



Modeling of Driver Behavior in Complicated Traffic Conditions by Combining Psychological Theories and Automotive Control Techniques

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mozaffari H.^{*1} MSc,

Nahvi A.² PhD

How to cite this article

Mozaffari H, Nahvi A. Modeling of Driver Behavior in Complicated Traffic Conditions by Combining Psychological Theories and Automotive Control Techniques. Modares Journal of Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):63-74.

ABSTRACT

Regarding the growing development of traffic perception systems, advanced driver assistance systems play a significant role in improving automotive safety. They should be able to guide intelligent vehicles through complicated driving scenarios. The complex nature of the driving process results in complicated control engineering methods. Modeling driver behavior based on psychological concepts would simplify the driving logic and human-machine interaction. In this research, psychological concepts and tire force limitations are formulated based on vehicle kinematics and kinetics as a function of speed and curvature. A multi-objective cost function is defined based on psychological concepts and tire force limits. The speed and the curvature, at which the cost function is minimal, are selected as the decided values. Saturated proportional controllers set the vehicle speed and path curvature on the decided values by adjusting the steering angle of the front wheels, accelerator pedal position, and brake force. The model performance is evaluated by a complicated driving scenario, which includes travelling in the same and opposite directions, presence of obstacles with different sizes and speeds, and high curvature paths. The model avoids face-to-face collisions with a time-to-collision close to 0.72 s. Also, it can avoid obstacles in tight spaces as narrow as 30 cm. Simulation results indicate that the proposed driver model performs safely at the presence of moving obstacles and tight spaces.

Keywords Advanced Driver Assistance System; Driver Behavior Model; Persian Gulf; Multi-objective Driver Decision Making

¹Dynamics & Pulsation Control Department, Mechanical Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Dynamics & Pulsation Control Department, Mechanical Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Postal Code: 19919433344

Phone: -

Fax: -

mozaffari.ha@email.kntu.ac.ir

Article History

Received: July 13, 2018

Accepted: August 29, 2018

ePublished: January 1, 2019

CITATION LINKS

[1] Design of self-learning fuzzy based driver model [2] Trajectory planning and integrated control with the Nonlinear Bicycle Model for high-speed autonomous lane change [3] A rule-based neural network approach to model driver naturalistic behavior in traffic [4] Applying time-to-collision to enhance the coefficient of determination for GHR Car-Following Model in Deceleration Mode [5] Robust control design for active driver assistance systems: A linear-parameter-varying approach [6] A flexible hierarchical control method for optimal collision avoidance. Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014 [7] Autonomous collision avoidance system by combined control of steering and braking using geometrically optimized vehicular trajectory [8] Collision-free navigation and control for autonomous vehicle in complex urban environments [9] Study on potential field based motion planning and control for automated vehicle collision avoidance systems. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) [10] Towards a general theory of driver behaviour [11] Target risk: Dealing with the danger of death, disease and damage in everyday decisions [12] A theoretical field-analysis of automobile-driving [13] Modeling the orderliness of human action. In: Sarter NB, Amalberti R, Amalberti R, Sarter N. Cognitive engineering in the aviation domain [14] A Motivational driver steering model: Task difficulty homeostasis from control theory perspective [15] The magic formula tire model. Vehicle System Dynamics [16] Simulation of vehicle roll control in a driving simulator

مدل‌سازی رفتار راننده برای هدایت خودرو در شرایط پیچیده ترافیکی با تلفیق تئوری‌های روان‌شناسی و تکنیک‌های کنترل خودرو

حامد مظفری * MSc

گروه مهندسی مکانیک دینامیک و کنترل، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علی نحوی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

چکیده

با توجه به توسعه روزافزون سامانه‌های ادراک محیط ترافیکی، سامانه‌های کمک به راننده پیشرفته نقش مهمی در بهبود ایمنی خودروها ایفا خواهند کرد. این سامانه‌ها با ادراک شرایط ترافیکی باید بتوانند خودرو را در سناریوهای پیچیده هدایت کنند. از آنجا که رانندگی فرآیندی پیچیده است، سامانه‌های کنترلی توسعه‌یافته با روش‌های متداول مهندسی با پیچیدگی ساختاری روبه‌رو هستند. مدل‌سازی رفتار راننده بر مبنای مفاهیم روان‌شناسی می‌تواند به ساده‌کردن سیستم هدایت و تعامل بهتر آن با راننده منجر شود. در پژوهش حاضر، مفاهیم روان‌شناسی و محدودیت‌های نیرویی تایرها به کمک سینماتیک و سینتیک حرکت خودرو بر حسب انحنا، مسیر و سرعت، فرمول‌بندی می‌شود. با تعریف تابع هزینه چندمنظوره براساس مفاهیم مذکور، انحنا، مسیر و سرعتی که تابع هزینه را کمینه می‌کند به‌عنوان تصمیم انتخاب می‌شوند. در نهایت کنترل‌گرهای تناسبی اشباع‌شده به‌وسیله کنترل زاویه فرمان چرخ‌های جلو، موقعیت پدال گاز و نیروی ترمز، انحنا، مسیر و سرعت خودرو را بر مقدار انحنا، مسیر و سرعت تصمیم تنظیم می‌کنند. مدل مذکور، در یک سناریوی پیچیده رانندگی شامل حرکت هم‌جهت و رو در رو، موانع با ابعاد مختلف، موانع با سرعت‌های مختلف و حرکت در پیچ تند مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مدل توانست در اجتناب از برخورد رو در رو با زمان برخورد ۷۲٪ ثانیه موفق عمل نماید. همچنین در فضای محدود با فاصله ۳۰ سانتی‌متر با موانع اطراف، خودرو را به‌صورت دقیق هدایت نماید. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که مدل در سناریوی پیچیده دارای موانع متحرک و فواصل کم‌ایمن رفتار می‌کند.

کلیدواژه‌ها: سامانه‌های کمک به راننده پیشرفته، مدل‌سازی رفتار راننده، تصمیم‌سازی چندمنظوره در رانندگی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۷

*نویسنده مسئول: mozaffari.ha@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

توسعه سامانه‌های کمک به راننده از مهم‌ترین مقولات در آینده نزدیک صنعت خودرو است. توسعه سامانه‌های کمک به راننده به دو حوزه بینایی جاده و سیستم هدایت خودرو تقسیم می‌شود. در حوزه اول، سامانه‌های بینایی جاده متعددی با دقت بالا توسط شرکت‌های بزرگ خودروسازی و انفورماتیک نظیر تسلا، انویدیا، گوگل و بنز ارایه شده، اما توسعه سیستم هدایت خودرو همچنان با مشکلات پیچیده‌ای روبه‌رو است.

رانندگی یک رفتار پیچیده اجتماعی بوده و بهتر است جنبه‌های انسانی در طراحی سامانه‌های هوشمند تعاملی با انسان در نظر گرفته شود. اکثر سامانه‌های هدایت هوشمند بر پایه مهندسی کنترل و دینامیک خودرو طراحی شده‌اند که شباهت کافی با ماهیت انسانی ندارند. به‌علاوه در سناریوهای پیچیده ترافیکی به‌علت تعدد سیگنال‌های اندازه‌گیری و پیچیدگی تصمیم‌سازی، سامانه‌های هدایت دارای پیچیدگی زیادی خواهند بود و در نتیجه اکثر سامانه‌های هوشمند دارای عملکرد محدود هستند. مدل‌های روان‌شناسی ارایه‌شده از رانندگی به‌علت نگاه جامع‌تر به رفتار انسان در شرایط ترافیکی متنوع‌تری قابل استفاده هستند، ولی نمی‌توانند

دینامیک خودرو را با دقت مطلوبی کنترل کنند. مدل‌های مبنای انسانی بیشتر جنبه مطالعاتی دارند و تاکنون در سامانه‌های کمک به راننده به‌عنوان راننده استفاده نشده‌اند. ایجاد یک مدل راننده تلفیقی از روان‌شناسی و مهندسی می‌تواند سه مزیت عمده داشته باشد. این مدل می‌تواند رفتار جامعی ارایه نماید و در شرایط پیچیده مشابه با انسان تصمیم بگیرد. همچنین به‌علت به‌کارگیری تکنیک‌های مهندسی خودرو، کنترل دقیقی بر رفتار دینامیک خودرو داشته باشد. از طرفی چون اساس مدل بر مبنای رفتار انسان است، تعامل این سیستم با راننده انسانی پیچیدگی کمتری خواهد داشت و از فرمول‌بندی ریاضیاتی ساده‌تری استفاده می‌کند.

تاکنون سامانه‌های هدایت خودرو بر مبنای فاز [1, 2]، شبکه‌های عصبی [3]، مدل تعقیب خودرو [4]، کنترل مقاوم [5]، کنترل بهینه [6]، مودل‌غزشی [8] و میدان پتانسیل [9] برای هدایت هوشمند خودرو ارایه شده است. همان‌طور که بیان شد، اکثریت این سامانه‌ها جامع نیستند و فرمولاسیون پیچیده محاسباتی آنها با ساختار رفتاری انسان در رانندگی سازگاری ندارد. از طرفی دیگر مدل‌های روان‌شناسی نظیر مدل انگیزشی [10, 11]، حاشیه ایمنی [12] و کنترل شناختی [13] برای توصیف رفتار رانندگان ارایه شده است و فاقد فرمول‌بندی محاسباتی هستند که بتواند دینامیک خودرو را کنترل کند.

در پژوهش حاضر، مدل بین‌رشته‌ای از رانندگی بر مبنای تئوری‌های روان‌شناسی، تحلیل سینماتیک و سینتیک از حرکت خودرو و کنترل‌گرهای تناسبی ارایه شده است. این مدل براساس تئوری‌های روان‌شناسی ترافیک، انگیزش‌های راننده انسانی را تعیین می‌نماید. انگیزش‌های رانندگی براساس مفاهیم زمانی و سینماتیک حرکت خودرو برای تصمیمات مختلف راننده (سرعت و انحنا، مسیر) تخمین زده می‌شوند. در نهایت براساس بهینه‌سازی چندمنظوره، تصمیم بهینه (سرعت و انحنا، مسیر بهینه) تعیین می‌شود. تصمیم حاصله توسط کنترل‌گرهای متداول اعمال می‌شوند. مدل ارایه‌شده در سناریوهای پیچیده عملکرد مطلوبی دارد. در فصل نتایج، این عملکرد برای یک سناریوی پیچیده شامل جاده با پیچ تند و موانع متحرک با جهت حرکت موافق و رودرو ارایه شده است. نتایج نشان داده است که مدل به‌صورت پیوسته و بدون استفاده از جدول قاعده، تغییر لاین می‌دهد و فضاهای خالی را انتخاب می‌کند. این مدل می‌تواند رویکرد تازه‌ای را از تحلیل عددی بر رفتار هیجانی رانندگان ارایه کند.

