

# طراحی سیستم کنترلی هوشمند برای رفتار تعقیب خودرو با توجه به رفتار لحظه‌ای راننده خودرو

با توجه به افزایش درخواست سفر در سیستم حمل و نقل و افزایش تردد وسایل نقلیه، امروزه برای افزایش ایمنی، کاهش تصادف و هزینه‌های مالی، وسایل نقلیه رو به هوشمند شدن پیش می‌روند. در این راستا اکثر خودروهای امروزی مجهز به سیستم‌های مختلف کنترل ایمنی و هدایت خودرو تولید می‌شوند. یکی از اشکالات عمده این سیستم‌های کنترلی آن است که این سیستم‌ها بصورت روشن-خاموش عمل می‌کنند. در این صورت هدایت خودرو یا در اختیار راننده است و یا در اختیار سیستم کنترلی است. در این مقاله به ارائه سیستم کنترلی هوشمندی برای رفتار تعقیب خودرو پرداخته می‌شود که علاوه بر تامین آزادی عمل راننده و به عبارت دیگر تامین لذت رانندگی، تامین کننده امنیت خودرو و اجتناب از شرایط غیر ایمن و پرهیز از ناپایداری کلی خودرو باشد. این سیستم کنترلی مبتنی بر سیستم پیش‌بین فازی طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی سیستم کنترلی به همراه راننده انسانی نشان می‌دهد که سیستم کنترلی طراحی شده توانسته است تا فاصله نسبی ایمن بین دو خودرو را حفظ کند و با تنظیم و ایجاد شرایط ایمن، لذت سرنشینان خودرو تعقیب‌گر در حضور آزادی عمل نسبی راننده در حرکت خودرو را نیز حفظ کند.

علیرضا خدایاری<sup>۱</sup>

استادیار

علی غفاری<sup>۲</sup>

استاد

رضا کاظمی<sup>۳</sup>

دانشیار

علی نحوی<sup>۴</sup>

استادیار

سعید صالحی‌نیا<sup>۵</sup>

کارشناس ارشد

افشین جمشیدی<sup>۶</sup>

کارشناس

واژه‌های راهنما: تعقیب خودرو، رفتار راننده، سیستم پیش‌بین فازی، سیستم کنترلی هوشمند

## ۱- مقدمه

علی‌رغم برنامه‌ریزی فراوان در زمینه طرح‌های مدیریت مسیر، زیر ساخت‌های کافی، و قوانین ترافیک برای رانندگی ایمن، هنوز هم جوامع پیشرفته به دلیل افزایش تقاضای سفر با مسأله تراکم ترافیک، و به تبع آن اتلاف زمان، سوخت و منابع مالی، روبرو هستند. ساختن راه‌های جدید می‌تواند یک راه حل باشد؛ اما این راه

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس arkhodayari@dena.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ghaffari@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی kazemi@kntu.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۵</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی saeed.salehnia@gmail.com

<sup>۶</sup> کارشناس مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی jamshidi.afshin@gmail.com

حل با توجه به روابط و دلایل سیاسی و زیست محیطی کمتر قابلیت عملی شدن را دارد. به همین دلیل، در حال حاضر به یک جایگزین کارآمد، به عنوان یک زیرساخت اساسی، نیاز است. از این رو، فن‌آوری‌های پیشرفته در زمینه سیستم‌های اطلاعات و ارتباطات، یک دست‌یافت عالی در اجرای نسل آینده شیوه مدیریت و کنترل ترافیک پیشنهاد می‌کنند. این امر منجر به دستیابی به یک الگوی جدید فوق‌العاده با عنوان سیستم‌های حمل و نقل هوشمند<sup>۱</sup> (ITS) می‌شود [۱].

ITS دو موضوع جاده و خودرو را با هدف بهتر کردن جریان ترافیک، به صورت هوشمندانه با هم ترکیب می‌کند. اقدامات عملکردی ممکن در این زمینه عبارت از حداکثر ظرفیت، زمانهای سفر، ایمنی، مصرف سوخت، قابلیت اطمینان در زمانهای سفر، مقاومت و ... است. ITS با بکارگیری تکنولوژی اطلاعات<sup>۲</sup> و ارتباطات از راه دور<sup>۳</sup>، تراکم ترافیک را نشان می‌دهد و می‌تواند آن را کاهش دهد. آینده مطلوب ITS دستیابی به پیشگویی و تخمین شرایط ترافیک لحظات بعد، در زمان حال است. به دلیل عدم آگاهی و دانش از شرایط ترافیک در هر لحظه و لحظات پس از آن، داشتن ابتکار عمل در هدایت و کنترل خودروها امری دور از انتظار است [۲].

یکی از راه‌های اصلاح و بهتر کردن جریان ترافیک و ایمنی سیستم‌های حمل‌ونقل موجود، بکارگیری و استفاده از اتوماسیون و روش‌های کنترل هوشمند در زیرساخت‌های کنار جاده و خودروها است. این امر موجب دستیابی به سیستم‌های بزرگراهی خودکار<sup>۴</sup> (AHS) می‌شود. این سیستم به عنوان یک مؤلفه از سیستم‌های کنترل پیشرفته خودرو، هوشمندی را بین خودروها و زیرساخت‌های کنار جاده برای هماهنگی بهتر فعالیت‌های شبکه ترافیک تقسیم می‌کند. از این رو، AHS وظیفه راننده را از راننده به خودرو انتقال می‌دهد. این وظایف رانندگان شامل فعالیت‌هایی مانند فرمان دادن، عوض کردن دنده‌ها و ساختن تصمیمات کنترلی درباره سرعت و پیشروی ایمن است؛ که باید برای رسیدن ایمن و با آسایش به مقصد، اجرا شوند.

کنترل حرکت طولی و حفظ حداقل فاصله بین دو خودرو به عنوان اساسی‌ترین اهداف در رانندگی مطرح هستند [۳]. برای دستیابی به این هدف امروزه فن‌آوری‌های کنترلی مختلفی در کنترل حرکت طولی خودرو بکار گرفته می‌شوند. مدل فرآیند تعقیب خودرو به عنوان یک تئوری پرکاربرد، یکی از روش‌های مطالعه و بررسی جریان ترافیک در بزرگراه‌ها است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، فرآیند تعقیب خودرو، به عنوان یک مدل اساسی سیستم شبیه‌سازی میکروسکوپی، حرکت طولی یک راننده و خودرو را در زمانی که خودرو جلویی را دنبال می‌کند و تلاش می‌کند تا یک فاصله ایمن را با آن حفظ کند، توصیف می‌کند.

در یک طبقه بندی کلی می‌توان مدل‌های مختلف تعقیب خودرو را به ۱۴ مدل کلی تقسیم نمود [۴]. این تقسیم بندی ها عبارت‌اند از مدل GHR، مدل اجتناب از برخورد یا فاصله ایمن، مدل خطی، مدل نقطه اقدام، مدل مبنی بر منطق فازی، مدل تقسیم بندی مطلوب، مدل مبتنی بر تئوری هیستریزس ترافیک و افت ظرفیت، مدل شبکه عصبی، مدل سرعت بهینه، مدل مبتنی بر استنتاج فازی عصبی تطبیقی، مدل

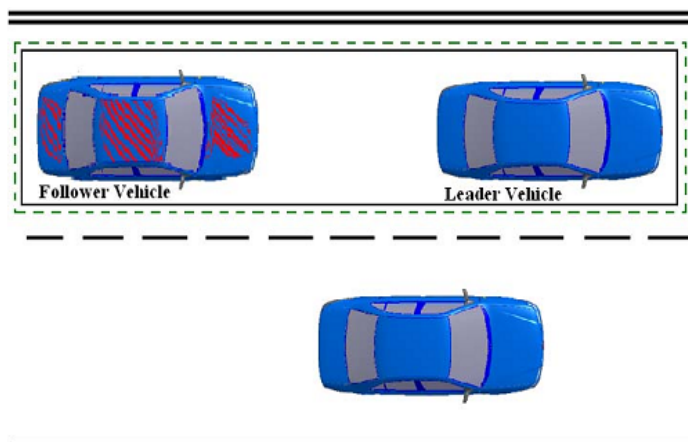
<sup>1</sup> Intelligent transportation systems

<sup>2</sup> Information technology

<sup>3</sup> Telecommunication

<sup>4</sup> Automated highway system

استنتاج فازی با یادگیری عاطفی، مدل فازی عصبی خطی-محلی، مدل فازی عصبی درجه دوم محلی و مدل ماشین های بردار پشتیبان حداقل مربعات بهینه سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک، هستند.



