ای تو آغاز، تو انجام، تو بالا، تو فرود

ای سراینده‌ی هستی، سرهر سطر و سرود

بازگردان، به سخن، دیگر بار

شادی و زیبایی را

داد و دانایی را

تو سخن را

بده آن شوکت دیرین

آمین...

محمدرضا شفیعی کدکنی

تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد - مهندسی مکاترونیک

طراحی سیستم کنترل هوشمند برای فرآیند سبقت‌گیری خودرو با در نظر گرفتن اثرات ریزساختار رفتار راننده و خودرو

اساتید راهنما

پروفسور علی غفاری **دکتر سید حسین ساداتی**

پژوهش و تدوین

فاطمه علیمردانی

شهریور ۱۳۹۰

تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد - مهندسی مکاترونیک

طراحی سیستم کنترل هوشمند برای فرآیند سبقت‌گیری خودرو با در نظر گرفتن اثرات ریزساختار رفتار راننده و خودرو

اساتید راهنما

پروفسور علی غفاری **دکتر سید حسین ساداتی**

استاد مشاور

مهندس علیرضا خدایاری

پژوهش و تدوین

فاطمه علیمردانی

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر که چون کوهی، همیشه چشم به قله‌اش داشتم

و به مادر که همیشه بی‌بهانه نامش آرام جانم بود

...

معلا مقامت ز عرش برتر باد

همیشه توسن اندیشه‌ات مظفر باد

به نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند

صحیفه‌های سخن از تو علم‌پرور باد

باسپاس از:

اساتید راهنمای محترم؛ جناب آقای پروفسور علی غفاری و جناب آقای دکتر سید حسین ساداتی، و استاد مشاور گرامی؛ جناب آقای مهندس علیرضا خدایاری، به خاطر راهنمائی‌های بی‌دریغ و یاری‌های بی چشمداشت‌اشان که سختی‌های این راه را برایم هموار نمودند. هم‌چنین، از سرکار خانم مهندس شکوفه پورمهر به خاطر کمک های موثرشان در ویرایش متن این گزارش تشکر ویژه دارم.

چکیده

رانندگی از جمله کارهایی است که روزمره، به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم، مقدار زیادی از انرژی ما را مصرف می‌کند. در چند دهه اخیر فعالیت‌های زیادی در زمینه‌ی کنترل هوشمند خودروها و فرآیندهای گوناگون رانندگی صورت گرفته است. از جمله این فرآیندها می‌توان فرآیندهای تعقیب خودرو[1]، تغییر خط[2] و سبقت-گیری[3] را نام برد. در مورد کنترل هوشمند فرآیندهای تعقیب خودرو و تغییر خط فعالیت‌های متعددی انجام شده است. اما در مورد فرآیند سبقت‌گیری، به علت پیچیدگی‌اش، پژوهش‌های کمی صورت گرفته است. از آن جائی که رفتار سبقت‌گیری یکی از فرآیندهای اصلی و پرمخاطره‌ی رانندگی است که در عین حال مطالعات کمی در مورد آن انجام شده است، در این پژوهش این رفتار را مورد توجه قرار دادیم.

هدف اصلی از انجام این پژوهش طراحی یک سیستم کنترلی هوشمند برای فرآیند سبقت‌گیری با در نظر گرفتن رفتار ریزساختار[4] رانندگان است. در این پژوهش، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کنترل رفتار سبقت‌گیری مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌سازی این رفتار بر مبنای داده‌های واقعی خواهد بود و بر خلاف مدل‌های موجود، از مقدار لحظه‌ای تمامی پارامترها استفاده می‌شود. سپس با استفاده از این داده‌های واقعی، به جای طراحی مدلی بر مبنای معادلات ریاضی، مدلی بر مبنای ورودی-خروجی طراحی می‌کنیم که با توجه به غیرخطی بودن رفتار سبقت‌گیری رویکرد مناسب‌تری برای مدل کردن این رفتار می‌باشد. در ابتدا، برای مدل-سازی این رفتار، با استخراج پارامترهای مورد نیاز از مجموعه‌ی داده‌های واقعی، ابتدا یک مدل شبکه عصبی برای مسیرحرکت رفتار سبقت‌گیری طراحی می‌شود. سپس، در ادامه، دو مدل پیش‌بین بر اساس سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی چند ورودی-چند خروجی (MANFIS) طراحی می‌گردد. بعد از طراحی مدل‌ها، با مقایسه‌ی خروجی آن‌ها با رفتار واقعی، استفاده از معیارهای خطای مختلف و مقایسه با خروجی مدل‌های دیگران، عملکرد مدل‌ها سنجیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های ارائه شده از لحاظ مختلف نسبت به مدل‌های موجود برتری دارند. بعد از مدل‌سازی دینامیک سیستم، یک کنترل‌کننده فازی برای هدایت مسیرحرکت خودروی سبقت‌گیرنده در بزرگراه‌های شهری با جریان ترافیک یک طرفه ارائه می‌شود. اعتبارسنجی و صحه‌گذاری کنترل‌کننده ارائه شده به صورت کامل با مقایسه با رفتار واقعی راننده انسانی و استفاده از معیارهای خطای مختلف صورت می‌پذیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که کنترل‌کننده ارائه شده قادر است به خوبی مسیرحرکتی مشابه مسیرحرکت مطلوب ارائه دهد. هم‌چنین، کنترل‌کننده طراحی شده قادر است با اصلاح اشتباهات رفتار یک راننده انسانی، نکات لازم را ایمنی سرنشینان و خودروها رعایت کند.

