دهی بهتر محیط ارائه می‌دهند و دوربین‌های رویداد[[85]](#footnote-85)، تغییرات روشنایی محیط را با دقت میکروثانیه تشخیص می‌دهند و امکان پاسخگویی سریع را فراهم می‌کنند [5].

عملکرد دقیق این سنسورها به فرآیندی به نام تنظیم یا کالیبراسیون[[86]](#footnote-86) بستگی دارد. در این فرآیند، موقعیت و مشخصات داخلی سنسورها به دقت اندازه‌گیری می‌شوند تا داده‌های آن‌ها با هم هماهنگ باشند. روش‌های قدیمی دستی بودند اما امروزه این کار به طور کاملاً خودکار و با استفاده از ویژگی‌های محیطی انجام می‌شود.

**فصل دوم**

مدل‌سازی و طرح مسأله

# **2- مدل‌سازی و طرح مسأله**

مدل‌سازی سیستم، یک گام ضروری پیش از انجام هرگونه شبیه‌سازی یا حل تحلیلی یک مسأله در علم دینامیک[[87]](#footnote-87) است. این بدان معناست که معادلات حاکم بر سیستم باید کشف شوند و بتوان دینامیک مسأله را به زبان ریاضی بیان نمود. در علم دینامیک، معادلات حرکت[[88]](#footnote-88)، معادلات دیفرانسیلی[[89]](#footnote-89) هستند که از دید مکانیک برداری[[90]](#footnote-90) با استفاده از قانون دوم حرکت نیوتن[[91]](#footnote-91) و قانون حرکت اویلر[[92]](#footnote-92) و از دید مکانیک تحلیلی[[93]](#footnote-93)، عمدتا با استفاده از روش‌های مبتنی بر اصول همیلتون[[94]](#footnote-94) یا دالامبر[[95]](#footnote-95) به دست می‌آیند.

پس از استخراج معادلات حاکم، لازم است برای بررسی پاسخ[[96]](#footnote-96) سیستم و طراحی سیستم کنترلی در صورت نیاز، این معادلات حل شوند. با این حال حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل در بسیاری از موارد دشوار است و برای رفع این مشکل، فرضیاتی به منظور ساده‌سازی مسأله اعمال می‌گردند.

امروزه به منظور اعمال کمترین فرضیات ساده‌سازی و نزدیک شدن به رفتار واقعی سیستم، مدل‌سازی سیستم‌های دینامیک در نرم‌افزارهای مهندسی صورت می‌گیرد و شبیه‌سازی نیز با وجود پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، نگرانی کمتری را ایجاد می‌نماید. علی‌رغم پیشرفت‌های حاصل‌شده و وجود ابزارهای نرم‌افزاری متنوع، به منظور کسب چشم‌انداز بهتر، درک فیزیک مسأله و شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، مدل‌سازی ساده‌ای در ادامه انجام شده است.