شکل ۱- فرآیند تعقیب خودرو

خودروهای هوشمند<sup>۱</sup>، با بکارگیری سیستم‌های کنترلی تعقیب و هدایت خودرو، توانایی نسل آینده خودروها را برای دستیابی به عملکرد بسیار کارآمد راننده و خودرو دارند. یک سیستم خودرو هوشمند محیط اطراف خودرو را حس می‌کند و برای دستیابی به عملکرد کارآمد خودرو به وسیله همیاری راننده، به شکل مشورت یا اخطار، یا با کنترل کامل خودرو، به صورت خودوند، عمل می‌کند. اقدامات کنترلی خودروهای هوشمند و یا زیرسیستم‌های کنترلی مجتمع در آن، حرکات طولی و عرضی خودرو، همراه با افزایش دادن ایمنی، راندمان عملکرد و آسایش رانندگی را ایجاد می‌کنند. این اقدامات، وقتی که با کنترل خودوند ترکیب می‌شوند، می‌توانند در کاهش زمان عکس‌العمل راننده و خودرو و همچنین در دستیابی به حداقل فاصله ایمن میان خودروها کمک کنند؛ و بدین ترتیب منجر به یک عملکرد ترافیکی بهبود یافته شوند.

سیستم‌های کنترلی تعقیب و هدایت خودرو را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد. سیستم‌های مشورتی<sup>۲</sup>، سیستم‌های نیمه‌خودوند<sup>۳</sup>، و سیستم‌های خودوند<sup>۴</sup> [۵]. یکی از اشکالات عمده این دسته از سیستم‌های کنترلی تعقیب خودرو و حفظ مسیر فعلی آن است که این سیستم‌ها بصورت روشن-خاموش عمل می‌کنند [۶]. در اینصورت هدایت خودرو یا در اختیار راننده است و یا در اختیار سیستم کنترلی است. به این ترتیب در هنگام روشن بودن سیستم، آزادی عمل راننده سلب شده و گاهی احساس نارضایتی از استفاده این سیستم‌ها در راننده ایجاد می‌شود و راننده آن را در وضعیت خاموش قرار می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که کنترل خودرو و استفاده از سیستم‌های مشورتی، نیمه‌خودوند و خودوند در دستیابی به خودرو هوشمند، علاوه بر تأمین امنیت و آرامش سفر، و استفاده از سیستم‌های همیار در رانندگی، از زیر ساخت‌ها و لازمه کنترل و مدیریت ترافیک، بهینه‌سازی جریان ترافیک و سایر مسائل مرتبط با خودروها و سیستم‌های

<sup>1</sup> Intelligent vehicle

<sup>2</sup> Advisory

<sup>3</sup> Semi-autonomous

<sup>4</sup> Autonomous

حمل و نقل شهری است. از این رو در این مقاله یک سیستم کنترلی هوشمند ارائه می‌شود که علاوه بر تامین آزادی عمل راننده و به عبارت دیگر تامین لذت رانندگی، تامین کننده امنیت خودرو و اجتناب از شرایط غیر ایمن و پرهیز از ناپایداری کلی خودرو باشد. این سیستم کنترلی بر مبنای سیستم فازی و بصورت پیش‌بین طراحی شده است. این سیستم هوشمند کنترلی رفتار لحظه‌ای راننده خودرو را برای شرایط ایمن در لحظه بعد پیش‌بینی و همچنین رفتار تعقیب و هدایت خودرو را پیش‌بینی می‌کند. سپس از بین دو رفتار بدست آمده، رفتار ایمن را اعمال می‌کند. سه ویژگی اساسی برای سیستم کنترلی در نظر گرفته شده است؛

- ۱- هدایت خودرو در شرایط ایمن باید عمدتاً در اختیار راننده باشد.
- ۲- هدایت خودرو در شرایط غیر ایمن باید عمدتاً در اختیار سیستم کنترلی باشد.
- ۳- در هر دو شرایط سیستم از ویژگی‌هایی مانند پایداری دینامیک حرکتی خودرو، مقاومت در برابر نویز اندازه‌گیری و اغتشاش و عدم قطعیت‌های مدل‌سازی برخوردار است.

که ویژگی اول تامین کننده آزادی عمل راننده و به عبارت دیگر تامین کننده لذت رانندگی است؛ و ویژگی دوم تامین کننده امنیت خودرو در شرایط غیر ایمن است؛ و ویژگی سوم پایداری کلی خودرو را در تمام شرایط حرکت طولی و در عدم برخورد با خودرو جلویی و همچنین مقاوم بودن در برابر نویز اندازه‌گیری و اغتشاش و عدم قطعیت‌ها فراهم می‌سازد.

در ادامه در این مقاله، در بخش (۲) ابتدا مروری کوتاه بر کنترل پیش‌بین مدل می‌شود. در ادامه مطلب ایده محاسبه رفتار لحظه‌ای راننده خودرو معرفی می‌شود و در آخر طراحی سیستم هوشمند کنترلی بر مبنای مدل پیش‌بین فازی توضیح داده می‌شود. در بخش (۳) سیستم کنترلی هوشمند با شبیه‌ساز رانندگی مرتبط می‌شود و نتایج شبیه‌سازی با راننده انسانی ارائه می‌شود. و در نهایت در بخش (۴) نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

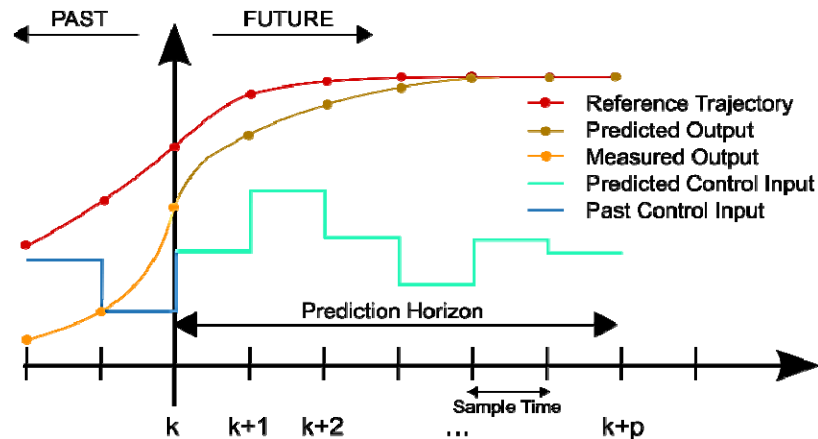
## ۲- طراحی سیستم کنترلی هوشمند

در این بخش یک سیستم کنترلی هوشمند برای کنترل دینامیک طولی خودرو با در نظر گرفتن رفتار راننده خودرو طراحی و ارائه می‌شود. ابتدا کنترل پیش‌بین مدل به اختصار معرفی می‌شود. سپس ایده محاسبه رفتار لحظه‌ای راننده خودرو در مدل‌سازی رفتار تعقیب خودرو توضیح داده می‌شود. در آخر، طراحی سیستم هوشمند کنترلی بر مبنای مدل پیش‌بین فازی توضیح داده می‌شود.

### ۲-۱- معرفی کنترل پیش‌بین مدل

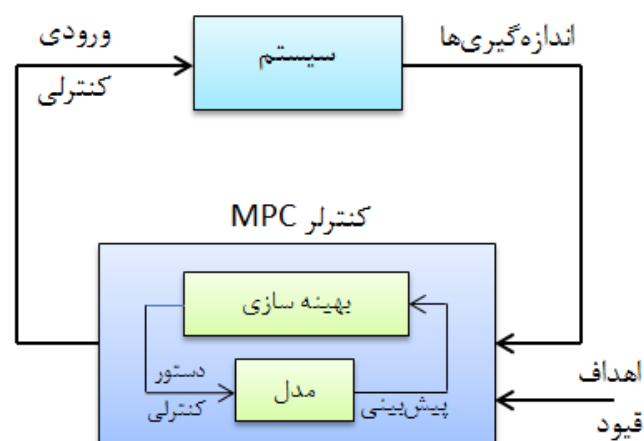
کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل [۷] یک دسته از الگوریتم‌های کنترلی محاسباتی هستند، که با استفاده از یک مدل صریح و واضح از فرآیند در یک افق مشخص، رفتار آینده سیستم را پیش‌بینی و کنترل می‌کند. در هر گام کنترلی، الگوریتم MPC یک دنباله حلقه باز از تنظیمات متغیرهای ورودی و متغیرهای کنترلی را به منظور بهینه‌سازی خروجی یا رفتار آینده سیستم محاسبه می‌کند. که در نهایت دنباله‌ای از متغیرهای ورودی مناسب در افق تعریف شده برای کنترل جهت اعمال به سیستم به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص شده است، هدف MPC دنبال کردن مسیر مرجع تعریف شده برای سیستم توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی دورشونده تعریف شده برای آن می‌باشد. به همین منظور به کمک اطلاعات

مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی سیستم، خروجی‌های آینده پیش‌بینی شده و به کمک این اطلاعات جدید و نیز با توجه به مسیر مرجع، اغتشاشات و استراتژی کنترلی در نهایت دنباله‌ای از ورودی‌های مناسب در یک افق تعریف شده کنترل برای عملکرد صحیح سیستم محاسبه می‌شود.