۲- ماهیت انگیزش‌های رانندگی براساس مبنای روان‌شناسی

نمی‌توان همه جنبه‌های رفتار انسانی و اجتماعی رانندگی را در مدل‌سازی رفتار راننده در نظر گرفت، ولی آن چه در سامانه‌های کمک به راننده اهمیت دارد، رفتارهای پایه‌ای راننده برای انجام وظیفه رانندگی است. وظیفه رانندگی در این پژوهش عبارت از کنترل سرعت و انحنا، مسیر خودرو به کمک فرمان، گاز و ترمز است به‌گونه‌ای که خودرو با موانع برخورد نکند، از کنترل خارج نشود و با در نظر گرفتن میزان منطقی از احتمال بروز اتفاق ناخواسته بتواند در زمان کوتاه‌تر و صرف فعالیت کمتر به مقصد برسد. مطابق با این تعریف، برخی از تئوری‌های روان‌شناسی ترافیک تلاش نموده‌اند تا معیارهای ادراکی راننده را در مسیر انجام وظیفه رانندگی تشریح نمایند. در این راستا مدل انگیزشی [10]، مدل حاشیه امنیت [12] و مدل شناختی کنترلی راننده [13] نکات قابل توجهی را از جنبه‌های مختلف رفتاری راننده ارایه نموده‌اند.

براساس مدل انگیزشی با عنوان "متعادل‌سازی دشواری وظیفه"،

زده شوند و با استفاده از بهینه‌سازی تصمیم با بهترین انگیزش به‌عنوان دستور برای اقدام انتخاب شود.

۳- مدل‌سازی انگیزش‌های رانندگی

۳-۱- تقاضای وظیفه

مدل‌سازی مفهوم تقاضای وظیفه به‌صورت محاسباتی، نیازمند تعیین متغیر قابل اندازه‌گیری از شرایط ترافیکی است. تئوری "متعادل‌سازی دشواری وظیفه" برای بررسی رفتار رانندگان در انتخاب سرعت در رانندگی مطرح شد. در این تئوری، مکانیزم رفتاری راننده مطرح شده است. راننده برای تصمیم‌گیری براساس پیچیدگی شرایط، نیاز به زمان برای پردازش اطلاعات دارد. اگر شرایط ترافیکی پیچیده شود، راننده زمان بیشتری برای پردازش اطلاعات احتیاج دارد، لذا با کاهش سرعت، زمان برخورد را طولانی‌تر می‌نماید و زمان قابل استفاده برای تصمیم‌سازی را افزایش می‌دهد. لذا نقش شرایط در تخمین تقاضای مورد نیاز به زمان برخورد، رابطه عکس دارد. هر چه زمان برخورد کمتر باشد، راننده به قابلیت بیشتری برای تصمیم‌سازی و پردازش اطلاعات احتیاج دارد. لذا زمان برخورد در صورت انتخاب تصمیم، مشخص می‌کند که بایستی راننده چه میزان سریع عمل کند [10]. به‌صورت منطقی تقاضای وظیفه برای هر تصمیم با زمان برخورد آن تصمیم با رابطه معکوس به‌صورت زیر قابل تخمین است:

$$D(K_{dec}, v_{dec}) = \frac{1}{TTC(K, v)} \quad (1)$$

در رابطه فوق D مقدار تقاضای وظیفه و TTC زمان برخورد برای هر تصمیم شامل انحنای مسیر (K) و سرعت (v) است. زمان برخورد به کمک تخمین مرتبه اول به‌صورت رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$TTC(K_{dec}, v_{dec}) = \frac{S(K, v)}{\dot{S}(K, v)} \quad (2)$$

که S فاصله بین دو نقطه برخورد و $\dot{S}$ سرعت تغییرات آن است، بنابراین برای تعیین زمان برخورد، بایستی نقاط برخورد برای هر زوج پارامتر تصمیم (K, v) تعیین شوند. بدین منظور از الگوریتم ابداع‌شده [14] استفاده می‌شود.

نقاط برخورد بر لبه جاده براساس مسیر پیش‌بینی‌شده خودرو تعیین می‌شود. خودرو حول مرکز آنی دوران که برای هر سرعت تصمیم و انحنای مسیر تعیین می‌شود، دوران می‌کند. مرکز آنی دوران به فاصله شعاعی ($1/K$) و در جهت سرعت مرکز جرم که با زاویه لغزش جانبی β مشخص می‌شود، مطابق با نقطه O در شکل ۱ به دست می‌آید. مسیر نقاط گوشه‌ای خودرو به‌وسیله چهار دایره با مرکزیت نقطه O تعیین می‌شود. طلاق این دواير با حاشیه جاده نقاط احتمالی برخورد مانند نقطه C است. زاویه لغزش جانبی β در بخش ۳-۴ تعیین خواهد شد.

برای موانع متحرک، نقاط برخورد براساس مسیر موازی با سرعت نسبی تعیین می‌شود. چهار خط موازی با سرعت نسبی مانع و نقطه گوشه خودرو مانند خط C_1C_2 در شکل ۲ ترسیم می‌شوند. طلاق این خطوط و اضلاع مستطیل، مانع زوج نقاط برخورد مانند C_1 و C_2 در شکل ۲ را تعیین می‌کنند. الگوریتم دوباره برای گوشه‌های مانع تکرار می‌شود. چهار خط موازی با سرعت نسبی از گوشه‌های مانع ترسیم می‌شوند. نقطه برخورد این خطوط و اضلاع خودرو نیز نقاط احتمالی برخورد هستند. نقطه احتمالی برخوردی که کمترین زمان برخورد را داشته باشد، به‌عنوان نقطه برخورد برای پارامترهای تصمیم شامل انحنای مسیر (K) و سرعت (v) در نظر گرفته می‌شود.

عامل انگیزشی دشواری وظیفه مبنای رفتار راننده در اجتناب از تصادم است. به عبارت دیگر، راننده به‌گونه‌ای تصمیم می‌گیرد که عامل انگیزشی دشواری اجتناب از برخورد در محدوده مورد انتظار قرار گرفته و متعادل باشد. در تعریف دشواری وظیفه، دو مفهوم تقاضای وظیفه و قابلیت راننده مطرح شده است. تقاضای وظیفه میزان عملکرد یا کارایی مورد نیاز انجام وظیفه با توجه به شرایط ترافیکی بوده و قابلیت راننده، میزان کارایی وی است [10]. از مقایسه قابلیت راننده و تقاضای وظیفه، میزان دشواری وظیفه حاصل می‌شود. طبق مفهوم هموستاسیس بایستی به‌گونه‌ای تصمیم‌گیری صورت گیرد که در فرآیند رانندگی، تعادلی بین میزان تقاضای وظیفه و قابلیت برقرار باشد. در رانندگی اغلب با افزایش سرعت، قابلیت راننده در تغییر جهت و کنترل خودرو کم می‌شود. از طرفی دیگر تقاضای وظیفه اجتناب از برخورد افزایش یافته است. راننده تمایل دارد تا با سرعت بیشتر حرکت کند، اما نباید قابلیت خود را بیش از مقدار مورد تقاضا کاهش دهد. این قیاس که منجر به تعادل هموستاسیس می‌شود، سرعت خودرو را متناسب با وخامت شرایط ترافیکی تعیین می‌کند.

مدل "شناختی کنترلی" انگیزش اجراپذیری را به معیارهای رفتاری اضافه می‌کند. براساس این مدل، راننده زمان لازم برای ادراک، تصمیم‌سازی و اقدام را تخمین می‌زند و آن را با زمان قابل مصرف مقایسه می‌کند. از این قیاس زمانی، معیاری با عنوان اجراپذیری استخراج می‌شود. اگر زمان مورد نیاز از زمان قابل مصرف بیشتر باشد، امکان اجرای تصمیم وجود ندارد.

در مدل حاشیه ایمنی، اتفاقات ناخواسته و عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته است. حتی اگر یک تصمیم اجراپذیر باشد و وظیفه رانندگی را با شرایط دشوار روبه‌رو نکند، بایستی در حضور حرکات ناگهانی دیگر نظیر موانع و اتفاقات محتمل نیز اجراپذیر باشد. در این مدل پیامد تصمیم در حوزه مکان- زمان سنجیده می‌شود. همچنین شرایط مرزهای ناایمن تعیین می‌شوند. طبق نگرش این تئوری، راننده تلاش دارد تا شرایط حاصل از تصمیم در حوزه مکان- زمان، از مرزهای ناایمن فاصله داشته باشد. طبق این تئوری تصمیمی با حاشیه ایمنی بالاتر نسبت به تصمیمات دیگر می‌تواند ارجحیت انتخاب داشته باشد.

طبق تعریف، وظیفه رانندگی شامل اجتناب از برخورد، صرف فعالیت کمتر، درنظرگرفتن اتفاقات ناخواسته و صرفه‌جویی در زمان است. دشواری وظیفه اثر افزایش سرعت بر دشوارشدن رانندگی را تخمین می‌زند. لذا با هر دو فاکتور صرفه‌جویی در زمان و اجتناب از برخورد با موانع را پوشش می‌دهد. اجراپذیری دو بُعد دارد. اول آن که آیا تصمیم حاصله با توجه به محدودیت‌های نیرویی تأیر قابل دستیابی است. ثانیاً آیا زمان انجام تصمیم از زمان قابل مصرف کمتر است. این ملاک دو بُعد اجراپذیری و کنترل نیروی جانبی خودرو را پوشش می‌دهد. حاشیه ایمنی، اتفاقات ناخواسته را در نظر می‌گیرد و تصمیماتی را در ارجحیت قرار می‌دهد که از مرزهای ناایمن فاصله دارند، لذا یک تصمیم توسط پنج انگیزش شامل موارد زیر ارزیابی می‌شود:

۱- تقاضای وظیفه برای اجتناب از برخورد در هر تصمیم

۲- میزان قابلیت راننده در هر تصمیم

۳- میزان اجراپذیری هر تصمیم

۴- محدودیت نیرویی تأیرها برای اجرای تصمیم

۵- حاشیه ایمنی هر تصمیم

در واقع معیارهای فوق انگیزش‌های تصمیم‌گیری راننده هستند. این انگیزش‌ها بایستی برای تمامی تصمیم‌های قابل اقدام تخمین

قابلیت C به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_{m,n} = \frac{1}{TTA_{m,n}} \quad (۴)$$

زمان اجتناب از برخورد شامل زمان تاخیر راننده و زمان ترمزگیری خودرو برای اجتناب از برخورد در جهت مشخص است. زمان تاخیر راننده τ_d در واقع زمانی است که راننده برای ادراک، تصمیم گیری و اقدام تلف می کند. زمان ترمزگیری خودرو t_b زمانی است که خودرو با توجه به مشخصات سیستم ترمز احتیاج دارد تا سرعت نسبی بین مانع و خودرو را به صفر برساند. زمان اجتناب از برخورد (TTA) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$TTA_{m,n} = \tau_d + t_b(V_n^0, v_m) \quad (۵)$$

در رابطه فوق V_n^0 سرعت مانعی است که خودرو در مسیر حرکت متناظر با انحنای κ_n با آن برخورد می کند. زمان تاخیر راننده τ_d از پارامترهای انسانی مدل بوده و زمان ترمزگیری خودرو با به کارگیری قانون دوم نیوتن بر حرکت طولی خودرو قابل تخمین است.

