مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 351-360

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی الگوریتم تصمیم‌گیری جدید مانور تعویض خطِ کشنده نیمه‌تریلر در محیط دینامیکی واقعی

سعید شجاعی[1]، علی رحمانی هنزکی[2*]، شهرام آزادی[3]، محمد امین سعیدی[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران
* تهران، کدپستی: 1678815811، a.rahmani@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 02 تیر 1396
پذیرش: 23 مرداد 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:
تعویض خط
کشنده نیمه‌تریلر
طرح‌ریزی مسیر
الگوریتم تصمیم‌گیری

چکیده

هدف اصلی در این پژوهش استخراج الگوریتم تصمیم‌گیری مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر در محیط دینامیکی واقعی است. برای دستیابی به این هدف از روش نوین تعیین قیود تصمیم‌گیری براساس سینماتیک خودروی کشنده نیمه‌تریلر استفاده شده است. در این روش نقاط مختلف از خودروی کشنده نیمه‌تریلر در هنگام انجام مانور تعویض خط در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نقاط بحرانی بر این اساس تعیین شده‌اند. سپس نقاط بحرانی به‌عنوان نقاط اعمال قیود فاصله ایمن در روش فوق‌الذکر در نظر گرفته شده‌اند. به‌منظور افزایش کارآمدی این روش، روش جدید واقع‌گرایانهٔ دینامیک برون‌خطی بر پایه یک مدل دینامیکی چهار درجه آزادی در خودروی کشنده نیمه‌تریلر استفاده شده است. بدین ترتیب حداقل زمان انجام مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر با قابلیت حفظ پایداری و رهگیری، تحت فرمول‌بندی جدیدی استخراج شده است. در ادامه بر اساس نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی شده، بازه زمانی قابل اطمینان برای انجام مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر در قالب استراتژی تصمیم‌گیری مانور تعویض خط در شرایط دینامیک واقعی ارائه شده است. . به منظور صحه‌گذاری و ارزیابی الگوریتم مورد نظر، ابتدا مدل دینامیکی صحه‌گذاری و سپس کاربرد الگوریتم تصمیم‌گیری در شرایط نمونه مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاکی از صحت و کارآمدی روش مذکور با روش صحه‌گذاری ترسیمی است.

Design of lane change decision-making algorithm of truck-semitrailer in real dynamic environment

Saeed Shojaei[1], Ali Rahmani Hanzaki[1*], Shahram Azadi[2], Mohammad Amin Saeedi[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Parand, Iran
* P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, a.rahmani@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 June 2017
Accepted 14 August 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Truck-semitrailer
Lane change
Trajectory planning
Decision making algorithm

ABSTRACT

The main goal of this study is to extract an algorithm for truck-semitrailer lane change maneuver decision-making in real dynamic environment. In order to accomplish this aim, a new method for determining decision-making constraints is applied based on the kinematics of the truck-semitrailer. In this approach, the various points of the truck-semitrailer are evaluated in different conditions when lane change maneuver is in progress and the critical points of the truck-semitrailer are defined according to the present method. Critical points are used as the main points of truck-semitrailer to apply the constraints. In order to enhance the efficiency of the methodology, new offline dynamic realistic method is used based on a four DoF dynamic model of truck-semitrailer. By this approach, a relation for minimum time of the maneuver is extracted based on the dynamic model of the truck semitrailer and environment features. Based on the results of the simulation assays, the minimum reliable time for lane change maneuver is chosen and decision-making strategies are proposed for the lane change maneuver of the vehicle in real dynamic environment. To validate the algorithm, first, dynamic model is verified, then the algorithm is applied to a truck-semitrailer sample. The results show that the methodology is accurate and applicable based on graphical validation.

1- مقدمه

مانور تعویض خط به‌عنوان یکی از مهمترین و مرسوم‌ترین مانورهای رانندگی خودکار در خودروهای خودران، طی سه دهه اخیر از توجه رو به افزایشی هم در صنعت و هم در تحقیقات دانشگاهی برخوردار بوده است [1]. بر اساس

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Shojaei, A. Rahmani Hanzaki, Sh. Azadi, M. A. Saeedi, Design of lane change decision-making algorithm of truck-semitrailer in real dynamic environment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 351-360, 2017 (in Persian)

مانور تعویض خط می‌توان مانورهای پیچیده‌تری همچون تعقیب، ورود/خروج از بزرگراه یا سبقت گرفتن از خودروهای مقابل را طراحی و اعمال کرد [2]. مانور تعویض خط به عنوان منبع عمده تصادفات شناخته می‌گردد چرا که 20 درصد از تصادفات بزرگراهی در اثر تعویض خط نامناسب اتفاق افتاده است [4,3]. این مانور یکی از پر خطرترین مانورهای رانندگی در بزرگراه است چرا که از یک طرف با چالش‌هایی همچون تغییر سرعت طولی و عرضی خودروی در حال مانور و از طرف دیگر با سرعت متغیر خودروهای اطراف مواجه است [5]. تصمیم‌گیری برای مانور تعویض خط به‌عنوان تضمین کنندهٔ یک عملیات ایمن، راحت و کارآمد برای رانندگی خودکار، بسیار مورد توجه و با اهمیت است [1]. از این رو تحقیقات زیادی بر روی یافتن الگوریتم مناسب برای تعویض خط در خودروهای خودران انجام شده است. در این راستا، هتریک در [6] نشان داد سن راننده و جهت تعویض خط بر روی زمان و فاصله مورد نیاز برای انجام مانور تعویض خط تأثیری ندارد. پنگوی و همکاران در [7] نشان دادند که نوع خودروی جلویی نمی‌تواند در زمان و بیشینه زاویه فرمان تأثیری داشته باشد در صورتی که سرعت خودروی جلویی بر این دو مشخصه موثر است.

سمیعی و همکاران مدل TUG-LCA را ارائه دادند. این مدل با در نظر گرفتن قیود ایمنی برای انجام مانور تعویض خط براساس سینماتیک خودرو و شرایط محیط دینامیک، استراتژی تصمیم‌گیری مشخصی را برای خودروهای سواری استخراج کرده است [8].

هیل و همکاران در این [9] یک مفهوم جدید طرح‌ریزی مسیر بر پایه چند جمله‌ای مرتبه پنج برای رانندگی خودکار ارائه کردند. نوآوری این تحقیق استفاده از روش‌های تحلیلی برای ارزیابی و انتخاب مقادیر چند جمله‌ای همچون در نظر گرفتن دامنه شتاب ماکزیمم، جرک یا رفتارهایی که از میزان نرمال تخطی کند، بوده است.

بنلوچیف و همکاران یک سیستم همکارِ فعالِ چند سطحی برای مانور تعویض خط طراحی کردند که به صورت دینامیکی و متناسب با شرایط راننده، امکان انتخاب سطح مناسب برای عکس‌العمل را به راننده می‌دهد [10]. سیستم مذکور، این قابلیت را دارد که براساس تغییرات شرایط محیط به‌روزرسانی شود. یان و همکاران یک سیستم همکار تصمیم‌گیری با قابلیت اطمینان بالا برای مانور تعویض خط پیشنهاد نمودند که در هنگام مانورهای همراه با عدم وجود قطعیت، به افزایش اعتماد راننده کمک می‌کند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی، الگوی احتمالاتی عدم قطعیت‌های راننده را در شرایط گوناگونِ مانور تعویض خط طبقه‌بندی کردند [11]. نیلسون، ایدهٔ اصلی طرح‌ریزی مسیر مرجع زمانی مانور تعویض خط را اولین بار براساس دو مشخصه فضای ترافیکی بین خودرویی و زمان مناسب انجام مانور در [12] مطرح کرد، و سپس این ایده را برای مانورهای خودکار نیز تعمیم داد [13]. نیلسون و همکاران در پژوهشی دیگر، یک الگوریتم جدید واقع‌گرایانه برای شروع حرکت عرضی مانور تعویض خط براساس فضای مناسب ترافیکی بین خودرویی و زمان واقعی با توانمندی‌های بیشتر ارائه نمودند. از جمله توانمندی‌های این الگوریتم می‌توان به برآورد معقول و منطقی از اطلاعات خام (فضای ترافیکی بین خودرویی و زمان واقعی) و استخراج مسیر مرجع زمانی ایمن و هموار برای مانور تعویض خط اشاره کرد. از طرفی الگوریتم پیشنهادی این قابلیت را دارد که علاوه بر استفاده به‌عنوان یک سیستم همکار راننده در مانور تعویض خط، برای خودروهای کاملاً خودکار در محیط‌های ترافیکی بزرگراه نیز مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتمِ زمان واقعی، روی پلتفرم خودروهای سواری استاندارد اجرا شده است [14].

