Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(2) (2022) 53-56
DOI: 10.22060/mej.2021.20198.7191

Lane Change Path Planning in Emergency Situation Based on Skilled Driver's Performance

S. N. Minaei*, A. Ghaffari

[1] Department of Mechanical Engineering, Laboratory of Advanced Vehicle Control Systems, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Lane Change at high speeds is a strategic maneuver to avoid the collision. In this situation, The time of an accident possibility is mainly less than two seconds. therefore, finding the proper trajectory and control of the vehicle is crucial at the lowest cost. In this paper, based on a skilled driver's performance in a similar situation, a proper path and corresponding appropriate control system was designed aiming at vehicle stability preserving and collision avoidance. To this purpose, possible paths were simulated and identified using the vehicle's seven degrees of freedom model and applying the driver's behavior. A neural network system was trained; then, the trajectory was chosen. A hybrid controller was hired for the vehicle navigation, consisting of the driver's performance pattern with a covering neural network and two proportional derivative controllers. The Novelties of this method are the simultaneous design of a stable path while maintaining geometric constraints and the low computational burden of the path planning and control system. The results show that the highest neural network error is about 11%. Also, the control system has been able to steer the vehicle and follow the trajectory with 40cm maximum lateral displacement error in the speed and road friction different conditions.

Review History:

Received: Jun. 23, 2021
Revised: Sep. 14, 2021
Accepted: Nov. 04, 2021
Available Online: Nov. 14, 2021

Keywords:

Autonomous vehicle
Collision avoidance
Skilled driver
Emergency Lane change
Path planning

1- Introduction

Today, many road accidents occur due to the driver's fault. In some cases, emergencies arise on the suburban roads which require a quick reaction of the autonomous car decision system and, if necessary, designing a proper path to collision avoidance. The sudden entry of animals into the road [1, 2] or another vehicle from the side road to the main [2] are examples of such incidents. In these cases, due to the car's high speed, the braking system cannot prevent the accident, both in terms of time and dynamic constraints [3, 4]. Besides, by studying the reaction of skilled drivers, it can be found that the use of Lane Change Maneuvers (LCM) or mouse maneuvers [5] is helpful in these situations and can avoid the accident. The approach of this study is path planning and control of an autonomous vehicle based on skilled driver's performance in an emergency LCM, with the aim of collisions avoidance, to prevent accidents at high speeds with the help of LCM.

2- Simulation of Skilled Driver's Performance

LCM at high speeds is a standard maneuver [29]. In this maneuver, a skilled driver is someone who can perform this maneuver in its standard conditions. By studying the behavioral pattern of skilled drivers in the emergency LCM at high speeds (more than 70 km/h), it can be seen that in this scenario, the driver uses only the steering actuator to perform the maneuver and operates a quasi-sine input to the steer. In this case, according to Eq. (1), the steps of the Lane Change (LC) scenario are divided into two parts: 1. Crossing the obstacle and 2. Returning to the straight line (Fig. 1).

$$\delta = \begin{cases} \delta_f \sin(\frac{2\pi}{t_{arv}} t) & t < t_{arv} \\ -1.5(t - t_{arv}) & t > t_{arv} \ \& \ \delta > -\delta_f \\ -\delta_f & t > t_{arv} \ \& \ \left|\tan^{-1}(X/Y)\right| > \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

that δ_f is the maximum angle applied to the front wheel and t_{arv} is the time to reach the obstacle and is calculated from Equation (2).

$$t_{arv} = \frac{X_{arv}}{V_{x_0}} \quad (2)$$

To select the final path in the LCM, two geometric constraints are used for collision avoidance and exiting the road boundary. These two terms are expressed as follows and based on Fig. 1:

*Corresponding author's email: .n.minaee@email.kntu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

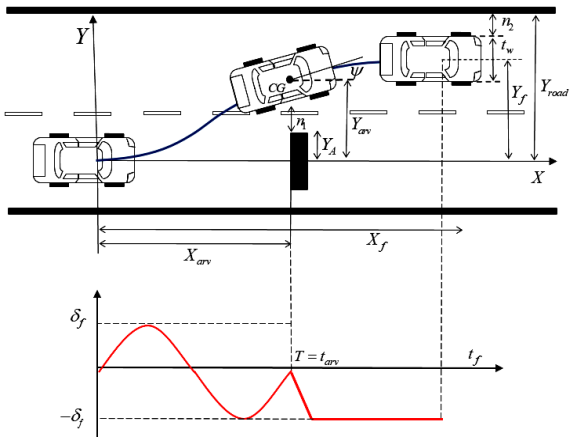


Fig. 1. Geometric schematic of the car trajectory for the front wheel angle input during the LCM

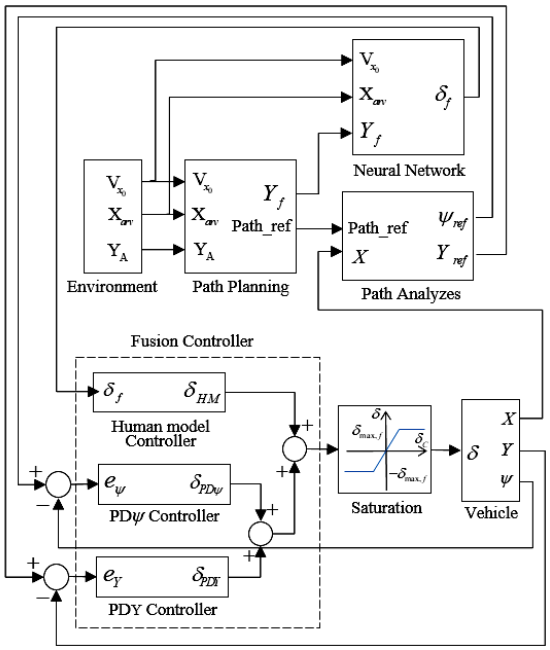


Fig. 2. Path planning and control system block diagram of the LCM based on skilled driver's Performance in the emergency situations

The corner distance of the car when crossing the obstacle is n_1. Therefore, the center lateral distance of the car must be greater than $Y_{arv} > Y_A + t_w / 2 + n_1$ at this point. Also, Y_A is the obstacle length, t_w is the car width, and the necessary safety factor when the car crosses the obstacle.

The safe distance of the car from the road boundary is n_2. so, Equation $Y_{Crit} = Y_{road} - (t_w / 2 + n_2) > Y_f$ is required for collision avoidance with the boundary road. Also, Y_{Crit} is the maximum lateral displacement of the car without exiting the road boundary and Y_f is the final lateral displacement of the car.

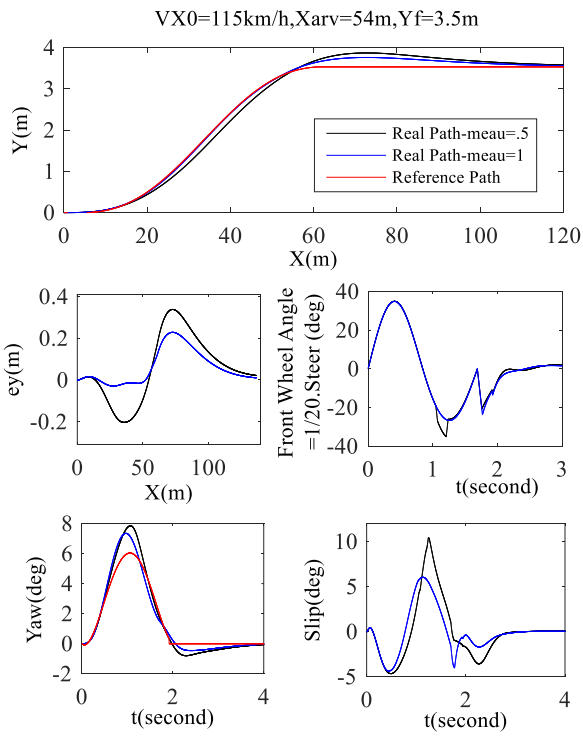


Fig. 3. Controller performance simulation with the Carsim software in the two dry and wet road modes for $V_{x_0} = 115$ km/h, and $X_{arv} = 54$ m.

3- Path Planning and Control

The path planning algorithm is such that first, with the help of an initial neural network, the traversable range of the path is determined with a focus on maintaining the vehicle's stability constraints and non-collision with the obstacle. After identifying this range, the 5th-degree curve coefficients of the final path are calculated by using a secondary neural network.

The designed control process consists of two parts. The first part is inspired by the behavior pattern of a skilled driver in an LCM that has the main load of car control in this maneuver (Eq. (1)). The second part consists of two proportional-derivative controllers whose output is added to the first controller output and its main task is to correct the output of the human model controller designed to follow the path more accurately.

4- Results and Discussion

With Carsim simulator software, the performance of the path planning neural network and control system is evaluated for the condition that $V_{x_0} = 115$ km/h, $X_{arv} = 54$ m, and $Y_A = 2$ m.

The maneuvering time, in this case, is about 2s and the time to reach the obstacle is 1.6s. In Fig. 3, in the lateral error diagram, the error rate is zero at the car arrival point to the obstacle. Therefore, considering the safety factor of the passing moment, the controller has been able to show appropriate performance on both dry and wet roads and

avoid the collision. Also, after crossing the obstacle, the controller, in addition to preventing the car from leaving the road boundary, prevented the increase of the vehicle's lateral displacement error and reduced it to zero.

The red line in the yaw diagram is the designed trajectory slope by the neural network. The controller has been able to track this angle to a reasonable extent in both dry and wet road conditions, although its performance on the dry road is better than the wet road. Also, the variation domain is in the appropriate range in the sliding angle diagram, and the car has maintained its stable condition.

5- Conclusions

In this paper, a path planning algorithm of the LCM is designed to prevent collisions in emergency situations at high speeds by inspiring a skilled driver's performance. The most important features of this study are:

The path planning process is such that each designed trajectory certainly be stable. Also, Because The path planning calculations are algebraic, the decision speed is appropriate in the situation of the accident Probability.

The highest error of the path planning neural network is about 11%. Also, the designed control system was able to steer the car in the designed direction,

References

[1] J.A. Decker, S.H. Haus, R. Sherony, Potential benefits of animal-detecting automatic emergency braking systems based on U.S. driving data, Journal of the Transportation Research Board, 2675(10) (2021) 678-688.

[2] IIHS HLDI, Collisions with Fixed Objects and Animals. Insurance Institute for Highway Safety, Fatality Facts, (2019).

[3] S. Sadeghi Namaghi, M. Moavenian, An adaptive modified fuzzy-sliding mode longitudinal control design and simulation for vehicles equipped with ABS system, Int. Journal of Automotive Engineering, 9(1) (2019) 2895-2907.

[4] J. Lenarda, A. Badea-Romero, Russell danton, typical pedestrian accident scenarios for the development of autonomous emergency braking test protocols, Accident Analysis and Prevention, 73 (2014) 73–80.

[5] https://www.toyotaofnorthcharlotte.com/blog/so-what-exactly-is-the-moose-test/

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. N. Minaei, A. Ghaffari, Lane Change Path Planning in Emergency Situation Based on Skilled Driver's Performance, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 53-56.

DOI: 10.22060/mej.2021.20198.7191

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۶۹ تا ۲۸۸
DOI: 10.22060/mej.2021.20198.7191

طراحی مسیر مانور تعویض خط در وضعیت اضطراری، مبتنی بر عملکرد راننده ماهر

سمیر نیسی مینائی*، علی غفاری

دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه سیستم‌های پیشرفته کنترلی خودرو، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران.

خلاصه: تعویض خط در سرعت‌های بالا، یک مانور راهبردی جهت اجتناب از برخورد است. در این شرایط زمان امکان بروز حادثه عمدتاً کمتر از ۲ s است؛ لذا یافتن مسیر مناسب و کنترل خودرو با کمترین هزینه زمانی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، براساس عملکرد راننده ماهر در شرایط مشابه، مسیر مناسب و سیستم کنترلی متناسب با آن، با هدف پایداری خودرو و اجتناب از برخورد طراحی شده است. برای این منظور، با شبیه‌سازی عملکرد راننده ماهر بوسیله مدل دینامیکی ۷ درجه آزادی خودرو، مسیرهای احتمالی شناسایی و با آموزش یک شبکه عصبی، مسیر نهایی انتخاب شده است. جهت هدایت خودرو از یک کنترل‌کننده ترکیبی، شامل: معادلات رفتاری راننده با یک سیستم شبکه عصبی پوششی و دو کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی استفاده شده است. مهم‌ترین نوآوری‌های این روش، طراحی هم‌زمان مسیرهای پایدار با حفظ قید هندسی عدم برخورد و هزینه محاسباتی و زمانی ناچیز سیستم کنترلی و طراحی مسیر برای شرایط اضطراری است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد بیشترین خطای شبکه عصبی طراحی مسیر حدود ۱۱ درصد است. همچنین سیستم کنترلی توانسته در شرایط مختلف سرعتی و اصطکاک جاده‌ای، با حداکثر خطای جابه‌جایی عرضی ۴۰ cm خودرو را هدایت و مسیر را دنبال کند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

کلمات کلیدی:
اجتناب از برخورد
راننده ماهر
تعویض خط اضطراری
خودروی خودران
طراحی مسیر

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از تصادف‌های جاده‌ای به دلیل خطای راننده به وقوع می‌پیوندد. براساس آمار [۱]، در ٪۶۸ تصادفات عدم توجه کافی راننده مهم‌ترین عامل بروز حادثه بوده است. تلاش برای به کار بردن فناوری‌های هوشمند در صنعت خودروسازی جهت کاهش حوادث رانندگی روزبه‌روز درحال افزایش است و رویکردهای تحقیقاتی به سوی توسعه سیستم‌های همیار راننده و خودروهای خودران، در حرکت است [۲ و ۳]. در حال حاضر زمینه‌های اصلی تحقیقاتی خودروهای خودران، شامل چهار زیرساختار ۱. ادراک و مدل‌سازی محیط، ۲. مکان‌یابی و ساخت نقشه، ۳. تصمیم‌گیری و طراحی مسیر و ۴. کنترل حرکت خودرو می‌باشند [۴ و ۵].