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{T_b}{R} - C_d v^2 + mg \sin \theta \quad (۶)$$

که در آن m جرم خودرو، T_b بیشترین گشتاور ترمزی موثر، شعاع چرخ، C_d ضریب درگ آئرو دینامیک، g شتاب گرانش زمین و θ زاویه شیب رو به پایین جاده است (اگر جاده شیب رو به بالا داشته باشد، θ منفی خواهد بود). زمان ترمزگیری خودرو با انتگرال گیری به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$t_b(V_n^0, v_m) = \int_{v_m}^{V_n^0} \frac{mR}{-T_b - C_d R v^2 + mg R \sin \theta} dv \quad (۷)$$

۳-۳-۱- اجراپذیری

اگر تصمیم اتخاذ شده شامل جهت گیری و سرعت از جهت گیری و سرعت کنونی خودرو فاصله داشته باشد و زمان موجود برای اجرای تصمیم کم باشد، تصمیم امکان اجرا ندارد. میزان اجراپذیری از مقایسه زمان اجرای تصمیم (AT) به زمان قابل استفاده (UT) تخمین زده می شود [13]. حداقل زمان اجرا به زمان شتاب گیری (t_a) از سرعت کنونی (v^k) به سرعت تصمیم (v_m) یا زمان ترمزگیری (t_b) از سرعت کنونی (v^k) به سرعت تصمیم (v_m)، زمان چرخش فرمان (t_s) از انحنای کنونی (κ^k) به انحنای تصمیم (κ_n) و تاخیر راننده (τ_d) به صورت زیر قابل تخمین است:

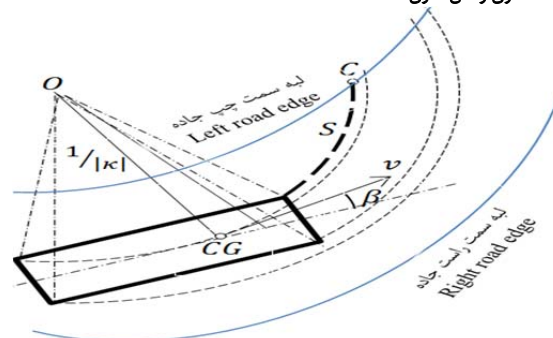
$$AT_{m,n} = \max(t_b(v^k, v_m), t_a(v^k, v_m), t_s(\delta^k, \delta_{m,n})) + \tau_d \quad (۸)$$

مشابه با رابطه ۷ زمان شتاب گیری به صورت زیر قابل تخمین است:

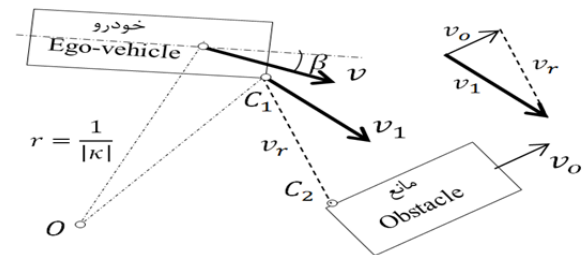
$$t_a(v^k, v_m) = \int_{v^k}^{v_m} \frac{mR}{T_t - C_d R v^2 + mg R \sin \theta} dv \quad (۹)$$

که در آن T_t بیشینه گشتاور پیشران خودرو است که با قدرت موتور و مشخصات گیربکس و دیفرانسیل خودرو ارتباط دارد. تغییر انحنای مسیر با چرخاندن گرینک فرمان صورت می گیرد، لذا زمان تغییر انحنای مسیر با قابلیت راننده در سرعت چرخش فرمان ارتباط دارد. در بخش ۳-۴، نحوه محاسبه زاویه فرمان لازم برای هر انحنای مسیر و سرعت $\delta_{n,m}$ تشریح شده است. براساس حداکثر سرعت چرخش فرمان توسط راننده (δ_{max})، زمان چرخش فرمان به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$t_s(\delta^k, \delta_{n,m}) = \frac{|\delta_{n,m} - \delta^k|}{\delta_{max}} \quad (۱۰)$$



شکل ۱) هندسه جاده و خودرو برای تعیین نقاط برخورد مرکز آبی دوران و نقاط احتمالی برخورد به ترتیب با O و C مشخص شده اند.

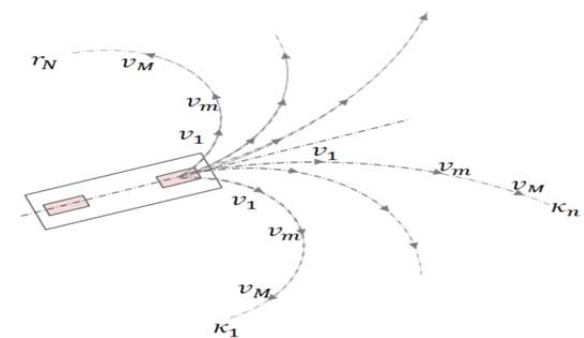


شکل ۲) هندسه خودرو و مانع متحرک بعضی از نقاط احتمالی برخورد با علامت C₂ و C₁ نشان گذاری شده اند.

همان طور که مشاهده می شود، روش تعیین نقاط برخورد، یک الگوریتم گسسته است. بدین منظور برای تخمین میدان دوبعدی زمان برخورد در رابطه ۲، بایستی گسسته سازی صورت گیرد. پارامتر انحنای مسیر با N نقطه و پارامتر سرعت با M نقطه مطابق با شکل گسسته سازی می شود. بدیهی است تابع دومتغیره تقاضای وظیفه به صورت عددی با یک ماتریس دوبعدی با ابعاد (M × N) محاسبه خواهد شد. بنابراین تقاضای وظیفه به صورت گسسته مطابق با رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$D_{m,n} = \frac{1}{TTC(v_m, \kappa_n)} \quad (۳)$$

که در آن v_m نشان دهنده مولفه mام از مقادیر گسسته شده سرعت و κ_n نشان دهنده مولفه nام از مقادیر گسسته شده انحنای مسیر است.



شکل ۳) نحوه گسسته سازی انحنای مسیر و سرعت

۳-۲- قابلیت راننده

برای مدل سازی مفهوم قابلیت به منظور ساده سازی قیاس از مفهوم زمان اجتناب از برخورد (TTA) استفاده می شود. زمان اجتناب از برخورد زمانی است که در آن راننده می تواند در جهت گیری مشخص با استفاده از تنظیم سرعت از برخورد اجتناب کند [10]. بر این اساس

$$F_{m,n}^f = \begin{cases} 0 & (f_{yf_{m,n}} \leq f_{r1}) \\ k_f \left| \frac{f_{r2} - f_{yf_{m,n}}}{f_{r2} - f_{r1}} \right| & (f_{r1} < f_{yf_{m,n}} \leq f_{r2}) \\ \infty & (f_{yf_{m,n}} > f_{r2}) \end{cases} \quad (13)$$

$$F_{m,n}^r = \begin{cases} 0 & (f_{yr_{m,n}} \leq f_{r1}) \\ k_f \left| \frac{f_{r2} - f_{yr_{m,n}}}{f_{r2} - f_{r1}} \right| & (f_{r1} < f_{yr_{m,n}} \leq f_{r2}) \\ \infty & (f_{yr_{m,n}} > f_{r2}) \end{cases} \quad (14)$$

$$F_{m,n} = \max(F_{m,n}^f, F_{m,n}^r) \quad (15)$$

که در آن $f_{yf_{m,n}}$ نیروی عرضی تأثیر مربوط به مولفه m از پارامترهای انحنا و مولفه n از پارامترهای سرعت تصمیم است. برای k_f ضریب حساسیت راننده در احساس ترس از لغزش است. برای محاسبه رابطه فوق، باید مقدار نیروی تأثیر عقب و جلو برای هر سرعت و انحنا مسیر تخمین زده شود.

تخمین مقدار دقیق نیروی جانبی تأثیرها به صورت لحظه‌ای بسیار پیچیده است، اما از آنجایی که ثابت زمانی رفتار دینامیک تأثیر، کوتاه است، مقدار حالت پایایی آن دقت مورد نیاز را تأمین می‌کند. با در نظر گرفتن دیگرام آزاد نیرویی حرکت جانبی خودرو در شکل ۴، معادلات نیوتنی حرکت خودرو قابل نوشتن بوده است و نیروهای تأثیرهای عقب و جلو تخمین زده می‌شود. با صرف نظر از نیروهای طولی تأثیرها، قانون دوم نیوتن برای شتاب شعاعی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f_{yr_{m,n}} \cos \beta_{m,n} + f_{yf_{m,n}} \cos(\delta_{m,n} - \beta_{m,n}) = m_v \kappa_n v_m^2 \quad (16)$$

معادله گشتاور و شتاب گردشی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$-f_{yr_{m,n}} l_r + f_{yf_{m,n}} l_f \cos \delta_{m,n} = I \ddot{\psi} \quad (17)$$

در رابطه ۱۷، l_f و l_r به ترتیب فاصله اکسل عقب و جلوی خودرو از مرکز جرم است. اگر شرایط حالت ماندگار در جهت گیری ثابت در نظر گرفته شود، می‌توان از $\ddot{\psi}$ به صورت زیر صرف نظر کرد:

$$f_{yr_{m,n}} l_r = f_{yf_{m,n}} l_f \cos \delta_{m,n} \quad (18)$$

با جای گذاری رابطه فوق در رابطه ۱۶، مقادیر زوایای نیروی جانبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{yf_{m,n}} = \left(\frac{m_v l_r \kappa_n v_m^2}{l_f \cos \beta_{m,n} \cos \delta_{m,n} + l_r \cos(\delta_{m,n} - \beta_{m,n})} \right) \quad (19)$$

$$f_{yr_{m,n}} = \left(\frac{m_v l_f \kappa_n v_m^2 \cos \delta_{m,n}}{l_f \cos \beta_{m,n} \cos \delta_{m,n} + l_r \cos(\delta_{m,n} - \beta_{m,n})} \right) \quad (20)$$

با استفاده از معادلات خطی شده تأثیر براساس سفتی جانبی تأثیرهای عقب و جلو (C_f, C_r)، می‌توان مقادیر لغزش تأثیر را بر حسب نیرو به صورت زیر بیان نمود:

$$\lambda_{f_{m,n}} = \frac{f_{yf_{m,n}}}{C_f} \quad (21)$$

$$\lambda_{r_{m,n}} = \frac{f_{yr_{m,n}}}{C_r} \quad (22)$$

با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ و همچنین تکنیک‌های مثلثاتی در شکل ۵، مقادیر زاویه $\beta_{m,n}$ و زاویه فرمان $\delta_{m,n}$ تعیین می‌شود. ابتدا با در نظر گرفتن مثلث OBC می‌توان مقدار طول عمود بر بدنه

زمان قابل مصرف، همان زمان برخورد در لحظه کنونی به صورت زیر است:

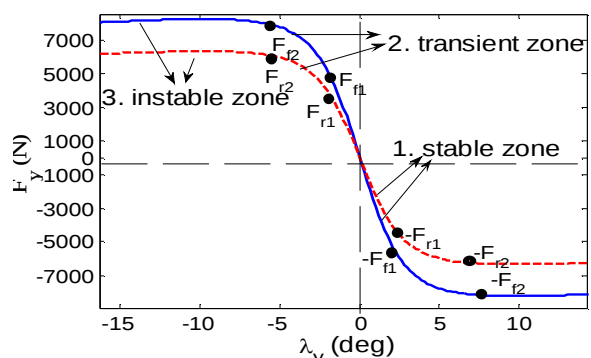
$$UT = TTC(\delta^k, v^k) \quad (11)$$

اجرائناپذیری براساس مقایسه زمان موجود و زمان اجرا به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A_{m,n} = \max(0, \frac{1}{UT} - \frac{1}{AT_{m,n}}) \quad (12)$$

