



دانشکده مهندسی مکانیک

گزارش سمینار مهندسی خودرو در گرایش طراحی سیستم‌های دینامیکی

پارک خودکار یک خودروی مفصلی مبتنی بر یادگیری تقویتی

نگارش:

امیرحسین محمدی

اساتید راهنما:

دکتر شهرام آزادی

دکتر رضا کاظمی

تابستان ۱۴۰۴



الحمد لله الذي  
خلقنا من  
الحمم



## چکیده

پارک کردن به‌ویژه برای خودروهای سنگین مفصلی به دلیل ابعاد بزرگ، مانورپذیری محدود و دینامیک غیرهولونومیک، یکی از چالش‌برانگیزترین و پرخطاترین عملیات رانندگی محسوب می‌شود. این پایان‌نامه به طراحی و توسعه یک سامانه هوشمند برای پارک خودکار خودروهای مفصلی مبتنی بر یادگیری تقویتی پایان‌به‌پایان می‌پردازد.

پس از مروری بر تاریخچه خودروهای خودران و رویکردهای مختلف در این حوزه (از جمله رویکرد ماژولار، یادگیری پایان‌به‌پایان و درک مستقیم)، مدل سینماتیکی ساده‌ای از خودروی مفصلی در حالت پایا و با فرض عدم لغزش ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی ذاتی حل مسئله سینماتیک معکوس برای پارک خودکار، رویکرد حل مسئله بر استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و به‌طور خاص یادگیری تقویتی متمرکز شده است.

یادگیری تقویتی به عنوان یک الگوریتم کنترلی پایان‌به‌پایان انتخاب شده است که در آن یک عامل از طریق تعامل با محیط شبیه‌سازی شده و بر اساس دریافت پاداش و جریمه، به تدریج سیاست بهینه برای انجام مانور پارک را می‌آموزد. این رویکرد از مزایای عدم نیاز به مجموعه داده‌های برچسب‌گذاری شده بزرگ و توانایی یادگیری مستقیم از محیط برخوردار است.

این پژوهش در نظر دارد تا با بهره‌گیری از این روش، گامی در جهت کاهش خطای انسانی، افزایش ایمنی و بهینه‌سازی عملیات حمل‌ونقل با خودروهای مفصلی بردارد.

**واژه‌های کلیدی:** خودروی مفصلی، پارک خودکار، یادگیری تقویتی، یادگیری پایان‌به‌پایان، سینماتیک معکوس، خودروی خودران.



۱- مقدمه.....	۲
۱-۱- پیش‌زمینه، انگیزه و اهداف.....	۲
۱-۲- تاریخچه خودروهای خودران و سامانه‌های کمک‌راننده پیشرفته.....	۵
۱-۳- رویکردهای رانندگی خودکار.....	۱۰
۱-۳-۱- رویکرد ماژولار.....	۱۱
۱-۳-۲- یادگیری پایان‌به‌پایان.....	۱۳
۱-۳-۳- درک مستقیم.....	۱۵
۱-۴- مقدمه‌ای بر سنسورها.....	۱۶
۲- مدل‌سازی و طرح مسأله.....	۱۹
۲-۱- سینماتیک خودروی مفصلی.....	۲۰
۲-۲- سینماتیک معکوس خودروی مفصلی.....	۲۴
۳- روش‌شناسی.....	۲۷
۳-۱- مروری بر تعاریف اولیه یادگیری ماشین.....	۲۷
۳-۲- دسته‌بندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین.....	۲۹
۳-۲-۱- یادگیری نظارتی.....	۲۹



۳-۲-۲- یادگیری بدون نظارت..... ۳۱

۳-۲-۳- یادگیری نیمه نظارتی..... ۳۲

۳-۲-۴- یادگیری تقویتی..... ۳۲

۳-۳- یادگیری تقویتی پایان به پایان..... ۳۳

۴- بحث و تفسیر..... ۳۵

نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۳۶

فهرست منابع..... ۳۷



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- نرخ تلفات جاده‌ای در سال ۲۰۱۹ بر اساس کشور، به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت..... ۲
- شکل ۱-۲- اعجوبه آمریکایی در سال ۱۹۲۵..... ۶
- شکل ۱-۳- ناولب ۱..... ۷
- شکل ۱-۴- دیاگرام سیستم کنترلی یک سامانه رانندگی خودکار..... ۱۰
- شکل ۱-۵- رویکرد ماژولار..... ۱۱
- شکل ۱-۶- یادگیری پایان‌به‌پایان..... ۱۳
- شکل ۱-۷- درک مستقیم..... ۱۵
- شکل ۲-۱- مدل صفحه‌ای ساده خودروی مفصلی در حالت پایا..... ۲۱
- شکل ۳-۱- برخی از حوزه‌های مرتبط با هوش مصنوعی..... ۲۸
- شکل ۳-۲- دیاگرام بلوکی یادگیری تقویتی..... ۳۳



## فهرست جداول

جدول ۱-۱- سطوح و مراتب سامانه‌های رانندگی خودکار [۳، ۵ و ۸]..... ۹

جدول ۱-۲- وظایف کلی ماژول‌ها در رویکرد ماژولار [۳]..... ۱۱

جدول ۳-۱- تعدادی از الگوریتم‌های یادگیری نظارتی..... ۳۱



## فهرست نمادها و اختصارات

$L_t$	فاصله میان محورهای جلو و عقب در تراکتور
$L_s$	فاصله میان محور عقب تراکتور و محور عقب تریلر
$R$	شعاع گردش
$V$	سرعت خودرو
$\delta_f$	زاویه فرمان
$\alpha_f$	زاویه لغزش محور جلوی تراکتور
$\alpha_r$	زاویه لغزش محور عقب تراکتور
$\alpha_s$	زاویه لغزش محور عقب تریلر
$\Gamma$	زاویه مفصلی
$\Omega_z$	سرعت دورانی یا نرخ گردش



# فصل اول

## مقدمه

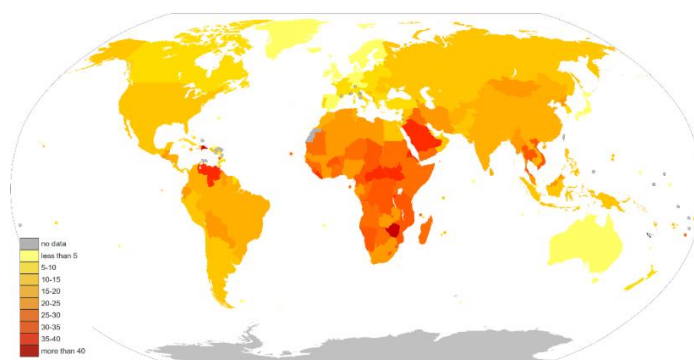


## ۱- مقدمه

امروزه بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی<sup>۱</sup> و یادگیری ماشین<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> است که در آن، الگوریتم‌های هوشمند نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد، افزایش ایمنی و ارتقای تجربه کاربری ایفا می‌کنند.

## ۱-۱- پیش‌زمینه، انگیزه و اهداف

مطابق با گزارش سازمان جهانی بهداشت<sup>۴</sup>، جراحات ناشی از تصادفات جاده‌ای در سال ۲۰۱۶ باعث مرگ حدود ۱/۳۵ میلیون نفر در سراسر جهان شده است [۱]. یعنی به طور متوسط هر ۲۶ ثانیه یک نفر در جهان به دلایلی مانند سرعت بیش‌ازحد، حواس‌پرتی، مسمومیت و... کشته شده است [۲]. شکل ۱-۱ نرخ تلفات جاده‌ای<sup>۵</sup> را در سال ۲۰۱۹ بر اساس کشور، به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- نرخ تلفات جاده‌ای در سال ۲۰۱۹ بر اساس کشور، به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ نفر جمعیت [۲]

<sup>۱</sup> Artificial Intelligence) AI(

<sup>۲</sup> Machine Learning) ML(

<sup>۳</sup> Autonomous) Self-Driving (Systems

<sup>۴</sup> World Health Organization) WHO(

<sup>۵</sup> Road Fatalities



خودروهای خودران<sup>۶</sup>، 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 [۳].

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 [۳].

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.