در بیشتر مطالعات انجام گرفته، واحد تصمیم‌گیری در شرایط دینامیک واقعی طراحی نشده است به این معنا که در حین انجام مانور بعد از گذشت مدت زمانی از شروع مانور، شرایط خودروهای اطراف تغییر کند. از سویی، تلفیق شرایط دینامیک خودرو در طراحی واحد تصمیم‌گیری موضوعی است که کمتر در نظر گرفته شده است. لذا در این پژوهش با انجام نوآوری‌هایی که عبارتند از بسط طرح‌ریزی مسیر برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر با تعیین قیود کلی تعیین حداقل زمان انجام مانور در حالت خودروی دو تکه در شرایط دینامیک واقعی (تغییر شرایط خودروهای اطراف در حین مانور) و تعیین و استخراج معادله حداقل زمان انجام مانور تعویض خط براساس روش دینامیک خارج‌خط[1] برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر، یک واحد تصمیم‌گیری مانور تعویض خط خودروهای کشنده نیمه‌تریلر در شرایط دینامیک واقعی طراحی شده است. ساختار این مقاله به ترتیب زیر است:

در بخش اول، معادله مسیر حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش دوم به معرفی خودروی کشنده نیمه‌تریلر و روابط سینماتیکی حاکم بر آن به صورت مجزا می‌پردازد. در بخش سوم روش تعیین قیود زمانی و اعمال آن در چهار حالت ممکن مورد بررسی قرار می‌گیرد که بر پایه آن، روش جدید نحوه قیدگذاری در خودروی کشنده نیمه‌تریلر استخراج می‌گردد. در بخش چهارم این پژوهش رابطه حداقل زمان انجام مانور تعویض خط برای کشنده نیمه-تریلر براساس روش دینامیک خارج‌خط محاسبه می‌گردد، در این بخش صحه‌گذاری مدل دینامیکی ارائه می‌گردد. و در انتها، استراتژی تصمیم‌گیری براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده ارائه می‌شود.

2- معادله مسیر حرکت

چند جمله‌ای مرتبه پنجم، رایج‌ترین و پایین‌ترین مرتبه‌ای است که با دارا بودن شرایط پیوستگی مکان، سرعت و شتاب، در عین سادگی می‌تواند حداقل‌های یک مسیر مطلوب تعویض خط را برآورده سازد. در این پژوهش، فرض شده است در تمام مدت انجام مانور تعویض مسیر، سرعت طولی خودرو ثابت بماند و در نتیجه از شتاب طولی آن صرفنظر شده است.

معادلهٔ چندجمله‌ای درجه پنج مطابق رابطهٔ (1) با داشتن شش شرط مرزی روی مکان، سرعت و شتابِ نقاط ابتدایی و انتهایی مسیر، مشخص می‌گردد.

$$y(t) = y_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (1)$$

که جابجایی و سرعت عرضی خودرو در لحظهٔ شروع و انتهای مانور برابر صفر است. با توجه به فرض ثابت بودن سرعت طولی خودرو در حین مانور تعویض مسیر، مقدار شتاب عرضی خودرو در ابتدا و انتهای مانور برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. بیان فرضیات فوق در معادله (2) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} y(0) = 0 \\ \dot{y}(0) = 0 \\ \ddot{y}(0) = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} y(t_m) = -H \\ \dot{y}(t_m) = 0 \\ \ddot{y}(t_m) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن t_m مدت زمان انجام مانور و H حداکثر میزان جابجایی در مانور تعویض خط است.

در این مدل‌سازی محورهای دستگاه مختصات مرجع، یعنی محورهای X ، Y و Z به ترتیب، در راستای مسیر مستقیم جاده، عمود بر راستای مستقیم جاده به سمت بالا و عمود بر راستای مسیر مستقیم به سمت بیرون جاده در نظر گرفته می‌شوند. با اعمال شرایط مرزی از رابطهٔ (2) در معادلهٔ (1)، فرم نهایی معادله مسیر به شکل معادلهٔ (3) استخراج می‌گردد.

[1] Offline

$$y(t) = \left(-\frac{6H}{{t_m}^5}\right)t^5 + \left(\frac{15H}{{t_m}^4}\right)t^4 + \left(\frac{-10H}{{t_m}^3}\right)t^3 \quad (3)$$

که در این مقاله به‌عنوان معادله اصلی تعویض خط در تعیین قیود زمانی و استخراج مسیر ایمن برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر استفاده می‌گردد [8].

3- استخراج مشخصات سینماتیکی خودروی کشنده نیمه‌تریلر

با توجه به اینکه از این پس در معادلات نقاط مختلف خودروی مفصلی مورد نیاز هستند، در شکل 1 این خودرو معرفی می‌شود.

مختصات و سرعت طولی و عرضی مرکز جرم کشنده (x_c, y_c) به ترتیب در معادلات (4) تا (7) آورده شده و سرعت طولی کشنده ($\bar{V}_{xc}$) در بازه زمانی انجام مانور، ثابت فرض شده است. معادله (8)، زاویه بین راستای کشنده و افق را نشان می‌دهد.

$$x_c(t) = \bar{V}_{xc}t + x_{0c} \quad (4)$$

$$y_c(t) = \left(\frac{-6H}{{t_m}^5}\right)t^5 + \left(\frac{15H}{{t_m}^4}\right)t^4 + \left(\frac{-10H}{{t_m}^3}\right)t^3 + y_{0c} \quad (5)$$

$$\dot{x}_c(t) = \bar{V}_{xc} \quad (6)$$

$$\dot{y}_c = \left(\frac{-30H}{{t_m}^5}\right)t^4 + \left(\frac{60H}{{t_m}^4}\right)t^3 + \left(\frac{-30H}{{t_m}^3}\right)t^2 \quad (7)$$

$$\ddot{y}_c = \left(\frac{-120H}{{t_m}^5}\right)t^3 + \left(\frac{180H}{{t_m}^4}\right)t^2 + \left(\frac{-60H}{{t_m}^3}\right)t \quad (8)$$

$$\theta_c = \arctan(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}) \quad (9)$$

در ادامه براساس روابط (10) تا (13) به ترتیب مختصات نقاط گوشهٔ کشنده به شکلی که در معادلات استفاده شده، ارائه می‌گردد. همچنین نحوه نام‌گذاری خودروهای اطراف نیز به همین شکل که در روابط (10) تا (13) آمده، انجام می‌گیرد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

$$\begin{Bmatrix} x_{1c} \\ y_{1c} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} -L_{\text{back}} \\ +L_{\text{side}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{1c} = -L_{\text{back}}(\cos\theta_c) - L_{\text{side}}(\sin\theta_c) + x_c \\ y_{1c} = -L_{\text{back}}(\sin\theta_c) + L_{\text{side}}(\cos\theta_c) + y_c \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{2c} \\ y_{2c} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} L_{\text{front}} \\ L_{\text{side}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{2c} = L_{\text{front}}(\cos\theta_c) - L_{\text{side}}(\sin\theta_c) + x_c \\ y_{2c} = L_{\text{front}}(\sin\theta_c) + L_{\text{side}}(\cos\theta_c) + y_c \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{3c} \\ y_{3c} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} L_{\text{front}} \\ -L_{\text{side}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{3c} = L_{\text{front}}(\cos\theta_c) + L_{\text{side}}(\sin\theta_c) + x_c \\ y_{3c} = -L_{\text{front}}(\sin\theta_c) - L_{\text{side}}(\cos\theta_c) + y_c \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{4c} \\ y_{4c} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} -L_{\text{back}} \\ -L_{\text{side}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{4c} = -L_{\text{back}}(\cos\theta_c) + L_{\text{side}}(\sin\theta_c) + x_c \\ y_{4c} = -L_{\text{back}}(\sin\theta_c) - L_{\text{side}}(\cos\theta_c) + y_c \end{cases} \quad (13)$$

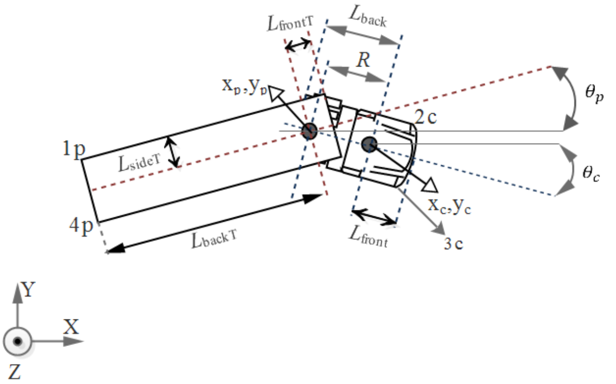

Fig. 1 The Specifications of a truck-semitrailer

شکل 1 مشخصات یک کشنده نیمه‌تریلر

از آنجا که لبه‌ها در کشنده نیم‌تریلر دارای انحنا می‌باشند، در روابط (10) تا (13) از $\simeq$ به‌جای $=$ استفاده شده است. با توجه به شکل 1، محل مفصل بین کشنده و نیمه‌تریلر (x_p, y_p) نسبت به مختصات محلی کشنده که مرکز آن روی مرکز جرم کشنده قرار دارد به اندازه $-R$ در جهت x فاصله دارد. در رابطه (14) مختصات مفصل در مختصات مرجع ارائه شده است.