۳-۴- محدودیت نیرویی تأثیرها

ترس از سُرخوردن خودرو باعث می‌شود رانندگان از انتخاب مسیر با انحنای زیاد در سرعت‌های بالا اجتناب کنند و محدودیت‌های فیزیکی خودرو در اجراپذیر بودن دستور را مد نظر قرار دهند. رفتار لغزشی تأثیر خودرو با بررسی ارتباط لغزش تأثیر و نیروی عکس‌العمل تأثیر که در نمودار ۱ نشان داده شده [15]، قابل بررسی است. براساس میزان نیروی تأثیر، رفتار تأثیر به سه ناحیه مجزا قابل تفکیک است. در ناحیه اول که در آن نیروی تأثیرهای جلو و عقب ناشی از تصمیم $f_{yf_{m,n}}, f_{yr_{m,n}}$ از نیروهای آستانه خطی تأثیرهای عقب و جلو f_{r1}, f_{r2} کمتر است، حرکت سرشی خودرو، خطی و پایدار است. در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که در ناحیه اول اگر نیروهای اینرسی بدنه خودرو باعث افزایش لغزش تأثیر شوند، نیروی عکس‌العمل تأثیر به صورت خطی بیشتر می‌شود و از بزرگ‌تر شدن لغزش تأثیر ممانعت به عمل می‌آورد، بنابراین مقدار لغزش تأثیر محدود خواهد ماند.



نمودار ۱) منحنی غیرخطی لغزش- نیروی عکس‌العمل تأثیر خودرو

در ناحیه دوم، میزان افزایش نیروی عکس‌العمل از حالت خطی خارج شده و به تدریج در حال کم شدن است. در مجاورت نیروی آستانه گذار برای تأثیرهای عقب و جلو، f_{r2}, f_{r1} این رابطه دیگر صعودی نیست و میزان افزایش نیرو نسبت به لغزش صفر است. این نقطه مرز پایداری است و در ناحیه دوم رفتار پایدار لغزش به سمت ناپایداری نزدیک می‌شود. این ناحیه را می‌توان ناحیه گذار نامید.

در ناحیه سوم، ارتباط نیروی عکس‌العمل تأثیر و لغزش نزولی بوده و افزایش لغزش تأثیر با کاهش نیروی عکس‌العمل تأثیر و شدت گرفتن میزان لغزش تأثیر همراه است. اگر لغزش تأثیرها به ناحیه سوم برسد، خودرو کاملاً سُرخورد و کنترل از دست راننده خارج می‌شود. این ناحیه، ناپایدار تلقی می‌شود که در رانندگی باید از آن اجتناب نمود. براساس نواحی سه‌گانه، ترس از سُرخوردن خودرو برای تأثیرهای عقب و جلو به صورت روابط زیر قابل تخمین بوده و احساس نهایی مدل از خطر سُرخوردن بیشینه احساس حاصله از تأثیرهای عقب و جلو است:

خودرو (r_0) را به صورت زیر تعیین نمود:

$$r_0 = \frac{1}{\kappa_n} \cos \beta \quad (23)$$

با در نظر گرفتن رابطه تانژانت زوایای راس از مثلث‌های OBD و OAB، نتیجه به صورت روابط زیر می‌شود:

$$r_0 \tan(\lambda_r) = (l_r - \Delta) \quad (24)$$

$$r_0 \tan(\delta - \lambda_f) = (l_f + \Delta) \quad (25)$$

در رابطه فوق، Δ فاصله پای عمود از نقطه مرکز دوران بر بدنه خودرو تا مرکز جرم است. با تجمیع معادلات فوق و جای‌گذاری r_0 از رابطه ۲۳ و زوایای لغزش از روابط ۲۱ و ۲۲، نتیجه به صورت رابطه زیر می‌شود:

$$\delta_{m,n} = \operatorname{atan} \left(\frac{(l_f + l_r) \kappa_n - \tan \left(\frac{f_{yrm,n}}{C_r} \right)}{\frac{f_{yrm,n}}{C_r}} \right) + \frac{f_{yrm,n}}{C_f} \quad (26)$$

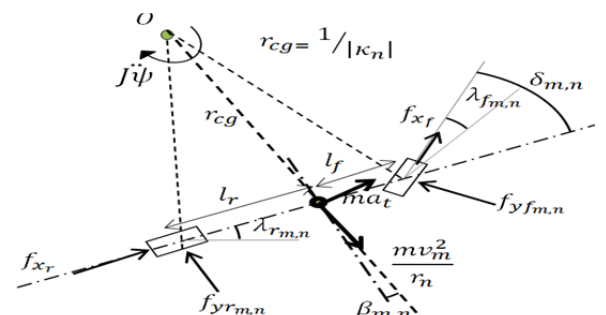
می‌توان مقدار Δ را از معادلات ۲۴ و ۲۵ به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta = \frac{r_0 (l_r \tan(\delta - \lambda_f) - l_f \tan \lambda_r)}{(l_f + l_r)} \quad (27)$$

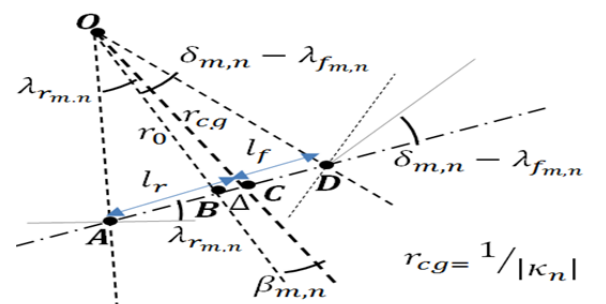
با نوشتن تانژانت زاویه رأس β از مثلث OBC و جای‌گذاری زوایای لغزش از روابط ۲۱ و ۲۲، نتیجه به صورت رابطه زیر می‌شود:

$$\beta = \operatorname{atan} \left(\frac{l_r \tan \left(\delta - \frac{f_{yrm,n}}{C_f} \right) - l_f \tan \left(\frac{f_{yrm,n}}{C_r} \right)}{(l_f + l_r)} \right) \quad (28)$$

دستگاه معادلات جبری شامل روابط ۱۹، ۲۰، ۲۶ و ۲۸ به کمک تکرار پیکارد با فرض حدس اولیه مقادیر صفر برای نیروهای تایلر قابل حل است. مقادیر $\beta_{m,n}$ برای محاسبه نقاط برخورد در بخش ۱ و ۲ قابل استفاده هستند. همچنین مقادیر $\delta_{m,n}$ برای محاسبه اجرانپذیری در بخش ۲ و ۳ برای محاسبه زمان فرمان‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴: دیاگرام آزاد نیرویی خودرو در عملکرد جانبی برای مدل دوچرخه



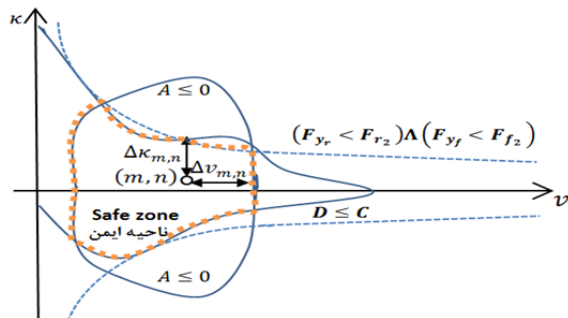
شکل ۵: هندسه خودرو در حرکت جانبی

۳-۵- حاشیه ایمنی

اگر یک تصمیم، دشواری وظیفه نداشته و اجرپذیری زمانی و فیزیکی داشته باشد، آن تصمیم ایمن است [12]، لذا شروط ایمن بودن به شرح زیر است:

- ۱- مقدار تقاضای وظیفه از قابلیت کمتر باشد.
- ۲- زمان حداقل اجرا از زمان قابل مصرف کمتر باشد.
- ۳- نیروی جانبی خودرو در ناحیه پایدار یعنی ناحیه اول و دوم باشد.

با در نظر گرفتن شروط فوق، مرز ایمن و فاصله حاشیه ایمنی برای هر تصمیم مانند آن چه در شکل ۶ نشان داده شده است، تعیین می‌شود.



شکل ۶: روش تعیین مرز ایمن و فواصل حاشیه ایمن

کوچک‌ترین فاصله عمودی از نقطه تصمیم تا مرز نایمن حاشیه ایمنی جهتی ($\Delta \kappa_{m,n}$) و کوچک‌ترین فاصله افقی از نقطه تصمیم تا مرز نایمن حاشیه ایمنی سرعت ($\Delta v_{m,n}$) بوده و مقدار حاشیه ایمن به صورت زیر قابل تخمین است:

$$S_{m,n} = 1/2 \left(\min \left(\frac{\Delta \kappa_{m,n}}{\Delta \kappa_d}, 1 \right) + \min \left(\frac{\Delta v_{m,n}}{\Delta v_d}, 1 \right) \right) \quad (29)$$

در رابطه فوق، $\Delta \kappa_d$ میزان حاشیه مورد انتظار انحنای مسیر برای راننده بوده و Δv_d میزان حاشیه مورد انتظار سرعتی برای راننده است. هر دو پارامتر از پارامترهای انسانی مدل هستند.

۴- تصمیم‌سازی

تمامی انگیزش‌های محاسبه‌شده غیر از حاشیه ایمنی، انگیزش منفی هستند، یعنی راننده میل دارد تا مقادیر کمتری از آنها مشاهده کند. لذا مساله تصمیم‌سازی با یک مساله کمینه‌سازی به صورت زیر قابل پیاده‌سازی است:

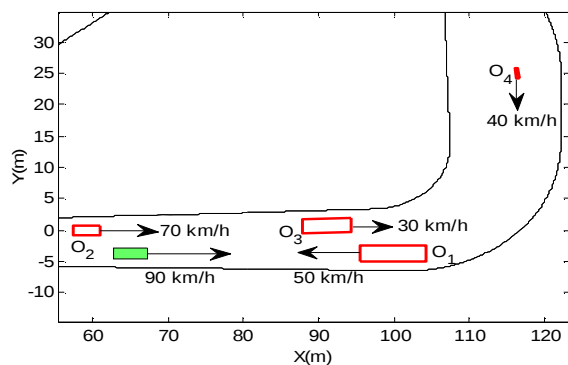
$$J_{M \times n} = D_{M \times n} + C_{M \times n} + A_{M \times n} + F_{M \times n} - S_{M \times n} \quad (30)$$

درایه‌ای از J که کمترین مقدار را دارد (m_{min}, n_{min}) انحنای تصمیم κ_{dec}^{k+1} و سرعت تصمیم v_{dec}^{k+1} را به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$\begin{aligned} \min J_{M \times n} &\rightarrow (m_{min}, n_{min}) \\ v_{dec}^{k+1} &= v_{m_{min}} \\ \kappa_{dec}^{k+1} &= \kappa_{n_{min}} \end{aligned} \quad (31)$$

پارامترهای انسانی مدل شامل تاخیر راننده (τ_d)، حداکثر سرعت چرخش فرمان توسط راننده (δ_{max})، ضریب حساسیت راننده در برابر سرخوردن (k_f)، حاشیه ایمنی جهتی مورد انتظار راننده ($\Delta \kappa_d$) و حاشیه ایمنی سرعتی مورد انتظار راننده (Δv_d) در واقع نقش وزن‌دهی به انگیزش‌ها را در تابع هزینه چندهدفه ایفا می‌کنند.