در بعضی از مواقع، در جاده‌های برون شهری شرایطی اضطراری پیش می‌آید که نیازمند عکس‌العمل سریع سیستم تصمیم‌گیری خودروی خودران و در صورت نیاز، طراحی یک مسیر مناسب جهت جلوگیری از وقوع حادثه است. از جمله این حوادث می‌توان به ورود ناگهانی حیوانات به جاده[1] [۶ و ۷] یا ورود ناگهانی خودروی دیگر از جاده‌های فرعی به اصلی[۷, ۸] اشاره نمود. در این مواقع به دلیل سرعت بالای خودرو، سیستم ترمزگیری هم از نظر زمانی و هم از نظر محدودیت‌های دینامیکی، توانایی جلوگیری از بروز حادثه را ندارد [۹ و ۱۰]. از سویی، با بررسی عکس‌العمل راننده‌های ماهر می‌توان دریافت که استفاده از مانور تعویض خط یا مانور موس[2] [۱۱] در این شرایط راه‌گشا بوده و می‌تواند از بروز حادثه جلوگیری نماید. لذا در ادامه به بررسی و تحلیل انواع روش‌های طراحی مسیر حرکت در مانور تعویض خط پرداخته شده است.

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی طراحی مسیر حرکت در مانور تعویض خط در خودروهای خودران صورت گرفته است [۱۲ و ۱۳]. سمیعی و

1 ورود حیوانات وحشی مانند گوزن به جاده‌های جنگلی و کوهستانی در کشورهای اسکاندیناوی مانند فنلاند هر ساله حوادث زیادی را هم برای حیات وحش و هم برای انسان‌ها به همراه داشته است [۱۱].

2 مانور موس یا تعویض خط دوگانه، بیشتر در جاده‌های کوهستانی که یک طرفه هستند کاربرد دارد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.n.minaee@email.kntu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی با روش فاصله زمانی و به کمک دو منحنی درجه ۵، یک روش طراحی مسیر در شرایط ترافیکی ارائه دادند. از مشکلات این روش، استفاده از چهار معادله غیر خطی جهت جلوگیری از برخورد است. لانگ[1] و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹، در طراحی منحنی‌های مسیر حرکت و پروفیل سرعت در مانور تعویض خط، از دو منحنی بزیر درجه ۳ استفاده کردند. نقطه ضعف این پژوهش، تحقیق در سرعت‌های زیر km/h۸۰ است. در پژوهش دیگری نیز از قطاع‌های دایروی به عنوان هندسه مسیر حرکت در مانور تعویض خط استفاده شده است [۱۶]. اما ضعف این الگوریتم عدم پیوستگی انحنای مسیر در نقاط اتصال قطاع‌ها است. نوروزی و همکاران [۱۷] در سال۲۰۱۹ ، انواع هندسه توابع چند جمله‌ای درجه ۷، درجه ۵، ترکیب معادله سینوسی و چند جمله‌ای درجه ۳ و ترکیب معادله تانژانت و چند جمله‌ای درجه ۳ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چند جمله‌ای درجه ۵ نسبت به سایر منحنی‌ها عملکرد بهتری دارد. در این مقاله زمان انجام مانور معلوم در نظر گرفته شده است. جنگ[2] و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۸، جهت طراحی مسیر حرکت در مانور تعویض خط از شبکه عصبی استفاده نمودند. داده‌های آموزشی این شبکه از مسیرهای پیموده شده توسط چند راننده ماهر در شرایط محیطی مختلف، به دست آمده است. ورودی این شبکه سرعت طولی خودرو و فاصله از مانع و خروجی آن ضرایب یک چندجمله‌ای درجه ۶ است که مسیر مانور تعویض خط را نشان می‌دهد. در این روش، شبکه تنها در مواردی خاص که بر اساس آن‌ها آموزش دیده است، امکان طراحی مسیر دارد. محدودیت دیگر این تحقیق کار در سرعت‌های زیر km/h ۵۰ است. دینگ[3] و همکاران [۱۹] در سال۲۰۲۰ از دو منحنی درجه ۵ جهت طراحی مسیر حرکت در مانور تعویض خط استفاده کردند و با کمک یک تابع هزینه مسیر نهایی انتخاب را کردند. میزان محاسبات بالا و عدم پوشش جابه‌جایی‌های عرضی غیر از ۳/m۷۵، کاربرد این روش را برای شرایط بحرانی با محدودیت مواجه نموده است. هان[4] و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۷ از یک کنترلر فازی–PID جهت کنترل عرضی خودرو استفاده نمودند. از نقاط ضعف این پژوهش عدم بررسی شرایط مختلف ضریب اصطکاک جاده‌ای و سرعتی خودرو است. نوروزی و همکاران [۲۱] در سال۲۰۱۷، از یک کنترلر مد لغزشی تطبیقی به همراه لایه مرزی فازی برای کنترل عرضی خودرو استفاده کردند. در طراحی کنترلر ضریب اصطکاک جاده به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. مسیر حرکت چندجمله‌ای درجه ۵ انتخاب شده است. این کنترلر در سطوح خیس برای سرعت‌های بیش از m/s۳۰ که زمان انجام مانور کمتر از s ۲ باشد عملکرد خوبی از خود نشان نداده است. سازگار و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی از یک کنترل ترکیبی طولی و عرضی خودرو جهت پیمایش مسیر حرکت مانور تعویض خط، با در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی تایر و عملگرهای فرمان و گاز/ترمز، به کمک کنترلر مود لغزشی بهره برده‌اند. همچنین فرآیند طراحی مسیر حرکت، بر اساس یک چندجمله‌ای درجه ۵ و در دو مرحله صورت پذیرفته است. در مرحله اول، محدوده قابل پیمایش خودرو با هدف اجتناب از برخورد تعیین شده و در مرحله دوم، با تمرکز بر حفظ پایداری دینامیکی خودرو، مسیر نهایی حرکت انتخاب می‌شود. در این فرآیند به دلیل استفاده از معادلات غیر خطی، مدت زمان تصمیم‌گیری با چالش روبه‌رو می‌شود و در شرایط اضطراری و زمانی محدود می‌تواند عملکرد را با مشکل مواجه نماید. در دو مقاله مذکور، صحت‌سنجی سیستم کنترلی خودرو در محیط نرم افزار کارسیم صورت پذیرفته است. ژونگ[5] و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۹ در فرآیند طراحی مسیر حرکت و پیمایش آن، از یک سیستم کنترل پیش‌بین و با در نظر گرفتن قیدهایی نظیر موقعیت طولی و عرضی نهایی خودرو و مقدار مجاز زاویه چرخ، استفاده نمودند. نقطه قوت این پژوهش آزمون الگوریتم ارائه شده در سناریوهای مختلف نظیر بازگشت به خط اولیه و نقطه ضعف آن، به کار بستن مدل دوچرخه به عنوان مدل دینامیکی خودرو و عدم بررسی تعویض خط در زمان زیر s ۲ است. وانگ[6] و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۹ از سیستم کنترل پیش‌بین برای تعویض اتوماتیک خط در حرکت عرضی و از سیستم کروز کنترل تطبیقی برای حرکت طولی استفاده کردند. در این پژوهش مسافت‌های زیر m ۱۰۰ مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این پژوهش طراحی مسیر حرکت و کنترل خودرو در مانور تعویض خط اضطراری با سه شاخه مورد بررسی قرار گرفته است: ۱. سرعت بالا (۸۰ تا km/h ۱۲۰) ۲. زمان انجام مانور کمتر از s۲ (زمان احتمال وقوع حادثه) باشد ۳. قابلیت جابه‌جایی عرضی متنوع از ۰ تا m ۷. همان‌طور که در بررسی سایر مقالات مرتبط در این زمینه بیان شد؛ حداقل یکی از این موارد مورد بررسی قرار نگرفته است. درواقع سیستم‌های طراحی شده در این شرایط پاسخگو نیستند. رویکرد پژوهش حاضر، طراحی مسیر حرکت و کنترل یک خودروی خودران با الگوبرداری از عملکرد حرکتی یک راننده

1 C. Long
2 G. Geng
3 D. Yang
4 G. Han
5 Y. Zhong
6 J. Wang

ماهر در یک مانور تعویض خط اضطراری، با هدف اجتناب از برخورد است به صورتی که بتوان در سرعت‌های بالا به کمک مانور تعویض خط از بروز حادثه جلوگیری نمود. در این مقاله ابتدا با کمک معادلات دینامیکی خودرو و الگوی رفتاری راننده ماهر، مسیرهای قابل پیمایش برای سرعت‌های اولیه ۸۰ تا ۱۲۰ km/h و فاصله مانع‌های ۲۰ تا ۶۰ m شبیه‌سازی و یک منحنی درجه ۵ بر آن‌ها برازش شده است. سپس با کمک ضرایب استخراج شده، یک سیستم شبکه عصبی آموزش داده شده است. نتیجه این سیستم شبکه عصبی طراحی مسیر، یک ماتریس وزن است که با هزینه محاسباتی پایین، ضرایب منحنی درجه ۵ مسیر حرکت را محاسبه کرده و در کنار تحقق شرایط هندسی عدم برخورد و بدون افزودن هزینه محاسباتی بیشتر، پایداری مسیر را حفظ می‌نماید. جهت هدایت خودرو از یک کنترل‌کننده ترکیبی، شامل: معادلات رفتاری راننده با یک شبکه عصبی پوششی و دو کنترل‌کننده تناسبی–مشتقی استفاده شده است. بخش اول از الگوی رفتاری راننده ماهر در مانور تعویض خط الهام گرفته شده است و در این مانور بار اصلی کنترل خودرو را نیز بر عهده دارد. بخش دوم شامل دو کنترل‌کننده تناسبی–مشتقی می‌باشد که خروجی آن با خروجی کنترلر اول جمع شده و وظیفه اصلی آن تصحیح خروجی این کنترلر برای دقیق‌تر دنبال کردن مسیر طراحی شده است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به طراحی هم‌زمان مسیرهای پایدار با حفظ قیدهای هندسی عدم برخورد، تبدیل عملکرد راننده ماهر به معادلات ریاضی در مانور تعویض خط اضطراری، طراحی کنترلر برای مانور تعویض خط در زمان‌های کمتر از ۲ ثانیه برای محدوده جابه‌جایی‌های عرضی متفاوت و هزینه محاسباتی و زمانی ناچیز سیستم کنترلی و طراحی مسیر، اشاره نمود.

ادامه مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ به بررسی معادلات حرکت خودرو، چرخ و دینامیک تایر پرداخته شده است. در بخش ۳ فرآیند طراحی محدوده مسیر حرکت و انتخاب مسیر نهایی بیان شده است. در بخش ۴ در ابتدا به کمک یک سیستم شبکه عصبی، امکان‌سنجی پیمایش مسیر حرکت مشخص شده و سپس با استفاده از شبکه عصبی دیگری، مسیر نهایی حرکت طراحی شده است. در بخش ۵ سیستم کنترلی جهت انجام مانور و تعقیب مسیر طراحی شده است و در بخش ۶ نیز نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- مدل دینامیکی خودرو

مدل دینامیکی استفاده شده در این پژوهش مدل ۷ درجه آزادی است [۲۲ و ۲۵ و ۲۶]. به منظور نزدیک بودن رفتار مدل به رفتار واقعی خودرو ملاحظاتی مانند انتقال بار طولی و مدل غیرخطی تایر در نظر گرفته شده است. مدل انتخابی برای بررسی رفتار خودرو در مانور تعویض خط خودرو در سرعت‌های بالا و بررسی دینامیک تایر در طول این مانور مناسب است. مدل دینامیکی را می‌توان به سه بخش معادلات حرکت خودرو، معادله حرکت چرخ و دینامیک تایر تقسیم‌بندی نمود. در ادامه هر یک از این بخش‌ها شرح داده شده است.

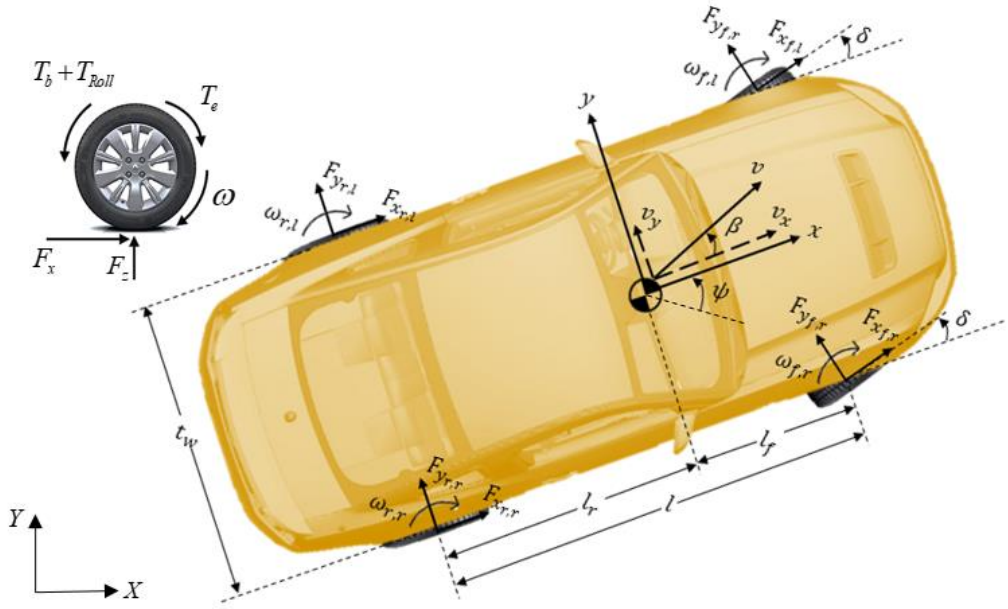
۲- ۱- معادلات حرکت خودرو

در این پژوهش، به منظور جلوگیری از افزایش پیچیدگی مدل خودرو، دینامیک سیستم تعلیق نادیده گرفته شده است. در شکل ۱، Y–X مختصات اینرسی و y–x مختصات محلی متصل به مرکز جرم (CG) است. همچنین، زوج‌های (l، f)، (r، f)، (r، l)و (l، r) به ترتیب به سمت جلو–چپ، جلو–راست، عقب–راست و عقب–چپ اشاره می‌کند و F_x و F_y به ترتیب نشان دهنده نیروهای طولی و جانبی هستند. سرعت زاویه‌ای تایر با ω نشان داده می‌شود. سرعت مرکز جرم خودرو برابر V بوده که با تجزیه آن در دستگاه مختصات محلی خودرو دو مؤلفه V_x و V_y (سرعت طولی و عرضی) حاصل می‌گردد. زاویه سمتی، زاویه تایر جلو و زاویه لغزش جانبی خودرو نیز به ترتیب با نمادهای ψ، δ و β نشان داده شده است. فاصله‌های بین محورهای جلو و عقب تا مرکز جرم نیز به ترتیب با نمادهای l_f و l_r نشان داده شده است. فاصله بین دو محور نیز با l نشان داده شده است.