شکل ۲- تعیین ورودی مناسب با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی و خروجی‌های پیش‌بینی شده سیستم به منظور حفظ خروجی‌ها در محدوده مسیر مرجع

به‌طور کلی MPC دو وظیفه مهم شناسایی و پیش‌بینی براساس مدل و تعیین ورودی کنترلی بهینه برای سیستم در جهت ارضای خواسته‌های کنترلی را بر عهده دارد. در شکل (۳) یک نمودار بلوکی از ساختار MPC نشان داده شده است. این ساختار شامل دو بلوک است. یکی براساس مدلی است که برای فرآیند در نظر گرفته می‌شود، خروجی را در افق مورد نظر پیش‌بینی می‌کند. دیگری با توجه به خروجی پیش‌بینی شده، ورودی بهینه به سیستم اصلی را تعیین می‌نماید. در واقع وظایف اصلی بخش MPC عبارت از است از تخمین و شناسایی پارامترهای مختلف سیستم، محاسبه خروجی آینده در افق پیش‌بینی به کمک مدل فرآیند و حذف اثر نویز و اغتشاشات به کمک مدل برای اغتشاشات [۸].



شکل ۳- نمودار بلوکی ساختار MPC [۵]

بلوک تعیین ورودی کنترلی بهینه وظیفه تعیین ورودی کنترلی بهینه را در افق کنترل معین براساس راهبرد کنترلی تعریف شده و خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط بلوک پیش‌بینی برعهده دارد.

## ۲-۲- مدل رفتار تعقیب خودرو با در نظر گرفتن رفتار لحظه‌ای راننده خودرو

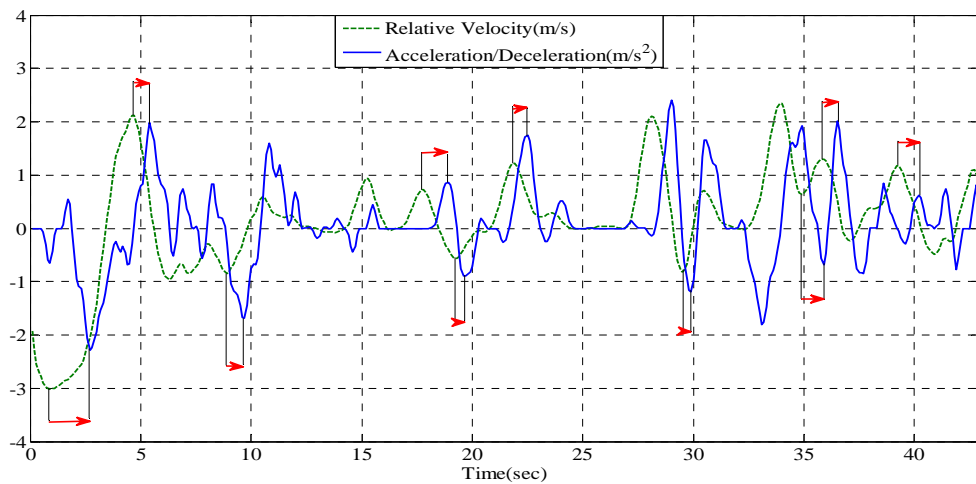
تأخیر عکس‌العمل در رانندگی، یک مشخصه عمومی و مشترک برای انسانها در استفاده و کنترل خودرو است. ضرایب عملیاتی و مشخصه تأخیر انسانها می‌تواند با تغییر عواملی مانند مطالبات کاری، انگیزه، حجم کار و خستگی با شدیداً تغییر کند. زمان عکس‌العمل راننده به وسیله اولین پژوهشگران در زمینه تعقیب خودرو، به شکل جمع زمان ادراک، و زمان عکس‌العمل فیزیکی تعریف شده است. در مطالعات روانشناختی، فرآیند عکس‌العمل راننده، با گسترش در چهار حالت ادراک، شناسایی، تصمیم و پاسخ فیزیکی بیان می‌شود. از آنجایی که در شبیه‌سازی میکروسکوپیک ترافیک، معمولاً راننده و خودرو به عنوان یک واحد یکپارچه مدل‌سازی می‌شوند، از در نظر گرفتن تأخیر سیستم مکانیکی خودرو در اغلب اوقات صرف‌نظر می‌شود. توجه و تأکید بر این موضوع که تأخیر عکس‌العمل برای هر راننده یک ضریب و عامل حتمی و ضروری برای شناسایی مدل‌های تعقیب خودرو است، لازم و ضروری است [۹].

در یک طبقه‌بندی کلی مدل‌های ارائه شده برای فرآیند تعقیب خودرو در روش میکروسکوپیک به دو دسته مدل‌های بر مبنای معادلات ریاضی و مدل‌های بر پایه ورودی و خروجی تقسیم می‌شوند. تمامی مدل‌های ارائه شده برای فرآیند تعقیب خودرو، بر مبنای توانایی این مدل‌ها در میزان کم‌ترین خطا در تخمین افزایش و کاهش شتاب در رفتار رانندگان خودرو تعقیب‌گر ارزیابی می‌شوند. در مدل‌سازی‌های بر پایه ورودی و خروجی نیز نکته اساسی آنست که با ثابت فرض کردن زمان عکس‌العمل راننده خودرو، مقادیر خروجی متناسب با ورودی مورد نظر اعمال می‌شود؛ این در حالی است که مقادیر تأخیر زمانی یا عکس‌العمل خودرو و راننده با توجه به شرایط زمانی و سایر پارامترها در نظر گرفته می‌شود. از این رو با فرض ثابت بودن زمان عکس‌العمل راننده خودرو خطایی در آموزش به دلیل تفاوت در تناسب داده‌های واقعی و داده‌های به‌کار برده شده برای آموزش و مدل به‌دست آمده وجود دارد [۱۰].

در [۱۱] ایده‌ای برای ارائه یک مدل جدید بر پایه مدل‌سازی ورودی و خروجی و اصلاح خطا در تخمین رفتار افزایش یا کاهش راننده خودرو تعقیب‌گر ارائه شده است. بر مبنای این ایده، محاسبه و استفاده از زمان عکس‌العمل لحظه‌ای راننده و خودرو به عنوان ورودی برای مدل‌سازی سیستم و همچنین انتخاب مناسب و درست ورودی‌ها و خروجی‌های متناظر ورودی‌های انتخاب‌شده، با توجه به اندازه تأخیر زمانی می‌باشد. یعنی با توجه به اینکه تأخیر سیستم راننده و خودرو در لحظات متوالی مقدار ثابتی نیست، پس انتخاب ورودی‌ها و خروجی‌های متناظر، در واقع تحریک و عکس‌العمل درست و مناسب، می‌باید با توجه تأخیر لحظه‌ای میان هر ورودی و خروجی صورت پذیرد. این موضوع سبب کاهش خطا در مدل‌سازی و افزایش دقت و صحت مدل می‌شود. همچنین اگر در هر لحظه میزان خطای میان خروجی این لحظه و خروجی تخمین زده شده این لحظه در  $\tau$  ثانیه قبل نیز، به عنوان یک ورودی و خروجی در نظر گرفته شود می‌تواند در کاهش میزان خطای این مدل‌سازی مؤثر باشد. در ادامه به بیان ایده تعیین تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو در رفتار تعقیب خودرو پرداخته می‌شود.

تحلیل حرکت طولی خودروها و داده‌های واقعی (داده‌های واقعی در بخش بعد معرفی می‌شود) این رفتار وابستگی زیاد میان زمان تأخیر با سرعت نسبی و شتاب خودرو تعقیب‌گر را نشان می‌دهد. در این ایده در

رفتار تعقیب خودرو تغییرات سرعت نسبی و شتاب خودرو تعقیب‌گر همانند مفهوم تحریک<sup>۱</sup> و عکس‌العمل<sup>۲</sup> می‌باشند. روش محاسبه تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو بر این مبنا استوار است که با تغییر جهت سرعت نسبی لحظه‌ای (وقوع مینیمم و ماکزیمم در منحنی سرعت نسبی دو خودرو یا تغییر علامت شتاب نسبی)، راننده خودرو تعقیب‌گر با تأخیر به فرمان تغییر شتاب اعمال می‌کند و مکانیزم اعمال فرمان راننده در خودرو با تأخیر فرمان راننده را اجرا می‌کند و شتاب را کاهش یا افزایش می‌دهد. در نهایت این فرمان راننده به شکل تغییر جهت شتاب لحظه‌ای (وقوع مینیمم و ماکزیمم در منحنی شتاب خودرو تعقیب‌گر) تحقق می‌یابد. از اینرو تأخیر لحظه‌ای سیستم راننده و خودرو، فاصله زمانی میان دو تغییر متوالی، دو مینیمم یا دو ماکزیمم متوالی، در نمودار سرعت نسبی و شتاب خودرو تعقیب‌گر است. این ایده، ایده تحریک-عکس‌العمل برای تخمین و تعیین تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو در رفتار تعقیب خودرو نامیده می‌شود. شکل (۴) ایده محاسبه لحظه‌ای تأخیر راننده و خودرو را نشان می‌دهد.