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ y_p \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} -R \\ 0 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_p = -R(\cos\theta_c) + x_c \\ y_p = -R(\sin\theta_c) + y_c \end{cases} \quad (14)$$

با جایگذاری روابط (4)، (5) و (8) در معادلات (15) و (16) و با استفاده از معادلات (17) و (18)، سرعت طولی و عرضی مفصل بین کشنده و نیمه‌تریلر (x_p, y_p) با فرض سرعت ثابت به صورت زیر محاسبه می‌گردد (نحوه محاسبه در پیوست ب ارائه شده است).

$$x_p = \bar{V}_{xc}t + x_0 - R\cos\theta_c \quad (15)$$

$$y_p = \left(\frac{-6H}{{t_m}^5}\right)t^5 + \left(\frac{15H}{{t_m}^4}\right)t^4 + \left(\frac{-10H}{{t_m}^3}\right)t^3 - R\sin\theta_c + y_0 \quad (16)$$

$$\dot{x}_p = \bar{V}_{xc} + \frac{R\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)\ddot{y}_c}{\dot{x}_c(1+(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

$$\dot{y}_p = \left(\frac{-30H}{{t_m}^5}\right)t^4 + \left(\frac{60H}{{t_m}^4}\right)t^3 + \left(\frac{30H}{{t_m}^3}\right)t^2 - R\frac{\ddot{y}_c}{\dot{x}_c(1+(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

حال با مشخص شدن سرعت طولی و عرضی مفصل بین کشنده و نیمه‌تریلر (x_p, y_p)، زاویه بین راستای نیمه‌تریلر و افق به صورت معادله (19) محاسبه می‌شود.

$$\theta_p = \arctan(\frac{\dot{y}_p}{\dot{x}_p}) \quad (19)$$

اکنون با جایگذاری روابط (15)، (16) و (19) نقاط گوشه نیمه‌تریلر، آن‌گونه که در شکل 1 نشان داده شده‌اند به صورت معادلات (20) تا (23) قابل محاسبه است.

$$\begin{Bmatrix} x_{1p} \\ y_{1p} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} -L_{\text{backT}} \\ -L_{\text{sideT}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{1p} = -L_{\text{backT}}(\cos\theta_p) - L_{\text{sideT}}(\sin\theta_p) + x_p \\ y_{1p} = -L_{\text{backT}}(\sin\theta_p) + L_{\text{sideT}}(\cos\theta_p) + y_p \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{2p} \\ y_{2p} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} L_{\text{fronT}} \\ L_{\text{sideT}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{2p} = L_{\text{fronT}}(\cos\theta_p) - L_{\text{sideT}}(\sin\theta_p) + x_p \\ y_{2p} = L_{\text{fronT}}(\sin\theta_p) + L_{\text{sideT}}(\cos\theta_p) + y_p \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{3p} \\ y_{3p} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} L_{\text{fronT}} \\ -L_{\text{sideT}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{3p} = L_{\text{fronT}}(\cos\theta_p) + L_{\text{sideT}}(\sin\theta_p) + x_p \\ y_{3p} = L_{\text{fronT}}(\sin\theta_p) - L_{\text{sideT}}(\cos\theta_p) + y_p \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{4p} \\ y_{4p} \end{Bmatrix} \simeq \begin{Bmatrix} -L_{\text{backT}} \\ -L_{\text{sideT}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{4p} = -L_{\text{backT}}(\cos\theta_p) + L_{\text{sideT}}(\sin\theta_p) + x_p \\ y_{4p} = -L_{\text{backT}}(\sin\theta_p) - L_{\text{sideT}}(\sin\theta_p) + y_p \end{cases} \quad (23)$$

3-1- تعیین قیود زمانی

به منظور تخمین بازهٔ زمانی ایمن برای انجام مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر، چهار حالت اصلی که خودروی مفصلی در هنگام انجام مانور تعویض خط در معرض آن قرار می‌گیرد به شرحی که در ادامه توضیح داده می‌شود در نظر گرفته شده است. خروجی هر حالت یک زمان مشخص، به شکل t_1، t_2، t_3 و t_4 خواهد بود از طرفی با در نظر گرفتن حداقل زمان انجام مانور t_m الگوریتم تصمیم‌گیری انجام مانور تعویض مسیر استخراج

می‌شود.

3-1-1- حالت اول: قرار گرفتن خودروی مفصلی و خودروی مقابل در یک خط

آن‌گونه که در شکل (2- الف) نمایش داده شده است برای آنکه بتوان یک فاصلهٔ ایمن کلی (جامع) برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر در نظر گرفت که بر این اساس معادلات برای انجام تعویض خط تنظیم گردد، ابتدا باید c_1 به عنوان فاصلهٔ ایمن مابین نقطهٔ 2c از کشنده و 4A از خودروی مقابل که در خط مشابه با کشنده تریلر است به عنوان فاصلهٔ ایمن در نظر گرفته شود.

همان‌طور که در شکل‌های 2- الف، ب و ج نشان داده شده است، با در نظر گرفتن فاصلهٔ ایمن C_1، C_1' و C_1'' که به ترتیب فاصله ایمن مابین 2c، 2p و 1p از خودروی کشنده نیمه‌تریلر با 4A از خودروی جلویی هستند معادلات در دو راستای طولی هنگامی که نقاط مورد نظر از کشنده نیمه‌تریلر با خودروی جلویی بر هم منطبق هستند و در راستای عرضی در همان لحظه، به صورت معادلات (24) تا (26) ارائه و زمان انجام مانور براساس هر کدام از این فواصل ایمن محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} y_{4A} - y_{2C} = C_1 \\ x_{4A} = x_{2c} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} y_{4A} - y_{2p} = C_1' \\ x_{4A} = x_{2p} \end{cases} \tag{25}$$

$$\begin{cases} y_{4A} - y_{1p} = C_1'' \\ x_{4A} = x_{1p} \end{cases} \tag{26}$$

شبیه‌سازی‌های متعددی براساس سرعت‌های مختلف و فاصله اولیه متفاوت برای حالت اول انجام شد که نتایج حاکی از آن بود که C_1 به‌عنوان فاصله ایمن کلی در نظر گرفته شود. در ادامه برای نمونه، نتایج شبیه‌سازی حالت اول برای مانور تعویض خط در سرعت 100 کیلومتر بر ساعت برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر و فاصله اولیه 35 متر نسبت به خودروی جلویی در مسیر اولیه با سرعت 60 کیلومتر بر ساعت ارائه شده است. به ازای هر کدام از فواصل ایمن C_1 ، C_1' و C_1''، مطابق شکل 2، در زمانی که سه نقطه 2c ، 2p و 1p در راستای طولی به نقطه 4A می‌رسند، مدت زمان انجام مانور و زمان انطباق در راستای طولی بین نقاط فوق الذکر براساس هر کدام از مدت زمان‌های انجام مانور محاسبه و ارائه شده که در جدول 1 نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، هنگامی که قید C_1، فاصله ایمن مابین دو نقطه 2c و 4A به‌عنوان قید کلی در نظر گرفته شده است، مدت زمان انجام مانور 4.0814 ثانیه بدست آمده و زمان رسیدن هر کدام از نقاط 2c، 2p و 1p از خودروی کشنده نیمه‌تریلر به نقطه 4A از خودروی جلویی به ترتیب 2.84488، 3.1014 و 3.8245 ثانیه بوده است.

جدول 2، اختلاف فاصله عرضی از مثال ذکر شده برای نقاط 2c، 2p و 1p از خودروی کشنده نیمه‌تریلر نسبت به نقطه 4A از خودروی جلویی را

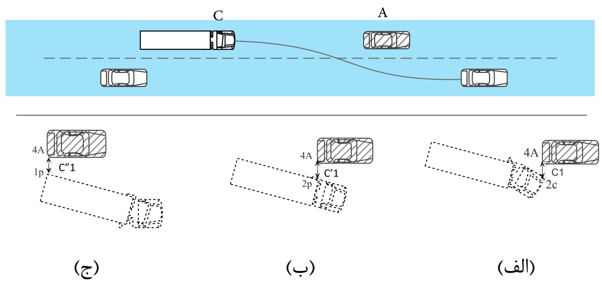

Fig. 2 Illustration of truck-trailer and other vehicles in first state

شکل 2 نمایش خودروی کشنده نیمه‌تریلر و خودروی مقابل در یک خط در حالت اول

جدول 1 زمان رسیدن (انطباق طولی) جفت نقاط مورد بررسی بر اساس مدت زمان انجام مانورها

Table 1 Longitudinal compliance time for investigated couple points based on lane change maneuver time period

قیود با شرایط $Vcar_C$ =100 km/h $Vcar_A$ = 60 km/h *Distance* = 35 m	مدت زمان انجام مانور (T_m)	زمان رسیدن نقطه 2c به 4A	زمان رسیدن نقطه 2p به 4A	زمان رسیدن نقطه 1p به 4A
بر اساس قید C_1	4.0814	2.8488	3.1014	3.8245
بر اساس قید C_1'	4.2942	2.8485	3.1009	3.8239
بر اساس قید C_1''	4.9459	2.8483	3.1003	3.8220

برای زمانی که هر کدام از سه نقطه فوق‌الذکر از کشنده نیمه‌تریلر در راستای طولی به نقطه 4A می‌رسند، محاسبه و ارائه کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تنها در زمانی که مدت زمان انجام مانور بر اساس قید C_1 در نظر گرفته شده، اختلاف فاصله عرضی در هر سه نقطه 2c، 2p و 1p از خودروی کشنده نیمه‌تریلر نسبت به نقطه 4A از خودروی جلویی از میزان فاصله عرضی ایمن ($C_1 = 1$ m) مساوی یا بیشتر است. با توجه به اینکه نتایج بدست آمده از همه شبیه‌سازی‌های حالت اول به همین شکل می‌باشد، لذا می‌توان نتیجه گرفت از این پس در حالت اول، نقطه 2c از خودروی کشنده نیمه‌تریلر و قید C_1 به ترتیب به‌عنوان نقطه اعمال قید و قید کلی در نظر گرفته شده و به‌عنوان مبنای طراحی مسیر در این حالت مورد استفاده قرار گرفته شوند.

مسیر حرکت در مانور تعویض خط برای سه نقطه 2c، 2p و 1p با در نظر گرفتن نقطه 2c از خودروی کشنده نیمه‌تریلر به‌عنوان نقطه اعمال قید و قید C_1 به‌عنوان قید کلی، در شکل 3 ترسیم شده است، خط موربی که هر سه منحنی را قطع کرده مکان نقاط 2c، 2p و 1p در لحظه‌ای که به نقطه 4A می‌رسند را نشان می‌دهد، به وضوح مشخص است که نقاط 2p و 1p در لحظه بحرانی انطباق طولی با نقطه 4A، فاصله عرضی بیشتر از فاصله ایمن C_1 دارند.