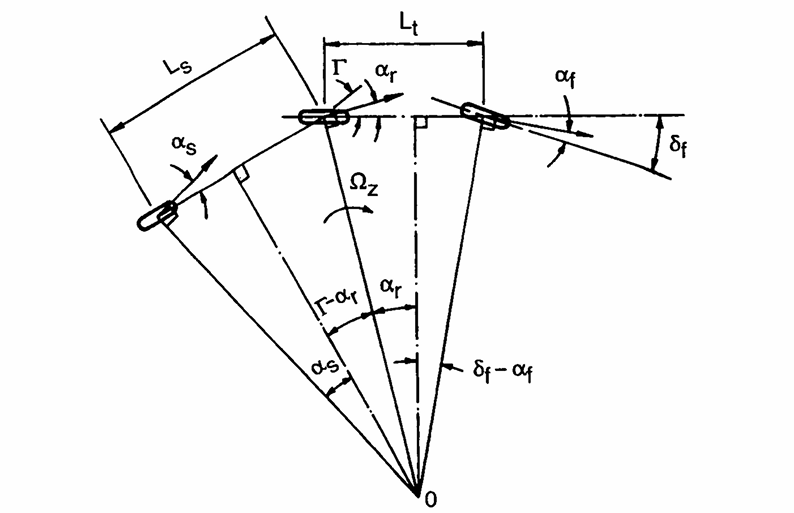
## **1-2- سینماتیک خودروی مفصلی**

سینماتیک[[97]](#footnote-97) شاخه‌ای از علم دینامیک است که به بررسی حرکت اجسام بدون درنظرگرفتن نیروهای وارد بر آن‌ها می‌پردازد. در مقابل، سینتیک[[98]](#footnote-98) شاخه دیگری از علم دینامیک است که به بررسی حرکت با درنظرگرفتن علل آن یا همان نیروهای وارد بر جسم سروکار دارد.

برای بررسی دینامیک عرضی[[99]](#footnote-99)، عملکرد فرمان‌پذیری[[100]](#footnote-100) و مانورپذیری[[101]](#footnote-101) خودرو، لازم است با در نظرگرفتن نیروهای وارد بر خودرو، معادلات حرکت استخراج گردند. با این حال برای ساده‌سازی، می‌توان فرضیاتی را درنظر گرفت. سرعت حرکت یک خودروی مفصلی در مانور پارک پایین می‌باشد. لذا می‌توان از لغزش عرضی زیر تایرها صرف نظرکرد و تایرها صلب فرض می‌شوند [4 و 11]. بنابراین زاویه لغزش[[102]](#footnote-102) صفر بوده و بردار سرعت در راستای محور طولی چرخ خواهد بود. از طرفی در این شرایط، تغییرات ناگهانی دینامیک در زمان کم مانند چرخش ناگهانی فرمان وجود ندارد و می‌توان سیستم را به لحاظ زمانی غیرمتغیر با زمان و در حالت پایا[[103]](#footnote-103) فرض نمود [12].

در حالت پایا و با فرض عدم لغزش، اینرسی[[104]](#footnote-104) خودرو در نظر گرفته نمی‌شود و معادلات حاکم بر سیستم از هندسه گردش[[105]](#footnote-105) بدست می‌آید [12].

شکل 2-1 مدل ساده‌شده‌ای از یک خودروی مفصلی را نشان می‌دهد که شامل یک کشنده یا تراکتور[[106]](#footnote-106) و یک پیرو منفعل[[107]](#footnote-107) یا تریلر[[108]](#footnote-108) است. تراکتور و تریلر توسط یک مفصل چرخان[[109]](#footnote-109) یا کوپلینگ مکانیکی[[110]](#footnote-110) که چرخ پنجم[[111]](#footnote-111) نیز نامیده می‌شود، به یکدیگر مقید شده‌اند. چرخ پنجم در بیشتر خودروهای مفصلی کمی جلوتر از محور عقب تراکتور قرار دارد. در مدل مورد بررسی، به منظور ساده‌سازی، این چرخ دقیقا بالای محور عقب تراکتور قرار گرفته است [12].



شکل 2-1- مدل صفحه‌ای ساده خودروی مفصلی در حالت پایا [12]

این مدل صفحه‌ای، به نوعی تعمیم‌یافته مدل دوچرخه[[112]](#footnote-112) در خودروی سواری محسوب می‌شود و معادلات هندسی حاکم بر آن مشابه مدل دوچرخه می‌باشد [12]. با این تفاوت که با توجه به مفصلی‌بودن آن، می‌توان آن را یک مدل سه‌چرخه یا به طور دقیق‌تر، یک تراکتور دومحوره همراه با یک تریلر تک‌محوره فرض کرد. به بیان دیگر، تراکتور در واقعیت 4 چرخ و تریلر 2 چرخ را شامل می‌شوند. لذا مجموعا خودروی مفصلی مورد نظر در واقعیت 6 چرخ دارد که با فرضیات اختیار شده، به صورت سه‌چرخه مدل می‌شود.