با به کارگیری قانون دوم نیوتن، حرکت خودرو برحسب شتاب مرکز جرم را می‌توان با روابط (۱) تا (۳) بیان نمود. در رابطه (۳) زوج نیروهایی که رابطه تفاضلی پیدا کرده‌اند به دلیل کوچک بودن مقادیر تفاضلی در نظر گرفته نشده‌اند [۲۲و ۲۵].

$$ma_x = [\left(F_{x_{f,l}} + F_{x_{f,r}}\right)\cos\delta - \left(F_{y_{f,l}} + F_{y_{f,r}}\right)\sin\delta + \left(F_{x_{r,l}} + F_{x_{r,r}}\right) - F_{aero}] \quad (۱)$$

$$ma_y = [\left(F_{x_{f,l}} + F_{x_{f,r}}\right)\sin\delta + \left(F_{y_{f,l}} + F_{y_{f,r}}\right)\cos\delta + \left(F_{y_{r,l}} + F_{y_{r,r}}\right)] \quad (۲)$$



شکل ۱. نمای شماتیک مدل دینامیکی خودرو و چرخ

Fig. 1. The schematic of the car and wheel. dynamic model

$$I_z\ddot{\psi} = l_f\left[\left(F_{x_{f,l}}+F_{x_{f,r}}\right)\sin\delta + \left(F_{y_{f,l}}+F_{y_{f,r}}\right)\cos\delta\right] - l_r\left(F_{y_{r,l}}+F_{y_{r,r}}\right) \quad (۳)$$

که در آن جرم خودرو با نماد m، ممان اینرسی آن با نماد I_z و شتاب زاویه‌ای حول محور Z خودرو با $\ddot{\psi}$ نشان داده شده است. $F_{x_{\tau,\varepsilon}}$ نیروی طولی هر تایر و $F_{y_{\tau,\varepsilon}}$ نیروی عرضی هر تایر است.

شتاب‌های طولی و جانبی مرکز جرم در سیستم مختصات محلی به ترتیب با a_x و a_y مشخص شده‌اند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$a_x = \dot{v}_x - v_y\dot{\psi}, \qquad a_y = \dot{v}_y + v_x\dot{\psi} \quad (۴)$$

در رابطه (۵)، F_{aero} نیروی پسای آیرودینامیک است و با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$F_{aero} = \frac{۱}{۲}\rho C_d A_F\left(v_x + v_{w\,ind}\right)^۲ \quad (۵)$$

که در آن ρ چگالی هوا، C_d ضریب پسای آیرودینامیکی و $v_{w\,ind}$ سرعت باد است. A_F نیز بیانگر سطح تصویر شده در راستای طولی یا همان سطح مؤثر خودرو بوده و برای خودروهای سواری با جرم ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$I_w\dot{\omega}_{\tau,\varepsilon} = -F_{x_{\tau,\varepsilon}}.R_w + (T_b+T_d)_{\tau,\varepsilon} - T_{roll_{\tau,\varepsilon}} \qquad \tau\in\{f,r\},\varepsilon\in\{l,r\} \quad (۶)$$

باید تأکید کرد که نیروی آیرودینامیکی رابطه (۵) بسیار ساده است و برای استفاده در ناحیه جلوی خودرو مناسب است. تعاملات آیرودینامیکی در دنیای واقعی پیچیده‌تر است. تجزیه و تحلیل دقیق‌تر این مورد در تحقیق حسین[1] و همکاران صورت پذیرفته است [۲۷].

1 K. Hussain

۲- ۲- معادلات حرکت چرخ

چرخ یکی از مهم‌ترین زیرسیستم‌ها در بررسی رفتار دینامیکی خودرو است. در رابطه (۷) معادلات هر چرخ بیان شده است.

$$F_{\gamma_{\tau,\varepsilon}} = \frac{S_{\gamma_{\tau,\varepsilon}}}{S_{\tau,\varepsilon}} \mu_{\tau,\varepsilon} F_{z_{\tau,\varepsilon}} \qquad \gamma \in \{x, y\},\ \ \tau \in \{f, r\},\ \varepsilon \in \{l, r\} \tag{۷}$$

که در آن I_w ممان اینرسی دورانی هر چرخ، $F_{x_{\tau,\varepsilon}}$ نیروی طولی هر تایر، R_w شعاع مؤثر چرخ، $\dot{\omega}$ سرعت زاویه‌ای هر چرخ، T_b گشتاور ترمزی کل، T_e گشتاور موتور منتقل شده به چرخ و T_{roll} گشتاور مقاوم غلتشی هر چرخ است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} F_{z_{f,l/r}} &= m\left[\frac{g l_r - a_{x_{cg}} h_{cg} - \frac{F_{aero} h_{aero}}{m}}{۲l} \mp \frac{l_r}{l}\frac{h_{cg}}{t_w} a_{y_{cg}}\right], \\ F_{z_{r,l/r}} &= m\left[\frac{g l_f + a_{x_{cg}} h_{cg} + \frac{F_{aero} h_{aero}}{m}}{۲l} \pm \frac{l_f}{l}\frac{h_{cg}}{t_w} a_{y_{cg}}\right] \end{aligned} \tag{۸}$$

که در آن f_r معرف ضریب مقاومت غلتشی و F_z نشان‌دهنده نیروی نرمال هر تایر است.

دینامیک تایر

با فرض وابستگی خطی نیروی اصطکاک تایرها به نیروی عمودی هر تایر، می‌توان نیروی اصطکاک طولی و عرضی هر تایر را با رابطه (۹) بیان کرد [۲۶].

$$S_{\tau,\varepsilon} = \sqrt{(S_{x_{\tau,\varepsilon}})^۲ + (S_{y_{\tau,\varepsilon}})^۲}, \qquad \tau \in \{f, r\},\ \varepsilon \in \{l, r\} \tag{۹}$$

که در آن F_{z_τ} معرف بار عمودی طولی یا عرضی، $\mu_{\tau,\varepsilon}$ ضریب اصطکاک طولی یا عرضی و S_{γ_τ} لغزش طولی یا عرضی هر یک از تایرهای جلو یا عقب است. همچنین $S_{\tau,\varepsilon}$ بیانگر لغزش کل هر تایر است.

هر چند محاسبه دقیق نیروی عمودی تایر با در نظر گرفتن دینامیک سیستم تعلیق به آسانی قابل انجام است، اما این امر باعث افزایش مرتبه مدل دینامیکی خواهد گردید. برای پرهیز از این مسئله در این پژوهش از دینامیک سیستم تعلیق صرف نظر شده و نیروی عمودی تایر با در نظر گرفتن شتاب طولی خودرو به صورت تقریبی از روابط (۱۰) محاسبه شده است.

$$S_{x_{\tau,\varepsilon}} = \frac{v_{rw_{\tau,\varepsilon}} - v_{cw_{\tau,\varepsilon}}}{\max(v_{rw_{\tau,\varepsilon}}, v_{cw_{\tau,\varepsilon}})} \qquad \tau \in \{f, r\},\ \varepsilon \in \{l, r\} \tag{۱۰}$$

با توجه به این روابط روشن است که مجموع نیروهای عمودی تایرها برابر نیروی وزن خودرو است.

ضریب $\mu_{\tau,\varepsilon}$ را نیز می‌توان با استفاده از فرمول پژکا جادویی، به صورت زیر محاسبه نمود [۲۸].

$$\begin{aligned} v_{cw_{f,l/r}} &= v_{cg} \mp \dot{\psi}\left(\frac{t_w}{۲} \mp l_f \beta\right), \\ v_{cw_{r,l/r}} &= v_{cg} \mp \dot{\psi}\left(\frac{t_w}{۲} \pm l_r \beta\right) \end{aligned} \tag{۱۱}$$

که در آن ضرایب B، C و D ثابت است.

لغزش طولی هر یک از تایرهای جلو یا عقب و راست یا چپ، تابعی از سرعت طولی نقطه تماس تایر با سطح جاده $v_{cw_{\tau,\varepsilon}}$ و سرعت طولی معادل دوران چرخ $v_{rw_{\tau,\varepsilon}}$ است و با رابطه (۱۲) محاسبه شده است.

$$v_{rw_{\tau,\varepsilon}} = R_W \omega_{\tau,\varepsilon} \qquad \tau \in \{f, r\}, \varepsilon \in \{l, r\} \tag{۱۲}$$

سرعت طولی نقطه تماس تایر با سطح جاده برای هر یک از تایرهای جلو و عقب به کمک رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$S_{y_r} \approx \alpha_\tau \qquad \tau \in \{f, r\} \tag{۱۳}$$

جدول ۱. مقادیر پارامترهای خودرو

Table 1. Values of the vehicle parameters

نماد پارامتر	واحد	مقدار	نماد پارامتر	واحد	مقدار
m	kg	۱۴۵۰	v_{wind}	m/sec	۰
I_z	kg.m^2	۲۷۴۰	R_w	m	۰/۳
l_f	m	۱/۱	I_w	kg.m^2	۰/۹
l_r	m	۱/۶	f_r	---	۰/۰۱۵
t_w	m	۱/۵۵	B	---	۷
h_{cg}	m	۰/۴	C	---	۱/۶
h_{aero}	m	۰/۴	D	---	۰/۵۲

چنانچه سرعت دورانی هر چرخ با نماد $\omega_{\tau,\varepsilon}$ نشان داده شود، سرعت طولی معادل دوران چرخ‌ها از رابطه (۱۴) تعیین می‌گردد.

$$\alpha_f = \delta - \arctan\left(\frac{v_y + \dot{\psi} l_r}{v_x}\right), \quad \alpha_r = -\arctan\left(\frac{v_y - \dot{\psi} l_r}{v_x}\right) \tag{۱۴}$$

با یک دقت خوب می‌توان فرض کرد که لغزش‌های جانبی تایر جلو/عقب برابر هستند. با فرض کوچک بودن زاویه لغزش تایر، لغزش جانبی هر لاستیک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\delta = \begin{cases} \delta_f \sin(\frac{۲\pi}{t_{arv}} t) & t < t_{arv} \\ -۱/۵(t - t_{arv}) & t > t_{arv} \ \& \ \delta > -\delta_f \\ -\delta_f & t > t_{arv} \ \& \ \left|\tan^{-1}(X/Y)\right| > \varepsilon \end{cases} \tag{۱۵}$$

زاویه لغزش تایر جلو α_f و زاویه لغزش تایر عقب α_r را به ترتیب می‌توان با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه نمود.

$$t_{arv} = \frac{X_{arv}}{V_{x_0}} \tag{۱۶}$$

مقادیر پارامترهای مدل دینامیکی خودرو مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۱۹].

۳- طراحی مسیر حرکت

تعویض خط در سرعت‌های بالا در شرایطی که امکان بروز حادثه فراهم است، یک مانور راهبردی جهت جلوگیری از برخورد به حساب می‌آید. هدف این بخش، طراحی مسیر حرکت مانور تعویض خط با الگوبرداری از عملکرد راننده ماهر در سرعت بالا است. در بحث طراحی مسیر حرکت باید دو هدف اجتناب از برخورد و قابل پیمایش بودن مسیر تأمین گردد. فرآیند طراحی مسیر حرکت، براساس دو پارامتر ۱. عملکرد ورودی راننده در هنگام مانور تعویض خط در سرعت بالا و ۲. شبیه‌سازی دینامیکی سیستم حرکتی خودرو براساس ورودی راننده، انجام شده است و مسیرهای طراحی شده به کمک یک منحنی درجه ۵ برازش شده‌اند.

۳- ۱- شبیه‌سازی الگوی رفتاری راننده

مانور تعویض خط در سرعت‌های بالا یک مانور استاندارد است [۲۹]. در این مانور راننده ماهر به کسی گفته می‌شود که بتواند این مانور را در شرایط استاندارد آن طی نماید. با بررسی الگوی رفتاری راننده‌های ماهر در مانور تعویض خط اضطراری در سرعت‌های بالا (بیش از ۷۰ km/h) بوسیله تحلیل فیلم‌های موجود از عملکرد این رانندگان در زمان اجرای مانور در تست‌های استاندارد آزمون تعویض خط [۳۰ و ۳۱]، می‌توان دریافت که در این سناریو، راننده تنها از عملگر فرمان جهت انجام مانور استفاده می‌نماید و به فرمان یک ورودی شبه سینوسی اعمال می‌کند. در این شرایط، راننده هنگام وقوع یک وضعیت اضطراری تلاش می‌کند با یک عملکرد سینوسی سریع، از مانع عبور کرده و از بروز حادثه و برخورد جلوگیری نماید. در این حالت، مراحل سناریوی تعویض خط به دو بخش ۱.عبور از مانع و ۲.بازگشت

به خط مستقیم، تقسیم می‌شود. نمودار ورودی زاویه چرخ (فرمان) توسط راننده در این دو حالت به صورت رابطه (۱۷) بیان شده است. در مرحله اول یک ورودی سینوسی به چرخ (فرمان) خودرو داده شده است تا عبور از مانع صورت پذیرد، در ادامه برای بازگرداندن خودرو به خط مستقیم، یک زاویه ثابت به خودرو اعمال شده است. برای حفظ پیوستگی نمودارهای این دو مرحله، براساس نرخ افزایش عملی زاویه چرخ خودرو، رابطه‌ای نسبت به زمان تعریف شده است تا نقطه انتهایی زاویه چرخ در حالت اول به مقدار $-\delta_f$ یعنی نقطه ابتدای حالت دوم برسد. در این حالت نرخ تغییرات زاویه چرخ ۱/deg/s۵ در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی این رفتار، طراحی مناسب دامنه و دوره تناوب عملکرد سینوسی راننده از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع با انتخاب صحیح و دقیق این دو پارامتر می‌توان مسیر مناسب را براساس الگوی رفتاری راننده شبیه‌سازی و شناسایی نمود.

$$y(x) = b_1 x^5 + b_2 x^4 + b_3 x^3 + b_4 x^2 + b_5 x + b_6 \quad (۱۷)$$

که در آن δ_f حداکثر زاویه اعمالی به چرخ جلو و t_{arv} زمان رسیدن به مانع است و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$y(x) = b_1 x^5 + b_2 x^4 + b_3 x^3 + b_4 x^2 \quad (۱۸)$$

در این رابطه فرض شده است که در زمان تعویض خط، سرعت طولی خودرو ثابت است. به دو دلیل این فرض قابل پذیرش است:

زمان این مانور در سرعت بالا، به طور متوسط کمتر از ۱/s۵ است، لذا به علت عدم استفاده راننده از پدال گاز در طول مانور تعویض خط، سرعت خودرو در انتهای مانور با سرعت اولیه آن تفاوت چندانی ندارد.