3-1-2- حالت دوم: قرار داشتن یک خودرو در خط هدف و جلوی خودروی مفصلی

در این حالت فرض شده است که سرعت خودروی مقابل در اثر توقف ناگهانی برابر صفر می‌شود [15]. براساس رابطه (27) فاصلهٔ ایمن C_2آن‌گونه که در

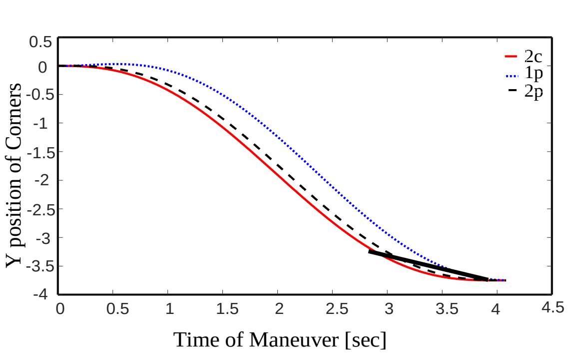

Fig. 3 Path of lane change maneuver for the three points 2c, 2p and 1p by taking c_1 as main constraint

شکل 3 مسیر حرکت در مانور تعویض مسیر برای سه نقطه 2c ، 2p و 1p با در نظر گرفتن نقطه 2c و قید c_1

جدول 2 اختلاف عرضی نقاط 2c، 2p و 1p از نقطه 4A در زمان‌های بحرانی انطباق طولی برای حالت اول

Table 2. Lateral difference between 2c, 2p and 1p from 4A at critical time of longitudinal compliance

نقطه 1p	نقطه 2p	نقطه 2c	قیود
1.4983	1.1624	1.000	فاصله عرضی از نقطه 4A براساس قید C_1
1.4106	1.000	0.8207	فاصله عرضی از نقطه 4A براساس قید C_1'
1.000	0.4774	0.2799	فاصله عرضی از نقطه 4A براساس قید C_1''

شکل 4 – د مشخص شده است و در نتیجه آن می‌توان مدت زمان انجام مانور که در این حالت t_2 نامیده می‌شود را تعیین کرد.

$$(X_B - X_C) = s_0 + v_{cx}t_d + \frac{{v_{cx}}^2}{2a_{cb}} + L_{\text{back B}} + L_{\text{frontc}}$$
$$y_B = y_c$$
$$c_2 = \quad s_0 + v_{cx}t_d + \frac{{v_{cx}}^2}{2a_{cb}} \tag{27}$$

که در آن S_0 فاصله ایمن توقف، V_{cx} سرعت طولی خودروی کشنده نیمه‌تریلر در لحظه اتمام مانور، a_{cb} حداکثر شتاب ترمزگیری خودروی کشنده نیمه‌تریلر و t_d زمان عکس‌العمل راننده بین 0.67 تا 1.11 ثانیه است [16].

بر این اساس کلیه مسیرهایی که موقعیت طولی انتهای خودروی جلویی و جلوی خودروی کشنده نیمه‌تریلر در لحظهٔ اتمام مانور، نسبت به یکدیگر بیشتر از c_2 باشد به عنوان مسیرهای ایمن قابل قبول هستند.

3-1-3- حالت سوم: قرار گرفتن خودرویی در کنار و در خط هدف

در این حالت نیز همانند حالت اول ابتدا باید یک قید جامع (کلی) برای خودروی کشنده تریلر در مانور تعویض خط تعریف گردد.

برای این منظور، نقاط 3c از کشنده، 3p و 4p از تریلر به ترتیب با قیود فاصلهٔ عرضی C_3 و C_3' و C_3'' نسبت به نقطهٔ 2D از خودروی کناری در خط هدف همان‌گونه که در شکل‌های 4–الف، 4–ب و 4–ج نمایش داده شده است در نظر گرفته می‌شوند. همانند حالت اول روابط براساس این قیود نوشته می‌شوند. معادلات مربوطه به صورت خلاصه در روابط (28) تا (30) ارائه شده است.

$$\begin{cases} y_{3c} - y_{2D} = C_3 \\ x_{3c} = x_{2D} \end{cases} \tag{28}$$

$$\begin{cases} y_{3p} - y_{2D} = C_3'' \\ x_{3p} = x_{2D} \end{cases} \tag{29}$$

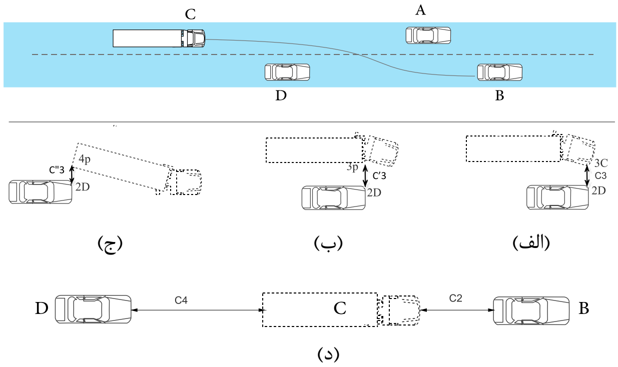

Fig. 4 Illustration of truck-trailer and other vehicles in second, third and fourth states

شکل 4 نمایش خودروی کشنده نیمه‌تریلر و خودروهای اطراف در حالت‌های دوم، سوم و چهارم

$$\begin{cases} y_{4p} - y_{2D} = C_3'' \\ x_{4p} = x_{2D} \end{cases} \tag{30}$$

در این حالت مشابه حالت اول، شبیه‌سازی‌های متعددی براساس سرعت‌های مختلف و فاصله اولیه متفاوت برای حالت سوم انجام شد که نتایج حاکی از آن بود که C_3'' به‌عنوان فاصله ایمن کلی در نظر گرفته شود. در ادامه برای نمونه، نتایج شبیه‌سازی حالت سوم برای یک مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر در سرعت 100 کیلومتر بر ساعت و فاصله اولیه 30 متر نسبت به خودروی کناری در خط هدف با سرعت 35 کیلومتر بر ساعت در جدول‌های 3 و 4 و شکل 5 نشان داده شده است. مطابق شکل 4، به ازای هر کدام از فواصل ایمن C_3 و C_3' و C_3''، در زمانی که هر کدام از سه نقطه 3c، 3p و 4p در راستای طولی به نقطه 2D می‌رسند، مدت زمان انجام مانور و زمان بحرانی انطباق در راستای طولی بین نقاط فوق‌الذکر محاسبه و در جدول 3 ارائه شده است.

در هر کدام از زمان‌های انطباق در راستای طولی، اختلاف فاصله عرضی همانند حالت اول محاسبه و در جدول 4 ارائه شده است. تنها زمانی که مدت زمان انجام مانور براساس قید C_3'' و نقطه 4p در نظر گرفته شده است اختلاف فاصله عرضی در دو نقطه 3c و 3p از میزان فاصله عرضی ایمن ($C_3'' = 1\,m$) بیشتر است لذا بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت در حالت سوم نقطه 4p و قید C_3'' به عنوان قید کلی و مبنای طراحی مسیر در این حالت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مسیر حرکت در مانور تعویض خط برای سه نقطه 3c، 3p و 4p با در نظر گرفتن نقطه 4p از خودروی کشنده نیمه‌تریلر به‌عنوان نقطه اعمال قید و قید C_3'' به‌عنوان قید کلی، در شکل 5 ترسیم شده است، خط موربی که هر سه منحنی را قطع کرده مکان نقاط 3c، 3p و 4p در لحظه‌ای که به نقطه 2D می‌رسند را نشان می‌دهد به وضوح مشخص است که نقاط 3p و 3c در لحظه بحرانی انطباق طولی با نقطه 2D، فاصله عرضی بیشتر از فاصله ایمن C_3'' دارند.

جدول 3 زمان بحرانی (انطباق) برای نقاط 3c، 3p و 4p براساس مدت زمان انجام مانورها به ازای همان نقاط

Table 3. Compliance time for 3c, 3p and 4p based on lane change maneuver period of time

زمان رسیدن نقطه 4p به 2D	زمان رسیدن نقطه 3p به 2D	زمان رسیدن نقطه 3c به 2D	مدت زمان انجام مانور (T_m)	قیود با شرایط: *Vcar*$_C$ =100 km/h *Vcar*$_D$= 35 km/h *Distance* = 30 m
2.2616	1.8184	1.6632	5.9841	براساس قید C_3
2.2615	1.8182	1.6631	6.1723	براساس قید C_3'
2.2613	1.8180	1.6629	6.6412	براساس قید C_3''

جدول 4 اختلاف عرضی نقاط 3c ، 3p و 4p از نقطه 2D در زمان‌های بحرانی انطباق طولی

Table 4. Lateral difference between 3c, 3p and 4p from 2D at critical time of longitudinal compliance

نقطه 4p	نقطه 3p	نقطه 3c	قیود
0.8385	0.9565	1.000	فاصله عرضی از نقطه 2D براساس قید C_3
0.8904	1.000	1.0406	فاصله عرضی از نقطه 2D براساس قید C_3'
1.000	1.0917	1.1262	فاصله عرضی از نقطه 2D براساس قید C_3''

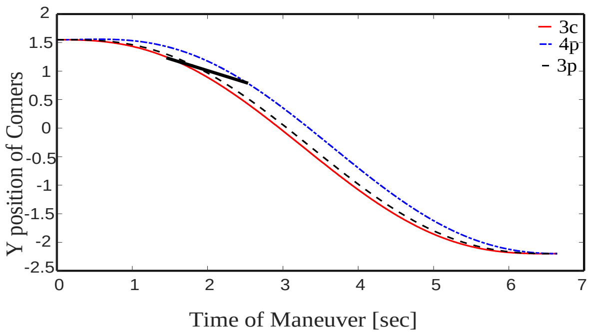

Fig. 5 Path of lane change maneuver for the three points 3c, 3p and 4p by taking $C_3^{"}$ as main constraint