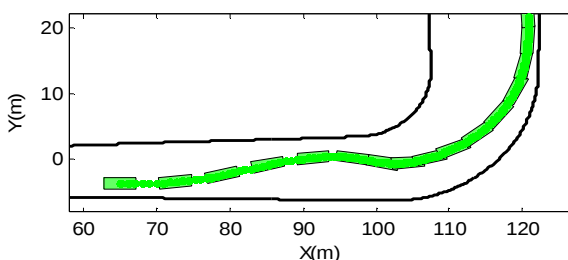
خودرو به علت سرعت کم مانع جلو و سرعت بالاتر مانع عقب یعنی مانع شماره ۲ (O_2) مجبور است به لاین مخالف دوباره تغییر جهت دهد. حین فرآیند تغییر جهت، مانع شماره ۲ از پشت سر تغییر جهت می‌دهد و مانع شماره ۲ (O_3) را پشت سر می‌گذارد. از روبرو مانع شماره ۴ (O_4) که شامل یک موتورسیکلت است، به صورت رودرو به خودروی هوشمند نزدیک می‌شود. خودرو بایستی به گونه‌ای سرعت و جهت را کنترل کند که از میان مانع شماره ۲ و مانع شماره ۴ در حالی که در پیچ تند قرار دارد، عبور کند. فاصله بین دو مانع تنها ۲m است، در حالی که عرض خودروی هوش ۱/۷m در نظر گرفته شده است، تنها ۳۰cm فاصله اضافی وجود دارد و فضا برای خودروی هوش محدود است. سپس خودرو بایستی پیچ تند را عبور کند و در مسیر مستقیم قرار گیرد تا سناریو به اتمام برسد. این سناریو شامل موانع با ابعاد مختلف، مسیرهای گوناگون، موانع با سرعت‌های متفاوت و حرکات هم‌جهت و رودرو و تغییر مسیرهای پیچیده است. در شکل ۷، شماتیک سناریو به تصویر کشیده شده است. برای شبیه‌سازی از مدل دینامیک ۱۴ درجه آزادی شامل شُرش طولی و عرضی تایرها، برای خودروی سواری پژو پارس استفاده شده است که در یک مرجع [16] صحت‌گذاری شده است.



شکل ۷) نمایی از چیدمان موانع در لحظه اول سناریوی در نظر گرفته شده برای تست

۲-۶- نتایج شبیه‌سازی و بحث و بررسی

در شکل ۸ مسیر پیموده شده توسط مدل راننده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود خودرو پس از چند تغییر جهت موضعی برای اجتناب از برخورد، نهایتاً از پیچ عبور کرده است. در شکل ۹، برای هشت زمان متفاوت، چیدمان ترافیکی خودرو در جاده نشان داده شده است. نمودارهای زاویه چرخ جلو، سرعت خودرو، شاخصه طولی کنترل سرعت، نیروهای چرخ‌های جلو و عقب به ترتیب در نمودارهای ۲-۶ نشان داده شده‌اند. در این نمودارها نقاط متناظر با سکانس‌های نمایش داده شده در شکل ۹ با نقاط پُررنگ نشان‌گذاری شده‌اند تا از مقایسه سکانس‌ها و نمودارها رفتار راننده تحلیل شود. پارامترهای انسانی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۸) مسیر طی شده در شبیه‌سازی توسط خودروی هوش

۵- کنترل

در مرحله اقدام جهت‌گیری و سرعت کنونی خودرو به کمک تنظیم زاویه فرمان، گاز و ترمز بر جهت‌گیری و سرعت تصمیم تنظیم می‌شود. در پژوهش حاضر کنترل‌گرهای متداول تناسبی مورد استفاده قرار می‌گیرد که خروجی آنها محدود می‌شود. برای کنترل سرعت ابتدا مقدار شاخص سرعت (α) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha^{k+1} = \min(\max(k_v(v_{dec}^{k+1} - v^k) + \alpha^k, -1), 1) \quad (32)$$

در رابطه فوق، k_v بهره تناسبی کنترل سرعت است. شاخص سرعت (α) در بازه $(-1, 1)$ به وسیله عملگرهای $\min$ و $\max$ محدود شده است. موقعیت پدال گاز (P_a) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$p_a^{k+1} = \begin{cases} \alpha^{k+1} & \alpha^{k+1} \geq 0 \\ 0 & \alpha^{k+1} < 0 \end{cases} \quad (33)$$

نیروی ترمزی P_b به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$p_b^{k+1} = \begin{cases} -F_{max}\alpha^{k+1} & \alpha^{k+1} \leq -0.1 \\ 0 & \alpha^{k+1} > -0.1 \end{cases} \quad (34)$$

در رابطه فوق، F_{max} نیروی حداکثر ترمزی راننده است. یک تعلل بین شتاب‌گیری و ترمزگیری قرار داده شده است، یعنی تا زمانی که شاخص سرعت از -0.1 کمتر نشود، ترمزگیری انجام نمی‌شود. این تعلل از ایجاد چترینگ ترمز و گاز در نزدیکی مقادیر نزدیک به صفر برای شاخص سرعت جلوگیری می‌کند.

کنترل‌گر تناسبی عرضی برای تنظیم زاویه چرخ‌های فرمان‌پذیر که در این پژوهش از آن به عنوان زاویه فرمان یاد می‌شود، توسعه داده می‌شود. از آنجایی که راننده نمی‌تواند فرمان را سریع‌تر از δ_{max} بچرخاند، بنابراین تغییرات زاویه فرمان در هر مرحله با فرض T_s به عنوان زمان گسسته‌سازی زمانی باید در بازه $[-T_s\delta_{max}, T_s\delta_{max}]$ محدود شود. تغییر زاویه فرمان برای لحظه کنونی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$(35)$$

$$\Delta\delta^{k+1} = \min(\max(k_s(\kappa_{dec}^{k+1} - \kappa^k), -T_s\delta_{max}), T_s\delta_{max})$$

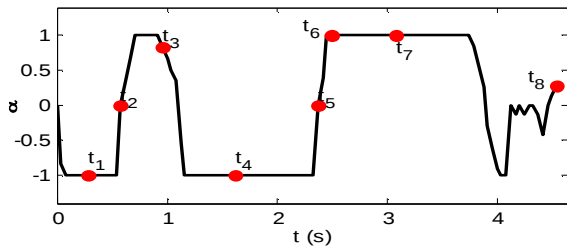
در رابطه فوق، k_s بهره تناسبی کنترل‌گر جهتی است. با محدود کردن زاویه فرمان در بازه $[-\delta_{max}, \delta_{max}]$ ، زاویه فرمان به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\delta^{k+1} = \min(\max(\delta^k + \Delta\delta^{k+1}, -\delta_{max}), \delta_{max}) \quad (36)$$

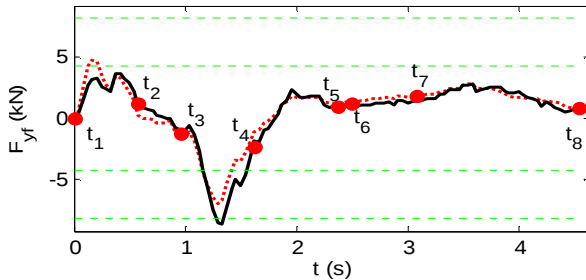
۶- ارزیابی مدل راننده در سناریوی پیچیده

۶-۱- طراحی سناریو

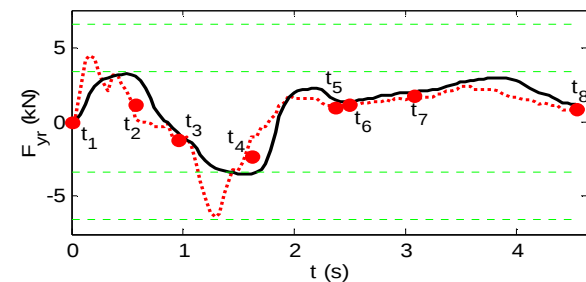
جاده سناریو از یک مسیر مستقیم با عرض متغیر و یک پیچ تند مطابق با شکل ۷ تشکیل شده است. دو مانع در لاین مخالف و دو مانع در لاین موافق قرار داده شده‌اند. ابتدا خودرو در لاین مخالف قرار دارد. مانع شماره ۱ که یک اتوبوس است، با سرعت ۵۰km/h به صورت رودرو به سمت خودرو با سرعت ۹۰km/h حرکت می‌کند. فاصله بین دو خودرو ۲۸ متر و زمان برخورد رودرو ۰/۷۲s است. در لاین موافق مانع شماره ۲ که یک خودروی سواری است، با سرعت ۷۰ km/h در حال نزدیک شدن به مانع شماره ۱ (O_1) است. در این رویداد خودرو بایستی با تنظیم سرعت و جهت، هم امکان اجتناب از برخورد با اتوبوس را فراهم کند و هم از برخورد سواری از پشت سر جلوگیری کند. در جلوی خودرو بعد از تغییر لاین، مانع شماره ۳ که یک مینی‌بوس است، با سرعت ۳۰km/h در حال حرکت است.