درجات آزادی[[113]](#footnote-113) یک سیستم متغیرهای مستقلی هستند که حرکت را بیان می‌کنند. هر جسم در صفحه، دارای دو حرکت انتقالی[[114]](#footnote-114) و یک حرکت دورانی[[115]](#footnote-115) است. لذا هر کدام از دو عضو تراکتور و تریلر در شکل 2-1، دارای 3 درجه آزادی هستند. با فرض حالت پایا، سرعت طولی تراکتور ثابت و مستقل از زمان بوده و به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد و سرعت عرضی آن نیز وابسته به سرعت طولی است. لذا تعداد درجات آزادی، دو درجه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر حرکت تریلر نیز توسط چرخ پنجم مقید شده است و دو درجه آزادی مربوط به حرکت انتقالی آن محدود می‌شوند. بنابراین مدل ساده‌شده دو درجه آزادی دارد و با دانستن دو ورودی زاویه فرمان[[116]](#footnote-116) و سرعت طولی خودرو، معین می‌گردد.

در ادامه، روابط هندسی حاکم را می‌توان با توجه به زوایای موجود در شکل 2-1 و با روش مرکز آنی دوران[[117]](#footnote-117) بدست آورد. معادلات 2-1 و 2-2 به ترتیب هندسه مربوط به زاویه فرمان و زاویه مفصلی[[118]](#footnote-118) را بیان می‌کنند [4 و 12].

(1-2)

(2-2)

در معادلات فوق، δf زاویه فرمان، Γ زاویه مفصلی (زاویه میان تریلر و تراکتور) و مقادیر αf و αr به ترتیب زوایای لغزش چرخ‌های جلو و عقب تراکتور و و αs زاویه لغزش محور عقب تریلر هستند. همچنین Lt و Ls بیانگر فاصله بین دو محور جلو و عقب به ترتیب در تراکتور و تریلر می‌باشند. شعاع گردش با R نمایش داده شده است و فرض بر یکسان بودن آن برای تراکتور و تریلر می‌باشد.

با فرض عدم لغزش، زوایای لغزش صفر درنظرگرفته می‌شوند. همچنین شعاع گردش را می‌توان برحسب سرعت خودرو (V) و سرعت گردشی[[119]](#footnote-119) (Ωz) حول مرکز آنی دوران خودرو نوشت. لذا معادلات 2-1 و 2-2 به فرم 2-3 و 4-2 ساده می‌شوند.

(3-2)

(4-2)

ملاحظه می‌گردد تعداد قابل توجهی از فرضیات ساده‌سازی به کار رفته‌اند. لذا مدل‌سازی صورت گرفته با واقعیت فاصله دارد. لازم به ذکر است دینامیک‌های مدل نشده می‌توانند منجر به بروز نامعینی و عدم قطعیت در سیستم شوند و کارایی آن را دچار اختلال نمایند [13]. با این حال، مدل‌سازی صورت‌گرفته نقطه شروع مناسبی می‌تواند باشد و درصورت نیاز می‌توان سیستم کنترلی را با عدم قطعیت مدل کرد و کارایی مقاوم آن را بررسی نمود [13]. هرچند همان‌گونه که در ابتدای فصل اشاره شد می‌توان از مدل‌های کامل‌تری که توسط نرم‌افزارهای مهندسی پشتیبانی می‌شوند استفاده نمود.

## **2-2- سینماتیک معکوس خودوری مفصلی**

در مدل‌سازی سینماتیک خودرو، با اعمال ورودی‌های زاویه فرمان و سرعت خودرو، سیستم معین می‌شود و با حل معادلات 2-3 و 2-4 می‌توان خروجی‌های متناظر که سرعت گردشی خودرو حول مرکز آنی دوران آن و زاویه مفصلی هستند را بدست آورد. این نگاشت ورودی به خروجی را سینماتیک مستقیم[[120]](#footnote-120) می‌نامند [14].