به دلیل افت سرعت خودرو در طول مانور، زمان محاسبه شده در رابطه (۱۸) کمی کمتر از زمان واقعی انجام مانور است. این مسئله خود باعث ایجاد نوعی ضریب ایمنی برای سریع‌تر اعمال شدن ورودی زاویه چرخ به رابطه (۱۷) است.

در ادامه مسیرهای شبیه‌سازی شده با یک منحنی درجه ۵ برازش شده‌اند (رابطه (۱۹)) [۱۱]. جهت تحقق این امر فرض‌های منحنی مسیر عبارتند از:

موقعیت خودرو در ابتدای انجام مانور تعویض خط بر روی مبدأ مختصات است.

در ابتدای انجام مانور، راستای طولی مسیر خودرو موازی با محور افقی است. بنابراین شیب منحنی در $x = ۰$ برابر صفر است.

لذا، شرایط مرزی به صورت $y(۰) = ۰$ و $y'(۰) = ۰$ است. با اعمال این شرایط مرزی بر منحنی درجه ۵ رابطه (۱۹)، منحنی رابطه (۲۰) به دست آمده است.

$$\begin{cases} Y_{arv,\max} < Y_A + t_w/۲ + n_1 & \rightarrow \text{Collision with obsticle} \\ Y_{f,\min} > Y_{Crit} = Y_{road} - t_w/۲ + n_2 & \rightarrow \text{Collision with road boundery} \end{cases} \quad (۱۹)$$

$$\delta_C = \delta_{HM} + \delta_{PD} \quad (۲۰)$$

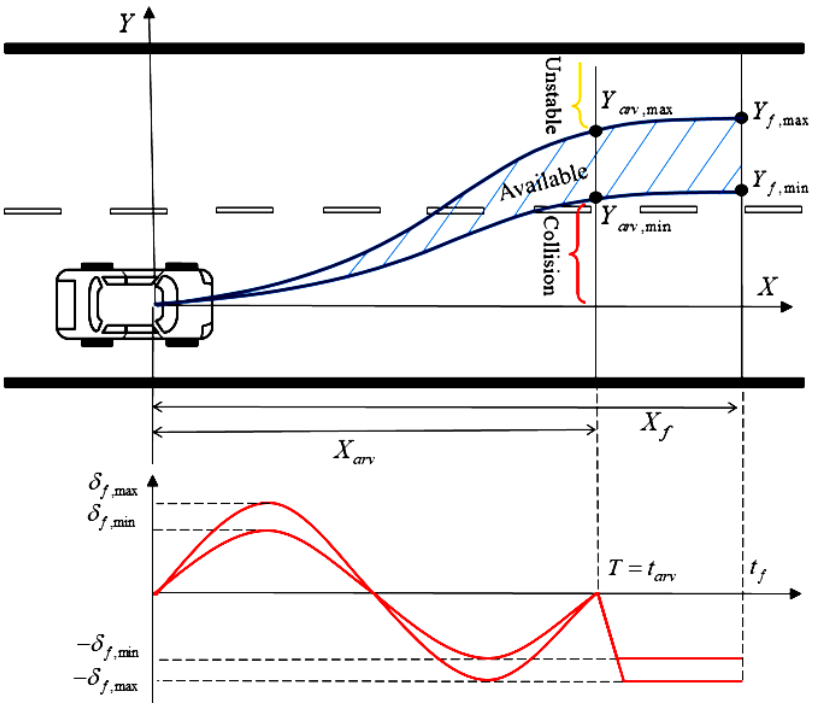
۳- ۲- طراحی محدوده مسیر حرکت

مسیرهای حرکت مانور تعویض خط در سرعت بالا با الگوبرداری از رفتار یک راننده ماهر، در شرایطی که فاصله از مانع برابر X_{arv} و سرعت اولیه خودرو V_{x_0} است، به صورت دسته مسیرهایی استخراج می‌شود که از اعمال ورودی رابطه (۱۷) به دینامیک خودرو، در زوایای δ_f مختلف، به دست آمده است. برای هر زوج X_{arv} و V_{x_0} مقدار δ_f تا حد مشخصی ($\delta_{f,\max}$) قابل افزایش است و بعد از آن مسیرهای به دست آمده شرایط پایداری را ندارند؛ زیرا قیدهای دینامیکی در طول مسیر حرکت از محدوده تعیین شده خارج شده‌اند. این قیدهای پایداری به صورت زیر تعریف شده‌اند و با کمک رابطه (۱۱) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ضریب اصطکاک هر تایر در طول مسیر حداکثر ۰/۵ باشد.

لغزش کلی هر تایر در طول مسیر حداکثر ۰/۱۵ باشد.

مشخص است که حداقل میزان زاویه چرخ ($\delta_{f,\min}$) برای موقعیتی خواهد بود که جابه‌جایی عرضی متناظر خودرو در لحظه (t_{arv}) رسیدن به مانع ($Y_{arv,\min}$) به اندازه‌ای باشد که بتواند از برخورد جلوگیری نماید. در شکل ۲ سه ناحیه نشان داده شده است. در صورتی که مسیر مانور تعویض خط در ناحیه قرمز رنگ باشد، برخورد با مانع صورت می‌پذیرد. اگر مسیر مانور تعویض خط وارد ناحیه زرد رنگ شود، خودرو شرایط پایدار خود را به دلیل عدم رعایت محدوده مجاز قیدهای دینامیکی ذکر شده از دست خواهد داد. ناحیه آبی رنگ تنها بخشی است که مسیرهای مانور تعویض خط طراحی شده در آن قابل پیاده‌سازی هستند؛ زیرا در این ناحیه می‌توان یک مانور تعویض خط امن را بدون برخورد با مانع و با حفظ پایداری دینامیکی



شکل ۲. محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت در مانور تعویض خط

Fig. 2. Path traversible range in the lane change maneuver

جدول ۲. اطلاعات مربوط به داده‌های آموزشی شبکه‌های عصبی

Table 2. Information on neural network training data

پارامتر	نقطه ابتدایی	نقطه انتهایی	گام
X_{arv} (m)	۲۰	۶۰	۲
V_{x_0} (km/h)	۸۰	۱۲۰	۵

خودرو انجام داد.

۳- ۳- طراحی مسیر نهایی حرکت

برای انتخاب مسیر نهایی حرکت[1] از دو قید هندسی جهت جلوگیری از برخورد و خروج از مرزهای جاده در هنگام مانور تعویض خط استفاده شده است. این دو قید به صورت زیر و براساس شکل ۳ بیان شده است:

فاصله گوشه خودرو هنگام عبور از مانع n_1 است. بنابراین فاصله عرضی مرکز خودرو در این لحظه باید بیشتر از $Y_{arv} > Y_A + t_w/2 + n_1$ باشد. که در آن Y_A طول مانع، t_w عرض ماشین و n_1 ضریب اطمینان لازم هنگام عبور خودرو از کنار مانع می‌باشد.

فاصله مطمئن خودرو از مرز جاده n_2 است. بنابراین لازم است رابطه $Y_{Crit} = Y_{road} - (t_w/2 + n_2) > Y_f$ جهت عدم برخورد با مرز جاده برقرار باشد. که در آن Y_{Crit} بیشترین جابه‌جایی عرضی خودرو بدون خروج از مرزهای جاده و Y_f جابجایی عرضی نهایی خودرو است.

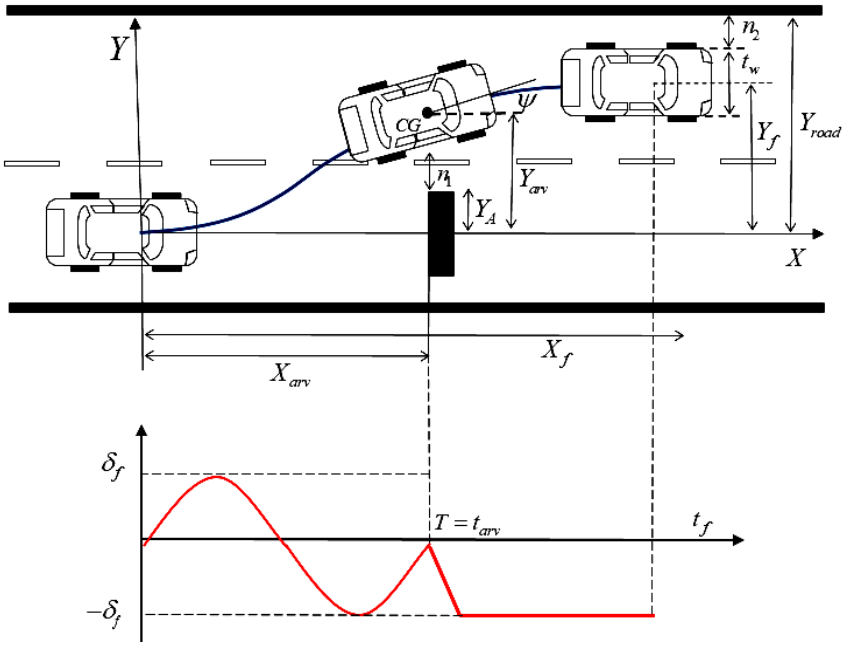
در نهایت مسیری که شرایط این دو قید هندسی در آن برقرار باشد؛ به عنوان مسیر نهایی در مانور تعویض خط انتخاب می‌شود.

در ادامه آموزش شبکه عصبی بر اساس محدوده داده‌های جدول ۲ و ضرایب منحنی‌های درجه ۵ بدست آمده انجام شده است.

۴- سیستم‌های شبکه عصبی طراحی مسیر حرکت

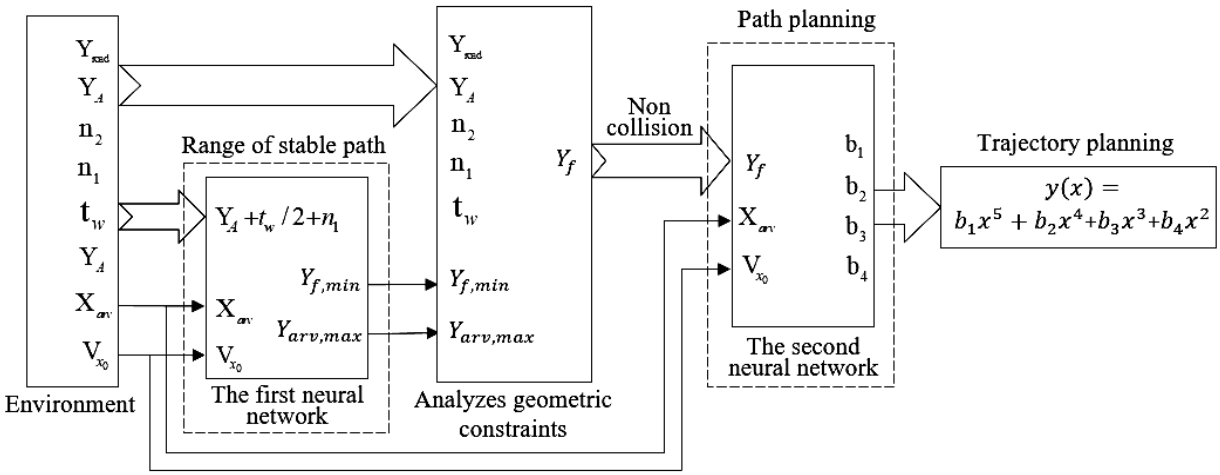
فرآیند طراحی مسیر بدین گونه است که ابتدا به کمک یک شبکه عصبی اولیه، محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت با تمرکز بر حفظ قیدهای پایداری

1 Trajectory



شکل ۳. شماتیک هندسی مسیر حرکت خودرو به ازای ورودی زاویه چرخ جلو در طول انجام مانور تعویض خط

Fig. 3. Geometric schematic of the car trajectory for the front wheel angle input during the LCM



شکل ۴. الگوریتم طراحی مسیر حرکت

Fig. 4. Path planning algorithm

خودرو و عدم برخورد با مانع تعیین می‌شود و بعد از شناسایی این محدوده، با استفاده از یک شبکه عصبی ثانویه، ضرایب منحنی مسیر نهایی محاسبه می‌شود. الگوریتم این فرآیند در شکل ۴ نشان داده شده است. در این دو شبکه از الگوریتم شبکه عصبی چندلایه پرسپترون[1] استفاده شده است.