[1] car follow
[2] lane change
[3] overtaking
[4] microscopic

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ خودروهای هوشمند ۲

۱-۲-۱ انواع عملکردهای خودروهای هوشمند ۳

۱-۳ رفتار سبقت‌گیری ۴

۱-۳-۱ تحلیل رفتار سبقت‌گیری ۴

۱-۳-۲ دسته‌بندی‌های رفتار سبقت‌گیری بر اساس پارامترهای مختلف ۷

۱-۴ پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی رفتار سبقت‌گیری ۸

۱-۵ پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی مدل‌سازی رفتار سبقت‌گیری ۱۲

۱-۶ پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی کنترل‌کننده‌های فازی رفتار سبقت‌گیری ۲۰

۱-۷ نتیجه‌گیری و اهداف این پژوهش ۲۵

فصل ۲ طراحی مدل‌های رفتار سبقت‌گیری ۲۷

۲-۱ مقدمه ۲۸

۲-۲ مجموعه‌ی داده‌ها و استخراج داده‌های رفتار سبقت‌گیری ۲۹

۲-۲-۱ استخراج ماتریس جفت خودرو برای هر رفتار سبقت‌گیری ۳۳

۲-۲-۲ زاویه‌ی حرکت خودرو ۳۶

۲-۳ مدل شبکه عصبی از رفتار سبقت‌گیری ۳۶

۲-۳-۱ نحوه‌ی طراحی مدل شبکه عصبی ۳۷

۲-۴ طراحی مدل‌های پیش‌بین رفتار سبقت‌گیری ۳۹

۲-۵ سیستم‌های استنتاج تطبیقی عصبی-فازی ۳۹

۲-۵-۱ سیستم چند ورودی-تک خروجی (ANFIS) ۳۹

۲-۵-۲ سیستم چند ورودی-چند خروجی (MANFIS) ۴۰
۲-۶ مدل MANFIS پیش‌بین شتاب و زاویه‌ی حرکت ۴۱
۲-۶-۱ طراحی مدل MANFIS پیش‌بین شتاب و زاویه‌ی حرکت ۴۱
۲-۷ مدل MANFIS پیش‌بین مسیرحرکت خودروی سبقت‌گیرنده ۴۴
۲-۷-۱ نحوه‌ی طراحی مدل MANFIS پیش‌بین مسیرحرکت ۴۵
۲-۸ بررسی عملکرد مدل‌های طراحی شده ۴۸
۲-۸-۱ بررسی عملکرد مدل شبکه عصبی مسیرحرکت رفتار سبقت‌گیری ۴۸
۲-۸-۲ بررسی عملکرد مدل MANFIS پیش‌بین شتاب و زاویه‌ی حرکت ۵۱
۲-۸-۳ بررسی عملکرد مدل MANFIS پیش‌بین مسیرحرکت خودروی سبقت‌گیرنده ۵۶
۲-۸-۴ مقایسه‌ی عملکرد پیش‌بین مسیرحرکت با مدل ارائه شده توسط Shamir ۵۹
۲-۹ نتیجه‌گیری ۶۲

فصل ۳ طراحی سیستم کنترلی هدایت مسیر رفتار سبقت‌گیری ۶۴
۳-۱ مقدمه ۶۵
۳-۲ سیستم استنتاج فازی ۶۶
۳-۳ طراحی کنترل‌کننده فازی هدایت مسیر رفتار سبقت‌گیری ۶۸
۳-۴ بررسی عملکرد کنترل‌کننده فازی طراحی شده ۷۱
۳-۵ نتیجه‌گیری ۷۶

فصل ۴ نتایج و تحقیقات آتی ۷۷
۴-۱ مقدمه ۷۸
۴-۲ بررسی نتایج ۷۸
۴-۳ تحقیقات آتی ۷۹

پیوست‌ها ۸۱
پیوست (الف): مدل مسیرحرکت بهینه ۸۲
پیوست (ب): سیستم‌های ANFIS ۸۶
پیوست (ج): شبکه‌های عصبی ۹۲
لیست مقالات ارائه شده
مراجع

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) فازها و وظایف مختلف برای انجام فرآیند سبقت‌گیری [۵]. ۵
شکل (۱-۲) انواع استراتژی‌های سبقت‌گیری [۵]. ۸
شکل (۱-۳) محدوده‌ی سبقت‌گیری [۱۵]. ۱۰
شکل (۱-۴) نمایش موقعیت خودروها در یک سبقت‌گیری ایمن [۱۶]. ۱۱
شکل (۱-۵) مولفه‌های یک رفتار سبقت‌گیری ساده [۲۲]. ۱۳
شکل (۱-۶) (الف) نمایش دو تغییرخط در فرآیند سبقت‌گیری، (ب) موقعیت و جهت خودرو در مسیر. ۱۴
شکل (۱-۷) سبقت‌گیری از یک خودروی در حال حرکت [۶]. ۱۵
شکل (۱-۸) مفهوم برخی داده‌های رفتار سبقت‌گیری [۲۴]. ۱۶
شکل (۱-۹) موقعیت دو خودرو قبل وبعد از سبقت‌گیری [۲۵]. ۱۷
شکل (۱-۱۰) ساختار سلسله مراتبی کنترل فرمان در فرآیند سبقت‌گیری [۲۶]. ۲۱
شکل (۱-۱۱) بخشی از رفتار سبقت‌گیری [۲۹]. ۲۳
شکل (۱-۱۲) فرآیند سبقت‌گیری شامل سه خودرو در مسیر دو طرفه [۳۰] ۲۴