علی‌رغم آنکه سینماتیک مستقیم مسأله‌ای کلیدی است و مفاهیم پیش‌نیاز اساسی را در برمی‌گیرد، در بسیاری از مسائل مهندسی به ویژه در رباتیک و کنترل، لازم است ورودی‌های مورد نیاز سیستم باتوجه به خروجی‌های مطلوب و اهداف مسأله، تعیین گردند. در این حالت مسأله سینماتیک معکوس[[121]](#footnote-121) بایستی حل شود [14].

پارک خودرو یک مسأله سینماتیک معکوس است و در آن، زاویه فرمان و سرعت خودرو ورودی‌هایی هستند که باید در محور تراکتور اعمال شوند تا خودرو مسیر مطلوب را دنبال کند [15]. حل مسأله سینماتیک معکوس و طراحی کنترل‌کننده مناسب، به مراتب پیچیده‌تر از حل سینماتیک مستقیم است. بدین منظور، راه‌حل‌های گوناگونی به صورت تحلیلی و مبتنی بر مدل توسعه یافته‌اند که هریک مزایا و معایبی دارند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین زیرمجموعه‌ای از روش‌های محاسبات نرم[[122]](#footnote-122) هستند که می‌توانند به منظور حل سینماتیک معکوس خودروی مفصلی و کنترل پایان‌به‌پایان آن برای پارک خودکار بکار روند. رویکرد مورد استفاده در این پایان‌نامه نیز همین روش است که مزایا و چالش‌های آن در فصل اول، مورد بحث قرار گرفته‌اند. در فصل سوم جزئیات بیشتری در این‌باره ارائه خواهد شد.

**فصل سوم**

روش‌شناسی

# **3- روش‌شناسی**

**فهرست منابع**

[1]“Road traffic mortality”, World Health Organization, 2021, <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/road-traffic-mortality>, Accessed September 2025.

[2] “List of countries by traffic-related death rate”, Wikipedia, Retrieved 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_traffic-related_death_rate>, Accessed September 2025.

[3] Geiger, Andreas. “Self-Driving Cars”, Lecture Slides, University of Tübingen, 2023, <https://uni-tuebingen.de/fakultaeten/mathematisch-naturwissenschaftliche-fakultaet/fachbereiche/informatik/lehrstuehle/autonomous-vision/lectures/self-driving-cars/>, Accessed September 2025.

[4] Azadi, Sh., Nedamani, H.R., and Kazemi, R. “Automatic Parking of an Articulated Vehicle Using ANFIS”, *Global Journal of Science, Engineering and Technology*, pp. 93-104, 2013.

[5] Janai, Joel., Güney, Fatma., Behl, Aseem., and Geiger, Andreas. “Computer Vision for Autonomous Vehicles: Problems, Datasets and State of the Art”, Now Publishers, 2020.

[6] Engelking, Carl. “The Driverless Car Era Began More Than 90 Years Ago”, Discover Magazine, 2017, <https://www.discovermagazine.com/the-driverless-car-era-began-more-than-90-years-ago-1327>, Accessed September 2025.

[7] Brookhuis, Karel A., de Waard, Dick., and Janssen, Wiel H. “Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems–an overview”, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 1, no. 3, pp. 245-253, 2001.

[8] “Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles”, SAE Standard J3016\_202104, Issued 2014, Revised 2021.

[9] Chen, Li., Wu, Penghao., Chitta, Kashyap., Jaeger, Bernhard., Geiger, Andreas., and Li, Hongyang. “End-to-end Autonomous Driving: Challenges and Frontiers”, *arXiv:2306.16927*, 2023.

[10] Pomerleau, Dean A. “ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network”, *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, pp. 305-313, 1988.

[11] رضایی ندامانی، حمیدرضا، "پارک خودکار خودروهای مفصلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 1392.

[12] Wong, J.Y. “Theory of Ground Vehicles”, Wiley, 2001.

[13] تقی‌راد، حمیدرضا.، فتحی، محمد.، زمانی اسگویی، فرینا. "کنترل مقاوم H∞"، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 1403.