در شبکه عصبی اول هدف یافتن محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت جهت جلوگیری از برخورد و همچنین عدم خروج از مرزهای جاده است؛ لذا نیاز است که بیشترین جابه‌جایی عرضی خودرو $Y_{arv,\max}$ در شرایط پایدار در لحظه t_{arv}، از رابطه $Y_A + t_w/2 + n_1$ (عرض مانع) بیشتر باشد تا بتوان از برخورد و بروز حادثه جلوگیری نمود. همچنین برای جلوگیری از خروج خودرو

1 Multi - Layer perceptron

از مرزهای جاده، باید کمترین جابه‌جایی عرضی نهایی خودرو $Y_{f,\min}$ از مقدار Y_{Crit} (بیشترین جابه‌جایی عرضی خودرو بدون خروج از مرزهای جاده) کمتر باشد، در این شرایط می‌توان براساس شکل ۳ محدوده‌ای را یافت که بتوان در آن محدوده یک مسیر پایدار طراحی نمود که شرایط هندسی عدم برخورد در آن صدق کند. بنابراین با توجه به شکل ۴ در شبکه عصبی اول، با کمک سه ورودی سرعت اولیه خودرو، فاصله تا مانع و جابه‌جایی عرضی لازم، دو خروجی $Y_{arv,\max}$ و $Y_{f,\min}$ مشخص می‌شود. در بلوک آنالیز مسیر با کمک خروجی‌های شبکه عصبی اولیه و سایر داده‌های هندسی مانند عرض جاده، عرض خودرو، عرض مانع و ضرایب ایمنی، شرایط برخورد با مانع و عرض‌های جاده به صورت رابطه (۲۱) بررسی می‌شود و در صورتی شرایط عدم برخورد برقرار باشد جابه‌جایی عرضی نهایی به صورت رابطه $Y_f = Y_{f,\min} + n_۲ / ۵$ وارد شبکه عصبی دوم می‌شود.

$$\psi_{ref} = \begin{cases} \tan^{-1}(\Delta Y_{ref} / \Delta X_{ref}) & ۰ < X < X_f \\ ۰ & X_f < X \end{cases} \qquad (۲۱)$$

در شبکه عصبی دوم، طراحی مسیر نهایی حرکت جهت مانور تعویض خط به کمک پارامتر مربوط به شرط عدم برخورد، یعنی حداقل فاصله مجاز از مانع و فاصله ایمن از مرزهای جاده صورت می‌گیرد. همان‌طور که در بخش ۳-۱ بیان شد، مهم‌ترین ویژگی شبکه عصبی طراحی مسیر، پایدار بودن مسیر طراحی شده است و دیگر مانند سایر روش‌ها نیازی به بررسی این مورد نخواهد بود که این امر در بالا بردن زمان طراحی مسیر اهمیت بسزایی دارد. براساس بلوک دیاگرام شکل ۴، ورودی شبکه عصبی دوم سه پارامتر فاصله از مانع X_{arv} و سرعت اولیه خودرو $V_{x_۰}$ و جابه‌جایی عرضی نهایی خودرو Y_f و خروجی آن ضرایب مربوط به چندجمله‌ای درجه ۵ رابطه (۲۰) می‌باشد که نشان دهنده مسیر حرکت مانور تعویض خط است. قابل ذکر است که آموزش شبکه عصبی فوق بر اساس داده‌های بدست آمده از جدول ۲ است، به این صورت که مقدار ضرایب $b_۱$، $b_۲$، $b_۳$ و $b_۴$ به ازای شرایط اولیه مختلف، پس از برازش چندجمله‌ای درجه ۵ بر روی هر مسیر به دست آمده است.

در شبکه‌های عصبی ارائه شده در پژوهش جاری به دلایل زیر از ساختار شبکه عصبی چند لایه پرسپترون بهره گرفته شده است:

شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون به جهت میان‌یابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش بر اساس شرایط اولیه مسئله و به منظور اخذ خروجی، عملیات میان‌یابی صورت می‌گیرد. در طرف مقابل، از شبکه‌های عصبی دیگر نظیر شبکه عصبی کانولوشن در مسائل پردازش تصویر، از شبکه عصبی احتمالی در مسائل تشخیص الگو و کلاس بندی و از شبکه عصبی بازگشتی در مسائلی نظیر پردازش صوت، ترجمه و به طور کلی، مسائلی با ماهیت ترتیبی بهره گرفته می‌شود [۳۲].

در شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون، بر خلاف شبکه عصبی توابع شعاعی پایه و شبکه عصبی احتمالی، در صورت ضرورت، تعداد لایه‌های پنهان قابل افزایش است [۳۳].

توابع فعال‌سازی لایه‌های شبکه عصبی چند لایه پرسپترون می‌تواند هر تابعی اعم از خطی و غیرخطی باشد. حال آن که در شبکه‌های عصبی توابع شعاعی پایه ، تابع فعال‌سازی صرفاً فاصله اویلری بردار ورودی و وزن‌ها را محاسبه می‌کند و در شبکه عصبی احتمالی، به عنوان تابع فعال‌سازی، از تابع توزیع احتمال استفاده می‌شود [۳۳].

پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون ساده‌تر است. از طرفی پیاده‌سازی و آموزش شبکه عصبی بازگشتی نسبتاً دشوار است [۳۴].

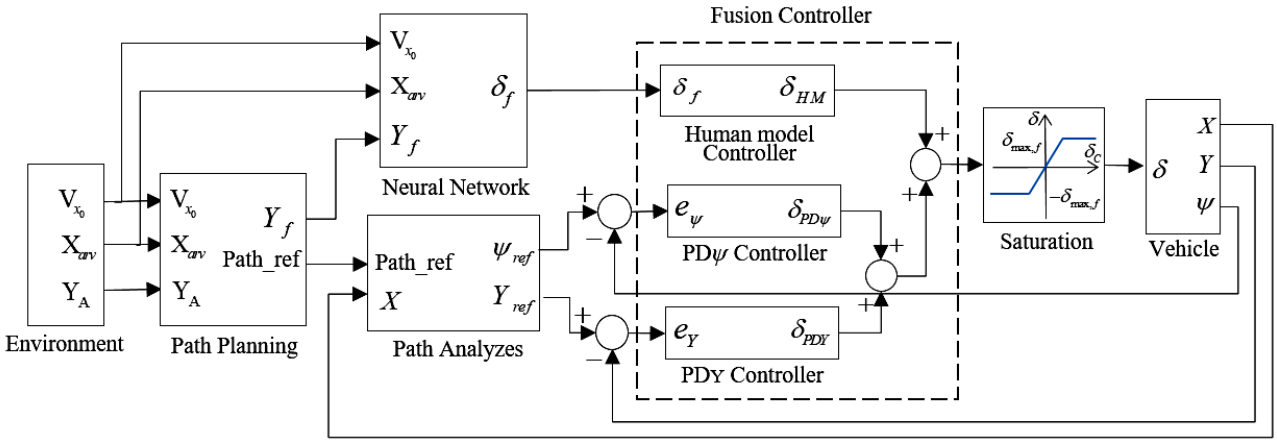
باید افزود به جهت انتخاب تعداد نورون‌ها و لایه‌های پنهان شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون، قواعد و اصول مشخصی وجود نداشته و تعداد بهینه آن‌ها، صرفاً با آزمون و خطا مشخص می‌شود [۳۳].

۵- طراحی کنترلر

فرآیند کنترلی طراحی شده متشکل از دو بخش است. بخش اول از الگوی رفتاری راننده ماهر در مانور تعویض خط الهام گرفته شده است که در این مانور بار اصلی کنترل خودرو را نیز بر عهده دارد و نقش کنترلر را اعمال می‌کند. بخش دوم از دو کنترلر کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی تشکیل شده است که خروجی آنها با خروجی کنترلر اول جمع شده (رابطه (۲۲)) و وظیفه اصلی آن تصحیح خروجی کنترلر الگو انسانی برای دقیق‌تر دنبال کردن مسیر طراحی شده است. در شکل ۵ بلوک دیاگرام تصمیم‌گیری و کنترلی این سیستم نشان داده است.

$$\delta = \begin{cases} \delta_{\max,f} & \delta_{\max,f} < \delta_C \\ \delta_C & -\delta_{\max,f} < \delta_C < \delta_{\max,f} \\ -\delta_{\max,f} & \delta_C < -\delta_{\max,f} \end{cases} \qquad (۲۲)$$

در بلوک آنالیز مسیر، زاویه ψ_{ref} شیب مسیر حرکت در هر لحظه است و



شکل۵. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی مانور تعویض خط با الگوبرداری در عملکرد راننده در شرایط اضطراری

Fig. 5. Block diagram of control system of the LCM based on skilled driver's Performance in the emergency situations

براساس رابطه (۲۳) تعریف شده است که طبیعتاً بعد از رسیدن به مکان X_f (شکل ۳)، مقدار مطلوب آن صفر است. همچنین Y_{ref} جابه‌جایی عرضی خودرو در مسیر طراحی شده در بلوک طراحی مسیر (بخش۴) است و بعد از رسیدن آن به مکان X_f مقدار مطلوب آن Y_f است.

$$\delta_{PD} = \delta_{PD\psi} + \delta_{PDY} \tag{۲۳}$$

بلوک کنترلر (بخشی که با خطچین جدا شده است) شامل یک بلوک کنترلر الگوی انسانی و دو بلوک کنترلر PD است. خروجی کنترلر الگو انسانی (δ_{HM}) براساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود و مقدار δ_f به کمک یک شبکه عصبی محاسبه می‌شود. این شبکه عصبی از سه ورودی تشکیل شده است که دو ورودی سرعت اولیه خودرو و فاصله تا مانع از داده‌های محیطی دریافت می‌شود و جاجایی نهایی مورد نیاز خودرو از بلوک آنالیز مسیر بدست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود خروجی نهایی کنترلر یا همان زاویه اعمالی به چرخ جلو، از جمع مقادیر محاسبه شده توسط این دو کنترلر بدست می‌آید که به کمک یک بلوک اشباع با رابطه (۲۴) مقدار این خروجی محدود شده است و نمی‌تواند بیش از $\delta_{\max,f}$ یا کمتر از $-\delta_{\max,f}$ باشد. $\delta_{\max,f}$ حداکثر مقدار زاویه اعمالی به چرخ در طول مانور در شرایط پایدار براساس قیدهایهایهای پایداری تعریف شده در بخش طراحی مسیر است.

$$e_\psi = \psi_{ref} - \psi \tag{۲۴}$$

کنترلر PD، از دو بلوک کنترلی PDψ و PDY تشکیل شده است و خروجی آن طبق رابطه (۲۵) از جمع مقادیر محاسبه شده توسط این دو کنترلر بدست می‌آید.

$$e_Y = Y_{ref} - Y \tag{۲۵}$$

$\delta_{PD\psi}$ خروجی کنترلر PDψ است که براساس خطای محاسبه شده از مقدار صحیح زاویه حول محور Z و مقدار واقعی این زاویه در هر لحظه طبق رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = Y_A + t_w/۲ + n_۱ \\ Y_{road} = Y_{Crit} + t_w/۲ + n_۲ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Y_{arv,\min} = ۱/۵ + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \\ ۵/۵ = Y_{Crit} + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Y_{arv,\min} = ۲/۷۸m \\ Y_{Crit} = ۴/۲۲m \end{cases} \tag{۲۶}$$

همچنین δ_{PDY} خروجی کنترلر PDY است که براساس خطای محاسبه شده از مقدار صحیح جابه‌جایی عرضی خودرو و مقدار واقعی این جابه‌جایی در

هر لحظه طبق رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = Y_A + t_w/۲ + n_۱ \\ Y_{road} = Y_{Crit} + t_w/۲ + n_۲ \end{cases} \rightarrow$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۲ + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \\ ۵/۵ = Y_{Crit} + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \end{cases} \rightarrow \qquad (۲۷)$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۳/۲۸\text{m} \\ Y_{Crit} = ۴/۲۲\text{m} \end{cases}$$

در این دو کنترلر از عملگر انتگرالی استفاده نشده است. زیرا مقدار این عملگر به دلیل ماهیت انتگرالی بودن آن در طول مانور رشد کرده و اجازه صفر شدن این کنترلر را درصورت نیاز، در ادامه مانور نخواهد داد.