شکل (۲-۱) بخشی از بزرگراه US-101 در Emeryville (سانفرانسیسکو) در کالیفرنیا [۳۲]. ۳۰
شکل (۲-۲) بخشی از بزرگراه I-80 در Emeryville (سانفرانسیسکو) در کالیفرنیا [۳۳]. ۳۰
شکل (۲-۳) نمای رفتار سبقت‌گیری و دو تغییر خط این رفتار. ۳۳
شکل (۲-۴) زاویه‌ی حرکت خودرو (زاویه تتا). ۳۶
شکل (۲-۵) مقایسه‌ی داده‌ی شتاب قبل و بعد از اعمال فیلتر. ۳۸
شکل (۲-۶) مقایسه‌ی داده‌ی زاویه‌ی حرکت قبل و بعد از اعمال فیلتر. ۳۸
شکل (۲-۷) ساختار شبکه عصبی طراحی شده. ۳۹
شکل (۲-۸) ساختار سیستم MANFIS برای حالت دو خروجی [۴۵]. ۴۱
شکل (۲-۹) ساختار مدل MANFIS تخمین‌گر شتاب و زاویه‌ی حرکت. ۴۲
شکل (۲-۱۰) نحوه‌ی تشکیل ماتریس کلی جفت‌خودروها. ۴۴
شکل (۲-۱۱) ساختار مدل MANFIS پیش‌بین مسیرحرکت. ۴۵
شکل (۲-۱۲) مقایسه‌ی داده‌ی مختصات عرضی قبل و بعد از اعمال فیلتر. ۴۷
شکل (۲-۱۳) شکل مدل شبکه عصبی در فضای simulink. ۴۸
شکل (۲-۱۴) نمودار مسیرحرکت مدل شبکه عصبی برای دو خودروی تست. ۴۹
شکل(۲-۱۵) ساختار مدل MANFIS پیش‌بین شتاب و زاویه‌ی حرکت. ۵۱

شکل (۲-۱۶) خروجی شتاب (الف) خودروی تست اول، (ب) خودروی تست دوم. ۵۲
شکل (۲-۱۷) خروجی زاویه‌ی حرکت (الف) خودروی تست اول، (ب) خودروی تست دوم. ۵۳
شکل (۲-۱۸) نتایج مدل پیش‌بین مسیرحرکت برای موتورسیکلت تست اول. ۵۷
شکل (۲-۱۹) نتایج مدل پیش‌بین مسیرحرکت برای خودروی تست اول. ۵۸
شکل (۲-۲۰) مسیرحرکت خودروی تست اول (الف) خروجی مدل MANFIS، (ب) خروجی مدل بهینه. ۶۰
شکل (۲-۲۱) مسیرحرکت خودروی تست دوم (الف) خروجی مدل MANFIS، (ب) خروجی مدل بهینه. ۶۰
شکل (۲-۲۲) مقایسه‌ی نتیجه‌ی دو مدل MANFIS و بهینه با مسیرحرکت واقعی خودروی تست اول. .. ۶۱
شکل (۲-۲۳) مقایسه‌ی نتیجه‌ی دو مدل MANFIS و بهینه با مسیرحرکت واقعی خودروی تست دوم... ۶۲

شکل (۳-۱) سیستم استنتاج فازی [۵۳]. ۶۶
شکل (۳-۲) استنتاج فازی نوع ۳ [۵۳] ۶۸
شکل (۳-۳) ساختار یک سیستم کنترلی حلقه بسته. ۶۹
شکل (۳-۴) نوع و تعداد توابع عضویت متغیرهای ورودی کنترل‌کننده. ۷۰
شکل (۳-۵) سطوح کنترل پارامترهای سوگینوی هر خروجی. ۷۱
شکل (۳-۶) سیستم کنترل‌کننده فازی در فضای simulink در نرم‌افزار MATLAB. ۷۲
شکل (۳-۷) مقایسه شتاب: (الف) خودروی تست اول، (ب) خودروی تست دوم. ۷۳
شکل (۳-۸) مقایسه‌ی زاویه‌ی حرکت: (الف) خودروی تست اول، (ب) خودروی تست دوم..... ۷۴
شکل (۳-۹) مقایسه‌ی مسیرحرکت: (الف) خودروی تست اول، (ب) خودروی تست دوم. ۷۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱) هجده ویژگی هر واحد راننده–خودرو در مجموعه‌ی داده‌های I-80 و US-101. ..... ۳۲
جدول (۲-۲) نمونه‌هایی از ماتریس داده‌های یک خودروی سبقت‌گیرنده. ۳۴
جدول (۲-۳) ماتریس جفت خودرو و ابعاد آن. ۳۵
جدول (۲-۴) ورودی–خروجی‌های ماتریس‌های استخراج شده برای طراحی مدل شبکه عصبی. ۳۷
جدول (۲-۵) ورودی–خروجی‌های ماتریس استخراج شده برای طراحی مدل پیش‌بین شتاب و زاویه‌ی حرکت. ۴۳
جدول (۲-۶) ورودی–خروجی‌های ماتریس استخراج شده برای طراحی مدل پیش‌بین مسیرحرکت. ۴۶
جدول (۲-۷) مقادیر خطا برای مسیرحرکت چهار خودروی تست سبقت‌گیرنده ۵۰
جدول (۲-۸) نتایج معیارها برای خروجی شتاب ۵۶