شکل 5 مسیر حرکت در مانور تعویض مسیر برای سه نقطه 3c، 3p و 4p با در نظر گرفتن نقطه 4P و قید $C_3^{"}$

3-1-4- حالت چهارم: تغییر مسیر خودروی مفصلی به خط هدف و فاصله ایمن از خودروی پشتی

در این حالت که در شکل 4- د نشان داده شده است. مانند حالت دوم یک فاصلۀ ایمن $C_4=C_2$ تعریف می‌گردد و براساس رابطۀ (31) مدت زمان انجام مانور (t_4) به دست می‌آید. واضح است کلیه مسیرهایی که در آنها فاصلۀ طولی انتهای تریلر p تا جلوی خودروی پشتی D بیش از C_4 باشد به عنوان مسیرهای ایمن قابل قبول هستند.

$$(X_C - X_D) = C_4 + L_{\text{frontD}} + L_{\text{backC}} + L_{\text{trailer}} \qquad (31)$$

3-1-5- حالت پنجم: بحرانی‌ترین شرایط مانور تعویض خط ممکن

از مهمترین نکاتی که باید در طراحی مسیر تعویض خط مدنظر قرار گیرد موضوع قابل پیمایش بودن مسیر طراحی شده است. این بدین معناست که قیود دینامیکی حاکم بر کشنده نیمه‌تریلر نیز، علاوه بر قیود سینماتیکی ارضا شود. به منظور تامین پایداری کشنده نیمه‌تریلر در هنگام مانور تعویض خط باید با توجه به اصطکاک میان جاده و تایر، شتاب عرضی ایجاد شده قابل حصول باشد. برای دستیابی به این مهم، باید مدت زمان شدیدترین مانور تعویض خط به عنوان حداقل زمان ممکن برای انجام مانور تعویض خط محاسبه و در نظر گرفته شود و مسیر به‌گونه‌ای طراحی شود که مدت زمان انجام آن بیشتر از این مقدار باشد.

کوتاه‌ترین مدت زمان تعویض خط ممکن $(t_m)_{\min}$ به عوامل مختلفی از جمله سرعت و شتاب خودرو، جنس و کیفیت تایر، شرایط جاده، و برخی مشخصات سینماتیکی خودرو از قبیل وزن و فاصله محورهای جلو و عقب خودرو از مرکز ثقل آن وابسته است [17]. در این کار، مقدار حداقل زمان تعویض خط به صورت تابعی از سه متغیر اصلی و تأثیرگذار سرعت طولی، وزن و اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است و بر این اساس رویه‌ای متشکل از این سه پارامتر استخراج و فرمول‌بندی شده است.

4- نحوه انجام آزمایش و معیار پذیرش حداقل زمان

برای بدست آوردن حداقل زمان انجام مانور تعویض خط با لحاظ قیود دینامیکی از مدل دینامیکی چهار درجه آزادی کشنده نیمه‌تریلر شامل حرکت طولی، عرضی و چرخشی کشنده و زاویه مفصل مابین کشنده و نیمه‌تریلر مطابق مدل دوچرخه در شکل 6 استفاده شده است.

روابط (32) و (35) به ترتیب معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت طولی کشنده و تریلر را نشان می‌دهد، روابط (33) و (36) به ترتیب معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت عرضی کشنده و تریلر را نشان می‌دهد و روابط

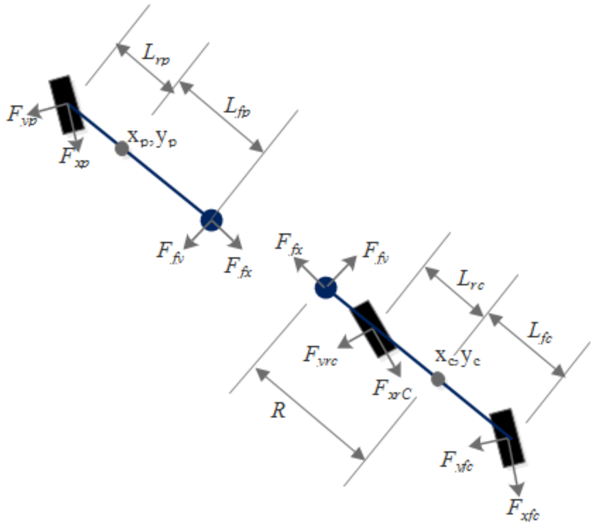

Fig 6 The dynamic bicycle model of truck-trailer

شکل 6 مدل دینامیکی دوچرخۀ کشنده نیمه‌تریلر

(34) و (37) به ترتیب معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت چرخشی کشنده و تریلر را نشان می‌دهد.

$$m_c(\dot{u}_c - v_c\dot{\psi}_c) = F_{xfc} + F_{xrc} - F_{fx} \qquad (32)$$
$$m_c(\dot{v}_c + u_c\dot{\psi}_c) = F_{yfc} + F_{yrc} - F_{fy} \qquad (33)$$
$$I_{zz_c}\ddot{\psi}_c = F_{fy}R + F_{yfc}L_{fc} - F_{yrc}L_{rc} \qquad (34)$$
$$m_p(\dot{u}_c - v_c\dot{\psi}_c) = F_{xp} + F_{fx} \qquad (35)$$
$$m_p(\dot{v}_c + u_c\dot{\psi}_c - (R + L_{fp})\ddot{\psi}_c - L_{fp}\ddot{\theta}_p) = F_{yrp} + F_{fy} \qquad (36)$$
$$I_{zzp}(\ddot{\psi}_c + \ddot{\theta}_p) = F_{fy}L_{fp} - F_{yrp}L_{rp} \qquad (37)$$

4-1- صحه‌گذاری مدل دینامیکی

به منظور صحه‌گذاری مدل دینامیکی ارایه شده، از نرم‌افزار تراک‌سیم استفاده شده است. بدین منظور مشخصات فیزیکی مدل توسعه داده شده با خودروی تست، یکسان در نظرگرفته شده است (جدول پیوست الف). زاویه فرمان تعویض خط دوگانه در شکل 7 و نتایج صحّه‌گذاری مربوط به مانورهای استاندارد تعویض‌خط دوگانه در شکل‌های 8 و 9 نشان داده شده است.

شکل‌های 8- الف و ب به ترتیب سرعت زاویه‌ای چرخشی کشنده و نیمه‌تریلر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج مدل شبیه‌سازی شده و آزمون‌های انجام شده در نرم‌افزار تراک سیم، نتایج قابل قبولی است. همچنین شکل 9 زاویه مفصل در مانور تعویض خط دوگانه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گرد میزان انحراف بین مدل دینامیکی و نتایج آزمون مدل تراک‌سیم بسیار ناچیز است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، کشنده نیمه‌تریلر در حال حرکت با

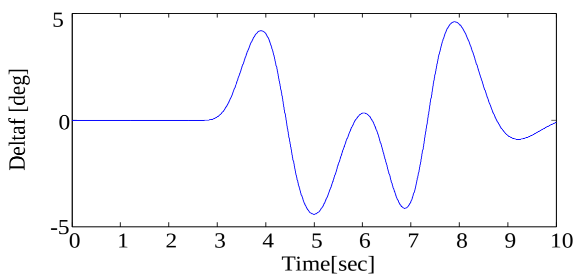

Fig 7 Steering angle of front wheels of truck-semitrailer in double lane change maneuver

شکل 7 زاویه فرمان خودروی کشنده نیمه‌تریلر در مانور تعویض خط دوگانه

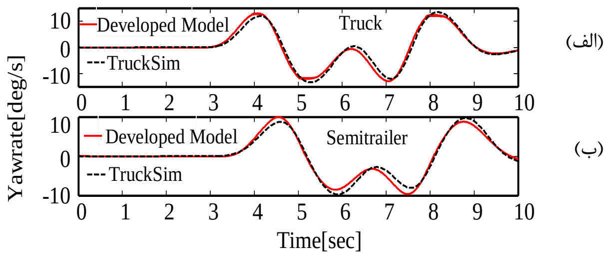

Fig 8 Yaw rate of tractor and semitrailer in dynamic and trucksim models in double lane change maneuver

شکل 8 سرعت زاویه‌ای چرخشی مدل دینامیکی و مدل تراک‌سیم خودروی کشنده نیمه‌تریلر در مانور تعویض خط دوگانه

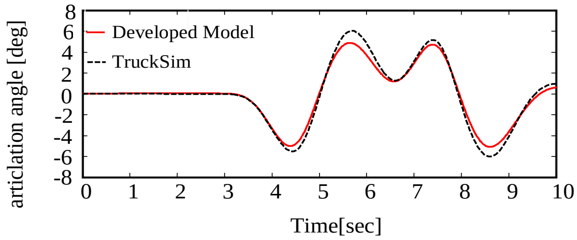

Fig 9 Articulation angle of truck-semitrailer in dynamic and trucksim models at double lane change maneuver

شکل 9 زاویه مفصل در مدل‌های دینامیکی و تراک‌سیم خودروی کشنده نیمه‌تریلر در مانور تعویض خط دوگانه

سرعت ثابت در بزرگراه است. در نقطه مشخصی از مسیر، ورودی به صورت شکل 10- الف به فرمان خودرو اعمال می‌شود.