نمودار ۴) منحنی شاخصه کنترل طولی بر حسب زمان (مقادیر منفی نشان‌دهنده استفاده از ترمز و مثبت استفاده از گاز هستند)



نمودار ۵) منحنی مجموع نیروی جانبی تخمینی و واقعی چرخ‌های جلو بر حسب زمان (منحنی نقطه‌چین، مقدار تخمینی و منحنی با خط پیوسته، مقدار واقعی را نشان می‌دهد؛ خطوط خط‌چین، مقدار $f_{f1} = 4.3 \text{ kN}$ و $f_{f2} = 8.3 \text{ kN}$ را نشان می‌دهند)

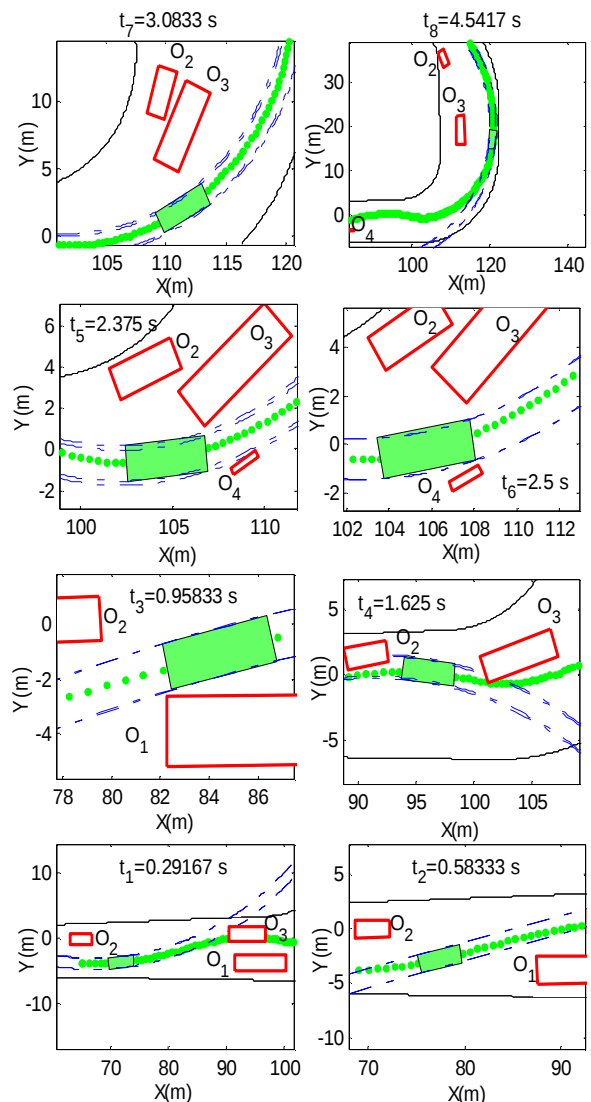


نمودار ۶) منحنی مجموع نیروی تایر تخمینی و واقعی چرخ‌های عقب بر حسب زمان (منحنی نقطه‌چین، مقدار تخمینی و منحنی با خط پیوسته، مقدار واقعی را نشان می‌دهد؛ خطوط خط‌چین مقدار $f_{r1} = 3.43 \text{ kN}$ و $f_{r2} = 6.6 \text{ kN}$ را نشان می‌دهند)

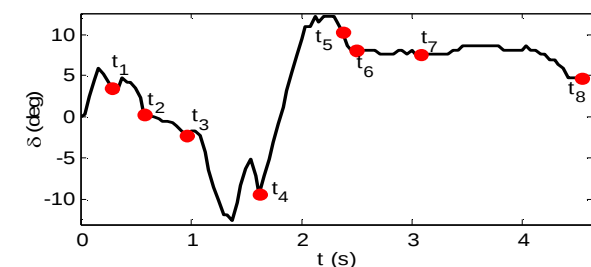
جدول ۱) پارامترهای انسانی لحاظ‌شده در شبیه‌سازی رانندگی

عنوان پارامتر	نماد	مقدار پارامتر
زمان تاخیر راننده	τ_d	۰/۲S
حداکثر سرعت چرخش فرمان	δ_{max}	۸۰۰ Deg/s
ضریب حساسیت راننده در برابر سرخوردن	k_f	۱
حاشیه ایمنی جهت مورد انتظار راننده	Δk_d	۰/۰۲m ⁻¹
حاشیه ایمنی سرعتی مورد انتظار راننده	Δv_d	۴ km/h
نیروی حداکثر ترمزی	F_{max}	۲۰۰N
بهره تناسبی کنترل سرعت	k_v	۰/۱
بهره تناسبی کنترل جهت	k_s	۱
زمان نمونه‌برداری	T_s	۱/۲۴

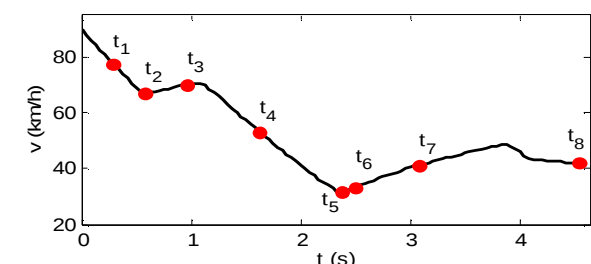
در سکانس اول $t_1=0/۲۹\text{s}$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که مانع شماره ۱ از روبه‌رو در حال نزدیک شدن به خودروی هوش است. در لاین سمت راست مانع شماره ۲ از عقب در حال حرکت است. در نمودار ۲ مشاهده می‌شود مدل ابتدا کمی چرخ‌های جلو را به سمت راست می‌چرخاند تا از برخورد رودرو با مانع شماره ۱ جلوگیری کند، اما پس از $0/۱۵\text{s}$ دوباره فرمان را برگردانده است، زیرا به علت نزدیکی با مانع شماره ۲ احتمال برخورد وجود دارد. در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که خودروی هوش اقدام به کاهش سرعت از طریق اعمال ترمزگیری نموده است. این امر باعث می‌شود تا زمان



شکل ۹) سکانس‌های شبیه‌سازی رانندگی در زمان‌های مختلف (خط‌چین نشان‌دهنده دایره آکرمن و خط نقطه مسیر حرکت خودرو است)



نمودار ۲) منحنی زاویه فرمان‌پذیر جلو، نقاط t_1 تا t_9 مطابق با سکانس‌های ترافیکی نشان‌داده‌شده در شکل ۹ (با نقاط پُررنگ نمایش داده شده‌اند)



نمودار ۳) منحنی سرعت بر حسب زمان

سمت چپ، چرخ‌های جلو را به سمت راست چرخانده است. همچنین برای اجتناب از برخورد با مانع شماره ۳ اقدام به کاهش سرعت نموده، به‌طوری که در لحظه t_5 سرعت خودرو به سرعت مانع شماره ۳ (3 km/h) رسیده است.

در سکانس $t_6=2/54S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که خودروی هوش با قرارگیری در پشت مانع شماره ۳ از برخورد با مانع شماره ۴ فرار کرده است. با عبور مانع شماره ۴ در پیچ، مدل راننده مطابق با نمودار ۴ اقدام به افزایش سرعت نموده و پدال گاز را فشرده است. مطابق با نمودار ۲ زاویه چرخ‌های جلو کمی به سمت راست در نظر گرفته شده است تا از برخورد گوشه‌های عقب با مانع شماره ۴ جلوگیری شود.

در سکانس $t_7=3/08S$ در شکل ۹ به‌علت تغییر جهت مانع شماره ۳ گوشه‌های خودروی هوش از گوشه‌های مانع فاصله گرفته است و دیگر خطری خودرو را تهدید نمی‌کند. در نمودار ۲ مدل راننده با گردش چرخ‌های جلو به سمت راست با مقدار تقریباً ثابت، قصد دارد از پیچ عبور کند. در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود به‌علت رفع خطر، مدل راننده اقدام به افزایش سرعت نموده است.

در سکانس $t_8=4/54S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که خودروی هوش به‌صورت کامل از پیچ خارج شده و سناریو بدون برخورد پایان یافته است. دایره آکرمن انتخابی مدل راننده (خط‌چین رسم‌شده) با حاشیه‌های جاده برخورد ندارد و زاویه چرخ‌های جلو برای اجتناب از برخورد با لبه‌های جاده به‌درستی تعیین شده است. از مقایسه نمودارهای ۶-۳ می‌توان فهمید که مقدار سرعت به‌گونه‌ای تنظیم شده است که مقدار نیروی جانبی از محدوده پایدار خطی خارج نشود. در نمودارهای ۵ و ۶ مشاهده می‌شود نیروی جانبی تایرها در ناحیه پایدار خطی $f_{yf} \leq f_{f1}$ و $f_{yr} \leq f_{r1}$ قرار دارد. مدل راننده با اعمال فرمان زیاد باعث سرخوردن خودرو نشده است. یکی از ابداعات پژوهش حاضر، تخمین زاویه لغزش چرخ‌های جلو با فرض دینامیک سریع تایلر است. در نمودار ۵ مشاهده می‌شود به‌علت اثرپذیری بدون واسطه شش چرخ‌های جلو از زاویه چرخ‌های جلو، دقت تخمین نیروی تایلر چرخ‌های جلو براساس تخمین حالت پایا بالا بوده، در نتیجه کارایی روش تخمین‌گر نیروی تایلر برای مدل ارایه‌شده مناسب است.

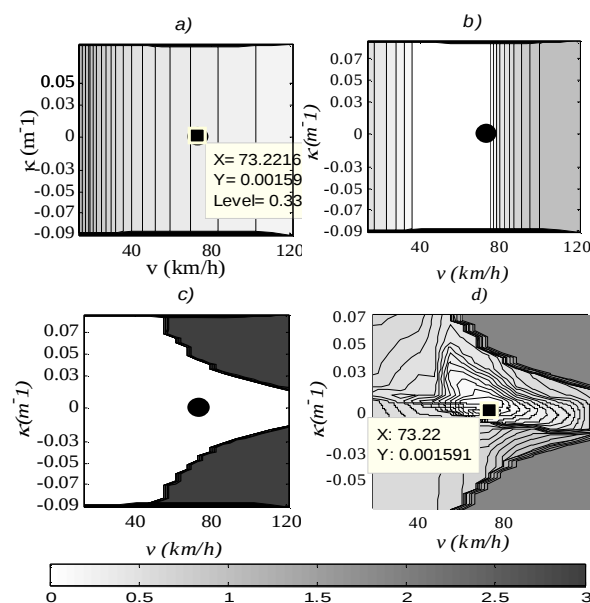
برای بررسی دقیق‌تر از چگونگی تصمیم‌گیری مدل و پیداکردن چرایی کارایی بالای آن، میدان‌های دوتبعی تقاضای وظیفه، قابلیت، حاشیه امنیت، اجراپذیری و ترس از شش خودرو در نمودار ۶ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای $t=0/58S$ ترسیم شده است. در این سکانس مدل راننده دارای تصمیم‌گیری پیچیده است، به نحوی که مدل مذکور برای اجتناب از برخورد با مانع شماره ۱ از تغییر جهت و برای اجتناب از برخورد با مانع شماره ۲ از کنترل سرعت استفاده کرده است. در شکل ۱۰، میدان دوتبعی تقاضای وظیفه که در واقع معکوس زمان برخورد بوده، نشان داده شده است. نواحی تیره‌تر دارای تقاضای وظیفه بالاتر بوده است و زمان برخورد کمتری دارند. نقاط متناظر با تقاضای وظیفه بزرگ‌تر از $5S^{-1} > D$ به رنگ سیاه نمایش داده می‌شوند. به‌عنوان مثال نقطه‌ای با مختصات $v=102 \text{ km/h}$ و $\kappa=0/06 \text{ m}^{-1}$ که در ناحیه سیاه‌رنگ قرار دارد، مقدار دشواری وظیفه $D=6.12S^{-1}$ بوده که متناظر با زمان برخورد $TTC=0/16S$ با لبه سمت راست جاده است. این زمان برخورد به‌اندازه‌ای کوچک است که زمانی برای عکس‌العمل راننده باقی نمی‌گذارد. در شکل ۱۰ سه مرز با شماره‌های ۱ تا ۳ مشخص شده است مرز شماره ۱ به‌علت حضور مانع شماره ۲ که در سکانس دوم شکل ۹ قابل رؤیت بوده، ایجاد