---

<sup>۶</sup> Autonomous Self-Driving (Vehicles)



به بیان دیگر از یک فناوری خودران انتظار می‌رود در برابر عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌ها<sup>۷</sup>، عملکرد<sup>۸</sup> (کارایی) مطلوبی را از خود نشان دهد و در برابر ورودی‌های ناخواسته، مقاوم<sup>۹</sup> باشد [۳]. در غیر این صورت 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 [۳].

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 [۴].

پارک خودروهای سنگین مفصلی<sup>۱۰</sup> (تجاری)، به دلیل ابعاد بزرگ، مانورپذیری محدود، وجود نقاط کور گسترده، درجات آزادی بیشتر و دینامیک غیرهولونومیک<sup>۱۱</sup>، 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<sup>۱۲</sup> (خودکار) می‌باشد که می‌توانند در خودروهای مفصلی به منظور رفع چالش مذکور، به کار روند.

---

<sup>۷</sup> Uncertainties

<sup>۸</sup> Performance

<sup>۹</sup> Robust

<sup>۱۰</sup> Articulated Commercial Vehicles

<sup>۱۱</sup> Nonholonomic

<sup>۱۲</sup> Autonomous Automatic Parking Systems



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 [۴].

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.

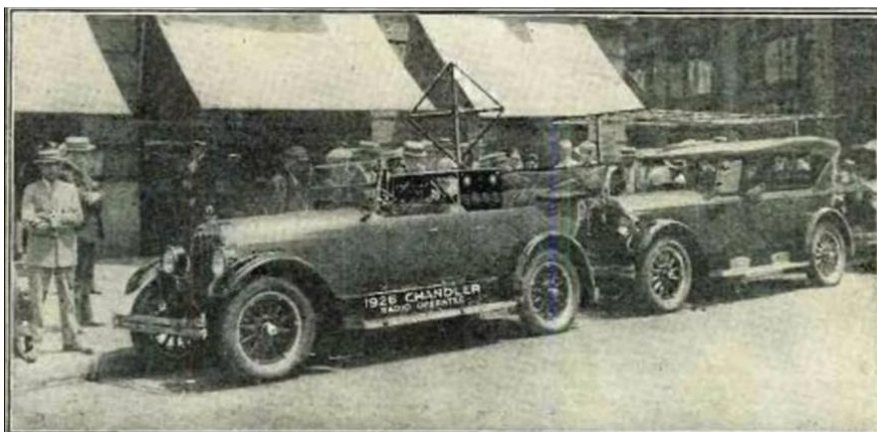
## ۱-۲- تاریخچه خودروهای خودران و سامانه‌های کمک‌راننده پیشرفته

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، پارک اتوماتیک یک خودروی مفصلی، نمونه‌ای از کاربردهای مورد استفاده در سامانه‌های خودران می‌باشد و نه تنها 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 ۱۹۲۵ میلادی توسط شرکت محصولات کنترل رادیویی هودینا<sup>۱۳</sup> در نیویورک به صورت عمومی به نمایش درآمد. این پروژه که در شکل ۱-۲ قابل مشاهده است، اعجوبه آمریکایی<sup>۱۴</sup> نام داشت و یک خودروی کنترل از راه دور بود که خودروی دارای راننده دیگری را با استفاده از امواج رادیویی دنبال می‌کرد [۵ و ۶]. در سال‌های بعد ایده‌ها و مفاهیمی توسط جنرال موتورز<sup>۱۵</sup> در نمایشگاهی<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۳۹ مطرح شدند که منجر به ساخت برخی از نمونه‌های اولیه مبتنی بر زیرساخت‌های اختصاصی تا دهه ۱۹۷۰ گشتند [۵].



شکل ۱-۲- اعجوبه آمریکایی در سال ۱۹۲۵ [۶]

در سال ۱۹۸۶ تحولی اساسی در توسعه خودروهای خودران مستقل رخ داد که متکی به زیرساخت‌های اختصاصی نبودند. تیم ناولب<sup>۱۷</sup> در دانشگاه کارنگی ملون در آمریکا و همزمان تیم ارنست دیکمنز<sup>۱۸</sup> در اروپا و آلمان اقدام به توسعه فناوری‌های نوآورانه مبتنی بر رویکردهای ماژولار<sup>۱۹</sup>

<sup>۱۳</sup> Houdina Radio Control

<sup>۱۴</sup> American Wonder

<sup>۱۵</sup> General Motors

<sup>۱۶</sup> Futurama

<sup>۱۷</sup> Navlab

<sup>۱۸</sup> Ernst Dickmanns

<sup>۱۹</sup> Modular Pipelines



و یادگیری پایان به پایان<sup>۲۰</sup> کردند که حوزه‌هایی مانند هوش مصنوعی، بینایی کامپیوتر<sup>۲۱</sup>، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۲۲</sup> و یادگیری تقلیدی<sup>۲۳</sup> را شامل می‌شدند. لازم به ذکر است پیاده‌سازی این پروژه‌ها عمدتاً روی خودروهای نیمه‌سنگینی مانند ون و مینی‌بوس انجام گرفت [۵]. شکل ۱-۳ اولین پروژه تیم ناولب را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- ناولب ۱ [۵]

در دهه ۲۰۰۰، سازمان پروژه‌های پیشرفته دفاعی<sup>۲۴</sup> (دارپا) مسابقاتی را برگزار کرد که به بروز پیشرفت‌هایی در این حوزه و رواج فناوری‌های مهمی مانند لیدار چندپرتویی<sup>۲۵</sup> منجر گشت. در ادامه،

<sup>۲۰</sup> End-to-End Learning

<sup>۲۱</sup> Computer Vision

<sup>۲۲</sup> Artificial Neural Networks) ANNs(

<sup>۲۳</sup> Imitation Learning) IL(

<sup>۲۴</sup> Defense Advanced Research Projects Agency) DARPA(

<sup>۲۵</sup> Multi-Beam Lidar



در سال ۲۰۰۹ گوگل<sup>۲۶</sup> 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<sup>۲۷</sup> فراهم آمد [۵]. این پیشرفت‌ها زمینه‌ساز توسعه پروژه‌هایی با پتانسیل تجاری‌سازی مانند خودرو ویمو<sup>۲۸</sup> توسط گوگل و سایر پروژه‌ها توسط شرکت‌های دیگر مانند تسلا<sup>۲۹</sup>، اوبر<sup>۳۰</sup> و مرسدس<sup>۳۱</sup> 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<sup>۳۲</sup>، به مجموعه‌ای از سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها در مسیر رسیدن به یک خودرو کاملاً خودران (در صورت تحقق) یا به بیان دیگر به هر سامانه‌ای که به راننده در رانندگی و پارک‌کردن کمک کند اطلاق می‌شود [۷].

از سال ۲۰۱۴ سیستم‌های کمک‌راننده و سیستم‌های رانندگی خودکار<sup>۳۳</sup>، توسط انجمن بین‌المللی مهندسان خودرو<sup>۳۴</sup> در ۶ سطح<sup>۳۵</sup>، از سطح صفر (بدون فناوری خودران<sup>۳۶</sup>) تا سطح ۵ (کاملاً

<sup>۲۶</sup> Google

<sup>۲۷</sup> Deep Learning) DL(

<sup>۲۸</sup> Waymo

<sup>۲۹</sup> Tesla

<sup>۳۰</sup> Uber

<sup>۳۱</sup> Mercedes

<sup>۳۲</sup> Advanced Driver-Assistance System) ADAS(

<sup>۳۳</sup> Automated Driving Systems) ADS(

<sup>۳۴</sup> Society of Automotive Engineers) SAE International(

<sup>۳۵</sup> SAE Levels of Autonomy

<sup>۳۶</sup> No Autonomy



خودران<sup>۳۷</sup>) طبقه‌بندی شده‌اند [۵ و ۸]. تعاریف، کاربردها و جزئیات مربوط به این سطوح در استاندارد ارائه شده توسط انجمن قابل دسترسی هستند [۸]. خلاصه‌ای از اطلاعات مربوطه در جدول ۱-۱ آمده است. همچنین در یک دسته‌بندی کلی‌تر، سطوح صفر تا ۲ را رانندگی تحت نظارت<sup>۳۸</sup> و سطوح بعدی را رانندگی بدون نیاز به نظارت<sup>۳۹</sup> معرفی می‌کنند [۵].

