



## تعیین مسیر خودروی هوشمند و کنترل آن در محیط‌های پیچیده شهری و تضمین عدم برخورد

آرزو کدخداجعفریان<sup>1</sup>، علی آنالوئی<sup>1</sup>، شهرام آزادی<sup>2\*</sup>، رضا کاظمی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* صندوق پستی 1999143344، azadi@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 مرداد 1396

پذیرش: 28 شهریور 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

مسیریابی

عدم برخورد

کنترلر مود لغزشی

تعویض خط خودکار

محیط‌های شهری

### چکیده

در این پژوهش روی مسیریابی خودروها در محیط‌های پیچیده شهری تمرکز شده است. در ابتدا خودرو هوشمند موانع و خطوط جاده را شناسایی کرده و مناطق امن را به وسیله روش فاصله زمانی که در این پژوهش توسعه داده شده است مشخص نموده است و سپس توسط الگوریتم نوشته شده مسیری نزدیک به تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه یک انسان به دست آورده است. در مسیر به دست آمده در نواحی که نیاز به انجام تعویض خط می‌باشد امکان برخورد با خودروهای اطراف وجود دارد. جهت اطمینان حاصل کردن از عدم برخورد، یک منحنی چندجمله‌ای درجه پنج برای هر تعویض خط پیشنهاد داده شده است و منحنی با توجه به امکان پذیر بودن انجام مانور از نظر دینامیک خودرو و شتاب عرضی مجاز خودرو بهینه شده است. در نهایت مسیر دقیقی پیشنهاد داده شده تا خودرو بتواند از میان موانع با ایمنی کامل و بدون برخورد عبور کند در پایان دو نمونه سناریو نزدیک به محیط ترافیکی بزرگراه‌های شهری شبیه‌سازی شده و عدم برخورد در آن‌ها توسط نرم‌افزار متلب صحت‌گذاری شده و مسیر به دست آمده توسط کنترلر مود لغزشی کنترل شده است. در این سناریوها شتاب عرضی خودرو از حد مجاز تجاوز نکرده است.

## Collision-Free Navigation and Control for Autonomous Vehicle in Complex Urban Environments

Arezoo Cadkhodajafarian, Ali Analooee, Shahram Azadi\*, Reza Kazemi

Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1999143344, Tehran, azadi@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 06 August 2017  
Accepted 19 September 2017  
Available Online 18 November 2017

#### Keywords:

Path planning  
Collision avoidance  
Sliding mode controller  
Automatic lane change  
Urban environments

### ABSTRACT

This paper focused on the vehicle path planning in the highways and complex urban environments. At first, obstacles and road lines have been detected by sensors of the intelligent vehicle, thereupon the vehicle will find the safe areas using the time interval method developed in this paper. Then, an appropriate path close to the intelligent decisions about human being are chosen through the developed algorithm. There is the possibility of collision with surrounding vehicles in the areas where changing the lane is needed. Therefore, to prevent collision, a five order polynomial curve is offered for each lane change maneuver. The reached maneuver is optimized based on the vehicle dynamic and allowed lateral acceleration. Finally, a suitable path to pass quite safely and without any collision through the obstacles is suggested. At the end, two main and different simulation scenarios including the lack of collision are verified by MATLAB software and the obtained path is controlled by the sliding mode controller. These simulations indicate the effectiveness of this method. The lateral acceleration is obtained in allowed range for comfort of occupants in these scenarios.

### 1- مقدمه

افزایش سرعت، سبقت گرفتن و یا تعویض خطوط<sup>1</sup> از برخورد جلوگیری کنند و به سوی هدف حرکت کنند و یا در بدترین حالت، میزان بروز خسارت را کاهش دهند. این خودروها قادر به تجزیه و تحلیل ساختار ترافیکی پیش روی خود هستند و جهت جلوگیری از برخورد<sup>2</sup> و کاهش تابع هزینه، بهینه‌ترین مسیر ممکن را از میان موانع موجود انتخاب می‌کنند. سه موضوع اساسی لازمه یافتن مسیری بدون احتمال برخورد بر پایه