۶- نتایج شبیه‌سازی

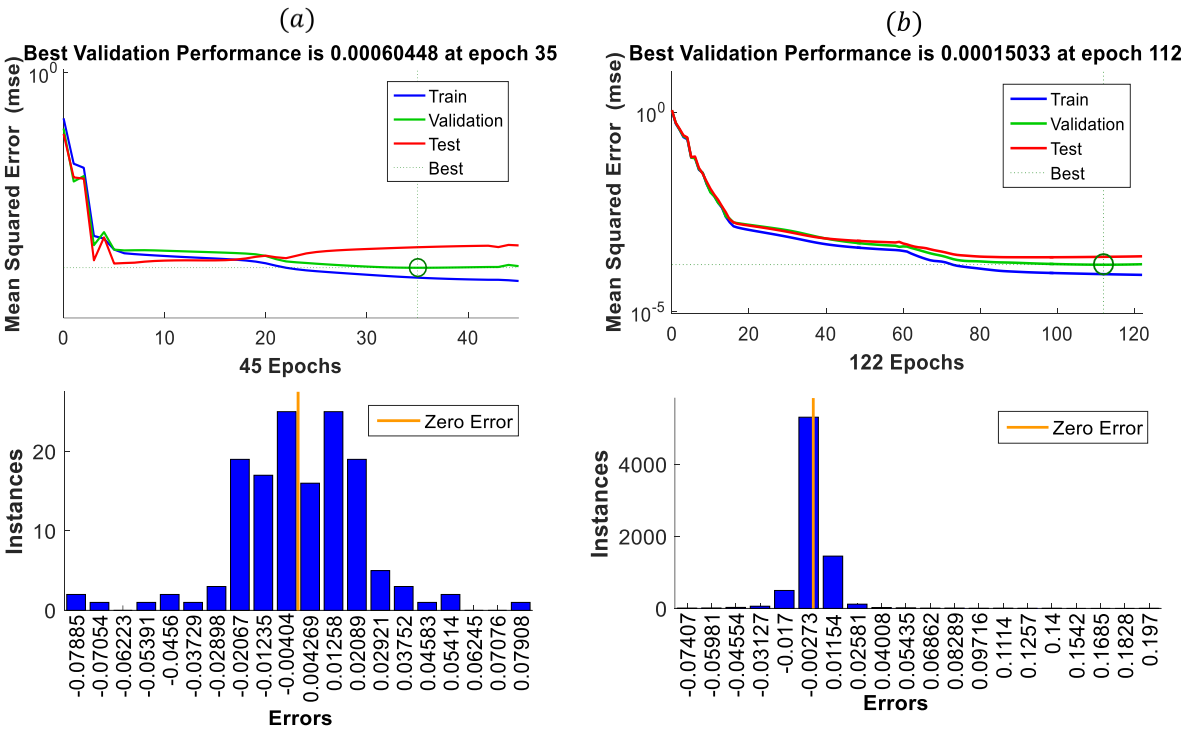
آموزش دو شبکه عصبی شناسایی محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت و طراحی مسیر حرکت براساس داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی دینامیکی رفتار راننده ماهر در مانور تعویض خط اضطراری در بخش‌های ۲ و ۳ صورت پذیرفته است. در این شبیه‌سازی‌ها، محدوده سرعت اولیه خودرو ۸۰ تا km/h ۱۲۰ و محدوده فاصله مانع از خودرو ۲۰ m تا ۶۰ m در نظر گرفته شده است. داده‌های خروجی حداکثر جابه‌جایی عرضی خودرو شبکه عصبی اولیه ۷ m است. همچنین در شبکه عصبی ثانویه ضرایب چند جمله‌ای برازش شده از مرتبه $۱۰^{-۴}$ الی $۱۰^{-۹}$ هستند. لذا با مقایسه این مقدار با بازه مقادیر ورودی می‌توان دریافت که داده‌های آموزشی این شبکه‌ها نیاز به نرمالیزاسیون[1] دارند. بنابراین پیش از فرآیند آموزش، عملیات نرمالیزاسیون با هدف تصویر تمامی مقادیر بر بازه [۱,۱-] صورت گرفته است. جهت افزایش پایداری شبکه‌های عصبی، ۷۰ درصد از داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش، ۱۵ درصد مربوط به داده‌های ارزیابی و ۱۵ درصد دیگر مربوط به داده‌های تست در نظر گرفته شده است. همچنین در شبکه‌های عصبی جهت جلوگیری از گرفتار شدن شبکه در مینیمم محلی از الگوریتم بازنشر رو به عقب بایزین[2] استفاده شده است که نرخ یادگیری آن تطبیق‌پذیر است و ثابت نیست. شبکه عصبی اول شامل سه لایه پنهان است و در هر لایه پنهان ۳، ۵ و ۳ نورون وجود دارد. همچنین شبکه عصبی دوم دارای پنج لایه پنهان و در هر لایه به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۱۵، ۱۵ و ۱۰ نورون وجود دارد. به علت رابطه غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی، توابع فعال‌سازی لایه‌های پنهان، سیگموید تک قطبی انتخاب شده است. همچنین به عنوان تابع فعال‌سازی لایه خروجی، از تابع خطی بهره گرفته شده تا مقادیر خروجی دچار اشباع[3] نگردد.

براساس شکل ۶الف، در شبکه عصبی شناسایی محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت پس از ۳۵ تکرار، بهینه‌ترین مقدار خطای میانگین مربعات داده‌های ارزیابی ۰/۰۰۰۶$m^۲$ (نرمالایز شده) به دست آمده است. بعد از بازگرداندن داده‌ها به مقیاس اصلی، با مقایسه داده‌های اصلی با خروجی شبکه، بیشترین درصد خطای شبکه حدود ۱۰ درصد به دست آمده است؛ یعنی به ازای هر یک متر ±۱۰cm خطا در شبکه وجود دارد. در شبکه عصبی طراحی مسیر حرکت (شکل ۶ب) پس از ۱۱۲ تکرار، بهینه‌ترین مقدار خطای میانگین مربعات داده‌های ارزیابی ۰/۰۰۰۱۵ به دست آمده است. بعد از بازگرداندن داده‌ها به مقیاس اصلی، با مقایسه داده‌های اصلی با خروجی این شبکه، بیشترین درصد خطای شبکه حدود ۱۱ درصد محاسبه شده است؛ یعنی به ازای هر یک متر، ±۱۱cm خطا در مسیر طراحی شده توسط شبکه وجود دارد. همچنین در هر دو شبکه عصبی هیستوگرام خطای توزیع داده‌ها، گوسی و با انحراف معیار تقریباً ناچیز است که نشان از عملکرد مناسب شبکه‌ها دارد. مقایسه مسیر حرکت طراحی شده توسط شبکه عصبی و مسیر حرکت اصلی و میزان خطای آنها برای حالت‌هایی که سرعت‌های اولیه ۸۰، ۱۰۵و km/h ۱۲۰ است، در شکل ۷ نشان داده شده است. فاصله از مانع در این سه حالت به ترتیب ۲۲، ۳۴ و ۵۲ m در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه حالت، مسیر حرکت طراحی شده توسط شبکه عصبی با مسیر اصلی تفاوت چندانی ندارد. از میان سه حالت شبیه‌سازی شده، بیشترین میزان خطا مربوط به حالت دوم است که در نقطه انتهایی مسیر پیش آمده است و برابر ۲۱ cm است. این خطا نسبت به فاصله جابه‌جایی عرضی ۲/۹ m مقداری ناچیز و حدود ۷ درصد است. بنابراین شبکه عصبی طراحی مسیر عملکردی مناسب و قابل اطمینان دارد.

۶- ۱- شبیه‌سازی سیستم طراحی مسیر حرکت

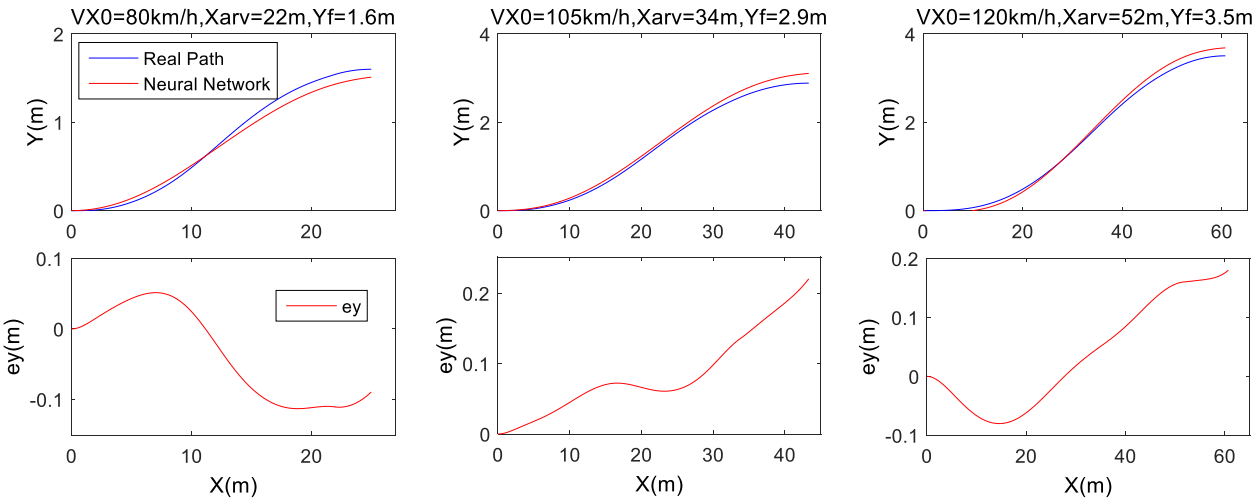
جهت بررسی عملکرد شبکه عصبی طراحی مسیر دو شرایط مختلف شبیه‌سازی و پایداری مسیرها با کمک شبیه‌سازی دینامیک سیستم بررسی شده است. در حالت اول فرض شده سرعت اولیه خودرو km/h ۹۰، فاصله از مانع ۳۲ m و ارتفاع مانع ۱/۵ m است و در حالت دوم سرعت اولیه خودرو km/h ۱۱۵، فاصله از مانع ۵۴ m و ارتفاع مانع ۲ m در نظر گرفته است.

1 Normalization
2 Bayesian regularization back propagation
3 Saturation



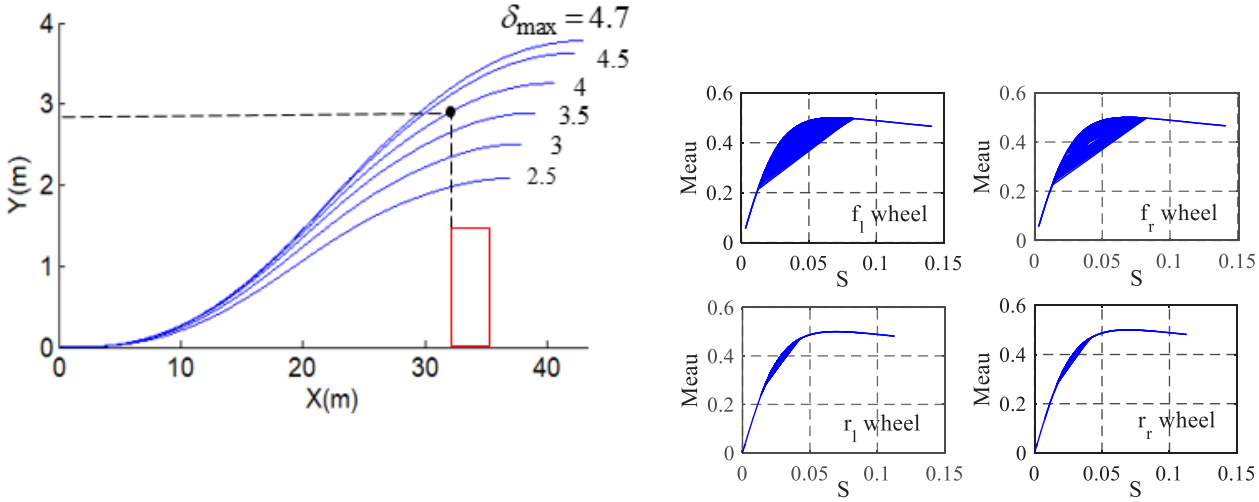
شکل ۶. نمودار عملکرد شبکه‌های عصبی الف. شناسایی محدوده قابل پیمایش مسیر حرکت و ب. طراحی مسیر حرکت

Fig. 6. Performance graph of the neural network A. identify the traversable range of path planning and B. trajectory planning



شکل ۷. مقایسه مسیر حرکت طراحی شده توسط شبکه عصبی و مسیر حرکت اصلی و میزان خطای آنها در سه شرایط مختلف

Fig. 7. Comparison of the neural network trajectory planinnig and the real path and their error rate in the different conditions



شکل ۸. مسیرهای طراحی شده توسط شبکه عصبی برای مسافت ۳۲ m و سرعت اولیه ۹۰ km/h و نمودار ضریب اصطکاک و لغزش کلی تایرهای جلو و عقب در حین مانور تعویض خط در زاویه چرخ بیشینه $\delta_{f,max}$ = ۴/۷°

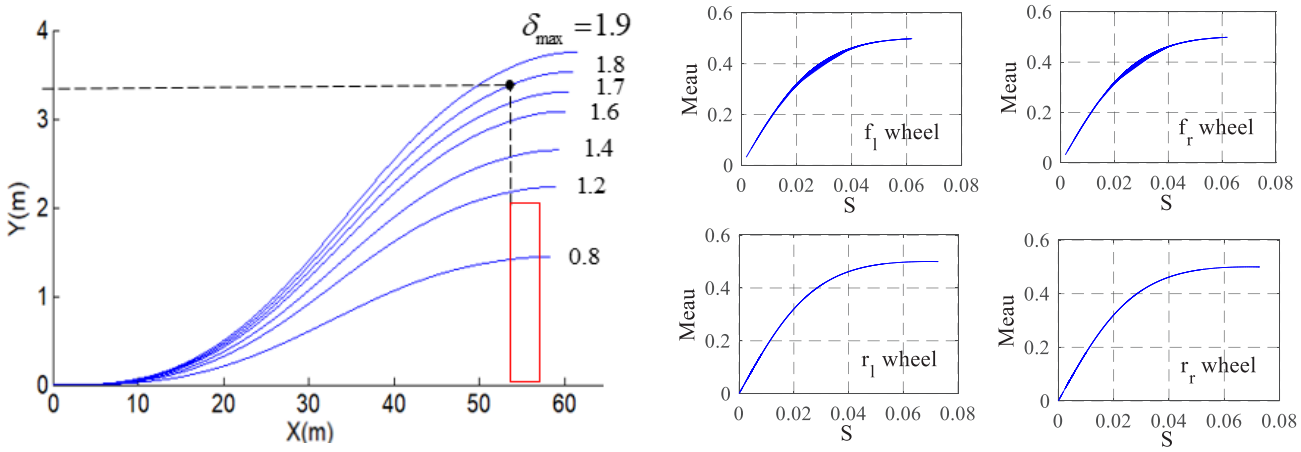
Fig. 8. Neural network path planning for 32m distance and 90km/h speed and diagram of friction coefficient and total slip of front and rear tires during lane change maneuver at maximum wheel angle $\delta_{f,max}$ = 4.7°

همچنین فاصله تا مرز جاده ۵/۵ m و ضریب اطمینان لازم هنگام عبور خودرو از کنار مانع و فاصله ایمن از مرز جاده ۰/m۵ در نظر گرفته شده است.

حالت اول: سرعت ۹۰ km/h، فاصله از مانع ۳۲ m، جابه‌جایی عرضی نهایی ۳/۲۶ m

شکل ۸ مسیرهای طراحی شده توسط شبکه عصبی جهت عبور از مانعی که در فاصله ۳۲ متری از خودرو را نشان داده است. براساس رابطه (۲۸) حداقل جابه‌جایی عرضی خودرو در لحظه رسیدن به مانع و حداکثر جابه‌جایی عرضی مجاز خودرو در انتهای مسیر به ترتیب ($Y_{arv,\min} = ۲/۷۸m$ و $Y_{Crit} = ۴/۲۲m$) می‌باشد. با توجه به اینکه جابه‌جایی نهایی تمامی مسیرها در حالت پایدار کمتر از ۴ m است، شرایط قید هندسی مرزهای جاده‌ای یا همان $Y_{f,\min} < Y_{Crit}$ برقرار می‌باشد. همچنین، مسیرهایی که زاویه اعمالی آنها بیش از $\delta_{\max}$ است، ناپایدار خواهند بود و شبکه عصبی آنها را بررسی نخواهد کرد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مسیری متناسب با زاویه چرخ ۴ درجه (زاویه δ_f مورد نیاز برای کنترلر الگو انسانی) دارای جابه‌جایی عرضی $Y_{arv} = ۲/۸۹$m در لحظه رسیدن به مانع است که از حداقل جابه‌جایی مورد نیاز بیشتر است؛ بنابراین قید هندسی مربوط به عدم برخورد ($Y_{arv} > Y_{arv,\min}$) نیز برقرار است.