جدول ۱-۱- سطوح و مراتب سامانه‌های رانندگی خودکار [۳، ۵ و ۸]

سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	سطح صفر	معیار
رانندگی خودکار کامل <sup>۴۵</sup>	رانندگی خودکار سطح بالا <sup>۴۴</sup>	رانندگی خودکار مشروط <sup>۴۳</sup>	رانندگی خودکار جزئی <sup>۴۲</sup>	همیار راننده <sup>۴۱</sup>	بدون رانندگی خودکار <sup>۴۰</sup>	عنوان
-	بی‌نیاز از دخالت راننده در شرایط مشخص	نظارت و کنترل محافظه‌کارانه	نظارت مداوم بر سامانه، عملکرد بدون نیاز به لمس دائم فرمان	نظارت مداوم بر سامانه، کنترل مداوم طولی یا عرضی خودرو	هدایت و کنترل کامل خودرو	نقش راننده
هدایت و کنترل کامل خودرو	هدایت و کنترل کامل خودرو در شرایط مشخص	کنترل طولی و عرضی خودرو در شرایط مشخص، شناسایی محدودیت‌های عملکردی و هشدار به راننده	کنترل طولی و عرضی خودرو در شرایط مشخص	کنترل طولی یا عرضی خودرو	-	نقش سامانه
خودروی کاملاً خودران	سامانه پارک خودکار <sup>۴۹</sup>	سامانه رانندگی خودکار در ترافیک <sup>۴۸</sup>	سامانه‌های کمکی در بزرگراه <sup>۴۷</sup>	کروز کنترل تطبیقی <sup>۴۶</sup>	خودروی معمولی بدون سامانه رانندگی خودکار	نمونه

<sup>۳۷</sup> Full Autonomy

<sup>۳۸</sup> Monitored Driving

<sup>۳۹</sup> Non-Monitored Driving

<sup>۴۰</sup> No Driving Automation

<sup>۴۱</sup> Driver Assistance

<sup>۴۲</sup> Partial Driving Automation

<sup>۴۳</sup> Conditional Driving Automation

<sup>۴۴</sup> High Driving Automation

<sup>۴۵</sup> Full Driving Automation

<sup>۴۶</sup> Adaptive Cruise Control) ACC(

<sup>۴۷</sup> Highway Assist Systems

<sup>۴۸</sup> Traffic Jam Chauffeur

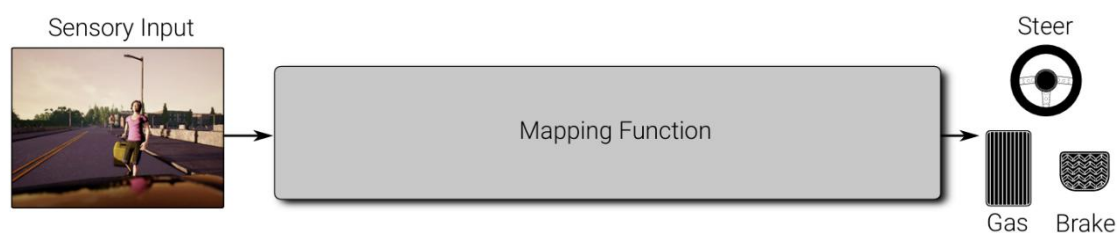
<sup>۴۹</sup> Automated Valet Parking



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 ۴ محسوب می‌شود و با وجود پیچیدگی بسیار، از جنبه‌های تجاری و فنی، اجرای آن چالش‌برانگیز است.

### ۳-۱- رویکردهای رانندگی خودکار<sup>۵۰</sup>

منظور از رویکردهای رانندگی خودکار روش‌هایی است که جهت توسعه سامانه‌های خودکار به کار می‌روند. دیاگرام موجود در شکل ۱-۴ 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<sup>۵۱</sup> تبدیل شوند تا خروجی مطلوب<sup>۵۲</sup> حاصل گردد. لذا رویکرد مورد استفاده، یک تابع نگاشت<sup>۵۳</sup> است که ورودی‌های سنسور<sup>۵۴</sup> را به فرمان کنترلی مطلوب تبدیل می‌کند یا به بیان دیگر، یک استراتژی کنترلی است که می‌تواند مجموعه‌ای از کنترل‌کننده‌ها<sup>۵۵</sup> را شامل شود.



شکل ۱-۴- دیاگرام سیستم کنترلی یک سامانه رانندگی خودکار [۳]

<sup>۵۰</sup> Approaches to Self-Driving

<sup>۵۱</sup> Control Commands

<sup>۵۲</sup> Desired Output

<sup>۵۳</sup> Mapping Function

<sup>۵۴</sup> Sensory Inputs

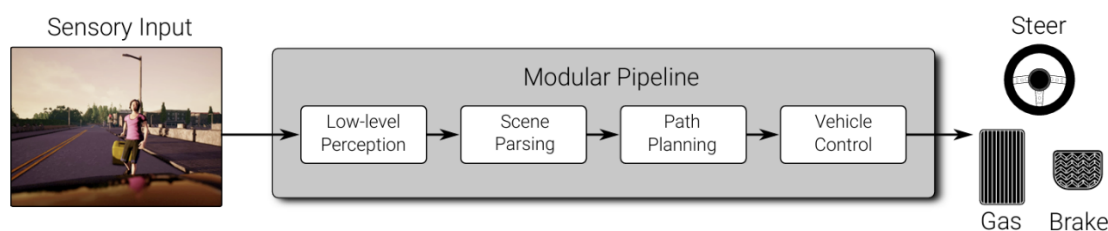
<sup>۵۵</sup> Controllers



رویکردهای موجود در توسعه سامانه‌های خودکار را می‌توان به طور کلی در یکی از ۳ دسته رویکرد ماژولار، یادگیری پایان‌به‌پایان و درک مستقیم<sup>۵۶</sup> قرار داد [۳ و ۵]. هر کدام از این رویکردها، ویژگی‌های خاص همراه با مزایا و معایبی دارند که در ادامه توضیحاتی در این باره ارائه شده است.

### ۱-۳-۱- 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 [۵]. بدین ترتیب هر کدام از ماژول‌ها به صورت مستقل و جداگانه توسعه داده می‌شوند و در نهایت با یکدیگر ادغام می‌گردند. شکل ۱-۵ ساختار کلی این رویکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- رویکرد ماژولار [۳]

هر کدام از ماژول‌های نشان داده شده در شکل ۱-۵ وظیفه مشخصی دارند که خلاصه‌ای از آن‌ها، در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲- وظایف کلی ماژول‌ها در رویکرد ماژولار [۳]

نقش	ماژول
تشخیص اشیا <sup>۵۸</sup> و اجزای محیط	درک سطح پایین <sup>۵۷</sup>

<sup>۵۶</sup> Direct Perception

<sup>۵۷</sup> Low-Level Perception

<sup>۵۸</sup> Object Detection



تجزیه و تفسیر روابط و استخراج قوانین میان شناسایی و تصمیم‌گیری <sup>۵۹</sup>	تجزیه صحنه <sup>۵۹</sup>
طراحی مسیر مناسب حرکت خودرو	برنامه‌ریزی یا طراحی مسیر <sup>۶۱</sup>
طراحی کنترل‌کننده و استخراج فرامین کنترلی به منظور ردیابی و دنبال کردن مسیر	کنترل خودرو <sup>۶۲</sup>

استفاده از این رویکرد مزایایی را به همراه دارد. مازول‌ها 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<sup>۶۳</sup> 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 عمدتاً مبتنی بر مدل<sup>۶۴</sup> طراحی می‌شوند، در شرایط بحرانی، پایداری<sup>۶۵</sup> سیستم دینامیک<sup>۶۶</sup> با توجه به معیارهای پایداری موجود در تئوری کنترل تضمین می‌گردد.

در تقابل با مزایای مورد بررسی، رویکرد مازولار معایبی نیز دارد. عملکرد مستقل و غیریکپارچه مازول‌ها، 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<sup>۶۷</sup> می‌باشد که جمع‌آوری داده‌ها و ساخت این نقشه‌ها دشوار و پرهزینه است.