شکل ۴- ایده تحریک-عکس‌العمل برای محاسبه تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو

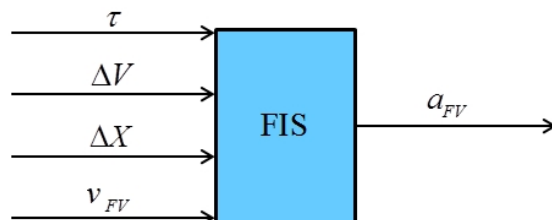
در نظر گرفتن تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو به عنوان اثرات انسانی در مدل‌سازی رفتار تعقیب خودرو منجر به دستیابی مدل‌های بهبودیافته با دقت بالایی در تخمین این رفتار در جریان واقعی ترافیک می‌شود. این مدل‌ها خطای کمتر و دقت بالاتری در پیش‌بینی رفتار تعقیب خودرو نسبت به کارهای گذشتگان دارند. دیگر آنکه در مدل‌سازی رفتار، روش‌های ترکیبی استنتاج فازی عصبی تطبیقی و استنتاج فازی-پیش‌بین به دلیل توانمندی بالا و استفاده همزمان از قابلیت‌های روش‌های مختلف محاسبات نرم، با دقت بالا و حداقل خطا می‌توانند رفتار تعقیب خودرو را مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند.

در [۱۲] یک مدل FIS برای پیش‌بینی ارائه شده است که دارای چهار ورودی و یک خروجی می‌باشد. تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو تعقیب‌گر ( $t$ )، سرعت نسبی ( $\Delta V$ )، فاصله نسبی ( $\Delta X$ ) و سرعت خودرو تعقیب-گر چهار ورودی این مدل می‌باشند. خروجی مدل برابر شتاب خودرو تعقیب‌گر ( $a_{EV}$ ) می‌باشد. آموزش این

<sup>1</sup> Stimulus

<sup>2</sup> Reaction

مدل بر مبنای انتخاب ورودی‌ها و خروجی مناسب با توجه به تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو انجام شده است. در این مدل از یک لایه مخفی با ۹ نود و الگوریتم پس انتشار<sup>۱</sup> استفاده شده است. شکل (۵) نمای مدل FIS را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مدل FIS رفتار تعقیب خودرو

در این مقاله از ایده معرفی شده در طراحی سیستم هوشمند کنترلی استفاده می‌شود. در قسمت بعد به طراحی سیستم هوشمند کنترلی بر مبنای مدل پیش‌بین فازی پرداخته می‌شود.

## ۲-۳- طراحی سیستم هوشمند کنترلی بر مبنای مدل پیش‌بین فازی

اکثر فرآیندهای پیوسته و دنباله‌دار صنعتی و فرآیندهایی که انسان در آن حضور دارد، ذاتاً غیرخطی هستند. از اینرو، پژوهش‌های زیاد برای توسعه الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی صورت پذیرفته است. این الگوریتم‌ها نمونه‌های مختلفی از مدل‌های غیرخطی مانند مدل‌ها با معادلات دیفرانسیل معمول غیرخطی، مدل‌ها با معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، مدل‌ها با معادلات انتگرالی و مشتقات مدل‌ها با معادلات تأخیردار را در بر می‌گیرند. این مدل‌ها می‌توانند در یک محدود وسیع از شرایط عملکردی سیستم با دقت زیادی معتبر باشند.

با این وجود بر مبنای اصول اولیه، توسعه این مدل‌ها برای اکثر فرآیندهای صنعتی و فرآیندهایی که عامل انسانی در آن وجود دارد بسیار دشوار است. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی بر مبنای استفاده از مدل سازی‌های فازی فرآیند غیرخطی و تقسیم این مدل‌ها به تعدادی از مدل‌های خطی یا شبه‌خطی فازی صورت گرفته است. این موضوع شرایط مناسبی برای ساده‌سازی در طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را ایجاد می‌نماید. همچنین برخی مسائل فیزیکی و قیود، امکان استفاده از MPC را برای سیستم‌های چندمتغیره با تأخیر و معادلات غیرخطی محدود می‌کند. که با استفاده از روش فازی این محدودیت‌ها قابل حل می‌شود. به عنوان نمونه، مدل نوع تاکاگی- سوگینو یکی از اصلی و پایه‌ای‌ترین مدل‌های فازی است که این مدل فازی به صورت مدل‌های خطی تکه‌ای معمولی رفتار می‌کند. از این قابلیت می‌توان به منظور جایگزینی مدل‌های فازی به جای مدل‌های غیرخطی در روش کنترل پیش‌بین استفاده کرد [۱۳].

روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل فازی، ایده اصلی روش کنترل پیش‌بین کلاسیک را با استفاده از یک تابع هدف و به وسیله مجموعه‌ای از نواحی یا معیارهای مختلف فازی بر مبنای دانش انسان خبره بیان می‌کند. در روش فازی استفاده از اهداف و قیود فازی به جای معیارهای درجه دوم رایج استفاده می‌شود. در

<sup>1</sup> Back-propagation



روش فازی انعطاف‌پذیری بیشتری در تعریف معیار بهینه‌سازی در مقابل روش‌های کلاسیک کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل وجود دارد. در واقع، هر دو مجموعه توابع عضویت فازی مربوط به اهداف و قیود، و عملگرهای تجمع آنها می‌توانند به دلخواه انتخاب شوند. حتی امکان اضافه کردن اهداف تعریف شده و مطلوب که نقش مهمی را در طول فرآیند ایفا می‌نمایند، وجود دارد. در حالی که این اهداف ارتباط مشابهی در مقایسه با اهداف سخت<sup>۱</sup> و قیود در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل کلاسیک ندارند.

اهداف و قیودی که یک مسئله کنترل پیش‌بین فازی را تعریف می‌کنند، می‌توانند به وسیله یک تابع عضویت تعریف شوند. این مسئله با استفاده از چهارچوب تصمیم‌گیری فازی ارائه شده توسط Zadeh و Bellman قابل حل است. برای هر بازه زمانی ثابت، اهداف و قیود فازی قابل تعریف هستند. بر این اساس تعریف یک هدف کلی با استفاده از تقاطع هر تابع عضویت فازی بیش از افق‌های زمانی تعریف شده در مسئله کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل فازی امکان‌پذیر است. در این صورت بهینه‌سازی می‌باید برای تمامی دنباله‌های کنترلی در آینده ساخته شود. این بهینه‌سازی به صورت یک مسئله تصمیم‌گیری فازی که شامل دستیابی به بیشترین مقدار معیار فازی، اهداف فازی، و قیود فازی به صورت همزمان، تعریف می‌شود.

به دلیل غیرخطی بودن مدل فرآیند و یا تابع تصمیم‌گیری، مسئله بهینه‌سازی معمولاً نامحدب<sup>۲</sup> است و به وسیله الگوریتم‌های بهینه‌سازی استاندارد نظیر برنامه‌ریزی درجه دوم<sup>۳</sup> قابل حل نیست. از این رو در روش فازی برای حل مسئله بهینه‌سازی از روش‌های گرادیان مانند برنامه‌نویسی درجه دوم ترتیبی<sup>۴</sup> و عملگر Yager استفاده می‌شود.

در این مقاله یک الگوریتم FMPC برای کنترل رفتار تعقیب خودرو در جریان ترافیک طراحی می‌شود. برای این موضوع از مدل بهبودیافته فازی معرفی شده در قسمت (۲-۲) استفاده می‌شود. سپس توابع هدف و بهینه‌ساز بر مبنای قوانین فازی توسعه می‌یابند. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل، یک مدل اولیه را برای تخمین خروجی در آینده استفاده می‌کنند. خروجی‌های آینده با توجه به روش‌های بهینه‌سازی مختلف قابل محاسبه هستند و همچنین به سیستم و توابع هدف وابسته هستند. در اینجا از مدل فازی تاکاگی-سوگینو برای توسعه مدل‌های فازی و از الگوریتم شاخه و محدوده<sup>۵</sup> برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

در طراحی FMPC برای هر ورودی سه تابع عضویت گوسی تعریف شده و در مرحله اول قوانین به صورت کامل تعریف شده‌اند. یعنی برای این کنترل‌کننده از ۸۱ قانون فازی نوع سوگینو استفاده شده است. سپس این قوانین اصلاح و بهینه‌سازی شده و به ۵۳ قانون فازی نوع سوگینو کاهش یافته‌اند. سیستم کنترلی هوشمند، با استفاده از مدل تخمین‌گر، با توجه به رفتار راننده در لحظه، و تخمین رفتار راننده در آینده و همچنین تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو، شتاب لازم در هر لحظه را معین می‌سازد.