[14] Craig, J. J. "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Third Edition, Pearson Education, 1986.

[15] Kusumakar, Rakshith, “Autonomous Parking for Articulated Vehicles”, M.Sc. Thesis, HAN University of applied science, Netherland, 2017.

1. Artificial Intelligence (AI) [↑](#footnote-ref-1)
2. Machine Learning (ML) [↑](#footnote-ref-2)
3. Autonomous (Self-Driving) Systems [↑](#footnote-ref-3)
4. World Health Organization (WHO) [↑](#footnote-ref-4)
5. Road Fatalities [↑](#footnote-ref-5)
6. Autonomous (Self-Driving) Vehicles [↑](#footnote-ref-6)
7. Uncertainties [↑](#footnote-ref-7)
8. Performance [↑](#footnote-ref-8)
9. Robust [↑](#footnote-ref-9)
10. Articulated (Commercial) Vehicles [↑](#footnote-ref-10)
11. Nonholonomic [↑](#footnote-ref-11)
12. Autonomous (Automatic) Parking Systems [↑](#footnote-ref-12)
13. Houdina Radio Control [↑](#footnote-ref-13)
14. American Wonder [↑](#footnote-ref-14)
15. General Motors [↑](#footnote-ref-15)
16. Futurama [↑](#footnote-ref-16)
17. Navlab [↑](#footnote-ref-17)
18. Ernst Dickmanns [↑](#footnote-ref-18)
19. Modular Pipelines [↑](#footnote-ref-19)
20. End-to-End Learning [↑](#footnote-ref-20)
21. Computer Vision [↑](#footnote-ref-21)
22. Artificial Neural Networks (ANNs) [↑](#footnote-ref-22)
23. Imitation Learning (IL) [↑](#footnote-ref-23)
24. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) [↑](#footnote-ref-24)
25. Multi-Beam Lidar [↑](#footnote-ref-25)
26. Google [↑](#footnote-ref-26)
27. Deep Learning (DL) [↑](#footnote-ref-27)
28. Waymo [↑](#footnote-ref-28)
29. Tesla [↑](#footnote-ref-29)
30. Uber [↑](#footnote-ref-30)
31. Mercedes [↑](#footnote-ref-31)
32. Advanced Driver-Assistance System (ADAS) [↑](#footnote-ref-32)
33. Automated Driving Systems (ADS) [↑](#footnote-ref-33)
34. Society of Automotive Engineers (SAE International) [↑](#footnote-ref-34)
35. SAE Levels of Autonomy [↑](#footnote-ref-35)
36. No Autonomy [↑](#footnote-ref-36)
37. Full Autonomy [↑](#footnote-ref-37)
38. Monitored Driving [↑](#footnote-ref-38)
39. Non-Monitored Driving [↑](#footnote-ref-39)
40. No Driving Automation [↑](#footnote-ref-40)
41. Driver Assistance [↑](#footnote-ref-41)
42. Partial Driving Automation [↑](#footnote-ref-42)
43. Conditional Driving Automation [↑](#footnote-ref-43)
44. High Driving Automation [↑](#footnote-ref-44)
45. Full Driving Automation [↑](#footnote-ref-45)
46. Adaptive Cruise Control (ACC) [↑](#footnote-ref-46)
47. Highway Assist Systems [↑](#footnote-ref-47)
48. Traffic Jam Chauffeur [↑](#footnote-ref-48)
49. Automated Valet Parking [↑](#footnote-ref-49)
50. Approaches to Self-Driving [↑](#footnote-ref-50)
51. Control Commands [↑](#footnote-ref-51)
52. Desired Output [↑](#footnote-ref-52)
53. Mapping Function [↑](#footnote-ref-53)
54. Sensory Inputs [↑](#footnote-ref-54)
55. Controllers [↑](#footnote-ref-55)
56. Direct Perception [↑](#footnote-ref-56)
57. Low-Level Perception [↑](#footnote-ref-57)