جدول (۲-۹) نتایج معیارها برای خروجی زاویه‌ی حرکت ۵۶
جدول (۲-۱۰) مقادیر خطا برای مسیرحرکت چهار موتور سیکلت تست سبقت‌گیرنده ۵۸
جدول (۲-۱۱) مقادیر خطا برای مسیرحرکت چهار خودروی تست سبقت‌گیرنده ۵۹
جدول (۲-۱۲) مقایسه‌ی پارامترهای دو مدل MANFIS و مدل بهینه با داده‌های مسیرحرکت واقعی. ... ۶۰
جدول (۳-۱) مقادیر خطا برای ۵ خودروی تست..... ۷۶

فصل ۱

❖ مقدمه

۱-۱ مقدمه

سبقت‌گیری یکی از رفتارهای پرمخاطره در بزرگراه‌هاست. درصد زیادی از تصادفات جاده‌ای به طور مستقیم یا غیر مستقیم به رفتار سبقت‌گیری مرتبط هستند. توسعه‌ی خودروهای هوشمند می‌تواند به بهبود عملکرد خودروها منجر شود. یک خودروی هوشمند می‌تواند زمانی که خودروی جلوئی‌اش با سرعت آهسته حرکت می‌کند تصمیم به سبقت بگیرد. از دید میکروسکوپیک، سبقت می‌تواند سرعت خودروی سریع‌تر را حفظ کند. از دید ماکروسکوپیک، سبقت می‌تواند نرخ جریان ترافیک را با کاهش اثر منفی خودروی آهسته بهبود بخشد.

یک خودروی هوشمند برای شروع و تکمیل فرآیند سبقت‌گیری نیازمند تصمیم‌گیری‌های متعدد و تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای می‌باشد. در زمینه‌ی رانندگی و خودرو در دهه‌های گذشته پروژه‌های تحقیقاتی مختلفی انجام شده است. اکثر این پروژه‌ها روی عملکردهای درون یک دسته[5] مانند رفتارهای حرکت-توقف، حرکت در دسته، جدا شدن از دسته، تعقیب خودرو [۱]، تغییرخط [۲]، و اجتناب از برخورد به مانع متمرکز بوده‌اند. هم‌چنین، تکنولوژی‌های کنترل خودرو، مانند ACC، تعقیب خط خودوند، و تغییرخط خودوند به طور گسترده‌ای مورد توجه بوده‌اند. اما به الگوریتم کنترل برای سبقت‌گیری و مباحث ایمنی مرتبط با آن بسیار کم پرداخته شده است [۳] . پژوهش‌هایی که تاکنون در مورد رفتار سبقت‌گیری انجام شده‌اند، اکثراً به بررسی رفتار سبقت‌گیری به طور کلی نمی‌پردازند. زیرا رفتار سبقت‌گیری رفتار پیچیده‌ای است که پرداختن به تمامی ابعاد آن در یک پژوهش به تنهائی ممکن نیست.

در این فصل، با نگاهی مختصر به خودروهای هوشمند و انواع عملکردهای آن‌ها، به سراغ تعریف رفتار سبقت‌گیری رفته و به جزئیات و تحلیل این رفتار پرداخته می‌پردازیم. سپس، مدل‌سازی‌هایی انجام شده از این رفتار شرح داده می‌شوند. در ادامه، کنترل‌کننده‌های فازی ارائه شده برای هدایت و انجام خودوند رفتار سبقت‌گیری بررسی می‌شوند.

۱-۲ خودروهای هوشمند

خودروهای هوشمند[6](IV) جزئی از سیستم‌های حمل و نقل هوشمند[7](ITS) می‌باشند. روی این خودروها سیستم‌هایی نصب می‌شود که آن‌ها را قادر می‌سازد به کمک سنسورهای مختلف و الگوریتم‌های هوشمند، محیط اطرافشان را به درستی شناسائی کنند. این شناسایی به منظور همیاری راننده و یا کنترل کردن خودرو انجام می‌شود. امروزه موضوع خودروهای هوشمند در سرتاسر دنیا مورد استقبال قرار گرفته است. این استقبال

[5] platoon
[6] intelligent vehicles
[7] intelligent transport system

دو علت عمده دارد. اول اینکه سیستم‌هایی که به منظور هوشمندسازی وسائل نقلیه استفاده می‌شوند قابلیت نصب روی هر نوع وسیله نقلیه -اعم از سواری، کامیون، و یا خودروهای بخش نظامی و صنعت- را دارند. دیگر این که، این سیستم‌ها کاربردهای بسیار متنوعی دارند. نقش اصلی خودروهای هوشمند افزایش ایمنی سرنشینان و خودروها و بهبود تراکم جریان ترافیک می‌باشد.