با استفاده از پیش‌بینی رفتار راننده و تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو، ورودی‌های کنترلی برای هدایت و کنترل خودرو بصورت لحظه‌ای؛ با هدف تنظیم سرعت و ناحیه ایمن برای خودرو و نیز تنظیم و بهبود دسته

<sup>1</sup> Strict goals

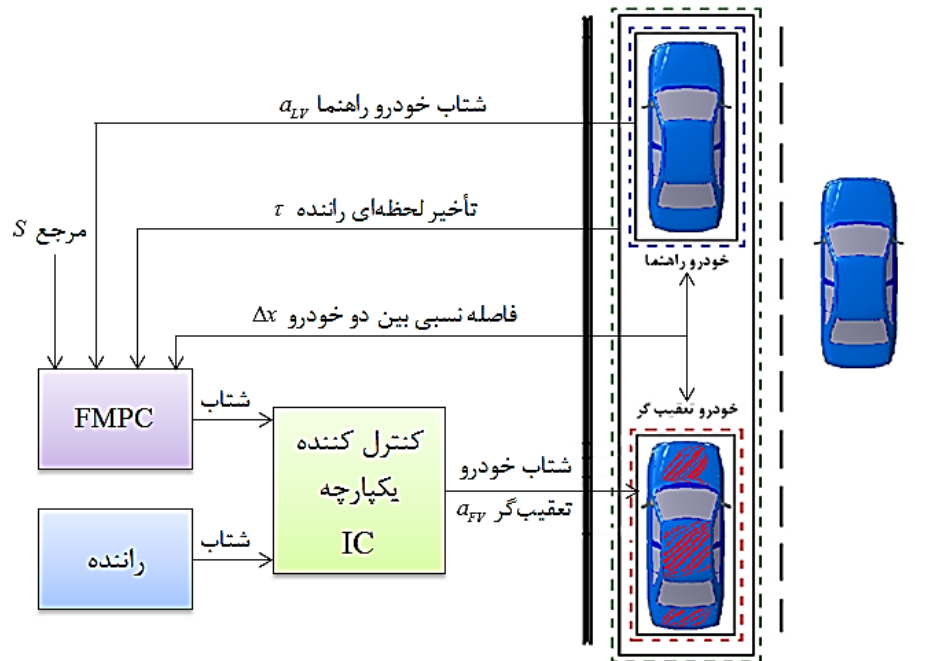
<sup>2</sup> Nonconvex

<sup>3</sup> Quadratic programming

<sup>4</sup> Sequential quadratic programming

<sup>5</sup> Branch-and-bound

خودروها در جریان ترافیک، اعمال می‌شوند. در عین حال وجود عدم قطعیت‌ها و عدم دقت‌ها، دخالت استدلال‌ها و منطق انسانی و طبیعت غیرخطی رانندگی، جریان ترافیک و پدیده‌های مرتبط با آن‌ها، و وجود تأخیر زمانی راننده و خودرو در اعمال فرمان‌های کنترلی، پیچیدگی‌های زیادی را در حل مسئله ایجاد می‌کند. به همین دلیل استفاده همزمان از روش‌هایی که توانایی برخورد با عدم دقت و عدم قطعیت، توانایی مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و توانایی بیان ریاضی استدلال‌ها و تصمیمات انسان و پتانسیل بسیار بالایی را برای کاربرد در شبیه‌سازی، مدل‌سازی و کنترل ترافیک دارا می‌باشند؛ و نیز روش‌هایی که به صورت بر خط محاسبات و بهینه‌سازی‌ها پیش‌بینی در تخمین و اعمال فرمان‌ها انجام دهند؛ و همچنین استفاده از داده‌های واقعی و محاسبه و تخمین رفتار راننده و تأخیر زمانی راننده و خودرو به صورت لحظه‌ای، در دستیابی به هدف طراحی سیستم کنترلی راه‌حل مناسبی خواهد بود. شکل (۶) نمای شماتیک سیستم مدار بسته کنترلی و رفتار دینامیکی حرکت جفت خودرو، همراه با اجزای اصلی تشکیل دهنده مدار را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شماتیک مدار بسته سیستم کنترلی هوشمند.

همانطور در شکل نیز مشاهده می‌شود، در این سیستم شتاب خودرو راهنما  $a_{LV}$ ، فاصله نسبی بین دو خودرو  $\Delta x$  و تأخیر لحظه‌ای راننده  $\tau$  به کنترل‌کننده اعمال می‌شود تا آن با مرجع ورودی به کنترل‌کننده مقایسه شود. فاصله ایمن بین دو خودرو  $S$ ، به عنوان مرجع برای حفظ فاصله ایمن بین دو خودرو به کنترل‌کننده اعمال می‌شود که توسط قانون Pipe بدست می‌آید [۱۴]:

$$S = L \left( 1 + \frac{V_{FV}}{4/47} \right) \quad (1)$$

نکته قابل توجه این است که این فاصله تابعی از سرعت خودرو تعقیب‌گر  $V_{FV}$  در هر لحظه است و با انتگرال‌گیری از  $a_{FV}$  محاسبه می‌شود. در واقع کنترل‌کننده در هر گام زمانی مقداری جدید به عنوان مرجع دریافت می‌کند که از آن اطلاعی ندارد و باید بگونه‌ای آن را پیش‌بینی کند تا بتواند فاصله ایمن بین دو خودرو را حفظ کند [۱۵].

سیستم کنترلی هوشمند ارائه شده در این مقاله در ارتباط مستقیم با راننده و احساس رانندگی است. لذا فقط زمانی می‌توان با اطمینان از عملکرد سیستم کنترلی صحبت به‌میان آورد که بازخورد راننده به عملکرد سیستم، ارزیابی شود. از سوی دیگر انسان بعنوان راننده یک سیستم کنترلی حلقه بسته است و لذا سیستم پیشنهادی در حضور انسان می‌بایست عملکرد قابل قبولی داشته باشد. بدین ترتیب انجام آزمایش راننده در حلقه<sup>۱</sup> در بررسی عملکرد سیستم کنترلی ضروری است. در این آزمایش تعریف مانورهای مناسب که بتواند اثر سیستم کنترلی بر روی رفتار راننده را ارزیابی نماید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور آزمایش راننده در حلقه سیستم کنترلی پیشنهادی بر روی شبیه‌ساز رانندگی آساران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی پیاده‌سازی شده است. مدل خودرو ایجاد شده در این شبیه‌ساز قبلاً با خودروهای واقعی صحنه‌گذاری شده است. این مدل با دریافت ورودی‌های دینامیکی از محیط مجازی، خروجی‌ها را به صورت شیب، غلت و ارتفاع اعمال می‌کند تا حس حضور در خودروی واقعی به کاربر القا شود. در شکل (۷) نمای کلی شبیه‌ساز رانندگی آساران نمایش داده شده است.



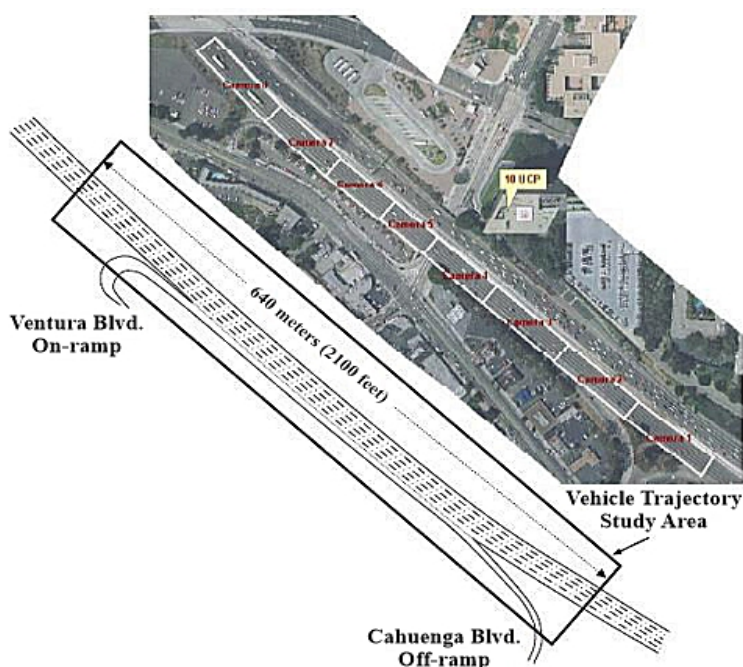
شکل ۷- نمای کلی شبیه‌ساز رانندگی آساران

### ۳- بررسی نتایج

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترلی هوشمند طراحی شده برای رفتار تعقیب خودرو، یک سناریو برای حرکت خودرو راهنما با توجه به رفتار واقعی راننده و خودرو در جریان واقعی ترافیک طراحی شده است. داده‌های مربوط به حرکت خودرو راهنما در این سناریو از پایگاه داده ارائه شده توسط اداره کل حمل و نقل بزرگ‌راه‌های فدرال در ایالات متحده آمریکا استخراج شده است [۱۶]. در سال ۲۰۰۵، یک مجموعه داده از