بیشتری برای تغییر جهت و جلوگیری از برخورد با مانع شماره ۱ در اختیار مدل راننده قرار گیرد. در نمودار ۵ مشاهده می‌شود که نیروی جانبی تایرها در ناحیه پایدار $f_{yf} \leq f_{f2}$ و $f_{yr} \leq f_{r2}$ قرار دارد. مدل راننده با اعمال فرمان زیاد باعث سرخوردن خودرو نشده است. در سکانس $t_2=0/58S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که مدل راننده در فاصله زمانی t_1 تا t_2 با کمی افزایش فاصله از مانع شماره ۲ اقدام به چرخش به سمت راست و فرار از برخورد با مانع شماره ۱ می‌نماید. مطابق با نمودار ۲، در لحظه t_2 مدل راننده پیش‌بینی کرده است که از مانع شماره ۱ عبور خواهد کرد، لذا برای جلوگیری از برخورد با حاشیه جاده اقدام به برگرداندن فرمان به سمت چپ می‌کند. در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود مدل راننده همچنان از زمان t_1 تا t_2 تا مدتی در حال ترمزگیری و کاهش سرعت است، اما به‌دلیل آن که به‌زودی در مسیر خودروی شماره ۲ با سرعت 70 km/h قرار می‌گیرد، اقدام به افزایش سرعت و گازدادن می‌نماید تا با رسیدن به سرعت 70 km/h از برخورد با خودروی شماره ۲ جلوگیری کند. این گونه رفتار نشان‌دهنده تصمیم‌گیری بسیار پیچیده است، زیرا فرمان متناسب با فرار از برخورد با مانع شماره ۱ کنترل می‌شود، در حالی که پدال گاز برای جلوگیری از برخورد با خودروی شماره ۲ فشرده می‌شود. در نمودار ۵ مشاهده می‌شود که نیروی جانبی تایرها در ناحیه پایدار $f_{yf} \leq f_{f2}$ و $f_{yr} \leq f_{r2}$ قرار دارد. مدل راننده با اعمال فرمان زیاد باعث سرخوردن خودرو نشده است. در سکانس $t_3=0/96S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود خودروی هوش با فاصله کم از موانع شماره ۱ از برخورد اجتناب نموده است. لازم به یادآوری است که به‌علت نزدیکی به لبه جاده و هجوم مانع شماره ۲، تنها راه اجتناب از برخورد، جهت‌گیری دقیق و عبور با فاصله کم از مانع شماره ۱ است. این امر نشان‌دهنده سختی بالای سناریو و کارایی بالای مدل راننده در هدایت خودرو است. مطابق با نمودار ۲، چرخش چرخ‌های جلو به سمت چپ باعث شده تا زاویه خودرو با جاده کمتر شده و گوشه‌های عقبی خودرو هوش با مانع شماره ۱ برخورد نکنند. در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود در لحظه t_3 که مانع روبه‌روی مانع شماره ۲ قرار گرفته، سرعت حرکت خودرو به 70 km/h نزدیک شده است، لذا مدل از پدال گاز به سمت ترمز تغییر ورودی می‌دهد. در نمودارهای ۵ و ۶ مشاهده می‌شود زاویه لغزش جانبی تایرها در ناحیه پایدار $\lambda_1 < 2 \text{ deg}$ دارد و مدل راننده با اعمال فرمان زیاد باعث سرخوردن خودرو نشده است.

در سکانس $t_4=1/625S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که خودروی هوش میان مانع شماره ۲ و ۳ قرار گرفته که دارای سرعت پایین 30 km/h است. مانع شماره ۲ به سمت راست چرخیده و این امر باعث شده است تا مدل راننده سمت چپ، مانع شماره ۳ را برای حرکت انتخاب نماید. در نمودار ۲ مشاهده می‌شود در فاصله زمانی t_3 تا t_4 برای ممانعت از برخورد با لبه سمت راست جاده، چرخ‌های جلو با سرعت بالایی به سمت چپ چرخیده‌اند. سپس مطابق با نمودار ۵، به‌منظور جلوگیری از سرخوردن به سرعت به سمت راست برگشته و این امر باعث شده است تا خودرو از برخورد با لبه سمت راست جاده و مانع شماره ۲ اجتناب نماید، بدون آن که به‌صورت ناپایدار شریخورد (نمودارهای ۵ و ۶). در نمودار ۳ مشاهده می‌شود که برای جلوگیری از برخورد با مانع شماره ۳ که سرعت پایینی دارد، مدل راننده اقدام به ترمزگیری شدید نموده است.

در سکانس $t_5=2/38S$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود که خودرو با فاصله بسیار کم از مانع شماره ۳ فاصله گرفته است تا از برخورد رودررو با مانع شماره ۴ اجتناب نماید. در نمودارهای ۴-۲ مشاهده می‌شود که مدل راننده برای اجتناب از برخورد با موتورسوار در

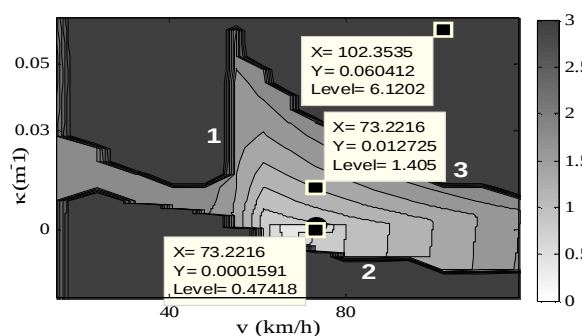
در شکل ۱۲ میدان‌های قابلیت راننده، اجراپذیری، محدودیت نیرویی خودرو و تابع هزینه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار قابلیت راننده با سرعت در حال کاهش است. راننده تمایل ندارد تا قابلیت بیش از حد داشته باشد و با سرعت پایین حرکت کند. در شکل ۱۲a مشاهده می‌شود میزان قابلیت با افزایش سرعت کاهش می‌یابد، لذا ذاتاً نقطه بهینه را به سمت سرعت‌های بالاتر حرکت می‌دهد. در سکانس t_2 میزان تمایل به افزایش سرعت در تقابل با تقاضای وظیفه قرار می‌گیرد. در شکل ۱۲d مشاهده می‌شود مقدار تابع هزینه در نقطه کمینه تقاضای وظیفه قرار گرفته و این بدان معنی بوده که افزایش تقاضای وظیفه با سرعت به‌گونه‌ای است که مدل راننده بایستی میزان قابلیت را $0.331/3$ برای خود حفظ کند و اقدام به افزایش سرعت نکند.



شکل ۱۲ (a) میدان قابلیت راننده، اجراپذیری، محدودیت نیرویی تایر و تابع هزینه چندمنظوره، (b) میدان قابلیت راننده (c) محدودیت نیرویی تایر (d) تابع هزینه چندمنظوره

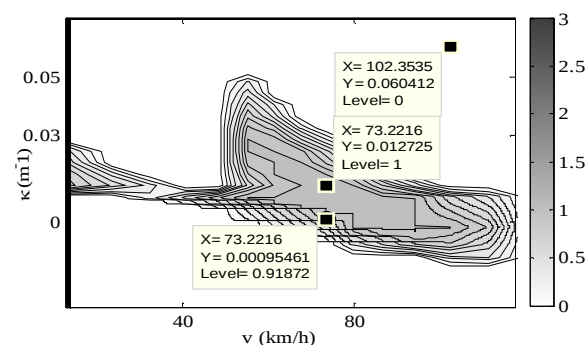
در شکل ۱۲b میدان اجراپذیری ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که سرعت‌های کمتر از 30 km/h و بیشتر از 80 km/h قبل از برخورد قابل دستیابی نیستند، لذا حتی اگر قابلیت راننده به‌گونه‌ای باشد که تمایل به افزایش سرعت باشد، نمی‌توان به سرعت بالاتر از 80 km/h دست یافت، لذا نقاط تصمیم سرعت بالا دارای هزینه بالای اجراپذیری خواهند بود. نقطه کمینه تقاضا در ناحیه سفید رنگ قرار داشته و قابل اجرا است. در شکل ۱۲c محدودیت فیزیکی تایرها نمایش داده شده است. نتایج حاصله به‌گونه‌ای است که با افزایش سرعت ناحیه مجاز، تغییر جهت چرخ‌های جلو کوچک می‌شود. نقطه کمینه تقاضا همان طور که مشاهده می‌شود در ناحیه سفید رنگ و پایدار قرار دارد. در شکل ۱۲d تابع هزینه چندمنظوره نشان داده شده است و مشاهده می‌شود به‌علت آن که نقطه کمینه تقاضای وظیفه دارای حاشیه ایمنی مناسب، زمان برخورد کمینه، قابلیت اجرای عملکردی و فیزیکی است، نقطه کمینه تابع هزینه قرار می‌گیرد و به‌عنوان تصمیم انتخاب می‌شود. لذا مدل راننده در لحظه کنونی مختصات در $v=73/22 \text{ km/h}$ و $K=0.0001591$ که به‌صورت نقطه سیاه رنگ در شکل ۱۲d نمایش داده شده است، انتخاب می‌کند. نقطه مذکور در برخورد با تمامی موانع زمان برخورد کمینه را دارد و دارای حاشیه

شده است. مشاهده می‌شود طبق مرز ۱، تصمیماتی که در سرعت‌های $v < 55 \text{ km/h}$ قرار دارند، به برخورد با مانع شماره ۲ منجر می‌شوند. مرز ۲ به برخورد از سمت راست با مانع شماره ۱ مربوط می‌شود. مشاهده می‌شود که جهت‌گیری‌های منفی منجر به برخورد رودرو و از سمت راست با مانع شماره ۱ خواهد شد. مرز ۳ برخورد سرعت‌های بالاتر با لبه سمت چپ جاده را نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، محدودیت بیشتری بر جهت‌گیری‌های مثبت اعمال می‌کند. مشاهده می‌شود که مرزهای ایجاد شده چگونه ارزش تصمیمات مختلف را از نظر زمان برخورد و انتخاب ایمن تعیین می‌کنند. نقطه کمینه تقاضای وظیفه در مختصات $v=68/49 \text{ km/h}$ و $K=0.001591$ قرار دارد. این نقطه دارای زمان برخورد $TTC=2/12 \text{ s}$ بوده و نقطه‌ای است که با مانع شماره ۱ برخورد ندارد، اما طولانی‌ترین مسافت برخورد با حاشیه سمت راست جاده را دارد. مسیر آکرمن این تصمیم در شکل ۹ با خطوط خط‌چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۰ میدان تقاضای وظیفه

در شکل ۱۱ میدان حاشیه ایمنی ترسیم شده است. مقدار حاشیه ایمنی برای نقطه‌ای که کمینه تقاضای وظیفه دارد، برابر 0.9 است. مشاهده می‌شود که نقطه پیشینه محلی از حاشیه ایمنی در مختصات $v=68/49 \text{ km/h}$ و $K=0.001591$ وجود دارد. تصمیمی که بیشترین حاشیه ایمنی را داراست، کمترین زمان برخورد را ندارد. این نقطه در شکل ۱۰ نشان داده شده که دارای تقاضای وظیفه $D=1/41 \text{ s}$ و زمان برخورد $TTC=0.71 \text{ s}$ است. زمان برخورد نقطه پیشینه حاشیه ایمنی 0.72 s از نقطه کمینه تقاضای وظیفه کمتر است. براساس شکل ۱۰، میزان تقاضای وظیفه این نقطه $0.931/3$ است. از نقطه کمینه تقاضا بیشتر است. این در حالی است که براساس شکل ۱۱ میزان حاشیه ایمنی آن تنها 0.9 بیشتر است. در تابع هزینه نهایی، این اختلافات باعث می‌شود که مقدار هزینه نقطه حاشیه ایمنی پیشینه 0.84 واحد از نقطه کمینه تقاضا، بیشتر و نقطه کمینه تقاضا برای تصمیم نهایی مناسب‌تر باشد.