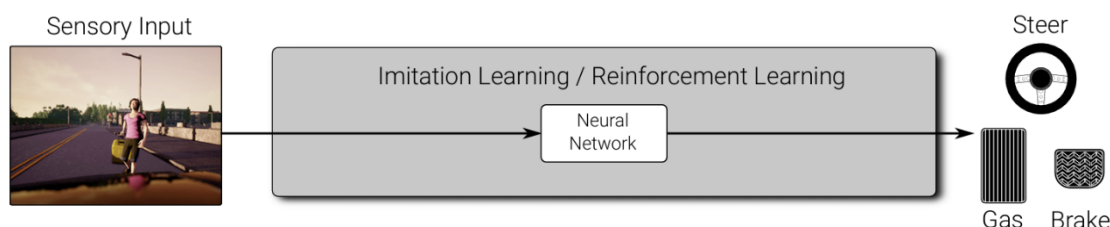
<sup>۵۹</sup> Scene Parsing<sup>۶۰</sup> Decision Making<sup>۶۱</sup> Path) Trajectory (Planning<sup>۶۲</sup> Vehicle Control<sup>۶۳</sup> Interpretability<sup>۶۴</sup> Model-Based<sup>۶۵</sup> Stability<sup>۶۶</sup> Dynamic System<sup>۶۷</sup> High-Dimensional) HD (Maps



## ۱-۳-۲- یادگیری پایان به پایان

یکی دیگر از رویکردهای رانندگی خودکار، روش‌های مبتنی بر یادگیری پایان به پایان هستند که در بخش تاریخچه اشاره‌ای به آن‌ها شد. هدف از یادگیری پایان به پایان، توسعه الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق است که ورودی خام سنسور را به صورت مستقیم به فرامین کنترلی نگاشت می‌کنند [۹].

الگوریتم‌های پایان به پایان به طور کلی در دو دسته یادگیری تقلیدی و یادگیری تقویتی<sup>۶۸</sup> طبقه‌بندی می‌شوند که در فصل‌های بعد با جزئیات بیشتری بررسی می‌گردند [۵ و ۹]. یکی از اولین پروژه‌هایی که از یادگیری تقلیدی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در آن استفاده شد، یک خودروی زمینی خودران در یک شبکه عصبی<sup>۶۹</sup> (واژه انگلیسی مخفف شده آن را می‌توان در فارسی آوین تلفظ کرد) نام دارد. پیاده‌سازی این پروژه در سال ۱۹۸۸ توسط تیم ناولب و روی ون ناولب انجام گرفت [۵ و ۱۰]. ساختار کلی رویکرد پایان به پایان در شکل ۱-۶ آمده است.



شکل ۱-۶- یادگیری پایان به پایان [۳]

شاید بتوان گفت مهم‌ترین مزیتی که یک الگوریتم پایان به پایان 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

<sup>۶۸</sup> Reinforcement Learning

<sup>۶۹</sup> An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network) ALVINN(



پایان به پایان در نظر گرفته می شود. از طرفی بازدهی در محاسبات نیز افزایش می یابد. همچنین بهینه سازی مبتنی بر داده<sup>۷۰</sup>، پتانسیل بهبود سامانه را با مقیاس بندی داده های آموزش<sup>۷۱</sup> دارد و جمع آوری داده نسبت به رویکرد ماژولار با هزینه کمتری قابل انجام است [۹].

یکی از چالش های اساسی که الگوریتم های یادگیری ماشین، نه تنها در حوزه خودروهای خودران، بلکه در زمینه های دیگر نیز با آن مواجه هستند، تعمیم پذیری<sup>۷۲</sup> است. تعمیم پذیری در یادگیری ماشین به توانایی مدل در بروز عملکرد مناسب و دقیق در برابر سناریوها و داده هایی اشاره دارد که با آن ها آموزش ندیده است. این موضوع با مفاهیم نامطلوبی مانند کم برآزش و بیش برآزش در ارتباط است که تمامی این موضوعات در فصل سوم به صورت جداگانه بررسی می گردند. در صورتی که یک سامانه رانندگی خودکار تعمیم پذیری خوبی نداشته باشد، قوام در کارایی ندارد و در برابر عدم قطعیت و نامعینی های مدل نشده در مراحل آموزش و شبیه سازی، به ویژه در سناریوهای حساس و بحرانی، عملکرد مناسبی نخواهد داشت.

از دیگر عیوب این رویکرد می توان به تفسیرپذیری پایین اشاره کرد. الگوریتم های یادگیری ماشین عمدتاً علت مشخصی را برای اجرای یک تصمیم، مبتنی بر قواعد منطق، ریاضی یا فیزیک حاکم بر مسأله ارائه نمی دهند. لذا گاهی با اصطلاحی تحت عنوان جعبه سیاه<sup>۷۳</sup> به کار می روند.

با توجه به پیشرفت هایی که امروزه در حوزه های مرتبط با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین حاصل شده اند، توجه ها در حوزه رانندگی خودکار، بیش از پیش به سمت رویکردهای یادگیری

---

<sup>۷۰</sup> Data-Driven

<sup>۷۱</sup> Training Data

<sup>۷۲</sup> Generalization

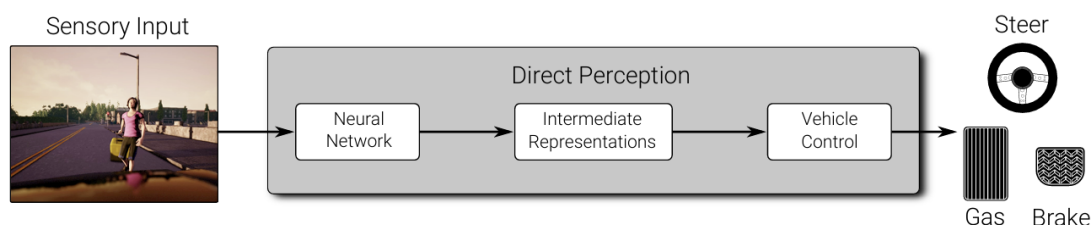
<sup>۷۳</sup> Black Box



پایان به پایان جلب شده‌اند و رشد سریعی در این زمینه اتفاق افتاده است. این حوزه به دلیل در دسترس بودن مجموعه داده‌های<sup>۷۴</sup> در مقیاس بزرگ، ارزیابی حلقه بسته و نیاز روزافزون به الگوریتم‌های رانندگی خودکار برای عملکرد مناسب در سناریوهای چالش برانگیز، رونق گرفته است [۹]. رویکرد انتخابی در حل مسأله مورد بررسی در این پایان‌نامه، یادگیری پایان به پایان مبتنی بر یادگیری تقویتی است.

### ۱-۳-۳- درک مستقیم

بیشتر منابع، رویکردهای رانندگی خودکار را از دید نحوه تصمیم‌گیری، در دو دسته ماژولار و یادگیری پایان به پایان که پیشتر مورد بررسی قرار گرفتند طبقه‌بندی می‌کنند. با این حال رویکرد دیگری نیز وجود دارد که از نظر مفهومی به یادگیری پایان به پایان نزدیک است و در بسیاری از موارد به عنوان زیرمجموعه‌ای از آن در نظر گرفته می‌شود. درک مستقیم، همان‌گونه که در شکل ۷-۱ مشاهده می‌شود، دارای یک مرحله بازنمایی میانی<sup>۷۵</sup> است که وظیفه آن تولید سرنخ‌های سطح میانی تفسیرپذیر است [۹].



شکل ۷-۱- درک مستقیم [۳]

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

<sup>۷۴</sup> Datasets

<sup>۷۵</sup> Intermediate Representation



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 مازولار، هدف اصلی رانندگی خودکار را به صورت بهینه پوشش نمی‌دهد. همچنین طراحی بازنمایی‌های میانی به ویژه در سناریوهای گسترده دشوار است.

#### ۱-۴- 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<sup>۷۶</sup>، کیلومترشمار چرخ<sup>۷۷</sup>، سنسورهای ناوبری و فاصله‌یابی صوتی<sup>۷۸</sup> (سونار) مانند اولتراسونیک<sup>۷۹</sup>، فناوری‌های آشکارسازی و فاصله‌یابی رادیویی<sup>۸۰</sup> (رادار) و آشکارسازی و فاصله‌یابی نوری<sup>۸۱</sup> (لیدار) متکی هستند [۵].