<sup>1</sup> Driver-in-the-loop

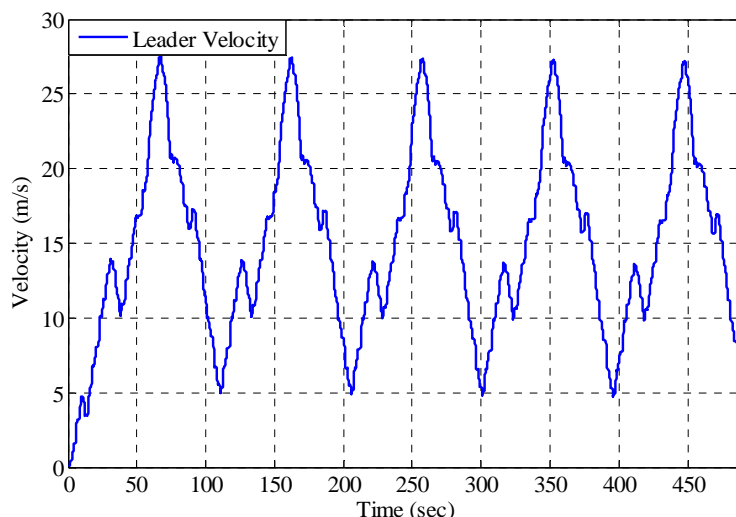
مسیر حرکت وسایل نقلیه در حال سفر در زمان اوج صبح از بزرگراه ۱۰۱ ایالت کالیفرنیا با استفاده از ۸ دوربین در بالای ۱۰ ساختمان موجود در کنار آن بزرگراه ساخته شده است. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، مسیر حرکت وسایل نقلیه در یک فاصله ۶۴۰ متری از بزرگراه و در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای ثبت شده است.



شکل ۸- بخشی از بزرگراه بین ایالتی ۱۰۱ در امیرویل، سانفرانسیسکو، کالیفرنیا

این مجموعه داده با عنوان "US-101" منتشر شده است. این مجموعه داده در زمان نمونه برداری شامل ۱۸ مشخصه از هر DVU می‌باشد، مثل موقعیت طولی و عرضی، سرعت، شتاب، زمان، نوع خورو و غیره [۱۷].

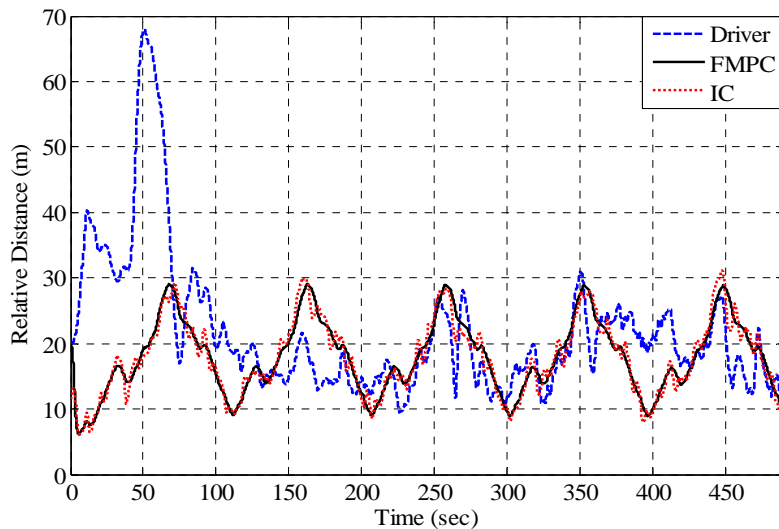
براساس تجزیه و تحلیل دقیق این مجموعه داده، داده‌های وسایل نقلیه‌ای که دارای رفتار تعقیب خودرو هستند، استخراج شده است. داده‌های استخراج شده از این مجموعه داده فیلتر نشده و دارای کمی نویز می‌باشند. پس این اطلاعات باید فیلتر شوند [۱۸، ۱۹]. یک فیلتر میانگین طراحی و به تمامی داده‌ها اعمال شده است. سپس با تکرار و هماهنگ سازی این داده‌ها، سناریویی جدید برای حرکت خودرو راهنما تهیه گردیده، که در بازه‌ای از آن یک رفتار مشخص از خودرو راهنما ۵ بار تکرار می‌شود. این تکرار به دلیل آنست که عکس العمل‌های متفاوت خودروی تعقیب‌گر نسبت به رفتار مشخص خودرو راهنما بررسی و تحلیل شود. شکل (۹) نمودار تغییرات سرعت خودرو راهنما را نشان می‌دهد.



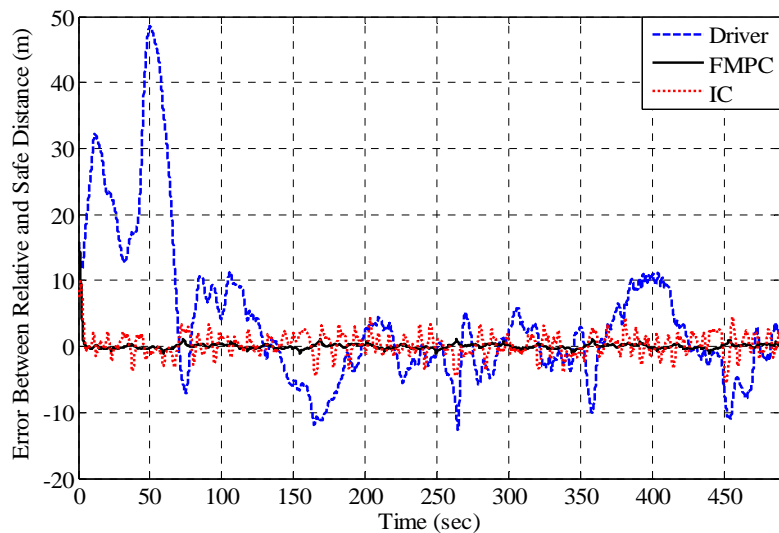
شکل ۹- سناریو حرکت خودرو راهنما

آزمایشی به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترلی هوشمند طراحی شده به صورت راننده در حلقه طراحی گردیده است. این سیستم کنترلی شامل عملکرد همزمان سیستم کنترلی پیش‌بین فازی، راننده و کنترل کننده فازی یکپارچه‌ساز است. در این آزمایش هدایت خودرو در اختیار کنترل کننده فازی یکپارچه‌ساز است؛ که در هر لحظه با توجه به شتاب اعمالی توسط راننده و شتاب اعمالی توسط کنترل کننده پیش‌بین فازی و سایر خصوصیات حرکتی خودرو، شتاب مورد نظر را به خودرو تعقیب‌گر اعمال می‌نماید. زمان نمونه‌برداری  $T_c$  برای شبیه‌سازی رفتار تعقیب خودرو ۰/۱ ثانیه انتخاب شده است. رفتار تعقیب خودرو در کل یک فرآیند آرام و یکنواخت می‌باشد. بخش بزرگی از این یکنواختی به محدودیت‌های موجود در خودرو از جمله محدودیت افزایش و کاهش دادن سرعت و ترمزگیری بر می‌گردد. به همین دلیل در طراحی سیستم کنترلی پیش‌بین فازی قیود نرم با استفاده از تعاریف فازی بر روی شتاب اعمال شده است، تا هم رفتار مدل به واقعیت نزدیکتر شود و هم با تنظیم آن حرکت خودرو روان‌تر و در نتیجه سفر لذت بخش‌تری محیا شود.

شکل (۱۰- الف) عملکرد سیستم کنترلی هوشمند در تنظیم فاصله نسبی و شکل (۱۰- ب) مقدار خطای دینامیکی فاصله نسبی با توجه به قانون پایپ ناشی از عملکرد این سیستم کنترلی، در بخشی از انجام یک آزمایش را برای سناریو تعریف شده از حرکت خودرو راهنما مطابق با شکل (۹) را نشان می‌دهد.