۱-۲-۱ انواع عملکردهای خودروهای هوشمند

سیستم‌هائی که روی خودروهای هوشمند نصب می‌شوند این خودروها را قادر می‌سازند به ۳ طریق مختلف به راننده کمک کنند:

نوع ۱: دسته‌ی اول سیستم‌هائی هستند که فقط برای هشدار به راننده برای جلوگیری از برخورد، طراحی و روی این خودروها نصب شده‌اند. به این دسته سیستم‌های "هشدار به برخورد[۸](CW)" گفته می‌شود.

نوع ۲: دسته‌ی دوم سیستم‌هائی هستند که تا حدی خودرو را کنترل می‌کنند، یا برای کمک به راننده وارد عمل می‌شوند و یا در شرایط اضطراری کنترل خودرو را به عهده می‌گیرند، که به آن‌ها سیستم‌های "اجتناب از برخورد [۹](CA)" گفته می‌شود.

نوع ۳: دسته‌ی سوم سیستم‌هائی هستند که کنترل خودرو را به طور کامل به عهده می‌گیرند. این کنترل ممکن است به دلخواه راننده به عهده‌ی سیستم گذاشته شود و یا در شرایط اضطراری، سیستم خود به طور خودوند تشخیص دهد که رفتار راننده مناسب نیست و آن‌گاه کنترل را به عهده بگیرد. به خودروهایی که دارای چنین سیستم‌هایی هستند "خودروهای خودوند" و یا به عبارت بهتر"خودروهای هوشمند" گفته می‌شود.

استفاده از سیستم‌های هوشمند در خودروهای سواری تاثیر بسزائی در کاهش تعداد تصادفات جاده‌ای و افزایش ایمنی سرنشینان و خودروها دارد. با این‌حال، برای کاهش هر گونه خطا و افزایش قابلیت اعتماد این سیستم‌ها، رشد و پیشرفت آن‌ها آرام، اما یکنواخت و پیوسته است. از بین پژوهش‌هایی که روی خودوندسازی خودرو متمرکز شده‌اند، خودروهای کاملاً خودوند طراحی شده توسط دانشگاه کره، آزمایشگاه مهندسی مکانیک دانشگاه ژاپن، دانشگاه Pavia (ایتالیا)، دانشگاه ایالت اوهایو، و دانشگاه کالیفرنیا در مرحله‌ی تست و بررسی هستند [۴].

[8] collision warning
[9] collision avoidance

۱-۳ رفتار سبقت‌گیری

از آن‌جایی که رفتار سبقت‌گیری رفتاری است که قصد داریم در این پژوهش به طور مفصل به آن بپردازیم، ابتدا به تشریح و آنالیز این رفتار می‌پردازیم. برای بررسی و طراحی سیستمی برای انجام فرآیند سبقت‌گیری، لازم است که ابتدا آنالیز کاملی نسبت به این رفتار صورت گیرد.

۱-۳-۱ تحلیل رفتار سبقت‌گیری

رفتار سبقت‌گیری را به طور کلی می‌توان به مراحل کلی و قسمت‌های جزئی متعددی تقسیم‌بندی کرد. سیستم‌های همیار راننده‌ی پیشرفته[10] (ADAS) به کمک سیستم همیار سبقت‌گیری[11] قادرند تقریباً تمامی این مراحل و قسمت‌ها را انجام دهند. می‌توان سبقت‌گیری را یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای رانندگی دانست. یک فرآیند سبقت‌گیری به پنج فاز تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: تصمیم‌گیری برای انجام سبقت‌گیری، آماده شدن، تغییرخط از خط راست به خط چپ، حرکت در مسیر مستقیم و رد شدن از خودروی آهسته، و در آخر تغییرخط مجدد از خط چپ به خط راست و ادامه دادن به مسیر مستقیم [۵] .