مقدار ماکزیمم زاویه فرمان که در شکل با θ نمایش داده شده است بر اساس موقعیت عرضی کشنده نیمه‌تریلر به اندازه عرض یک باند مسیر یعنی 3.75 متر جابه‌جایی عرضی در پایان مانور تعیین می‌شود. بعد از تعیین این مقدار، مدت زمان انجام مانور یعنی t_m تا رسیدن خودرو به مرز ناپایداری با گام 0.05 ثانیه کاهش داده می‌شود. زمان به‌دست آمده حداقل زمان ممکن برای تعویض خط با توجه به شرایط محیط و خودرو است. این زمان به عنوان $(t_m)_{\min}$ ثبت می‌گردد. این سناریو برای سرعت‌های بین 60 کیلومتر بر ساعت تا 120 کیلومتر بر ساعت و با گام 20 کیلومتر بر ساعت تکرار شده

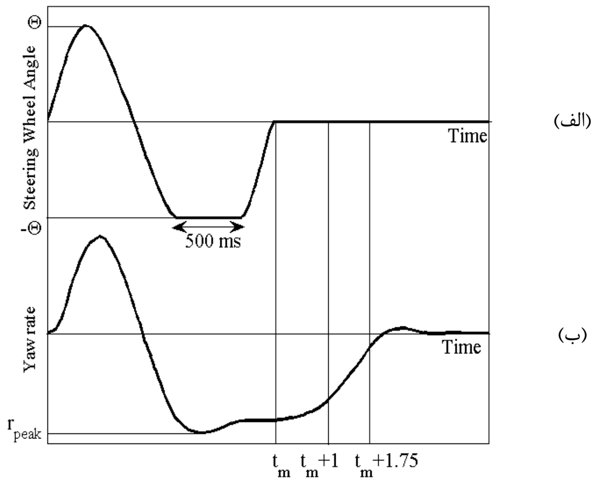

Fig. 10 Vehicle stability requirements according to the ESC standard [17]

شکل 10 شرط پایداری خودرو با توجه به استاندارد کنترل پایداری الکترونیکی [17]

است. به ازای هر سرعت مشخص، اصطکاک‌هایی در بازه 0.1 تا 1 و به فواصل 0.1 بین تایر و مسیر حرکت در نظر گرفته شده است. تمام آزمایشات فوق برای دو حالت کشنده نیمه‌تریلر بدون بار و با بار تکرار شده است که در مجموع بیش از 100 شبیه‌سازی صورت پذیرفته است. پایداری خودرو طبق استاندارد مربوط به سیستم‌های ESC مورد بررسی قرار گرفته است [17]. طبق این استاندارد، سیستم کنترل پایداری الکترونیکی[1] در صورتی دارای عملکرد مطلوب است که با اعمال تغییرات زاویه در غربیلک فرمان مطابق شکل 10- الف، نرخ زاویه یاو 1 و 1.75 ثانیه پس از اتمام مانور به ترتیب بیشتر از 35 و 25 درصد حداکثر نرخ زاویه یاو ایجاد شده نباشد (شکل 10- ب). در این شکل r_{peak} حداکثر نرخ تغییرات زاویه یاو در مانور انجام شده است.

به عنوان نمونه نتایج به‌دست آمده برای نمودار تغییرات نرخ زاویه یاو در سرعت ثابت 80 کیلومتر بر ساعت هم برای کشنده و هم برای نیمه‌تریلر به صورت مجزا در شکل 11 ارائه شده است. با توجه به اینکه میزان تغییرات نرخ زاویه یاو در کشنده بسیار بیشتر از نیمه‌تریلر است، لذا مقیاس سنجش براساس شکل 11- الف، کشنده در نظر گرفته شده است.

شکل 12 رویه تلفیقی سه بعدی حداقل مدت زمان انجام مانور با در نظر گرفتن سه پارامتر وزن و سرعت خودرو و اصطکاک تایر و جاده را نشان می‌دهد. رویه نشان داده شده در شکل 12، فضا را به دو قسمت نقاط واقع در بالای رویه که بیان کننده زمان‌های قابل قبول برای انتخاب به عنوان حداقل مدت زمان انجام مانور و نقاط واقع در زیر این رویه به عنوان زمان‌های غیرقابل قبول از لحاظ پایداری خودرو بر اساس معیار آورده شده، تقسیم می‌کند. به منظور افزایش ضریب اطمینان، یک ضریب ایمنی در نظر گرفته می‌شود. در شکل 12، دو رویه؛ یکی بدون ضریب ایمنی، پایین‌تر و دیگری با اعمال ضریب ایمنی بالاتر قرار گرفته است. این ضریب به‌گونه‌ای انتخاب شده است که رویه نهایی در سرعت‌های بالا و ضرایب اصطکاک پائین‌تر، که احتمال ناپایداری خودروی کشنده نیمه‌تریلر بیشتر است، مقدار بیشتری داشته باشد. با این روش عملاً حداقل زمان لازم برای انجام مانور تعویض خط

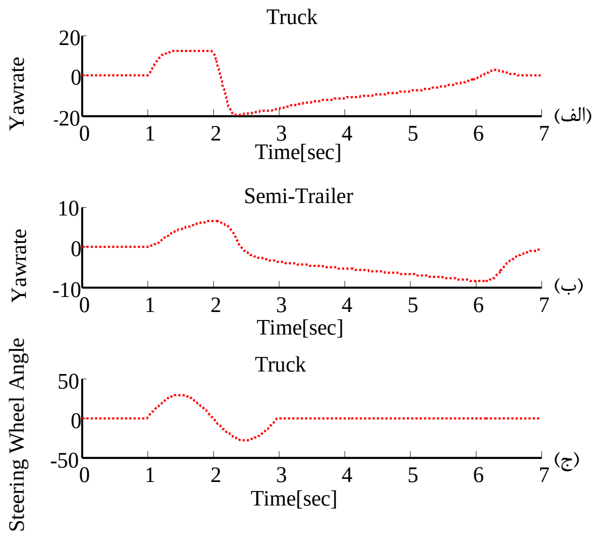

Fig. 11 Yaw rate in the truck and trailer based on the steering angle

شکل 11 منحنی تغییرات نرخ زاویه یاو در کشنده و نیمه‌تریلر براساس زاویه فرمان مشخص

[1]. Electronic Stability Control (ESC)

خودروی کشنده نیمه‌تریلر با درنظر گرفتن شرایط پایداری خودرو بصورت آفلاین بدست می‌آید که می‌توان از آن برای شبیه‌سازی‌های آنلاین استفاده کرد و از این طریق زمان محاسبات را به میزان زیادی پایین آورد.

تخمین مناسبی از این رویه به صورت معادله (38) با استفاده از نرم افزار متلب تعیین شده است. در این معادله حداقل زمان انجام مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر به صورت تابعی از ضریب اصطکاک جاده و سرعت خودرو بیان شده است.

$$T_m(\mu, V_x) = \frac{(31.42 + 12.53\mu + 0.35\mu V_x)}{(2.53 + 42.66\mu)} \quad (38)$$

5- استراتژی تصمیم‌گیری مانور تعویض خط خودروی کشنده نیمه‌تریلر

به منظور ارزیابی الگوریتم تصمیم‌گیری، ابتدا زمان‌های t_1 تا t_4 و t_m با توجه به شرایط در نظر گرفته شده در مثال شکل 13 و براساس مقادیر مشخص شده در جدول 5 محاسبه می‌گردد.

با مقایسه زمان‌های بدست آمده، معادل حالت به وجود آمده در جدول 6 که در این حالت معادل حالت چهاردهم جدول یعنی $t_2 > t_1 > t_3 > t_m > t_4$ است، در نظر گرفته می‌شود.

همان‌گونه که در شکل 13 نمایش داده شده است دو مسیر مانور تعویض خط براساس t_1 و t_3 ترسیم می‌گردد، در حقیقت منحنی های ترسیم شده مابین این دو منحنی، منحنی‌های مورد قبول براساس استراتژی تصمیم‌گیری هستند اما، به منظور بدست آوردن مسیر دقیق‌تر به لحاظ شرایط راحتی و ایمنی، مطابق شکل 14 عمل می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل 14- ب نشان داده شده است شتاب جانبی براساس مسیرهای تعیین شده به سمت منحنی بدست آمده براساس t_1 (بیشترین زمان) کمتر می‌شود و نشان دهنده راحتی بیشتر در صورت انتخاب این مسیر است. انتخاب نهایی مسیر مطلوب، می‌تواند بر اساس معیارهای

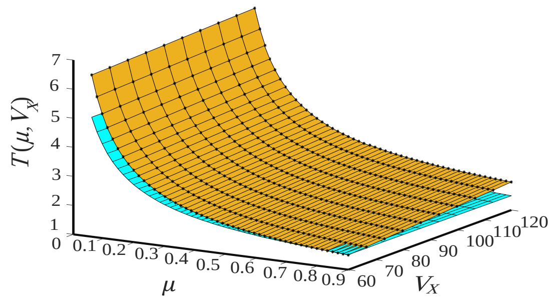

Fig. 12 Three-dimensional amended time surface to lane change maneuver by taking three parameters weight, friction and speed of the truck-trailer and original surface

شکل 12 رویه اصلاح شدهٔ سه بعدی مدت زمان انجام مانور با در نظر گرفتن سه پارامتر وزن و سرعت خودرو و اصطکاک تایر و جاده و موقعیت آن نسبت به رویه اصلی

جدول 5 پارامترهای خودروی کشنده نیمه‌تریلر جهت شبیه‌سازی

Table 5 truck semitrailer parameters for simulating

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_3	1 (m)	W_A	1.65 (m)
W_C	2.2 (m)	ab_D	9.81 μ (m/s^2)
ab_C	9.81 μ (m/s^2)	W_D	1.65 (m)
t_d	0.7 (s)	C_1	1 (m)
R	1.959 (m)	L_{front}	1.6 (m)
L_{backT}	7.5 (m)	L_{frontT}	1.115 (m)