الف



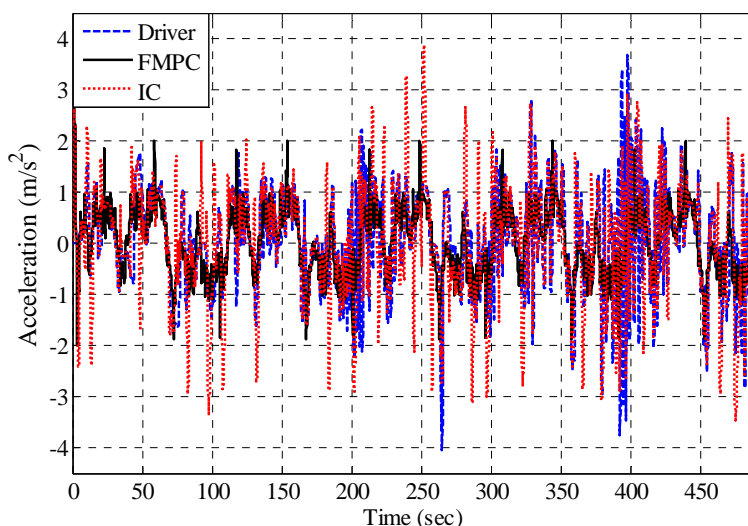
ب

**شکل ۱۰-۱** عملکرد سیستم کنترلی هوشمند برای رفتار تعقیب خودرو در مقایسه با راننده انسانی، (الف) فاصله نسبی خودرو راهنما و خودرو تعقیب‌گر، (ب) خطای فاصله نسبی با استفاده از قانون پایپ

همانگونه که در شکل (۱۰-۱) مشاهده می‌شود، در این آزمایش از ابتدای حرکت، کنترل‌کننده هوشمند فعال می‌شود. از اینرو، سیستم کنترلی هوشمند با توجه به شرایط ایمن، آسایش سرنشینان و عملکرد راننده، هدایت خودرو را در اختیار می‌گیرد. در این سیستم همانگونه که در شکل نیز مشخص است، در زمان‌هایی که رفتار راننده، خودرو تعقیب‌گر را از شرایط ایمن رانندگی و آسایش سرنشینان دور می‌کند، کنترل‌کننده هوشمند با ایجاد شرایط ایمن بر خلاف رفتار راننده خودرو را به شرایط ایمن در تنظیم سرعت و فاصله نسبی می‌رساند. مشاهده می‌شود که در این وضعیت رفتار راننده در هدایت خودرو، تنظیم فاصله نسبی و کاهش خطای بی‌تأثیر است.

این در حالی است که وقتی سیستم راننده و خودرو به شرایط تعادل پایدار برسد و شرایط ایمن ایجاد شود، رفتارهای راننده به رفتار کنترل‌کننده پیش‌بین فازی نزدیک می‌شود، و تلاش راننده بر خارج شدن خودرو از شرایط تعادل و ایمن کمتر می‌شود. در این وضعیت، هدایت خودرو در اختیار راننده است و حرکت

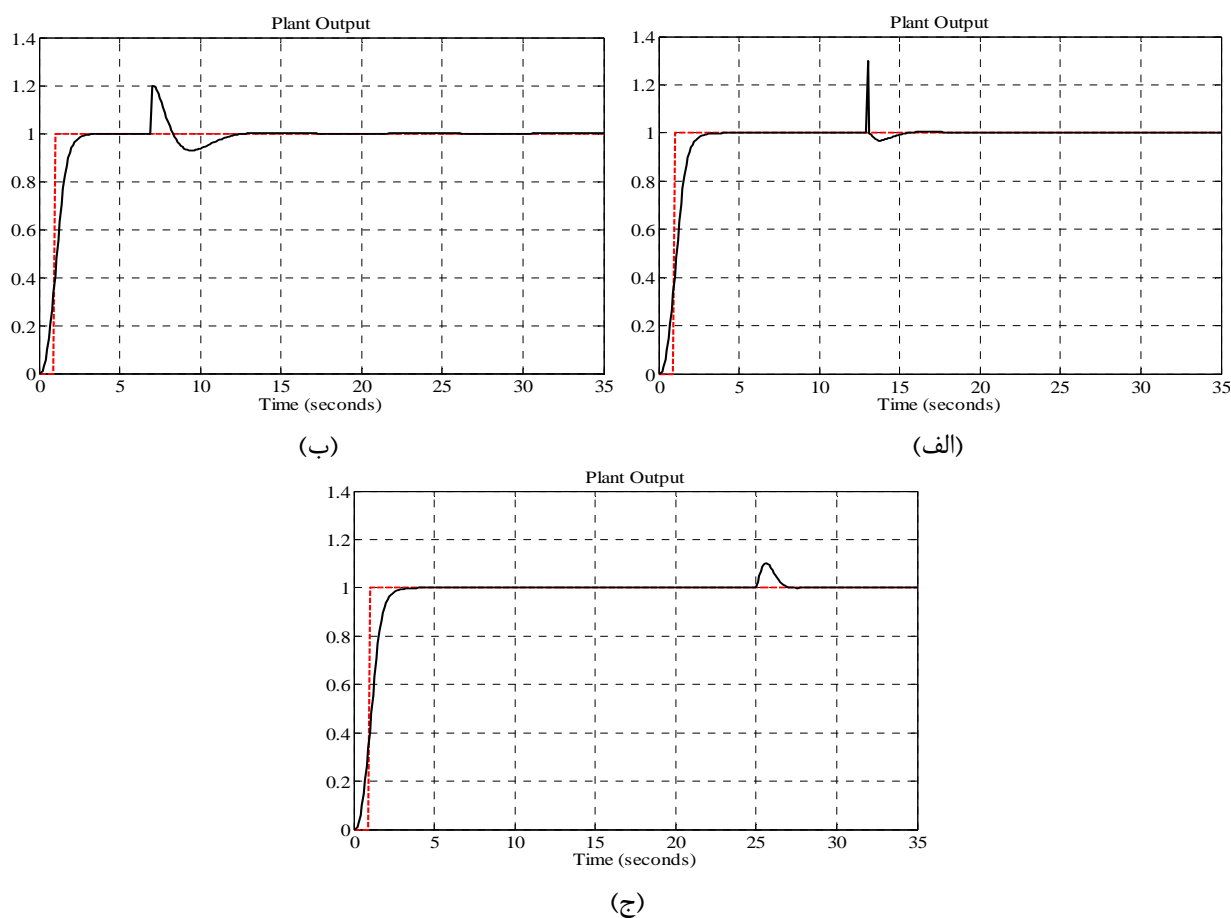
خودرو تا جایی که از ناحیه ایمن خارج نشود و آسایش سرنشینان تأمین باشد، با شتاب ایجاد شده توسط راننده صورت می‌گیرد. این موضوع در شکل (۱۱)، که پروفایل شتاب خودرو تعقیب‌گر را نشان می‌دهد، نیز قابل مشاهده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود شتاب سیستم راننده خودرو، با توجه به عملکرد کنترل یکپارچه‌ساز فازی و با توجه به مقادیر اعمالی از طرف راننده، شتاب اعمالی توسط کنترل‌کننده پیش‌بین، فاصله نسبی و سرعت خودرو تعقیب‌گر، محاسبه و اعمال می‌شود. نتیجه کلی این سیستم تنظیم و ایجاد شرایط ایمن و لذت سرنشینان خودرو تعقیب‌گر در حضور آزادی عمل نسبی راننده در حرکت خودرو می‌باشد. نکته قابل توجه در انجام این آزمایش آن بوده است که با توجه به استفاده و تمرین رانندگان پس از تکرار آزمایش‌ها، رانندگان به سیستم اعتماد کرده و رفتارهای رانندگی ایشان با رفتار ایمن تولید شده توسط کنترل‌کننده هوشمند نزدیک شده است. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در رفتارهای ثبت‌شده از عکس‌العمل راننده، مقاومت و ممانعت زیادی در برابر هدایت خودرو توسط کنترل‌کننده دیده نمی‌شود.



شکل ۱۱- عملکرد سیستم کنترلی هوشمند در تنظیم شتاب خودرو تعقیب‌گر در شبیه‌ساز رانندگی در مقایسه با راننده انسانی

یکی دیگر از معیارهای مهم برای سنجش عملکرد کنترل‌کننده‌ها، توانایی آن‌ها در فیلتر کردن نویزها می‌باشد. در اینجا توانایی کنترل‌کننده هوشمند طراحی شده در فیلتر کردن تأثیر نویزهای اندازه‌گیری شده بر روی خروجی بررسی می‌شود. بررسی و تحلیل پاسخ ضربه یا پله، که از آزمایش‌های ساده ولی کاربردی می‌باشند، نتایج مطلوب و قابل قبولی در مورد پایداری سیستم طراحی شده در اختیار قرار می‌دهند [۲۰، ۲۱]. بزرگی اندازه نویز وارد شده بر خروجی، بر مقدار تأثیر گذاری نویز بر تصمیم‌گیری کنترل‌کننده اثر می‌گذارد. یعنی، اگر یکی از اندازه‌گیری‌ها خیلی پراگتاشاش باشد، کنترل‌کننده به آن وزن کمتری تخصیص می‌دهد و به جای آن به اطلاعات پیش‌بینی شده اکتفا می‌کند. برای این منظور، آزمایشی ترتیب داده شده است. در این صورت یک سیگنال پله واحد به عنوان مرجع به کنترل‌کننده وارد می‌شود، سپس همانطور که نویز سفید بر روی خروجی تأثیر می‌گذارد، در زمان‌های مختلف و به طور تصادفی اغتشاشات مختلفی بر

خروجی وارد می‌شود. در واقع، این آزمایش حالتی را شبیه‌سازی می‌کند که خودرو تعقیب‌گر بر اثر ترمز ناگهانی خودرو راهنما یا شتاب‌گیری خودش در حین حرکت بطور ناگهانی از مسیر مرجع خود دور شود. در شکل (۱۲) چند نمونه از نتایج این آزمایش نشان داده شده است. همانطور که در نتایج نشان داده شده در شکل مشاهده می‌شود، در هر زمانی که اغتشاش بر سیستم وارد شود و آن را از حالت تعادل پایدار (فاصله نسبی دینامیکی ایمن از خودرو راهنما) خارج و از مرجع دور کند، کنترل‌کننده هوشمند به خوبی سیستم را به حالت تعادل پایدار و خروجی را به مرجع آن باز می‌گرداند. در تمامی مدت زمان آزمایش نویز سفید نیز بر خروجی تأثیر می‌گذارد که کنترل‌کننده هوشمند به راحتی تأثیر آن بر خروجی را فیلتر می‌کند.