دوربین‌ها به دلیل هزینه کم و عملکرد غیرفعال<sup>۸۲</sup>، 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<sup>۸۳</sup>، دوربین‌های همه‌جهته<sup>۸۴</sup>، میدان دید ۳۶۰

<sup>۷۶</sup> Cameras

<sup>۷۷</sup> Wheel Odometry

<sup>۷۸</sup> Sound Navigation & Ranging) Sonar(

<sup>۷۹</sup> Ultrasonic

<sup>۸۰</sup> Radio Detection and Ranging) Radar(

<sup>۸۱</sup> Light Detection and Ranging) Lidar(

<sup>۸۲</sup> Passive Sensing

<sup>۸۳</sup> Conventional Cameras

<sup>۸۴</sup> Omnidirectional Cameras



درجه‌ای را برای پوشش‌دهی بهتر محیط ارائه می‌دهند و دوربین‌های رویداد<sup>۸۵</sup>، تغییرات روشنایی محیط را با دقت میکروثانیه تشخیص می‌دهند و امکان پاسخگویی سریع را فراهم می‌کنند [۵].

عملکرد دقیق این سنسورها به فرآیندی به نام تنظیم یا کالیبراسیون<sup>۸۶</sup> 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.

---

<sup>۸۵</sup> Event Cameras

<sup>۸۶</sup> Calibration



## فصل دوم

مدل سازی و طرح مسأله



## ۲- مدل‌سازی و طرح مسأله

مدل‌سازی سیستم، یک گام ضروری پیش از انجام هرگونه شبیه‌سازی یا حل تحلیلی یک مسأله در علم دینامیک<sup>۸۷</sup> 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<sup>۸۸</sup>، معادلات دیفرانسیلی<sup>۸۹</sup> هستند که از دید مکانیک برداری<sup>۹۰</sup> با استفاده از قانون دوم حرکت نیوتن<sup>۹۱</sup> و قانون حرکت اویلر<sup>۹۲</sup> و از دید مکانیک تحلیلی<sup>۹۳</sup>، عمدتاً با استفاده از روش‌های مبتنی بر اصول همیلتون<sup>۹۴</sup> یا دالامبر<sup>۹۵</sup> به دست می‌آیند.

پس از استخراج معادلات حاکم، لازم است برای بررسی پاسخ<sup>۹۶</sup> 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

<sup>۸۷</sup> Dynamics<sup>۸۸</sup> Equations of Motion<sup>۸۹</sup> Differential Equations<sup>۹۰</sup> Vector Mechanics<sup>۹۱</sup> Newton's Second Law of Motion<sup>۹۲</sup> Euler's Law of Motion<sup>۹۳</sup> Analytical Mechanics<sup>۹۴</sup> Hamilton's Principle<sup>۹۵</sup> D'Alembert's Principle<sup>۹۶</sup> Response



حاصل شده 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.

## ۲-۱- سینماتیک خودروی مفصلی

سینماتیک<sup>۹۷</sup> شاخه‌ای از علم دینامیک است که به بررسی حرکت اجسام بدون در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آن‌ها می‌پردازد. در مقابل، سینتیک<sup>۹۸</sup> شاخه دیگری از علم دینامیک است که به بررسی حرکت با در نظر گرفتن علل آن یا همان نیروهای وارد بر جسم سروکار دارد.

برای بررسی دینامیک عرضی<sup>۹۹</sup>، عملکرد فرمان‌پذیری<sup>۱۰۰</sup> و مانورپذیری<sup>۱۰۱</sup> خودرو، لازم است با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر خودرو، معادلات حرکت استخراج گردند. با این حال برای ساده‌سازی، می‌توان فرضیاتی را در نظر گرفت. سرعت حرکت یک خودروی مفصلی در مانور پارک پایین می‌باشد. لذا می‌توان از لغزش عرضی زیر تایرها صرف نظر کرد و تایرها صلب فرض می‌شوند [۴ و ۱۱]. بنابراین زاویه لغزش<sup>۱۰۲</sup> 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<sup>۱۰۳</sup> فرض نمود [۱۲].

<sup>۹۷</sup> Kinematics

<sup>۹۸</sup> Kinetics

<sup>۹۹</sup> Lateral Dynamics

<sup>۱۰۰</sup> Handling Performance

<sup>۱۰۱</sup> Maneuvering

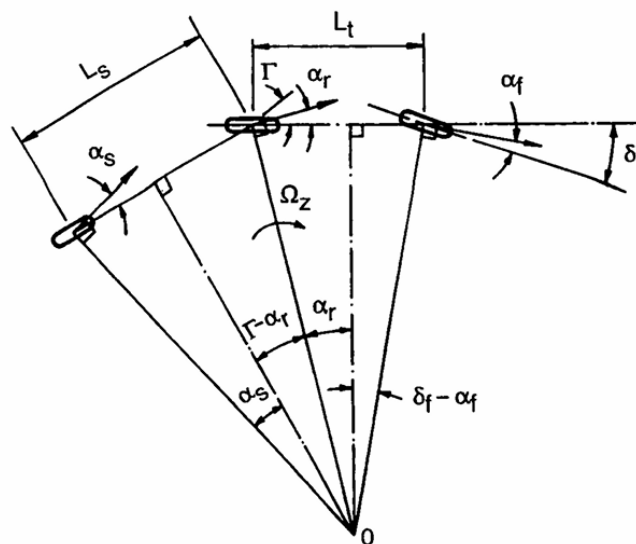
<sup>۱۰۲</sup> Slip Angle

<sup>۱۰۳</sup> Steady State



در حالت پایا و با فرض عدم لغزش، اینرسی<sup>۱۰۴</sup> خودرو در نظر گرفته نمی‌شود و معادلات حاکم بر سیستم از هندسه گردش<sup>۱۰۵</sup> بدست می‌آید [۱۲].

شکل ۱-۲ مدل ساده‌شده‌ای از یک خودروی مفصلی را نشان می‌دهد که شامل یک کشنده یا تراکتور<sup>۱۰۶</sup> و یک پیرو منفعل<sup>۱۰۷</sup> یا تریلر<sup>۱۰۸</sup> است. تراکتور و تریلر توسط یک مفصل چرخان<sup>۱۰۹</sup> یا کوپلینگ مکانیکی<sup>۱۱۰</sup> که چرخ پنجم<sup>۱۱۱</sup> 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 دقیقاً بالای محور عقب تراکتور قرار گرفته است [۱۲].



شکل ۱-۲- مدل صفحه‌ای ساده خودروی مفصلی در حالت پایا [۱۲]

<sup>۱۰۴</sup> Inertia

<sup>۱۰۵</sup> Steering Geometry

<sup>۱۰۶</sup> Tractor

<sup>۱۰۷</sup> Passive

<sup>۱۰۸</sup> Semi-Trailer

<sup>۱۰۹</sup> Pivoting Joint

<sup>۱۱۰</sup> Mechanical Coupling

<sup>۱۱۱</sup> Fifth Wheel



این مدل صفحه‌ای، به نوعی تعمیم یافته مدل دوچرخه<sup>۱۱۲</sup> در خودروی سواری محسوب می‌شود و معادلات هندسی حاکم بر آن مشابه مدل دوچرخه می‌باشد [۱۲]. با این تفاوت که با توجه به مفصلی بودن 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 ۴ چرخ و تریلر ۲ چرخ را شامل می‌شوند. لذا مجموعاً خودروی مفصلی مورد نظر در واقعیت ۶ چرخ دارد که با فرضیات اختیار شده، به صورت سه‌چرخه مدل می‌شود.

درجات آزادی<sup>۱۱۳</sup> یک سیستم متغیرهای مستقلی هستند که حرکت را بیان می‌کنند. هر جسم در صفحه، دارای دو حرکت انتقالی<sup>۱۱۴</sup> و یک حرکت دورانی<sup>۱۱۵</sup> است. لذا هر کدام از دو عضو تراکتور و تریلر در شکل ۱-۲، دارای ۳ 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 ساده شده دو درجه آزادی دارد و با دانستن دو ورودی زاویه فرمان<sup>۱۱۶</sup> و سرعت طولی خودرو، معین می‌گردد.