نمودار ضریب اصطکاک و لغزش کلی تایر جلو عقب خودرو در این زاویه ۴/۷ درجه ($\delta_{f,\max}$) با کمک معادلات دینامیکی خودرو شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود محدوده قیدهای پایداری در طول مسیر حرکت حفظ شده است و در حالت پایدار جابه‌جایی عرضی مرکز جرم خودرو در لحظه رسیدن به مانع ($Y_{arv,\max}$) نمی‌تواند بیش از ۳/۲ m باشد؛ بنابراین اگر عرض مانع بیش از ۲/۵ متر باشد نمی‌توان از برخورد خودرو با مانع جلوگیری نمود. در چنین شرایطی در صورت استفاده از مانور تعویض خط خودرو وارد شرایط ناپایدار شده و به دلیل لغزش عرضی بیش از حد مجاز از مرزهای جاده خارج خواهد شد. حال باید دید در شرایط پیش آمده کاهش سرعت و تصادف بهینه خواهد بود یا خطرات خروج از جاده. در این زمینه تحقیقات و کارهای جالبی در دست اجرا است [۲۴-۲۶]، بخصوص آنکه مباحث فلسفی نیز بر شیوه‌های تصمیم‌گیری و طراحی مسیر تاثیرگذار است. در مرجع [۲۷] نیز، در یکی از سخنرانی‌های سمینارهای تد، این موضوع با طراحی یک آزمایش هوشمندانه و بررسی نظرات جامعه آماری ۵ میلیون نفر به چالش کشیده شده است.



شکل ۹. مسیرهای طراحی شده توسط شبکه عصبی برای مسافت ۵۴ m و سرعت اولیه ۱۱۵ km/h و مودار ضریب اصطکاک و لغزش کلی تایرهای جلو و عقب در حین مانور تعویض خط در زاویه چرخ بیشینه $\delta_{f,max}$ = ۱/۹°

Fig. 9. Neural network path planning for 54m distance and 115km/h speed and diagr am of friction coefficient and total slip of front and rear tires during lane change maneuver at maximum wheel angle $\delta_{f,max}$ = 1.9°

$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = Y_A + t_w/۲ + n_۱ \\ Y_{road} = Y_{Crit} + t_w/۲ + n_۲ \end{cases} \rightarrow$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۱/۵ + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \\ ۵/۵ = Y_{Crit} + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \end{cases} \rightarrow \quad (۲۸)$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۲/۷۸m \\ Y_{Crit} = ۴/۲۲m \end{cases}$$

حالت دوم: سرعت ۱۱۵ km/h، فاصله از مانع ۵۴ m، جابه‌جایی عرضی نهایی ۳/۵ m

در شکل ۹ مسیرهای طراحی شده توسط شبکه عصبی جهت عبور از مانعی که در فاصله ۵۴ متری از خودرو را نشان داده است. براساس رابطه (۲۹) حداقل جابه‌جایی عرضی خودرو در لحظه رسیدن به مانع و حداکثر جابه‌جایی عرضی مجاز خودرو در انتهای مسیر به ترتیب ($Y_{arv,\min} = ۳/۲۸$m و $Y_{Crit} = ۴/۲۲$m) می‌باشد. با توجه به اینکه جابه‌جایی نهایی تمامی مسیرها کمتر از ۴ m است شرایط قید هندسی مرزهای جاده‌ای یا همان $Y_{f,\min} < Y_{Crit}$ برقرار می‌باشد. همچنین، مسیرهایی که زاویه اعمالی آنها بیش از $\delta_{\max}$ است، ناپایدار خواهند بود و شبکه عصبی آنها را بررسی نخواهد کرد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مسیری متناسب با زاویه چرخ ۱/۸ درجه (زاویه δ_f مورد نیاز برای کنترلر الگو انسانی) دارای جابه‌جایی عرضی $Y_{arv} = ۳/۳۹$m در لحظه رسیدن به مانع است که از حداقل جابه‌جایی مورد نیاز بیشتر است؛ بنابراین قید هندسی مربوط به عدم برخورد ($Y_{arv} > Y_{arv,\min}$) نیز برقرار است. در شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک و لغزش کلی تایر جلو عقب خودرو در این زاویه ۱/۹ درجه ($\delta_{f,\max}$) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده قیدهای پایداری در طول مسیر حرکت حفظ شده است و در حالت پایدار جابه‌جایی عرضی مرکز جرم خودرو در لحظه رسیدن به مانع ($Y_{arv,\max}$) حداکثر ۳/m۶ می‌باشد. در این حالت لغزش کلی تایرها بیش از ۰/۰۸ نشده است، در صورتی که در حالت قبل این مقدار کمتر از ۰/۱۵ است. دلیل این امر تفاوت زیاد زاویه (δ_f) جهت انجام مانور است که در حالت اول ۴/۷ و در این حالت ۱/۹ درجه است. البته لازم به ذکر است لغزش کلی تایرها در هر دو حالت کمتر حد مجاز است و در حالت پایدار قرار دارند.

$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = Y_A + t_w/۲ + n_۱ \\ Y_{road} = Y_{Crit} + t_w/۲ + n_۲ \end{cases} \rightarrow$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۲ + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \\ ۵/۵ = Y_{Crit} + ۱/۵۶ \div ۲ + ۰/۵ \end{cases} \rightarrow \quad (۲۹)$$
$$\begin{cases} Y_{arv,\min} = ۳/۲۸\text{m} \\ Y_{Crit} = ۴/۲۲\text{m} \end{cases}$$

۶- ۲- شبیه‌سازی سیستم کنترلی

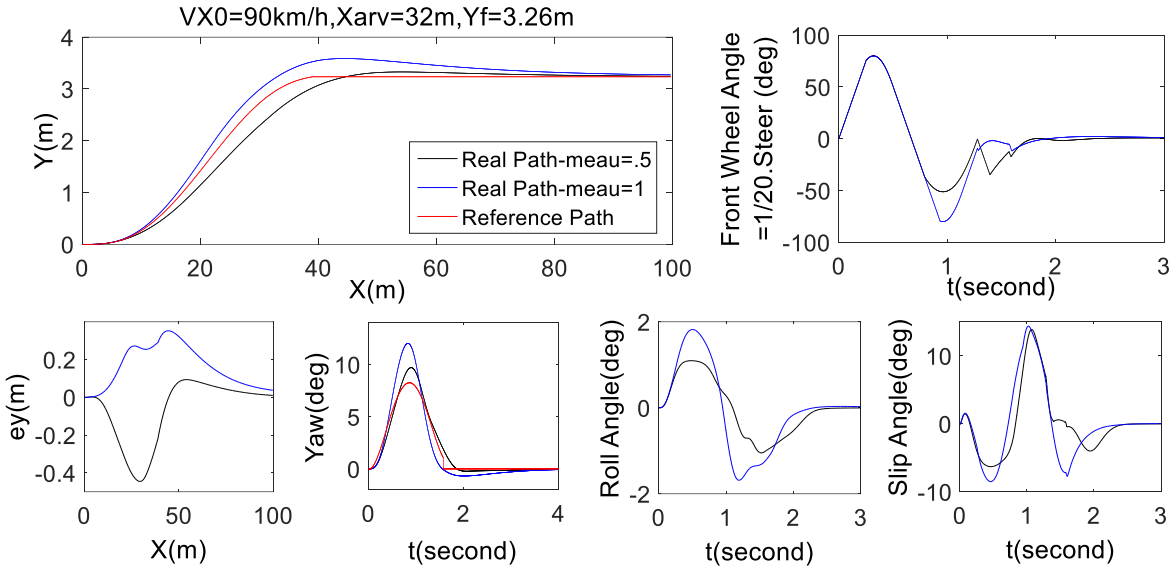
جهت صحت‌سنجی سیستم کنترلی طراحی شده برای انجام مانور تعویض خط اضطراری در دو حالت ذکر شده و در شرایط عدم قطعیت ضریب اصطکاک جاده‌ای در دو حالت جاده خشک ($\mu = ۱$) و مرطوب ($\mu = ۰/۵$)، از دو نرم افزار کارسیم و سیمولیک متلب استفاده شده است. براساس شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مسیر قرمز رنگ، مسیر طراحی شده توسط شبکه عصبی ثانویه است. خطوط آبی رنگ عملکرد خودرو در جاده خشک و خطوط سیاه عملکرد خودرو در جاده مرطوب نشان می‌دهد. در بلوک کنترلی PD ضرایب دو کنترلر PDψ و PDY به ترتیب $k_{p\psi} = ۲۰$ و $k_{d\psi} = ۲$ و $k_{pY} = ۵۰$ و $k_{dY} = ۱۰$ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم ترکیبی از دو کنترلر پیش‌خور و PD، با وجود عدم قطعیت در نظر گرفته شده، توانسته مسیر را دنبال کند و با به انتها رساندن مانور، عملکرد نسبتاً خوبی داشته باشد.

حالت اول: سرعت ۹۰ km/h، فاصله از مانع ۳۲ m

زمان انجام مانور در این حالت اول حدود ۱/۷ s و زمان رسیدن به مانع ۱/۳ s است. همان‌طور که در نمودار خطای جابه‌جایی عرضی مشخص است مسیر طی شده در جاده خشک کمی بالای مسیر اصلی است بنابراین در لحظه عبور از مانع مشکلی از لحاظ برخورد نیست، اما این مسئله اگر بیش از حد باشد می‌تواند قید هندسی مرزها جاده را نقص نماید. بعد عبور از مانع بیشترین انحراف خودرو از مسیر منتخب در جاده مرطوب بیشتر از جاده خشک و حدود ۳۵ سانتیمتر است؛ اما با توجه به ضریب ایمنی ۵۰ سانتیمتری تا مرز جاده و همچنین فاصله ۵۵ سانتیمتری از حداکثر جابه‌جایی عرضی مجاز خودرو $Y_{f,\max}$، عملکرد کنترلر در شرایط بعد از عبور از مانع نیز قابل قبول است و توانسته علاوه بر جلوگیری از خروج خودرو از مرزهای جاده، از افزایش خطای جابه‌جایی عرضی خودرو جلوگیری کرده و آن را به صفر برساند. در جاده مربوط وضعیت عکس است و مسیر طی شده پایین مسیر اصلی است، بنابراین میزان خطا در لحظه عبور از مانع جهت جلوگیری از برخورد نباید از ضریب ایمنی ۵۰ سانتیمتری بیش باشد. در لحظه عبور از مانع خطا ۴۰ سانتیمتر است و کنترلر توانسته از برخورد جلوگیری نماید. البته میزان خطا زیاد است که این امر ناشی از فرمان پذیری کمتر خودرو در جاده‌های مرطوب است. بنابراین بهتر است در جاده‌های مرطوب ضریب ایمنی بیش از ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شود که البته ضعف آن محدوده مسیر قابل پیمایش است. خط قرمز رنگ در نمودار زاویه سمتی خودرو، شیب مسیر طراحی شده توسط شبکه عصبی است. کنترلر تا حد مناسبی توانسته در دو شرایط جاده خشک و مرطوب این زاویه را دنبال نمایید، هرچند عملکرد آن در جاده مرطوب از جاده خشک بهتر است. با بررسی نمودارهای زاویه لغزش کلی و زاویه حول محور x خودرو و مدت زمان مانور که کمتر از ۱/s۷ است، تغییرات این نمودار در هر دو شرایط در محدوده مناسبی قرار دارد و کنترلر خودرو را در شرایط پایدار نگه داشته است.

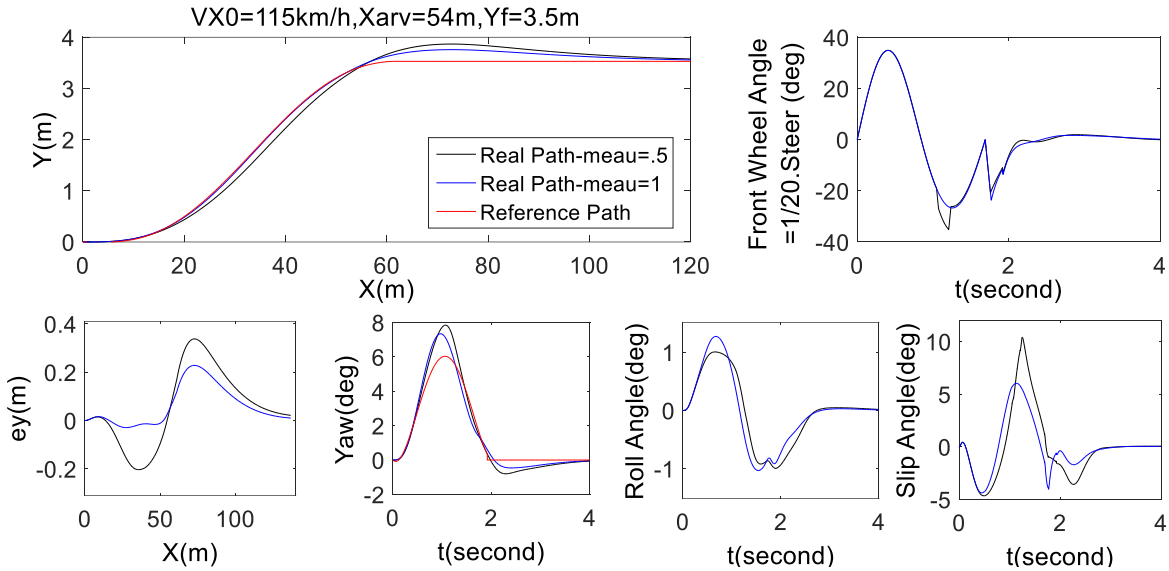
حالت دوم: سرعت ۱۱۵ km/h، فاصله از مانع ۵۴ m

زمان انجام مانور در این حالت اول حدود s۲ و زمان رسیدن به مانع ۱/s۶ است. همان‌طور که در نمودار خطای جابه‌جایی عرضی مشخص است در لحظه رسیدن خودرو به مانع میزان خطا صفر است، بنابراین با نظر گرفتن ضریب ایمنی لحظه عبور کنترلر توانسته هم در جاده خشک و هم در جاده مرطوب عملکرد مناسبی از خود نشان دهد و از برخورد جلوگیری نماید. بعد عبور از مانع انحراف خودرو از مسیر اصلی در جاده مرطوب بیشتر از جاده خشک و حدود ۳۵ سانتیمتر است؛ اما با توجه به ضریب ایمنی ۵۰ سانتیمتری تا مرز جاده و همچنین فاصله ۳۰ سانتیمتری از حداکثر جابه‌جایی عرضی مجاز خودرو $Y_{f,\max}$، عملکرد کنترلر در شرایط بعد از عبور از مانع نیز قابل قبول است و توانسته علاوه بر جلوگیری از خروج خودرو از مرزهای جاده، از افزایش خطای جابه‌جایی عرضی خودرو جلوگیری کرده و آن را به صفر برساند. خط قرمز رنگ در نمودار زاویه سمتی خودرو، شیب مسیر طراحی شده توسط شبکه عصبی است. کنترلر تا حد مناسبی توانسته در دو شرایط جاده خشک و مرطوب این زاویه را دنبال نمایید، هرچند عملکرد آن در جاده خشک از جاده مرطوب بهتر است. با بررسی نمودارهای زاویه لغزش کلی و زاویه حول محور x خودرو و مدت زمان مانور که کمتر از s۲ است، تغییرات این نمودار در هر دو شرایط در محدوده مناسبی قرار دارد و خودرو شرایط پایدار خود را حفظ کرده است.