شکل ۱۲- خروجی سیستم کنترلی هوشمند در شرایط وجود نویز سفید و اغتشاشات ناگهانی:

(الف) ورودی ضربه، (ب) ورودی پله، (ج) ورودی شیب

## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم کنترلی هوشمند مبتنی بر سیستم پیش‌بین فازی برای رفتار تعقیب خودرو ارائه گردید. تفاوت این سیستم کنترلی با سیستم‌های موجود اینست که علاوه بر تأمین شرایط ایمن در رانندگی، حفظ آزادی عمل و لذت رانندگی راننده در کنترل خودرو را نیز فراهم می‌کند. در طراحی این سیستم از ایده محاسبه تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو استفاده شده است. این سیستم کنترلی با توجه به اطلاعات ورودی به پیش‌بینی رفتار راننده خودرو راهنما می‌پردازد و همچنین رفتار راننده خودرو تعقیب‌گر را با توجه



به رفتار آن برای تأمین ایمنی بررسی می‌کند و در نهایت دستور کنترلی که با مرجع حفظ فاصله ایمن سازگار باشد را اعمال می‌کند. بررسی عملکرد سیستم کنترلی هوشمند که بصورت راننده در حلقه انجام شده است، با استفاده از شبیه‌ساز رانندگی آساران صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که عملکرد سیستم کنترلی طراحی شده با توجه به اهداف تعیین شده می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی، دقت و عملکرد بسیار خوب سیستم کنترلی هوشمند طراحی شده را در دستیابی به اهداف کنترلی و کاهش خطا نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که، این کنترل‌کننده دارای سه ویژگی تأمین آزادی عمل راننده و لذت رانندگی، تأمین امنیت خودرو در شرایط غیرایمن، و پایداری کلی خودرو با توجه به شاخصه‌ها و معیارهای تعریف شده در رفتارهای رانندگی است. همچنین نشان داده شده است که کنترل‌کننده هوشمند طراحی شده قادر است در صورت رخ دادن اغتشاش ناگهانی و در نتیجه دور شدن خودرو از مرجع که همان فاصله ایمن می‌باشد، آن را سریعاً به مرجع بازگردانده و فاصله ایمن را دوباره حفظ کند. این سیستم کنترلی به عنوان یک سیستم همیار راننده، علاوه بر آزادی عمل راننده و لذت رانندگی، ایمنی سرنشینان را نیز فراهم می‌آورد. از این سیستم کنترلی می‌توان برای بهبود عملکرد سیستم‌های کنترلی موجود و همچنین بررسی رفتار راننده در حفظ فاصله ایمن استفاده کرد.

## مراجع

- [1] Andreasson, X., and Ma, I., "Behavior Measurement, Analysis, and Regime Classification in Car Following", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 144–155, (2007).
- [2] Lieu, H., "A Roadmap for the Research, Development, and Deployment of Traffic Estimation and Prediction Systems for Real-time and Offline Applications (TrEPS, TrEPS-P)", Federal Highway Administration, USDOT: 35, (2003).
- [3] Zhang, H. M., and Kim, T., "A Car-Following Theory for Multiphase Vehicular Traffic Flow", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 39, No. 5, pp. 385–399, (2005).
- [4] Khodayari, A., Ghaffari, A., Kazemi, R., and Brauningl, R., "A Modified Car-following Model Based on a Neural Network Model of the Human Driver Effects", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A -Systems and Humans (ISI), Vol. 99, pp. 1440-1449, (2012).
- [5] Baskar, L. D., De Schutter, B., and Hellendoorn, H., "Model Based Predictive Traffic Control for Intelligent Vehicles: Dynamic Speed Limits and Dynamic Lane Allocation", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven University of Technology, pp.174-179, (2008).
- [6] خدایاری، علیرضا، "طراحی سیستم کنترل هوشمند تعقیب خودرو مبتنی بر تأخیر لحظه‌ای رفتار راننده و خودرو"، رساله دکتری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، تابستان (۱۳۹۱).

- [7] Maciejowski, J. M., “*Predictive Control with Constraints*”, Prentice Hall, Harlow, England, (2002).
- [8] Camacho, E.F., and Bordons, C., “*Model Predictive Control*”, Springer, London, (2004).
- [9] Ma, X., and Andreasson, I., “Driver Reaction Time Estimation from Real Car Following Data and Application in GM-Type Model Evaluation”, The 85th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., (2006).
- [10] Khodayari, A., Ghaffari, A., Kazemi, R., and Manavizadeh, N., “ANFIS Based Modeling and Prediction Car Following Behavior in Real Traffic Flow Based on Instantaneous Reaction Delay”, 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Portugal, pp. 599-604, (2010).
- [11] Khodayari, A., Ghaffari, A., Kazemi, R., and Braunstingl, R., “Modify Car Following Model by Human Effects Based on Locally Linear Neuro Fuzzy”, 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2011), Germany, Baden-Baden, pp. 661-666, (2011).
- [۱۲] خدایاری، علیرضا، غفاری، علی، کاظمی، رضا، "طراحی یک سیستم فازی عصبی تطبیقی مبتنی بر ایده تأخیر لحظه‌ای راننده و خودرو برای تخمین و پیش‌بینی فرآیند تعقیب خودرو در جریان ترافیک"، هجدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۹).
- [13] Petrov, M., Ahmed, S., Ichtev, A., and Taneva, A., “Fuzzy–Neural Model Predictive Control of Multivariable Processes”, *Advanced Model Predictive Control*, Publisher: in Tech, [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com), (2011).
- [14] Pipes, L. A., “An Operational Analysis of Traffic Dynamics”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 3, pp. 274-281, (1953).
- [15] Ghaffari, A., Khodayari, A., Nouri, M., Salehinia, S., and Alimardani, F., “Model Predictive Control System Design for Car-following Behavior in Real Traffic Flow”, *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Turkey, Istanbul, pp.87-92, (2012).
- [16] US Department of Transportation, “NGSIM – Next Generation Simulation,” <http://www.ngsim.fhwa.dot.gov>, (2009).
- [17] Federal Highway Administration website, Lankershim Boulevard Dataset: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/07029/index.cfm>, (2009).
- [18] Thiemann, C., Treiber, M., and Kesting, A., “Estimating Acceleration and Lane-changing Dynamics Based on NGSIM Trajectory Data”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2088, pp. 90-101, (2008).
- [19] Ghaffari, A., Khodayari, A., Alimardani, F., and Sadati, H., “ANFIS Based Modeling for Overtaking Maneuver Trajectory in Motorcycles and Autos”, *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2011)*, Malaysia, Penang, pp. 68–73, (2011).

[20] Palumbo, G., and Pennisi, S., “*Feedback Amplifiers-Theory and Design*”, Springer, New York, (2003).

[21] Ogata, K., “*Modern Control Engineering*”, Prentice Hall, USA, (2010).

**Abstract**

Due to the increasing demand for traveling in public transportation systems and increasing traffic of vehicles, nowadays vehicles are getting to be intelligent to increase safety, reduce the probability of accident and also financial costs. Therefore, today, most vehicles are equipped with multiple safety control and vehicle navigation systems. But one of the main drawbacks of these control systems is that they are operating as on-off. Therefore the vehicle navigated either by driver or the control system. In this paper a car following integrated control (IC) system is presented that will provide vehicle safety along with freedom of action for the driver and will avoid unsafe condition and instability of the vehicle. This system was developed using a fuzzy model predictive control and used to simulate and predict the future behavior of a Driver-Vehicle-Unit (DVU). For experimental evaluation, the IC system was used along with a human driver in a driving simulator. The results showed that the IC system has better performance in keeping the safe distance in comparison with real human driver and also it can provide driver's relative freedom in driving the vehicle.