---

<sup>۱۱۲</sup> Bicycle Model

<sup>۱۱۳</sup> Degrees of Freedom) DoF(

<sup>۱۱۴</sup> Translational

<sup>۱۱۵</sup> Rotational

<sup>۱۱۶</sup> Steering Angle



در ادامه، روابط هندسی حاکم را می‌توان با توجه به زوایای موجود در شکل ۱-۲ و با روش مرکز آنی دوران<sup>۱۱۷</sup> بدست آورد. معادلات ۱-۲ و ۲-۲ به ترتیب هندسه مربوط به زاویه فرمان و زاویه مفصلی<sup>۱۱۸</sup> را بیان می‌کنند [۴ و ۱۲].

$$\tan(\delta_f) - \alpha_f + \alpha_r = \frac{L_t}{R} \quad (1-2)$$

$$\tan(\Gamma) - \alpha_r + \alpha_s = \frac{L_s}{R} \quad (2-2)$$

در معادلات فوق،  $\delta_f$  زاویه فرمان،  $\Gamma$  زاویه مفصلی (زاویه میان تریلر و تراکتور) و مقادیر  $\alpha_f$  و  $\alpha_r$  به ترتیب زوایای لغزش چرخ‌های جلو و عقب تراکتور و و  $\alpha_s$  زاویه لغزش محور عقب تریلر هستند. همچنین  $L_t$  و  $L_s$  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 در نظر گرفته می‌شوند. همچنین شعاع گردش را می‌توان برحسب سرعت خودرو ( $V$ ) و سرعت گردشی<sup>۱۱۹</sup> ( $\Omega_z$ ) حول مرکز آنی دوران خودرو نوشت. لذا معادلات ۱-۲ و ۲-۲ به فرم ۳-۲ و ۴-۲ ساده می‌شوند.

$$\tan(\delta_f) = \frac{L_t}{R} = \frac{L_t}{\frac{V}{\Omega_z}} \Rightarrow \tan(\delta_f) = L_t \frac{\Omega_z}{V} \quad (3-2)$$

$$\tan(\Gamma) = \frac{L_s}{R} = \frac{L_s}{\frac{V}{\Omega_z}} \Rightarrow \tan(\Gamma) = L_s \frac{\Omega_z}{V} \quad (4-2)$$

<sup>۱۱۷</sup> Instantaneous Center of Rotation Method

<sup>۱۱۸</sup> Articulation Angle

<sup>۱۱۹</sup> Yaw Rate



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 [۱۳]. با این حال، مدل‌سازی صورت گرفته نقطه شروع مناسبی می‌تواند باشد و در صورت نیاز می‌توان سیستم کنترلی را با عدم قطعیت مدل کرد و کارایی مقاوم آن را بررسی نمود [۱۳]. هرچند همان‌گونه که در ابتدای فصل اشاره شد می‌توان از مدل‌های کامل‌تری که توسط نرم‌افزارهای مهندسی پشتیبانی می‌شوند استفاده نمود.

## ۲-۲- سینماتیک معکوس خوددوری مفصلی

در مدل‌سازی سینماتیک خودرو، با اعمال ورودی‌های زاویه فرمان و سرعت خودرو، سیستم معین می‌شود و با حل معادلات ۲-۳ و ۲-۴ 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<sup>۱۲۰</sup> می‌نامند [۱۴].

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 با توجه به خروجی‌های مطلوب و اهداف مسأله، تعیین گردند. در این حالت مسأله سینماتیک معکوس<sup>۱۲۱</sup> بایستی حل شود [۱۴].

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 [۱۵].

<sup>۱۲۰</sup> Direct Kinematics

<sup>۱۲۱</sup> Inverse Kinematics



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<sup>۱۳۲</sup> 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 این باره ارائه خواهد شد.

---

<sup>۱۳۲</sup> Soft Computing



# فصل سوم

## روش شناسی



## ۳- روش‌شناسی

در توسعه سامانه پارک خودکار مبتنی بر یادگیری پایان‌به‌پایان، جزئیاتی مانند انتخاب الگوریتم‌های مناسب و اعتمادپذیر بسیار حائز اهمیت است. برای انتخاب الگوریتم‌ها معیارهایی مانند نوع، ابعاد و میزان پیچیدگی مسأله، وجود پارامترها و الگوهای غیرخطی، انعطاف و مقیاس‌پذیری و دسترسی به داده‌های کافی مورد ملاحظه قرار می‌گیرند.

## ۳-۱- مروری بر تعاریف اولیه یادگیری ماشین

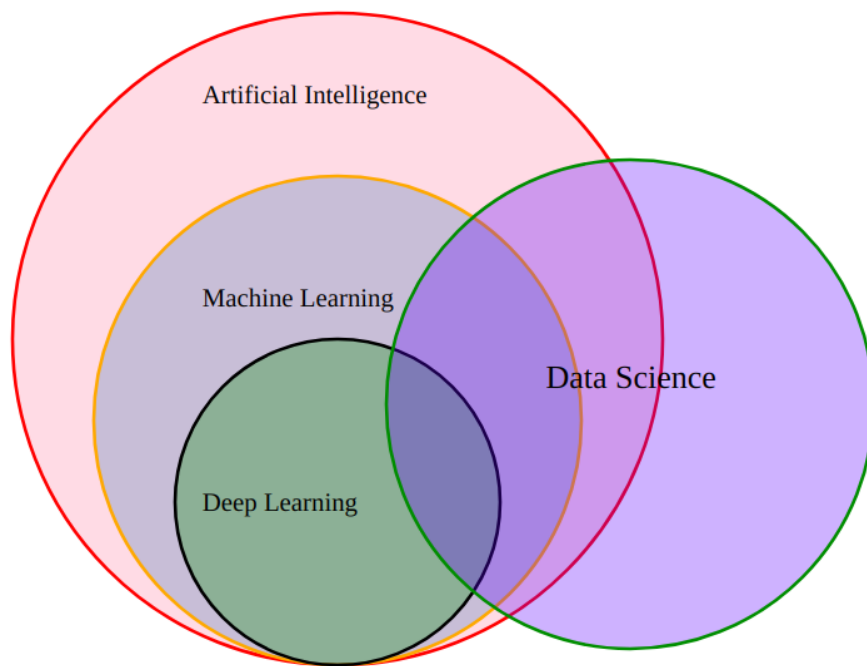
یادگیری ماشین شاخه‌ای از علوم کامپیوتر<sup>۱۳۳</sup> و هوش مصنوعی است که بر توسعه الگوریتم‌ها و مدل‌های آماری تمرکز دارد و کامپیوترها (مدل‌ها) را قادر می‌سازد وظایفی را بدون دستورالعمل‌های صریح انجام دهند. درواقع این مدل‌ها، الگوها را از اطلاعات ارزشمند موجود در داده‌ها استخراج می‌کنند و با یادگیری آن‌ها، براساس اطلاعات ارائه‌شده تصمیم می‌گیرند. این فرآیند، حل مسائل عملی با جمع‌آوری یک مجموعه داده و سپس ساخت الگوریتمی یک مدل آماری از آن را شامل می‌شود. با توجه به آنکه یادگیری ماشین مبتنی بر داده است، با حوزه‌های دیگری مانند علم داده<sup>۱۳۴</sup> در ارتباط است [۱۶، ۱۷ و ۱۸]. شکل ۳-۱ محدوده حوزه‌های مرتبط و روابط آن‌ها را مشخص می‌کند.