شکل ۱۱ میدان حاشیه ایمنی

۸- پی‌نوشت

علام	علام اختصاری
اجرانپذیری تصمیم	A
شتاب مماسی	a_t
قابلیت راننده	C
ضریب درگ جریان هوا	C_d
مجموع سفتی جانبی تایرهای عقب	C_r
مجموع سفتی جانبی تایرهای جلو	C_f
تقاضای وظیفه	D
محدودیت نیرویی تایر	$F_{m,n}$
حداکثر نیروی ترمزی وارده به پدال ترمز	F_{max}
مجموع نیروی مماسی تایرهای عقب	f_{xr}
مجموع نیروی مماسی تایرهای جلو	f_{xf}
مجموع نیروی جانبی تایرهای عقب	f_{yr}
مجموع نیروی جانبی تایرهای جلو	f_{yf}
شتاب گرانش	g
ممان اینرسی جرمی خودروی هوش	I
تابع هزینه	J
ضریب حساسیت به نیروی جانبی تایر	K_f
بهره تناسبی کنترل سرعت	K_v
بهره تناسبی کنترل جهت	K_s
فاصله محور عقب تا مرکز جرم خودرو	l_r
فاصله محور جلو تا مرکز جرم خودرو	l_f
جرم خودرو	m_v
تعداد نقاط مش‌بندی‌شده بر سرعت تصمیم	M
شماره مولفه سرعت تصمیم	m
مولفه‌ای از بردار سرعت تصمیم که تابع هزینه را کمینه می‌کند.	m_{min}
تعداد نقاط مش‌بندی‌شده بر انحنای مسیر	N
شماره مولفه جهت تصمیم	n
مولفه‌ای از بردار جهت تصمیم که تابع هزینه را کمینه می‌کند.	n_{min}
درصد پدال گاز	P_a
نیروی ترمز	P_b
فاصله مرکز انحنا از پای عمود بر بدنه خودرو	r_0
شعاع انحنای مسیر مرکز جرم	r_{cg}
حاشیه ایمنی	S
زمان اجتناب از برخورد	TTA
زمان برخورد	TTC
حداقل زمان شتاب‌گیری از سرعت کنونی تا سرعت تصمیم	t_a
حداقل زمان ترمزگیری با توجه به قدرت سیستم ترمز	t_b
حداکثر گشتاور ترمزی خودرو	T_b
حداقل زمان تغییر جهت از جهت کنونی به جهت تصمیم	t_s
زمان نمونه‌برداری	T_s
حداکثر گشتاور شتاب‌گیری خودرو	T_t
سرعت خودرو	v
حاشیه سرعتی تا مرز نایمن	Δv
حاشیه سرعتی مورد انتظار راننده	Δv_d
سرعت مانع	V_o
سرعت نسبی خودرو به مانع	V_r
سرعت تصمیم که بایستی سرعت خودرو بر آن کنترل شود.	v_{dec}
مولفه m از بردار گسسته‌شده سرعت تصمیم	v_m
سرعت مانعی که اگر خودرو در جهت δ_{dec}^{set} حرکت کند، با آن برخورد می‌کند.	V_n^0
مولفه‌ای از بردار سرعت تصمیم که تابع هزینه را کمینه می‌کند.	v_{nmin}^{k+1}
سرعتی که بایستی کنترل‌گر به‌عنوان نقطه تنظیم در نظر گیرد.	v_{dec}^{k+1}
علام یونانی	
زاویه لغزش میانگین چرخ‌های عقب	λ_r
زاویه لغزش میانگین چرخ‌های جلو	λ_f
زاویه فرمان چرخ‌های جلو	δ
حاشیه جهتی تا مرز نایمن	$\Delta\delta$
حداکثر حاشیه جهتی مورد انتظار	$\Delta\delta_d$
فاصله پای عمود از مرکز دوران تا مرکز جرم	Δ
مولفه n از بردار گسسته‌شده انحنای مسیر	K_n
انحنای مسیر که بایستی کنترل‌گر به‌عنوان نقطه تنظیم در نظر گیرد.	K_{dec}^{k+1}
زمان تاخیر راننده	τ_d
زاویه شیب جاده	θ
زاویه شرس جانبی مرکز جرم خودرو	β
زاویه یابو	ψ
شتاب زاویه‌ای چرخش یابو	$\dot{\psi}$
مولفه‌ای از بردار انحنای مسیر که تابع هزینه را کمینه می‌کند.	K_{nmin}
شاخص عملکرد طولی برای کنترل سرعت	α_k
حداکثر زاویه فرمان چرخ‌های جلو	δ_{max}
حداکثر سرعت چرخش زاویه فرمان چرخ‌های جلو	$\dot{\delta}_{max}$

ایمنی ۰/۹۱ بوده است و باعث سُرش خودرو نمی‌شود. این روش به‌صورت پیوسته تمامی نقاط تصمیم را ارزیابی می‌کند و نقطه بهینه را به دست می‌آورد، لذا نسبت به روش‌های منطق گسسته و قاعده مبنا دقیق‌تر و پیوسته‌تر عمل می‌کند.

۷- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر رفتار راننده براساس تئوری‌های برجسته روان‌شناسی ترافیک به کمک تکنیک‌های مهندسی خودرو و کنترل شبیه‌سازی شد. به‌علت استفاده از مفاهیم روان‌شناسی شامل تقاضای وظیفه، قابلیت راننده، اجرانپذیری، محدودیت فیزیکی تایرها و حاشیه ایمنی، مدل مذکور می‌تواند در سناریوهای پیچیده ترافیکی تصمیم‌سازی کند. این مدل ساختار ریاضی پیچیده‌ای نداشته است و اکثر روابط ساده هستند. مدل راننده در یک سناریوی پیچیده مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریو به‌گونه‌ای طراحی شد که روش‌های تصمیم‌سازی گسسته بر مبنای قاعده نتوانند در آن کارایی بالایی داشته باشند. در نتایج شبیه‌سازی، کارایی مدل در تشخیص صحیح تغییر لاین، کنترل سرعت و جهت، مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل توانست با کنترل سرعت و جهت‌گیری از برخورد با موانع اجتناب نماید و تصمیمات پیچیده و چندجانبه بگیرد. مدل راننده در این سناریو به‌موقع تغییر لاین داد و در شرایطی که سبقت منجر به برخورد می‌شد از آن صرف نظر نمود. نکته حایز اهمیت آن بود که مدل، تصمیم‌گیری لحظه‌به‌لحظه داشته و با قوانین گسسته عمل نکرد، لذا توانست در فضاهای تنگاتنگ و چالش‌برانگیز با حاشیه امنیت پایین با هدایت دقیق خودرو از برخورد اجتناب کند. همچنین خطای عملکردی تخمین‌گر زاویه لغزش برای چرخ‌های جلو توسط کنترل‌گر قابل جبران بوده است و این روش تخمین برای مدل حاضر دقت مناسبی دارد. علی‌رغم موفقیت مدل، رسیدن به یک مدل با عملکرد منطقی هنوز نیازمند تحقیقات بیشتر است. در مدل مذکور، راننده، تخمینی از تصمیمات دیگر خودروها نداشت و حرکت موانع نیز از پیش تعیین شده بود. تئوری بازی می‌تواند با تشکیل ماتریس هزینه برای موانع موجود در جاده، رفتار منطقی دیگر رانندگان را تخمین بزند و تعاملات اجتماعی حاصل را در مدل‌سازی در نظر بگیرد. در پژوهش آتی تلاش خواهد شد تا براساس ماتریس هزینه، فرآیند رانندگی به‌صورت یک بازی در چهارچوب تئوری بازی تعریف شود و با استفاده از مفهوم تعادل نش (Nash) رفتار اجتماعی رانندگان پیش‌بینی شود و در تصمیم‌گیری مدل راننده دخالت نماید.

تشکر و قدردانی: مولفان از موسسه علوم شناختی ایران بابت تامین مالی پژوهش حاضر با شماره پروژه ۱۳۰۷ کمال قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: تمامی موارد استفاده شده از دیگران ارجاع داده شده و نتایج این مقاله در هیچ جای دیگری منتشر نشده است.

تعارض منافع: نتایج این پژوهش هیچ تعارض منافی با سازمان یا موسسه‌ای ندارد.

سهم نویسندگان: حامد مظفری (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ علی نحوی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)

منابع مالی: تامین مالی این پروژه توسط آزمایشگاه واقعیت مجازی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی صورت گرفته و همچنین ستاد علوم شناختی ایران، حمایت مالی بخشی از پروژه را در آزمایشگاه واقعیت مجازی بر عهده گرفته است.

- 8- Cadkhodajafarian A, Analooee A, Azadi S, Kazemi R. Collision-free navigation and control for autonomous vehicle in complex urban environments. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(11):277-288. [Persian]
- 9- Rasekhipour Y, Khajepour A, Chen SK, Litkouhi B. A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017;18(5):1255-1267.
- 10- Fuller R. Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*. 2005;37(3):461-472.
- 11- Wilde GJS. The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. 1982;2(4):209-226.
- 12- Gibson JJ, Crooks LE. A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*. 1938;51(3):453-471.
- 13- Hollnagel E. Time and time again. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2002;3(2):143-158.
- 14- Mozaffari H, Nahvi A. A Motivational driver steering model: Task difficulty homeostasis from control theory perspective. *Cognitive Systems Research*. 2018;50:67-82.
- 15- Pacejka HB, Bakker E. The magic formula tire model. *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 1992;21(Suppl 001):1-18.
- 16- Mehrabi N, Nahvi A, Azari Sh. Simulation of vehicle roll control in a driving simulator [Dissertation]. Tehran: K. N.Toosi University of Technology; 2010. [Persian]
- 1- Nagarajan K. Design of self-learning fuzzy based driver model. *SAE Technical Paper*. 2017;2017-26-0081.
- 2- Sazgar H, Azadi S, Kazemi R. Trajectory planning and integrated control with the Nonlinear Bicycle Model for high-speed autonomous lane change. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(2):103-114. [Persian]
- 3- Chonga L, Abbas MM, Flintsch AM, Higgs B. A rule-based neural network approach to model driver naturalistic behavior in traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013;32:207-223.
- 4- Naseralavi SS, Saffarzadeh M, Nadimi N, Mamdoohi AR. Applying time-to-collision to enhance the coefficient of determination for GHR Car-Following Model in Deceleration Mode. *Modares Civil Engineering Journal*. 2011;11:17-26. [Persian]
- 5- Gaspar P, Szabo Z, Bokor J, Nemeth B. Robust control design for active driver assistance systems: A linear-parameter-varying approach. Basel: Springer; 2017.
- 6- Receveur JB, Victor S, Melchior p. Multi-criteria trajectory optimization for autonomous vehicles. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):12520-12525.
- 7- Hayashi R, Isogai J, Raksincharoensak P, Nagai M. Autonomous collision avoidance system by combined control of steering and braking using geometrically optimized vehicular trajectory. *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2012;50(Suppl 1):151-168.