شکل ۱۰. شبیه‌سازی عملکرد کنترلر با نرم افزار کارسیم در دو حالت جاده خشک و مرطوب برای V_{x_0} = ۹۰ km/h و X_{arv} = ۳۲m .

Fig. 10. Controller performance Simulation with the Carsim software in the two dry and wet road modes for V_{x_0} = 90 km/h, and X_{arv} = 32m



شکل ۱۱. شبیه‌سازی عملکرد کنترلر با نرم افزار کارسیم در دو حالت جاده خشک و مرطوب برای V_{x_0} = ۱۱۵ km/h و X_{arv} = ۵۴m .

Fig. 11. Controller performance Simulation with the Carsim software in the two dry and wet road modes for V_{x_0} = 115 km/h, and X_{arv} = 54m

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، یک الگوریتم طراحی مسیر مانور تعویض خط با هدف جلوگیری از برخورد در شرایط اضطراری در سرعت‌های بالا و با الگوبرداری از عملکرد یک راننده ماهر ارائه شده است. برای این منظور یک سیستم شبکه عصبی جهت شناسایی و طراحی مسیر حرکت مانور تعویض خط طراحی شده است تا در سرعت‌های بالا و در شرایطی که راهی جز تعویض سریع مسیر نیست بتواند در کنار حفظ پایداری خودرو، مسیر مناسب را طراحی و از بروز حادثه جلوگیری نماید. مهم‌ترین ویژگی‌های این تحقیق به شرح ذیل است.

به منظور در نظر گرفتن رفتار واقعی خودرو در بحث طراحی مسیر حرکت، علاوه بر انتقال بار طولی خودرو، دینامیک غیرخطی تایر نیز در نظر گرفته شده است.

در مقایسه با سایر تحقیقات، نظر به اینکه محاسبات طراحی مسیر حرکت به صورت جبری انجام پذیرفته است، هزینه محاسباتی آن بسیار اندک بوده و این مسئله به دلیل امکان بروز حادثه در زمان کوتاه و نیاز به تصمیم‌گیری سریع، بسیار ارزشمند است.

در فرآیند طراحی مسیر به صورتی است که هر مسیر طراحی شده حتماً پایدار است لذا در صورت وجود مسیری با قابلیت اجتناب از برخورد، مسیر طراحی شده نیازی به بررسی شرایط پایداری ندارد و این مسئله باعث بهبود سرعت طراحی و تصمیم‌گیری شده است.

سیستم طراحی مسیر حرکت مانور تعویض خط به صورتی است که توانایی پوشش جابه‌جایی عرضی متنوع را دارد، همچنین به دلیل استفاده از یک کنترلر پیش خور (با الهام از عملکرد راننده ماهر) در سیستم کنترلی، حجم محاسبات کنترلی کاهش داده شده است و کنترلر تعویض خط زیر s۲ را پوشش داده است.

بیشترین درصد خطای شبکه عصبی طراحی مسیر حدود ۱۱ است؛ یعنی به ازای هر یک متر، ±۱۱cm خطا، همچنین سیستم کنترلی طراحی شده توانسته در شرایط مختلف سرعتی و اصطکاک جاده‌ای، خودرو را در مسیر طراحی شده با خطای جابه‌جایی عرضی کمتر از ۱۲ درصد هدایت نماید.

در ادامه این پژوهش و به عنوان فعالیت‌های آتی می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود. سیستم طراحی مسیر قابلیت کار در طیف گسترده‌ای از سرعت‌ها و فواصل را دارد و می‌توان از این الگوریتم در سایر شرایط بهره جست. الگوی رفتاری راننده در این مانور شبه سینوسی در نظر گرفته شده است که می‌توان الگوهای دیگری را نیز طراحی و نتایج آن را بررسی نمود. در این پژوهش فرض بر این بود که ضرایب فرمول تایر مشخص است. با این حال برای جامع بودن الگوریتم طراحی مسیر نیاز به یک روش مناسب، برای شناسایی برخط این ضرایب به خوبی احساس می‌شود.

۸- فهرست علائم

نماد	توضیح	واحد
C_d	ضریب پسای آیرودینامیکی	---
F_x	نیروهای طولی	N
F_y	نیروهای جانبی	N
F_{z_τ}	نیروهای عمودی تایرها	N
I_z	ممان اینرسی حول محور Z	kg.m^2
I_w	ممان اینرسی دورانی هر چرخ	kg.m^2
l_f	فاصله محور جلو از مرکز جرم	m
l_r	فاصله محور عقب از مرکز جرم	m
m	جرم خودرو	kg
R_w	شعاع مؤثر چرخ	m
s_x	لغزش طولی	---
s_y	لغزش عرضی	---
T_b	کل گشتاور ترمزی	N.m
T_e	گشتاور موتور منتقل شده به چرخ	N.m
T_{roll}	گشتاور مقاوم غلتشی	N.m
X_{arv}	فاصله مانع تا خودرو	m
β	زاویه لغزش جانبی خودرو	rad
δ	زاویه چرخ خودرو	rad
v	سرعت مرکز جرم خودرو	m/s
v_{wind}	سرعت باد	m/s
ρ	چگالی	kg.m^3
ψ	زاویه سمتی	rad
ω	سرعت زاویه‌ای تایر	rad/s

منابع

[1] A.E. Wester, K.B.E. Bocker, E.R. Volkerts, J.C. Verster, J.L. Kenemans, Event-related potentials and secondary task performance during simulated driving, Accident Analysis & Prevention, 40(1) (2008) 1-7.

[2] M. Zhu, H. Chen, G. Xiong, A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles, Mechanical Systems and Signal Processing, 87 (2017) 138-152.

[3] J.B. Receveur, S. Victor, P. Melchior, Autonomous car decision making and trajectory tracking based on genetic algorithms and fractional potential fields, Intel Serv Robotics, 13 (2020) 315–330.

[4] S. Yang, Y. Cao, Z. Peng, G. Wen, K. Guo, Distributed formation control of nonholonomic autonomous vehicle via RBF neural network, Mechanical Systems and Signal Processing, 87 (2017) 81-95.

[5] H. Zhang, G. Zhang, J. Wang, Observer design for LPV systems with uncertain measurements on scheduling variables: application to an electric ground vehicle, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 21(3) (2016) 1659-1670.

[6] J.A. Decker, S.H. Haus, R. Sherony, Potential benefits of animal-detecting automatic emergency braking systems based on U.S. driving data, Journal of the Transportation Research Board, 2675(10) (2021) 678-688.

[7] IIHS HLDI, Collisions with fixed objects and animals. Insurance Institute for Highway Safety, Fatality Facts, (2019).

https://www.iihs.org/topics/fatality-statistics/detail/collisions-with-fixed-objects-and-animals

[8] M. Fausten, A. Vorentwicklung, accident avoidance by evasive manoeuvres, Chassis Systems Control Robert Bosch GmbH, 2010.

[9] S. Sadeghi Namaghi, M. Moavenian, An adaptive modified fuzzy-sliding mode longitudinal control design and simulation for vehicles equipped with ABS system, International Journal of Automotive Engineering, 9(1) (2019) 2895-2907.

[10] J. Lenarda, A. Badea Romero, R. Danton, Typical pedestrian accident scenarios for the development of autonomous emergency braking test protocols, Accident Analysis and Prevention, 73 (2014) 73–80.

[11] https://www.toyotaofnorthcharlotte.com/blog/so-what-exactly-is-the-moose-test/

[12] J. Nilsson, M. Brannstrom, E. Coelingh, J. Fredriksson, Lane change maneuvers for automated vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 18(5) (2017) 1087-1096.

[13] H. Guo, D. Cao, H. Chen, Z. Sun, Y. Hu, Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification, Mechanical Systems and Signal Processing, 118 (2019) 41-60.

[14] S. Samiee, S. Azadi, R. Kazemi, A. Eichberger, B. Rogic, M. Semmer, Performance evaluation of a novel vehicle collision avoidance lane change algorithm, Advanced Microsystems for Automotive Applications 2015, (2016) 103-116.

[15] L. Chen, D. Qin, X. Xu, Y. Cai, J. Xie, A path and velocity planning method for lane changing collision avoidance of intelligent vehicle based on cubic 3-D Bezier curve, Advances in Engineering Software, 132 (2019) 65-73.

[16] Y. Choi, K. Lim, J. Kim, Lane change and path planning of autonomous vehicles using GIS, 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, KINTEX, Goyang, Korea, (2015) 163-166.

[17] A. Norouzi, R. Kazemi, O.R. Abbassi, Path planning and re-planning of lane change manoeuvres in dynamic traffic environments, Int. J. Vehicle Autonomous Systems, 14(3) (2019) 239-264.

[18] G. Geng, Z. Wu, H. Jiang, L. Sun, C. Duan, Study on path planning method for imitating the lane changing operation of excellent drivers, Applied Sciences, 8(5) (2018) 1-19.

[19] Y. Ding, W. Zhuang, L. Wang, J. Liu, L. Guvenc, Z. Li, Safe and optimal lane-change path planning for automated driving, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile

Engineering, 235(4) (2020) 1070-1083.

[20] G. Han, W. Fu, W. Wang, Z. Wu, The lateral tracking control for the intelligent vehicle based on adaptive PID neural network, Sensors, 17(6) (2017)1244.

[21] A. Norouzi, R. Kazemi, S. Azadi, Vehicle lateral control in the presence of uncertainty for lane change maneuver using adaptive sliding mode control with fuzzy boundary layer, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 232(1) (2018) 12-28.

[22] H. Sazgar, S. Azadi,R. Kazemi, Trajectory planning and combined control design for critical high-speed lane change manoeuvres. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(2-3) (2020) 823-839.

[23] Y. Zhong, L. Guo, Y. Zhang, Q. Liu, H. Chen, Optimal lane change control of intelligent vehicle based on MPC, IEEE 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), (2019) 1468-1473.

[24] J. Wang, H. Zheng, C. Zong, Longitudinal and lateral dynamics control of automatic lane change system, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 41(15) (2019) 4322-4338.

[25] H. Sazgar, S. Azadi, R. Kazemi, A. Khalaji. Integrated longitudinal and lateral guidance of vehicles in critical high speed manoeuvres, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics; 233(4) (2019) 994-1013.

[26] R. Rajamani, Vehicle dynamics and control, 4 ed., Springer, New York, 2012.

[27] Z. Zhang, J. Li, W. Guo, Combined simulation of heavy truck stability under sudden and discontinuous direction change of crosswind with computational fluid dynamics and multi-body system vehicle dynamics software, Advances in Mechanical Engineering, 10(7) (2018) 1–10.

[28] E. Velenis, P. Tsiotras, J. Lu, Optimality properties and driver input parameterization for trail-braking cornering, European Journal of Control, 14(4) (2008) 308-320.

[29] ISO 3888-2:2011, Passenger cars - test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 2: Obstacle avoidance, 2016.https://www.iso.org/standard/57253.html.

[30] www.km77.com.

[31] S. Gim, S. Lee, Life fellow, safe and efficient lane change maneuver for obstacle avoidance inspired From human driving pattern, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (2020) 1-19.

[32] M.I. Razzak, S. Naz, A. Zaib, Deep learning for medical image processing: overview, challenges and the future, Classification in BioApps, 26 (2017) 323-350.

[33] H. Lassoued, R. Ketata, S. Yacoub, ECG decision support system based on feedforward neural networks, International Journal on Smart Sensing and Intelligent System, 11(1) (2018) 1-15.

[34] A.N. Sharkawy. Principle of neural network and its main types, Review. Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics, Avanti Publishers, 7 (2020) 8-19.

[35] J.F. Bonnefon, A. Shariff, I. Rahwan, The social dilemma of autonomous vehicles. Science 352, (2016) 1573–1576.

[36] Y.E. Bigman, K. Gray, Life and death decisions of autonomous vehicles, J.Nature 579, (2020).

[37] E. Awad, S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, The moral machine experiment. J.Nature 563, (2018) 59–64.

[38]https://www.ted.com/talks/iyad_rahwan_what_moral_decisions_should_driverless_cars_make?language=en#t-310886.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. N. Minaei, A. Ghaffari, Lane Change Path Planning in Emergency Situation Based on Skilled Driver's Performance, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 269-288.

DOI: 10.22060/mej.2021.20198.7191