کاربردهای یادگیری ماشین فراوان است. برای حل مسائلی که راه‌حل‌های موجود نیاز به تنظیم دستی گسترده یا تهیه فهرست‌های طولانی از قوانین دارند، ایده‌آل است؛ زیرا یک الگوریتم یادگیری ماشین اغلب می‌تواند فرآیند کدنویسی را ساده‌تر کرده و عملکرد بهتری را ارائه دهد. همچنین برای مسائل پیچیده‌ای که فاقد راه‌حل به روش‌های کلاسیک هستند یا حل آن‌ها با اسفاده از این روش‌ها

<sup>۱۳۳</sup> Computer Science<sup>۱۳۴</sup> Data Science



دشوار است، به طور منحصر به فردی مناسب است. علاوه بر این موارد، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی ذاتی خود در سازگاری با داده‌های جدید، در صورت بهینه‌سازی مناسب، می‌توانند در برابر نامعینی‌ها مؤثر واقع شوند. در نهایت، یادگیری ماشین برای استخراج الگوهای معنادار از مسائل پیچیده و حجم زیادی از داده‌ها که در نگاه اول غیرقابل نفوذ هستند، کاربردی است [۱۹].



شکل ۳-۱- برخی از حوزه‌های مرتبط با هوش مصنوعی

توسعه مدل‌های یادگیری ماشین عمدتاً دارای چند مرحله کلیدی است. جمع‌آوری داده<sup>۱۲۵</sup>، پیش‌پردازش داده<sup>۱۲۶</sup>، انتخاب الگوریتم با توجه به اهداف و کاربردها، آموزش<sup>۱۲۷</sup>، ارزیابی<sup>۱۲۸</sup> و استقرار<sup>۱۲۹</sup> مراحل مهمی هستند که در بیشتر مسائل یادگیری ماشین ایفای نقش می‌کنند [۱۶].

<sup>۱۲۵</sup> Data Collection

<sup>۱۲۶</sup> Data Preprocessing

<sup>۱۲۷</sup> Training

<sup>۱۲۸</sup> Evaluation

<sup>۱۲۹</sup> Deployment



## ۳-۲- دسته‌بندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین

برای دسته‌بندی الگوریتم‌های یادگیری ماشین معیارهای مختلفی وجود دارد. یکی از معیارهای مهم، سطح نظارت انسانی<sup>۱۳۰</sup> است. مسائل و الگوریتم‌های یادگیری ماشین با توجه به این معیار، در ۴ نوع یادگیری بانظارت<sup>۱۳۱</sup> (نظارتی)، یادگیری بدون نظارت<sup>۱۳۲</sup>، یادگیری نیمه‌نظارتی<sup>۱۳۳</sup> و یادگیری تقویتی<sup>۱۳۴</sup> طبقه‌بندی می‌شوند [۱۸ و ۱۹].

## ۳-۲-۱- یادگیری نظارتی

یادگیری نظارتی رویکردی است که در آن، یک الگوریتم از مجموعه‌ای از نمونه‌ها که هر کدام با یک پاسخ خاص متناظر هستند، یاد می‌گیرد و پاسخ به عنوان برچسب<sup>۱۳۵</sup> شناخته می‌شود. لذا در این حالت خروجی‌ها مشخص هستند و برچسب‌گذاری صورت گرفته است. هر نمونه از مجموعه داده یا جدول آموزش، با مجموعه‌ای از ویژگی‌هایی<sup>۱۳۶</sup> توصیف می‌شود که سازگار و توصیفی مانند قد یا وزن هستند. هدف نهایی این است که الگوریتم این نمونه‌های برچسب‌گذاری‌شده را تجزیه و تحلیل کند و مدلی بسازد که بتواند برچسب صحیح را برای نمونه‌های جدید و دیده نشده، تنها بر اساس ویژگی‌های آن‌ها استنباط کند [۱۸ و ۱۹].

<sup>۱۳۰</sup> Human Supervision<sup>۱۳۱</sup> Supervised Learning<sup>۱۳۲</sup> Unsupervised Learning<sup>۱۳۳</sup> Semi-Supervised Learning<sup>۱۳۴</sup> Reinforcement Learning<sup>۱۳۵</sup> Label<sup>۱۳۶</sup> Features



الگوریتم‌های نظارتی ۲ نوع هستند. آن‌ها می‌توانند به عنوان الگوریتم رگرسیون<sup>۱۳۷</sup> یا طبقه‌بندی<sup>۱۳۸</sup> بکار روند. البته بسیاری از آن‌ها قابلیت استفاده به هر دو صورت را دارند.

رگرسیون زمانی استفاده می‌شود که هدف، پیش‌بینی یک مقدار عددی برای متغیر وابسته<sup>۱۳۹</sup> با توجه به متغیرهای مستقل<sup>۱۴۰</sup> (ویژگی‌ها) باشد. پیش‌بینی قیمت یک خودرو، با توجه به مجموعه‌ای از ویژگی‌ها نمونه‌ای از یک مسأله است که با این روش قابل حل است [۱۹]. در این مثال، قیمت خودرو متغیر وابسته و ویژگی‌های موثر بر آن متغیرهای مستقل می‌باشند.

طبقه‌بندی یک روش نظارتی دیگر است که در آن، متغیر وابسته بیانگر گروه یا کلاس مشخصی است و هدف آن است که پیش‌بینی شود یک نمونه جدید، براساس ویژگی‌هایش متعلق به کدام کلاس است [۱۹]. در صورتی که تعداد ۲ کلاس وجود داشته باشد، مسأله باینری<sup>۱۴۱</sup> و در صورتی که بیش از ۲ کلاس وجود داشته باشد مسأله چندکلاسه<sup>۱۴۲</sup> است. تشخیص یک بیماری نمونه‌ای از یک مسأله طبقه‌بندی می‌باشد که در آن، نوع بیماری متغیر وابسته است.

الگوریتم‌های مختلفی برای تحلیل‌های رگرسیون و طبقه‌بندی توسعه یافته‌اند. تعدادی از این الگوریتم‌ها در جدول ۳-۱ آمده‌اند. هرکدام از این الگوریتم‌ها با توجه به معیارهایی مانند اندازه مجموعه داده، الگوهای غیرخطی، تعداد متغیرهای مستقل و نوع و ابعاد داده‌های ورودی، انتخاب می‌شوند.

---

<sup>۱۳۷</sup> Regression

<sup>۱۳۸</sup> Classification

<sup>۱۳۹</sup> Dependent Variable

<sup>۱۴۰</sup> Independent Variables

<sup>۱۴۱</sup> Binary Classification

<sup>۱۴۲</sup> Multiclass Classification



جدول ۳-۱- تعدادی از الگوریتم‌های یادگیری نظارتی

الگوریتم	نوع و کاربرد
رگرسیون خطی <sup>۱۴۳</sup>	رگرسیون
رگرسیون لاجستیک <sup>۱۴۴</sup>	طبقه‌بندی (به صورت پیشفرض باینری)
k نزدیک‌ترین همسایه <sup>۱۴۵</sup>	رگرسیون و طبقه‌بندی
ماشین بردار پشتیبان <sup>۱۴۶</sup>	رگرسیون و طبقه‌بندی
درخت تصمیم و جنگل تصادفی <sup>۱۴۷</sup>	رگرسیون و طبقه‌بندی
یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند پرسپترون چندلایه <sup>۱۴۸</sup> ، شبکه‌های عصبی کانولوشنی <sup>۱۴۹</sup> و شبکه‌های عصبی بازگشتی <sup>۱۵۰</sup>	رگرسیون و طبقه‌بندی (در مواردی می‌توانند در یادگیری بدون نظارت نیز بکار روند)

## ۳-۲-۲- یادگیری بدون نظارت

در یادگیری بدون نظارت، برخلاف نظارتی، داده‌ها بدون برچسب<sup>۱۵۱</sup> هستند و پاسخ قبلی مشخصی به عنوان متغیر وابسته وجود ندارد. الگوریتم‌های خوشه‌بندی<sup>۱۵۲</sup> مانند k میانگین<sup>۱۵۳</sup>، از روش‌های مرسوم بدون نظارت می‌باشند. نمونه‌ای از یک مسأله خوشه‌بندی، جداسازی کاربران یک سایت با توجه به رفتار، شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌هاست [۱۹].

<sup>۱۴۳</sup> Linear Regression<sup>۱۴۴</sup> Logistic Regression<sup>۱۴۵</sup> K-Nearest Neighbor) KNN(<sup>۱۴۶</sup> Support Vector Machine) SVM(<sup>۱۴۷</sup> Decision Tree and Random Forest<sup>۱۴۸</sup> Multi-Layer Perceptron) MLP(<sup>۱۴۹</sup> Convolutional Neural Networks) CNNs(<sup>۱۵۰</sup> Recurrent Neural Networks) RNNs(<sup>۱۵۱</sup> Unlabeled<sup>۱۵۲</sup> Clustering<sup>۱۵۳</sup> k-Means



علی‌رغم آن‌که الگوریتم‌های یادگیری نظارتی در سامانه‌های رانندگی خودکار کاربرد بیشتری دارند، یادگیری بدون نظارت نیز در برخی موارد در حوزه خودروهای خودران بکار می‌رود. یکی از کاربردهای یادگیری بدون نظارت در این زمینه، بازسازی محیط<sup>۱۵۴</sup> در مرحله تجزیه صحنه در رویکرد ماژولار است [۳].

### ۳-۲-۳- یادگیری نیمه‌نظارتی

در یادگیری نیمه‌نظارتی، مجموعه داده شامل ترکیبی از نمونه‌های برچسب‌گذاری‌شده و بدون برچسب است. معمولاً تعداد نمونه‌های بدون برچسب بسیار بیشتر از تعداد نمونه‌های برچسب‌گذاری‌شده است. هدف یک الگوریتم یادگیری نیمه‌نظارتی، همان هدف الگوریتم یادگیری نظارتی است. انتظار می‌رود استفاده از نمونه‌های بدون برچسب زیاد بتواند به الگوریتم یادگیری کمک کند تا مدل بهتری را آموزش دهد [۱۸].

### ۳-۲-۴- یادگیری تقویتی

یادگیری تقویتی با روش‌های قبلی تفاوت بسیار دارد. در این رویکرد مطابق با شکل ۲-۳، سیستم یادگیرنده که عامل<sup>۱۵۵</sup> نامیده می‌شود، می‌تواند محیط<sup>۱۵۶</sup> را مشاهده کند، ضمن دریافت حالت<sup>۱۵۷</sup> (وضعیت)، اقداماتی<sup>۱۵۸</sup> را انتخاب نماید، انجام دهد و در عوض پاداش<sup>۱۵۹</sup> یا جریمه‌هایی<sup>۱۶۰</sup> را به شکل پاداش‌های منفی، دریافت کند. سپس باید خودش یاد بگیرد (کشف کند) که بهترین استراتژی که

<sup>۱۵۴</sup> World Reconstruction

<sup>۱۵۵</sup> Agent

<sup>۱۵۶</sup> Environment

<sup>۱۵۷</sup> State

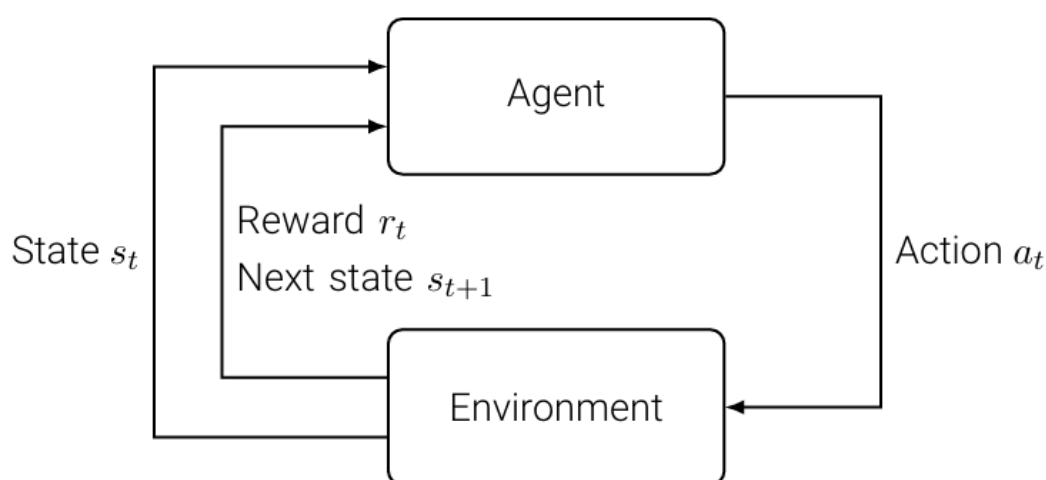
<sup>۱۵۸</sup> Action

<sup>۱۵۹</sup> Reward

<sup>۱۶۰</sup> Penalty



سیاست<sup>۱۶۱</sup> نام دارد، برای دریافت بیشترین پاداش در طول زمان (پاداش تجمعی<sup>۱۶۲</sup>) چیست. یک سیاست مشخص می‌کند که عامل در یک موقعیت معین چه اقدامی را برای عملکرد مطلوب باید انتخاب کند [۳ و ۱۹].



شکل ۳-۲- دیاگرام بلوکی یادگیری تقویتی [۳]

یادگیری تقویتی می‌تواند به صورت یک الگوریتم کنترلی پایان‌به‌پایان در سیستم‌های کنترلی بکار رود و از مجموعه داده بی‌نیاز است و عامل با سعی و خطا یاد می‌گیرد. همچنین در یادگیری تقویتی، عامل در تعامل با محیط، مبتنی بر قوانینی آموزش می‌بیند که در واقعیت حائز اهمیت هستند. این رویکرد با توجه به کاربردهایی که در سامانه‌های رانندگی خودکار و پارک خودکار دارد، در ادامه با جزئیات بیشتری بررسی می‌گردد.

### ۳-۳- یادگیری تقویتی پایان‌به‌پایان

به زودی...

<sup>۱۶۱</sup> Policy

<sup>۱۶۲</sup> Long-Term Reward



# فصل چہارم

## بحث و تفسیر



#### ۴- بحث و تفسیر

به زودی...



## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این گزارش به عنوان مقدمه‌ای برای یک پروژه تحقیقاتی گسترده، به بررسی مبانی تئوری و پیش‌زمینه لازم برای توسعه یک سامانه پارک خودکار خودروهای مفصلی مبتنی بر یادگیری تقویتی پرداخت. در این راستا، ابتدا اهمیت و انگیزه موضوع با استناد به چالش‌های منحصربه‌فرد پارک خودروهای سنگین تشریح شد. سپس تاریخچه‌ای از تحولات خودروهای خودران و سامانه‌های کمک‌راننده ارائه و رویکردهای مختلف طراحی این سامانه‌ها (ماژولار، یادگیری پایان‌به‌پایان و درک مستقیم) به همراه مزایا و معایب هر یک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

در ادامه، با تمرکز بر مسأله اصلی، مدل سینماتیکی ساده‌شده‌ای برای خودروی مفصلی استخراج و مفهوم کلیدی سینماتیک معکوس به عنوان هسته نظری مسأله پارک خودکار تبیین شد. در نهایت، مبانی روش‌شناسی و دسته‌بندی‌های مختلف یادگیری ماشین به عنوان چارچوب حل مسأله مرور شد و یادگیری تقویتی به عنوان رویکرد منتخب برای این پژوهش معرفی گردید.

لازم به تأکید است که بخش اصلی این پژوهش، یعنی پیاده‌سازی، شبیه‌سازی و آموزش عامل یادگیری تقویتی، هنوز انجام نشده است و انتظار می‌رود در ادامه پژوهش کامل گردد. آنچه در این گزارش ارائه شد، صرفاً مروری بر ادبیات موضوع، مبانی تئوری و طرح اولیه مسأله می‌باشد.



## 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](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.



[۱۱] رضایی ندامانی، حمیدرضا، "پارک خودکار خودروهای مفصلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۲.

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

[۱۳] تقی‌راد، حمیدرضا، فتحی، محمد، زمانی اسگویی، فرینا. "کنترل مقاوم  $H_\infty$ "، ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۴۰۳.

[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.

[۱۶] محمدی، امیرحسین، توسعه سیستم توصیه‌گر هوشمند برای پیکربندی دستگاه‌های یوپی‌اس، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۴۰۳.

[17] Deisenroth, M. P., Faisal, A. A., and Ong, C. S. "Mathematics for Machine Learning", Cambridge University Press, 2020.

[18] Burkov, Andriy., "The Hundred-Page Machine Learning Book", Andriy Burkov, 2019.

[19] Géron, Aurélien., "Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow", Second Edition, O'Reilly, 2020.