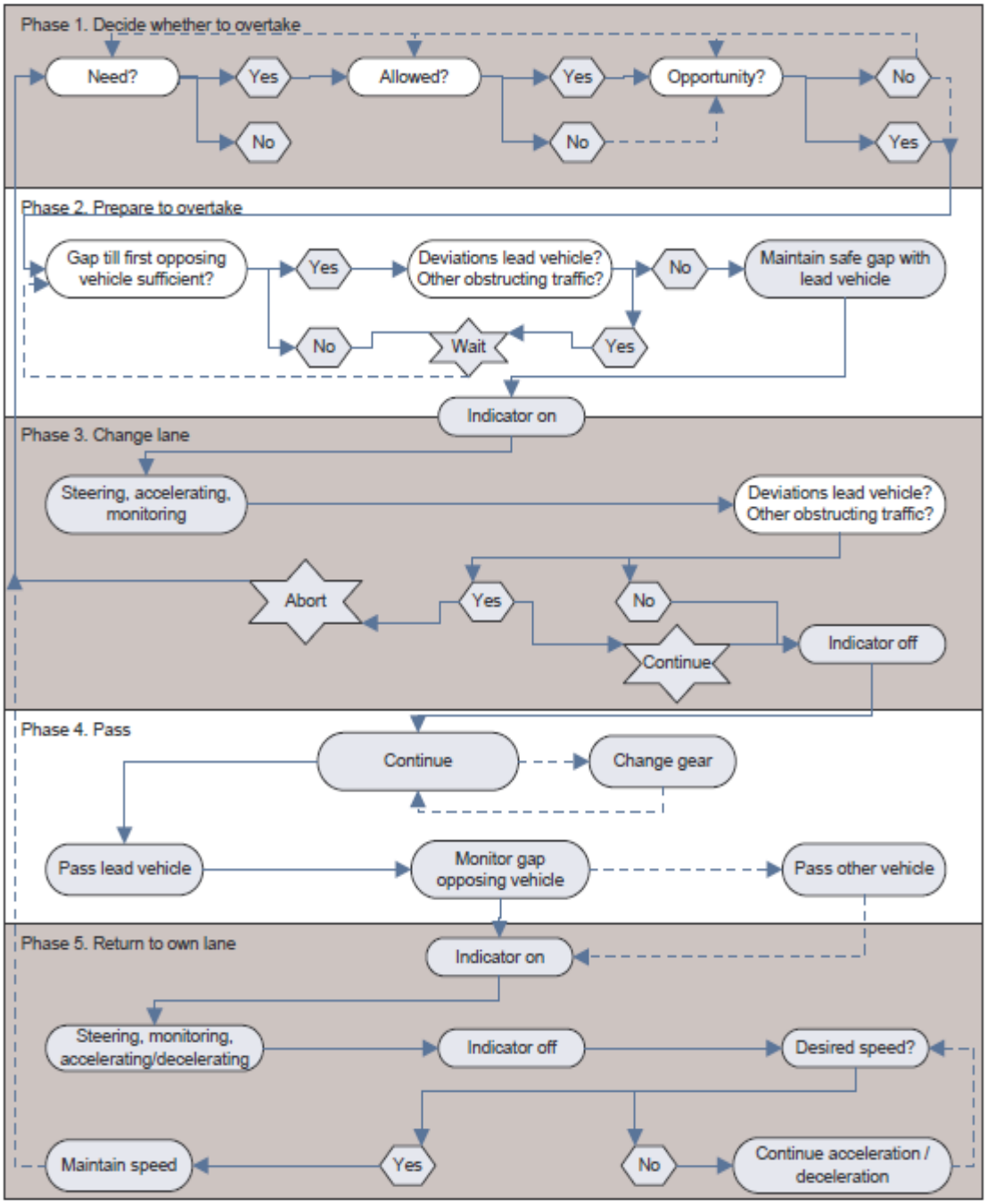
طبق این تقسیم‌بندی رفتار سبقت‌گیری دارای ۵ مرحله می‌باشد، اما اکثر پژوهش‌های انجام شده روی این رفتار، آن را به سه فاز کلی تقسیم می‌کنند: تغییر خط به چپ، سبقت‌گیری از خودروی آهسته و بازگشت به خط اولیه که خود تغییر خط به راست می‌باشد [۳و۶] . اما در این قسمت می‌خواهیم به کامل‌ترین شکل ممکن، رفتار سبقت‌گیری را بررسی کنیم. بنابراین، با انتخاب تعریف اول به عنوان کامل‌ترین تعریف، به تحلیل این رفتار می‌پردازیم.

هر کدام از این پنج مرحله خود به زیرشاخه‌های متعددی تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل (۱-۱) مروری بر این وظایف و فعالیت‌ها شده است. در این شکل، نقطه‌چین‌ها مسیرهای پیشنهادی هستند که ممکن است انتخاب نشوند. حال به بررسی فازهای این رفتار می‌پردازیم [۵] .

فاز ۱: راننده تصمیم می‌گیرد سبقت را انجام دهد یا نه. اولین وظیفه، تصمیم‌گیری در مورد انجام یا عدم انجام سبقت است. اولین سوال این است که آیا راننده ضرورتی برای انجام سبقت می‌بیند یا نه. ضرورت انجام سبقت را سرعت مطلوب مورد نظر، سرعت خودروی جلوئی و فاکتورهای متفاوت رفتار راننده -مانند عجله داشتن وی- تعیین می‌کند. در ضمن یک راننده که نیاز به سبقت‌گیری دارد باید قبل از سبقت‌گیری تابلوهای راهنمائی رانندگی مربوط به سبقت را که درکنار جاده نصب هستند بررسی کند. پس دو وظیفه تا اینجا بررسی شده است، بررسی وجود نیاز و وجود ممنوعیت برای سبقت‌گیری.

---

[10] advanced driver assistance systems
[11] overtaking assistant



شکل (۱-۱) فازها و وظایف مختلف برای انجام فرآیند سبقت‌گیری [۵].

فاز ۲: آماده شدن برای سبقت‌گیری. در مسیر دو طرفه، جریان ترافیک مسیر روبه‌رو اثر مستقیمی روی فرصت مناسب برای سبقت‌گیری دارد. در نتیجه، فاصله تا اولین خودروی نزدیک شونده از روبه‌رو باید بررسی