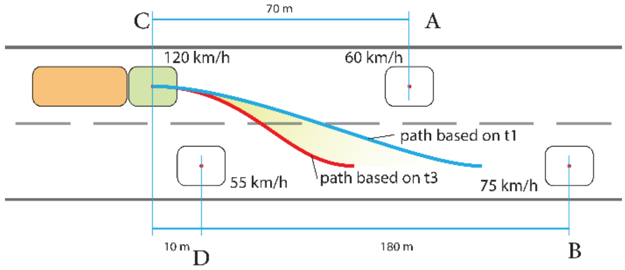

Fig. 13 An example for real traffic test created based on the No.14 from Table 6

شکل 13 نمونه‌ای از شرایط ترافیکی ایجاد شده مبتنی بر حالت 14 از جدول 6

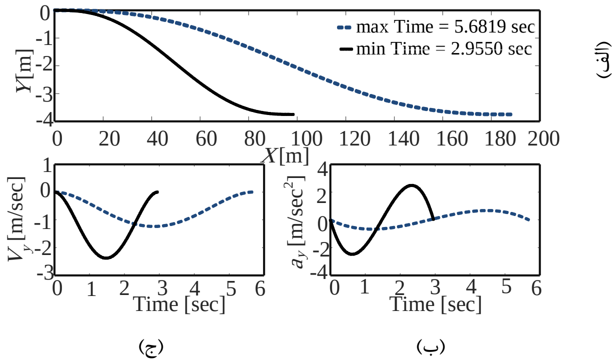

Fig. 14 The path, speed and lateral acceleration curves based on the accepted period of time

شکل 14 منحنی مسیر، سرعت و شتاب عرضی براساس بازه زمانی مورد قبول

مختلفی از جمله کمینه کردن زمان مانور و یا فراهم کردن بیشترین آسایش برای سرنشینان انتخاب شود که بحث این پژوهش نیست.

نکته بسیار حائز اهمیت در ارتباط با واحد تصمیم‌گیری، نحوه پیاده‌سازی آن برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر و جمع‌آوری اطلاعات و پردازش آن است. بر این اساس به‌طور مختصر سه بخش اصلی برای پیاده‌سازی و استخراج اطلاعات مورد نیاز است یکی سنسورهای شتاب طولی و عرضی و چرخش خودرو و موقعیت خودرو که حالت‌های خودروی کشنده نیمه‌تریلر را مشخص می‌کنند دیگری، سنسورهایی که برای تعیین شرایط و استخراج اطلاعات محیط اطراف استفاده می‌گردند شامل (رادار، آلتراسونیک و دوربین) و در انتها عملگرها در این کار است که استفاده از سیستم فرمان فعال و فرمان با سیم پیشنهاد می‌گردد. این سیستم، فرمان را به صورت مکانیکی به چرخ‌ها وصل نمی‌کند بلکه سیستم فرمان از طریق سنسور زاویه غربیلک فرمان و سنسور گشتاور غربیلک فرمان که با وارد کردن میزان گشتاور لازم، زاویه مورد نظر را اعمال می‌کند.

6- بحث و نتیجه‌گیری

تصمیم‌گیری درباره انجام یا عدم انجام تعویض خط براساس مقایسه زمان‌های t_1، t_2، t_3 و t_4 با یکدیگر و با درنظر گرفتن $(t_m)_{\min} = t_5$ صورت می‌گیرد. در مجموع 120 حالت ممکن بدون احتساب زمان‌های مساوی، بر اساس شرایط فوق‌الذکر قابل پیش‌بینی است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد زمان t_1 که در مواجهه کشنده نیمه‌تریلر با خودروی A (خودروی جلویی در خط اولیه) بدست می‌آید مقدار ماکزیمم زمان، در این وضعیت است و لذا زمان‌های کمتر از آن به‌عنوان زمان‌های ایمن و قابل قبول پذیرفته می‌شوند، همچنین در حالتی که خودروی B در خط هدف قرار دارد زمان t_2 نیز بیشترین زمان قابل قبول در این شرایط است و زمان‌های بیشتر از آن شرایط

جدول 6 شرایط مختلف ممکن برای انجام مانور کشنده نیمه‌تریلر و زمان پیشنهادی

Table 6 the possible different conditions to the truck-trailer lane change maneuver and the proposed time

شماره	حالت ایجاد شده	زمان مورد پذیرش
1	$t_1 > t_2 > t_4 > t_3 > t_m$	$[t_4 \quad t_2]$
2	$t_1 > t_2 > t_4 > t_m > t_3$	$[t_4 \quad t_2]$
3	$t_1 > t_2 = t_4 > t_m > t_3$	t_4
4	$t_1 > t_2 > t_3 > t_4 > t_m$	$[t_3 \quad t_2]$
5	$t_1 > t_2 > t_3 > t_m > t_4$	$[t_3 \quad t_2]$
6	$t_1 > t_2 = t_3 > t_m > t_4$	t_3
7	$t_1 > t_2 > t_m > t_3 > t_4$	$[t_m \quad t_2]$
8	$t_1 > t_2 > t_m > t_4 > t_3$	$[t_m \quad t_2]$
9	$t_1 > t_2 = t_m > t_4 > t_3$	t_m
10	$t_2 > t_1 > t_4 > t_3 > t_m$	$[t_4 \quad t_1]$
11	$t_2 > t_1 > t_4 > t_m > t_3$	$[t_4 \quad t_1]$
12	$t_2 > t_1 = t_4 > t_m > t_3$	t_1
13	$t_2 > t_1 > t_3 > t_4 > t_m$	$[t_3 \quad t_1]$
14	$t_2 > t_1 > t_3 > t_m > t_4$	$[t_3 \quad t_1]$
15	$t_2 > t_1 = t_3 > t_m > t_4$	t_3
16	$t_2 > t_1 > t_m > t_3 > t_4$	$[t_m \quad t_1]$
17	$t_2 > t_1 > t_m > t_4 > t_3$	$[t_m \quad t_1]$
18	$t_2 > t_1 = t_m > t_4 > t_3$	t_m

را غیر ایمن می‌کنند اما، در حالتی که کشنده نیمه‌تریلر در حال عبور از کنار خودروی D (خودروی کناری) برای تعویض خط اولیه به خط هدف است هر زمانی کمتر از زمان t_3، بر هم زننده شرایط ایمن است و به همین صورت، زمان t_4 نیز به‌عنوان حداقل زمان ایمن در شرایطی که در انتهای مانور باید انتهای کشنده نیمه‌تریلر فاصله ایمن از خودروی عقبی در خط هدف داشته باشد تعیین می‌گردد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، این حالت‌ها به میزان قابل توجهی قابل کاهش هستند لذا، بر این اساس یک بار با فرض زمان بدست آمده برای انجام مانور بین $(t_m)_{\min}$ و t_1 و یک بار هم بین $(t_m)_{\min}$ و t_2، بسیاری از حالات غیرقابل انجام و حذف می‌گردند. پس از حذف حالت‌های غیرقابل انجام، بازه زمانی قابل قبول برای حالت‌های مختلف ممکن برای انجام تعویض خط طبق جدول 6 برای انجام مانور بدون ایجاد برخورد ارائه شده است.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که تنها در صورتی اجازه انجام مانور تعویض خط به سیستم کنترلی داده نمی‌شود که مقایسه زمان‌های بدست آمده، هیچ یک از حالت‌های موجود در جدول 6 نباشد، در این حالت خودرو تا فراهم شدن شرایط مانور در خط موجود نگه‌داری و هدایت می‌شود. بدیهی است چنانچه هر یک از خودروهای دیگر در مسیر نباشند، استراتژی تصمیم‌گیری تغییری نخواهد کرد و تنها، زمان مربوط به قید آن خودرو در محاسبات لحاظ نمی‌شود.

7- جمع‌بندی

در این پژوهش با بسط طرح‌ریزی مسیر خودروی سواری برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر و بدست آوردن قیود کلی که در متن به آن اشاره شد، امکان محاسبه حداقل زمان انجام مانور تعویض خط در حالت خودروی دو تکه در شرایط دینامیک واقعی (تغییر شرایط خودروهای اطراف در حین مانور) فراهم گردید. از طرفی، معادله حداقل زمان انجام مانور تعویض خط براساس روش دینامیک خارج‌خط برای خودروی کشنده نیمه‌تریلر تعیین و استخراج گردید. بر اساس موارد فوق الذکر، این امکان فراهم شد تا یک واحد تصمیم‌گیری مانور تعویض خط خودروهای کشنده نیمه‌تریلر در شرایط دینامیک واقعی بر پایه الگوریتم جامع تصمیم‌گیری مانور تعویض خط طراحی گردد.