58. Object Detection [↑](#footnote-ref-58)
59. Scene Parsing [↑](#footnote-ref-59)
60. Decision Making [↑](#footnote-ref-60)
61. Path (Trajectory) Planning [↑](#footnote-ref-61)
62. Vehicle Control [↑](#footnote-ref-62)
63. Interpretability [↑](#footnote-ref-63)
64. Model-Based [↑](#footnote-ref-64)
65. Stability [↑](#footnote-ref-65)
66. Dynamic System [↑](#footnote-ref-66)
67. High-Dimensional (HD) Maps [↑](#footnote-ref-67)
68. Reinforcement Learning [↑](#footnote-ref-68)
69. An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network (ALVINN) [↑](#footnote-ref-69)
70. Data-Driven [↑](#footnote-ref-70)
71. Training Data [↑](#footnote-ref-71)
72. Generalization [↑](#footnote-ref-72)
73. Black Box [↑](#footnote-ref-73)
74. Datasets [↑](#footnote-ref-74)
75. Intermediate Representation [↑](#footnote-ref-75)
76. Cameras [↑](#footnote-ref-76)
77. Wheel Odometry [↑](#footnote-ref-77)
78. Sound Navigation & Ranging (Sonar) [↑](#footnote-ref-78)
79. Ultrasonic [↑](#footnote-ref-79)
80. Radio Detection and Ranging (Radar) [↑](#footnote-ref-80)
81. Light Detection and Ranging (Lidar) [↑](#footnote-ref-81)
82. Passive Sensing [↑](#footnote-ref-82)
83. Conventional Cameras [↑](#footnote-ref-83)
84. Omnidirectional Cameras [↑](#footnote-ref-84)
85. Event Cameras [↑](#footnote-ref-85)
86. Calibration [↑](#footnote-ref-86)
87. Dynamics [↑](#footnote-ref-87)
88. Equations of Motion [↑](#footnote-ref-88)
89. Differential Equations [↑](#footnote-ref-89)
90. Vector Mechanics [↑](#footnote-ref-90)
91. Newton’s Second Law of Motion [↑](#footnote-ref-91)
92. Euler’s Law of Motion [↑](#footnote-ref-92)
93. Analytical Mechanics [↑](#footnote-ref-93)
94. Hamilton's Principle [↑](#footnote-ref-94)
95. D'Alembert's Principle [↑](#footnote-ref-95)
96. Response [↑](#footnote-ref-96)
97. Kinematics [↑](#footnote-ref-97)
98. Kinetics [↑](#footnote-ref-98)
99. Lateral Dynamics [↑](#footnote-ref-99)
100. Handling Performance [↑](#footnote-ref-100)
101. Maneuvering [↑](#footnote-ref-101)
102. Slip Angle [↑](#footnote-ref-102)
103. Steady State [↑](#footnote-ref-103)
104. Inertia [↑](#footnote-ref-104)
105. Steering Geometry [↑](#footnote-ref-105)
106. Tractor [↑](#footnote-ref-106)
107. Passive [↑](#footnote-ref-107)
108. Semi-Trailer [↑](#footnote-ref-108)
109. Pivoting Joint [↑](#footnote-ref-109)
110. Mechanical Coupling [↑](#footnote-ref-110)
111. Fifth Wheel [↑](#footnote-ref-111)
112. Bicycle Model [↑](#footnote-ref-112)
113. Degrees of Freedom (DoF) [↑](#footnote-ref-113)
114. Translational [↑](#footnote-ref-114)
115. Rotational [↑](#footnote-ref-115)
116. Steering Angle [↑](#footnote-ref-116)
117. Instantaneous Center of Rotation Method [↑](#footnote-ref-117)
118. Articulation Angle [↑](#footnote-ref-118)
119. Yaw Rate [↑](#footnote-ref-119)
120. Direct Kinematics [↑](#footnote-ref-120)
121. Inverse Kinematics [↑](#footnote-ref-121)
122. Soft Computing [↑](#footnote-ref-122)