شود. این کار تصیم‌گیری بسیار پیچیده‌ای است، دلیل اول این است که این تصمیم‌گیری در دیگر فرآیندها انجام نمی‌شود. در نتیجه راننده با تمرین نمی‌تواند در این کار مهارت کسب کند. دلیل دوم این‌که رانندگان نمی‌توانند تخمین دقیقی از فاصله و سرعت داشته باشند. تخمینی که راننده می‌زند به سرعت خودروی خودش نیز بستگی دارد. اگر خودروئی در حال تعقیب خودروی جلوئی‌اش با فاصله‌ی ۳۰ متر باشد، حداقل گذشت مسافت ۳,۷ متر لازم است تا راننده از افزایش یا کاهش سرعت خودروی جلوئی‌اش آگاه شود، که از این تغییر سرعت با نام "تغییر سرعت نسبی" یاد می‌شود. مدت زمان فاز ۲ را از لحظه‌ای که آخرین خودروی نزدیک-شونده در مسیرچپ از کنار خودروی هدف عبور می‌کند تا لحظه‌ای که چرخ چپ جلوی خودروی هدف از خط-چین وسط دو خط عبور می‌کند، در نظر می‌گیرند. به این زمان، زمان "درک - عکس‌العمل" می‌گویند که برای اکثر موارد کمتر از ۱ ثانیه است.

فاز ۳: تغییرخط. فاز ۳ با کنترل فرمان و افزایش سرعت و عبور از خط‌چین وسط دو خط شروع می‌شود و تا لحظه‌ی رسیدن به وسط خط چپ ادامه دارد. در پایان تغییرخط چراغ راهنما باید خاموش شود. مدت زمان فاز ۳ از لحظه‌ای که چرخ چپ جلوی خودرو از خط‌چین وسط دو خط عبور می‌کند شروع می‌شود تا لحظه‌ای که چرخ راست عقب خودرو از این خط می‌گذرد. این زمان معمولاً $1.5s \pm 0.5s$ می‌باشد.

فاز ۴: عبور کردن. در فاز ۴، خودرو در خط چپ است و از خودروی آهسته‌ی خط راست عبور خواهد کرد. راننده حین عبور از خودروی آهسته باید به فضای خالی جلوی خودرواش تا خودروی نزدیک شونده از روبه‌رو نیز دقت کند. اگر برای اتمام عبور از خودروی آهسته فرصت کافی وجود نداشته باشد، راننده باید از سبقت‌گیری صرف‌نظر نموده و به خط راست، پشت‌سر خودروی آهسته برگردد و سبقت‌گیری را در فرصت مناسب‌تر مجدد از فاز ۱ شروع کند. مدت زمان میانگین طی مسیر در خط چپ، که مدت زمان فاز ۴ است، برابر $4.2s \pm 2.3s$ می-باشد.

فاز ۵: بازگشت به خط راست. پنجمین و آخرین فاز سبقت‌گیری بازگشت به خط راست است. در این مرحله نیز چراغ راهنما باید روشن شود و چرخش به راست را نشان دهد. چرخش فرمان برای هدایت خودرو به مرکز خط راست از لحظه‌ای شروع می‌شود که هر دو چراغ جلوی خودروی آهسته‌ی خط راست در آیینه‌ی نصب شده به شیشه‌ی جلو برای مشاهده‌ی پشت‌سر، قابل رویت باشد. اما اگر فاصله با خودروی نزدیک‌شونده از روبه‌رو در خط چپ بحرانی شد، یعنی در زمانی کمتر از ۴ ثانیه احتمال برخورد پیش بیاید، راننده می‌تواند زودتر تصمیم به چرخاندن فرمان به راست بگیرد. مدت زمان پنجمین فاز از لحظه‌ای که چرخ راست جلوی خودرو از خط‌چین بین دو خط عبور کند شروع می‌شود و تا لحظه‌ایی که چرخ چپ عقب خودرو از این خط عبور کند ادامه دارد. مدت زمان میانگین پنجمین فاز بین $2.7s \pm 0.7s$ می‌باشد. بررسی‌های انجام شده برای آنالیز رفتار

سبقت‌گیری نشان می‌دهد که مدت زمان میانگینی برابر $7.8s \pm 2.5s$ برای کل فرآیند سبقت‌گیری لازم است [۵].

۱-۳-۲ دسته‌بندی‌های رفتار سبقت‌گیری بر اساس پارامترهای مختلف

فرآیند سبقت‌گیری بر اساس پارامترهای زیر دسته‌بندی می‌شود:

الف) نوع خودروی آهسته: خودروی سواری یا خودروهای سنگین[12] (HGVها).

ب) نوع خودروی سبقت‌گیرنده: بسته به توانایی موتور و نوع استفاده از خودرو (حمل مسافر یا بار).

ج) سبقت‌گیری منفرد یا چندگانه: بسته به اینکه خودروی سبقت‌گیرنده از یک یا چند خودروی آهسته سبقت می‌گیرد.

چ) استراتژی‌های سبقت‌گیری: یک خودروی سبقت‌گیرنده به ۴ روش ممکن است رفتار سبقت‌گیری را انجام دهد. به از این روش‌ها، استراتژی‌های سبقت‌گیری گفته می‌شود که در این‌جا به توضیح آن‌ها می‌پردازیم.

۱- نرمال (شتاب‌گیرنده)[13]: خودروی سبقت‌گیرنده به خودروی جلوئی نزدیک می‌شود. خودروی سبقت-گیرنده باید صبر کند تا فرصتی مناسب برای سبقت پیش بیاید، بنابراین تا آن لحظه باید سرعتش را با سرعت خودروی جلوئی تنظیم کند. بعد از گذشت زمان لازم می‌تواند سبقت بگیرد. خودروی سبقت‌گیرنده در حین فرآیند سبقت‌گیری شتاب می‌گیرد.