8- پیوست

8-1- پیوست الف: مشخصات کشنده نیمه تریلر تحت آزمون

جدول 7 پارامترهای خودروی کشنده تریلر جهت شبیه‌سازی

Table 7 Properties of truck semi-trailer

پارامتر	مقدار (واحد)
ارتفاع مرکز ثقل جرم فنربندی شده کشنده (نیمه تریلر) از محور غلت	0.438m (1.8m)
فاصلهٔ مرکز جرم کشنده (نیمه تریلر) از سطح زمین	1.05m(1.9m)
ارتفاع چرخ پنجم از سطح زمین	1.22m
ممان اینرسی چرخشی کل واحد کشنده (نیمه تریلر) حول محور عمودی گذرنده از مرکز ثقل واحد	20679 kg m² (238898 kg m²)
ممان اینرسی غلت کشنده (نیمه تریلر) حول محور غلت گذرنده	3335 kg m² (120024 kg m²)
ممان اینرسی حاصل‌ضرب جرم فنربندی شدهٔ کشنده (نیمه تریلر)	602 kg m² (5756 kg m²)
ممان اینرسی چرخ	11.63 kg m²
سختی پیچشی سیستم تعلیق قسمت جلوی (عقب) واحد کشنده	380 kNm/rad (684 kNm/rad)
سختی پیچشی سیستم تعلیق نیمه تریلر	800 kNm/rad
سختی پیچشی کوپلینگ میان واحد کشنده و نیمه تریلر	30000 kNm/rad
فاصلهٔ میان مرکز جرم کشنده و محور جلویی کشنده (محور عقبی کشنده)	1.115 m (2.583m)
فاصلهٔ میان مرکز جرم نیمه تریلر و چرخ پنجم (محور میانی نیمه تریلر)	5.653m , 2.047m
فاصلهٔ میان مرکز جرم کشنده و چرخ پنجم	1.959m
فاصلهٔ میان محور مرکزی نیمه تریلر و محورجلوئی (عقبی) آن	1.31m
فاصله میان چرخ پنجم تا انتهای نیمه تریلر	9 m
جرم کل (جرم فنربندی شده) کشنده	6525 kg (4819kg)
جرم کل (جرم فنربندی شده) نیمه تریلر	33221kg (30821kg)
شعاع هر چرخ	0.4 m
عرض کشنده (نیمه تریلر)	2.04 m (2 m)

8-2- پیوست ب: محاسبه سرعت طولی و عرضی مفصل بین کشنده و نیمه-تریلر

$$g(t) = \frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c} \quad \text{(ب- 1)}$$

$$\cos(\arctan(g(t))) = \frac{1}{\sqrt{1+g(t)^2}} = f_1(g(t)) \quad \text{(ب- 2)}$$

$$\sin(\arctan(g(t))) = \frac{g(t)}{\sqrt{1+g(t)^2}} = f_2(g(t)) \quad \text{(ب- 3)}$$

با توجه به اینکه سرعت ثابت فرض شده است:

$$\dot{f}_1(g(t)) = \dot{f}_1(g(t)) \times \dot{g}(t) = \frac{-g(t)}{(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \times \dot{g}(t)$$
$$= \frac{-g(t)}{(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \times \left(\frac{\ddot{y}_c \dot{x}_c}{\dot{x}_c^2} - \frac{\ddot{x}_c \dot{y}_c}{\dot{x}_c^2}\right) = \frac{-g(t) \times \ddot{y}_c}{\dot{x}_c(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{(ب- 4)}$$

$$\dot{f}_2(g(t)) = \dot{f}_2(g(t)) \times \dot{g}(t) = \frac{+1}{(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \times \dot{g}(t) \quad \text{(ب- 5)}$$

$$= \frac{1}{(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \times \left(\frac{\ddot{y}_c \dot{x}_c}{\dot{x}_c^2} - \frac{\ddot{x}_c \dot{y}_c}{\dot{x}_c^2}\right) = \frac{+\ddot{y}_c}{\dot{x}_c(1+g(t)^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\dot{x}_p = \bar{V}_{xc} + \frac{R\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)\ddot{y}_c}{\dot{x}_c\left(1+\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$
(ب- 6)

$$\dot{y}_p = \left(\frac{-30H}{{t_m}^5}\right)t^4 + \left(\frac{60H}{{t_m}^4}\right)t^3 + \left(\frac{30H}{{t_m}^3}\right)t^2 - R\frac{\ddot{y}_c}{\dot{x}_c\left(1+\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$
(ب- 7)

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{\dot{y}_p}{\dot{x}_p}\right)$$
(ب- 8)

$$\cos\theta_p = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\dot{y}_p}{\dot{x}_p}\right)^2}}$$
(ب- 9)

$$\sin\theta_p = \frac{\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)}{\sqrt{1+\left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c}\right)^2}}$$
(ب- 10)

9- فهرست علائم

$F_{fx(y)}$ نیروی ایجاد شده در مفصل در جهت محور طولی (عرضی) کشنده

$\hat{F}_{fy}$ نیروی جانبی تخمین زده شده در مفصل

F_{yfc} نیروی جانبی ایجاد شده در محور جلوئی کشنده

F_{yrc} نیروی جانبی ایجاد شده در محور عقبی کشنده

F_{yrp} نیروی جانبی ایجاد شده در محورهای عقبی نیمه تریلر

$\hat{F}_{yfc}$ نیروی جانبی تخمین زده شده برای محور جلوئی کشنده

$\hat{F}_{yrc}$ نیروی جانبی تخمین زده شده برای محور عقبی کشنده

$\hat{F}_{yrp}$ نیروی جانبی تخمین زده شده برای محورهای عقبی نیمه تریلر

$I_{xx_{c(p)}}$ ممان اینرسی غلت کشنده (نیمه تریلر) حول محور موازی محور غلت گذرنده ازمرکز جرم جرم فنر بندی شدهٔ کشنده (نیمه تریلر)

$I_{xz_{c(p)}}$ حاصلضرب اینرسی جرم فنربندی شدهٔ کشنده (نیمه تریلر) حول مرکز جرم جرم فنربندی شده

$I_{zz_{c(p)}}$ ممان اینرسی چرخشی کل واحد کشنده (نیمه تریلر) حول محور عمودی گذرنده از مرکز ثقل واحد

$L_{fc}(L_{rc})$ فاصلهٔ مرکز جرم کشنده تا چرخ‌های جلوی این واحد (تا چرخهای عقب این واحد)

$L_{fp}(L_{rp})$ فاصلهٔ مرکز جرم نیمه تریلر تا چرخ پنجم (تاچرخهای عقب این واحد)

L_p فاصلهٔ چرخ پنجم تا انتهای نیمه تریلر

m_c جرم کل واحد کشنده

m_p جرم کل واحد نیمه‌تریلر

R فاصلهٔ مرکز جرم کشنده تا چرخ پنجم

$u_{c(p)}$ سرعت طولی کشنده (نیمه تریلر)

$v_{c(p)}$ سرعت عرضی کشنده (نیمه تریلر)

10- مراجع

[1] F. Meng, J. Su, C. Liu, W. H. Chen, Dynamic decision making in lane change: Game theory with receding horizon, *Proceedings of The 11th UKACC International Conference on Control*, Belfast, Northern Ireland, UK, Aug 31-Sept 2, 2016.

[2] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. De Pedro, Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 438-450, 2008 .

[3] J. Wang, R. Chai, Q. Wu, Changing lane probability estimating model based on neural network, *Proceedings of The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, Changsha, China, May 31 -June 2, 2014.

[4] A. Talebpour, H. S. Mahmassani, S. H. Hamdar, Modeling lane-changing behavior in a connected environment: A game theory approach, *Transportation Research Procedia*, Vol. 7, No. 5, pp. 420-440, 2015.

[5] V. A. Butakov, P. Ioannou, Personalized driver/vehicle lane change models for ADAS, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, No. 10, pp. 4422-4431, 2015 .

[6] S. Hetrick, *Examination of Driver Lane Change Behavior and the Potential Effectiveness of Warning Onset Rules for Lane Change or "Side" Crash Avoidance Systems*, MSCThesis, Virginia Polytechnic Institute & State University, Virginia, 1997.

[7] L. Penghui, H. Mengxia, Z. Wenhui, X. Xiaoqing, L. Yibing, Steering behavior during overtaking on freeways, *Proceedings of The Fifth International Conference on Computing for Geospatial Research and Application*, Washington, DC, USA, Aug 4-6, 2014.

[8] S. Samiee, S. Azadi, R. Kazemi, A. Eichberger, Towards a decision-making algorithm for automatic lane change manoeuvre considering traffic dynamics, *PROMET-Traffic&Transportation*, Vol. 28, No. 2, pp. 91-103, 2016.

[9] T. Heil, A. Lange, S. Cramer, Adaptive and efficient lane change path planning for automated vehicles, *Proceedings of The 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016.

[10] M. Benloucif, J. Popieul, C. Sentouh, Multi-level cooperation between the driver and an automated driving system during lane change maneuver, *Proceedings of The 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Gothenburg, Sweden, June 19-22, 2016.

[11] F. Yan, M. Eilers, A. Lüdtke, M. Baumann, Developing a model of driver's uncertainty in lane change situations for trustworthy lane change decision aid systems, *Proceedings of The 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Gothenburg, Sweden, June 19-22, 2016.

[12] J. Nilsson, M. Brännström, E. Coelingh, J. Fredriksson, Longitudinal and lateral control for automated lane change maneuvers, *Proceedings of The 2014 IEEE Intelligent Vehicles S*ymposium, MI, USA, Jun 08- 11, 2014.

[13] J. Nilsson, M. Brännström, J. Fredriksson, E. Coelingh, Longitudinal and lateral control for automated yielding maneuvers, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 1404-1414, 2016.

[14] J. Nilsson, M. Brännström, E. Coelingh, J. Fredriksson, Lane change maneuvers for automated vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 1087-1096, 2016.

[15] Y. Wu, J. Xie, L. Du, Z. Hou, Analysis on traffic safety distance of considering the deceleration of the current vehicle, *Proceedings of The Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Zhangjiajie, China, October 10-11, 2009.

[16] Y. L. Chen, S. C. Wang, C. A. Wang, Study on vehicle safety distance warning system, *Proceedings of The 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, Singapore, Dec 08- 11, 2008.

[17] S. Samiee, *The Design of Vehicle Control System with Drowsy Driver Based on Vehicle-driver Interaction*, Doctor of Philosophy Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, 2016. (in Persian فارسی)