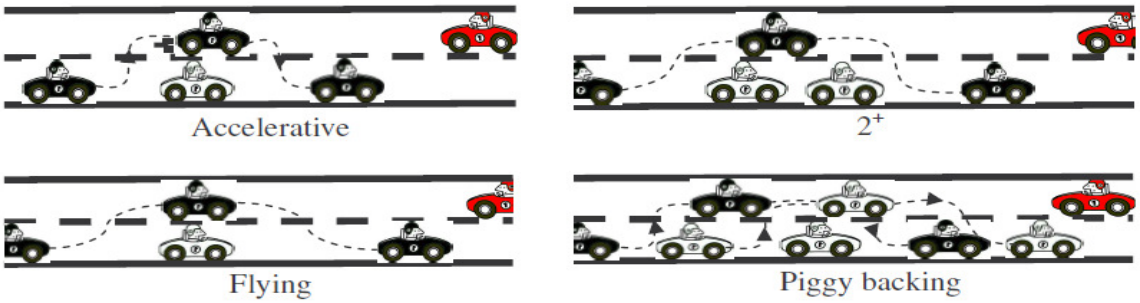
۲- سریع‌السیر[14]: سبقت‌گیرنده با سرعت دلخواهش حرکت می‌کند. خودروی آهسته را مشاهده می‌کند و بلافاصله می‌تواند بدون تنظیم سرعت از خودروی آهسته سبقت بگیرد.

۳- Piggy backing: یک خودروی دیگر از خودروی آهسته سبقت می‌گیرد و خودروی سبقت‌گیرنده این خودرو را تعقیب می‌کند. بنابراین خودروی سبقت‌گیرنده پشت‌سر خودروی جلوئی باقی می‌ماند، در حالیکه هر دو از خودروی آهسته سبقت می‌گیرند.

۴- 2^+: خودروی سبقت‌گیرنده طی یک فرآیند سبقت‌گیری از خودروی آهسته‌ی جلوئی و خودروهای پشت سر این خودرو سبقت می‌گیرد. یعنی از بیش از یک خودرو سبقت می‌گیرد. این استراتژی‌ها در شکل (۱-۲) نشان داده شده‌اند.

---

[12] heavy goods vehicles
[13] normal (accelerative)
[14] flying



شکل (۱-۲) انواع استراتژی‌های سبقت‌گیری [۵].

ح) وجود یا عدم وجود محدودیت دید برای راننده: بسته به اینکه خودرویی از مقابل نزدیک شود یا شرایط جاده طوری باشد که راننده بتواند به وضوح مسیرش را در خط چپ ببیند.

خ) محل خودروی سبقت‌گیرنده در یک دسته: سبقت ممکن است در شرایطی رخ دهد که خودروی سبقت-گیرنده در درون دسته، دومین خودرو باشد؛ در این شرایط خودروی سبقت گیرنده درست پشت سر خودروی آهسته قرار دارد [۵] .

۱-۴ پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی رفتار سبقت‌گیری

در این قسمت، نگاه کوتاهی به برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی رفتار سبقت‌گیری خواهیم داشت.

– Matson و Forbes در سال ۱۹۳۸ اولین کسانی بودند که در زمینه‌ی رفتار سبقت‌گیری شروع به مطالعه و تحقیق کردند. آنها در تحقیقات‌شان از یک خودروی مشاهده‌گر متحرک و یک زمان‌سنج برای اندازه‌گیری زمان فرآیند سبقت‌گیری، و یک سرعت‌سنج برای اندازه‌گیری سرعت خودروی آهسته‌ی تحت آزمایش استفاده کردند. سپس از روش‌های مختلف عکاسی، برای اندازه‌گیری فاصله‌ی بین خودروی آهسته و خودروی سبقت-گیرنده، قبل و بعد از رفتار سبقت‌گیری بهره گرفتند. مشاهده شد که رانندگان با سرعت، زمان و مسافت‌های متفاوتی فرآیند عبور از خودروی آهسته را انجام می‌دهند. اما قانون کلی مشاهده شده این بود که با افزایش سرعت خودروی مشاهده‌گر، مسافت لازم بیشتری برای عبور از کنار آن لازم بود. برای مثال در سرعت ۳۰ مایل در ساعت، مسافت ۶۵۰ فوت برای سبقت‌گیری لازم بود ولی با سرعت ۵۰ مایل در ساعت، مسافت ۱۰۵۰ فوت باید طی می‌شد. با افزایش سرعت خودروی مشاهده‌گر، مطابق انتظار زمان لازم برای عبور نیز افزایش داشت. برای دو وضعیت مطرح شده در بالابه ترتیب ۸,۵ ثانیه و ۹,۵ ثانیه زمان سپری شد تا سبقت‌گیری کامل شود. از بین ۷۰۹ رفتار سبقت‌گیری که بررسی شد کمترین زمان سپری شده برای تکمیل فرآیند سبقت‌گیری ۶ ثانیه و بیشترین زمان ۲۰ ثانیه بود. بنابراین در این پژوهش در سرعت‌های متفاوت خودروی مشاهده‌گر متحرک، زمان و مسافت لازم برای تکمیل فرآیند سبقت‌گیری اندازه‌گیری شد [۷].