در دهه اخیر مطالعات زیادی در خصوص خودروهای هوشمند که توانایی تردد در محیط‌های پیچیده شهری را دارند، انجام شده است. این خودروها از جهت راحتی، ایمنی، کاهش مصرف سوخت و اتوماتیک بودن روز به روز در حال توسعه و پیشرفت هستند. آن‌ها می‌بایست بتوانند خود را با ساختار پیچیده شهری مطابقت دهند و خطوط جاده و موانع ساکن و متحرک مسیر را تشخیص دهند و هنگام برخورد و یا بروز تصادف به‌وسیله توقف، کاهش یا

<sup>1</sup> Lane change

<sup>2</sup> Collision avoidance

Please cite this article using:

A. Cadkhodajafarian, A. Analooee, Sh. Azadi, R. Kazemi, Collision-Free Navigation and Control for Autonomous Vehicle in Complex Urban Environments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 277-288, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

داده‌های دریافتی از حسگرها می‌باشد:

- ایجاد یک مسیر بدون برخورد با موانع از مبدا تا مقصد
- بهینه کردن مسیر به دست آمده از نظر عدم وجود برخورد
- تعقیب مسیر<sup>1</sup> به دست آمده (کنترل)

### 1-1- پژوهش‌های پیشین

امروزه مطالعه‌های زیادی در جهت یافتن مسیر در محیط‌های ناشناخته همراه با موانع ثابت و متحرک صورت گرفته است. در اغلب مطالعات ابتدا با استفاده از روش‌های مسیریابی که در رباتیک معمول است، مسیر اصلی را فقط با احتساب موانع ثابت مشخص می‌کنند و سپس موانع دینامیکی را به مسیر اضافه کرده و مسیر را تصحیح می‌کنند.

منگین فو و همکاران [1] برای کنترل خودکار خودرو از میان محیطی پیچیده روشی متشکل از هرمیت مکعبی ابداع کردند. در این روش، مسیر به دست آمده از هرمیت مکعبی را بهینه‌سازی نموده تا بتواند سینماتیک خودرو را نیز ارضا کند. آن‌ها الگوریتمی نوشتند که آن را دایره گذر<sup>2</sup> نامیدند. در این روش ساختار ساده و موانع ساکن مورد بررسی قرار گرفته شد.

شیاولین سونگ و همکاران [2] با استفاده از ترکیب روش پتانسیل مصنوعی و تئوری طناب الاستیکی<sup>3</sup>، روش تولید مسیری ابداع کردند که در شرایط متفاوت ترافیکی قابل استفاده است و در آن خودرو میزبان و موانع متحرک خودرویی را به صورت یک دایره امن در نظر گرفتند.

در مقاله‌ای دیگر سومین ژانگ و همکاران [3] نوعی الگوریتم تعیین مسیر نوشتند که به خودروی بی‌سرنشین توانایی عبور امن و یافتن مسیر از میان یک محیط پیچیده با احتساب موانع خارجی مانند خطوط کناره مسیر، هندسه مسیر، موانع ثابت و متحرک و در شرایط پیچیده ترافیکی و قوانین ترافیکی را می‌دهد و می‌تواند مسیر بهینه را از نظر راحتی و امنیت پیدا کند. رابرت دیلی و دیوید بولی [4] برای آن که بتوانند از تئوری پتانسیل در تعیین مسیر در سرعت‌های بالا استفاده کنند، موانع با اشکال پیچیده را به صورت دایره‌های کنار هم در نظر گرفتند و از این طریق تعیین مسیر با تابع پتانسیل را انجام دادند.

دیوید مدس و همکاران [5] سه روش «نگارنده شبکه‌ای حالت<sup>4</sup>»، «نگارنده مسیر پیش‌بین بر پایه قیود<sup>5</sup>» و روش «جستجوی درختی با استفاده از اسپلاین<sup>6</sup>» را از نظر کمی و کیفی مورد مقایسه قرار دادند و نشان دادند که استفاده از هر یک از روش‌ها برای انجام مانور با توجه به قیود اعمالی و فرمول بهینه مانور، متفاوت است و مزایای و معایب استفاده از این روش‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

هائوتین چیانگ و همکاران [6] تکنیک جدیدی بر پایه روش پتانسیل مصنوعی ارائه دادند که در محیط‌های شامل موانع ثابت و موانع متحرکی که حرکت اتفاقی دارند، هدف را دنبال می‌کند. در این تکنیک آن‌ها موانع را به صورت مربع و خودرو میزبان را ذره‌ای در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند دستیابی به هدف در این روش در محیط با 300 مانع متحرک با حرکت اتفاقی موفقیت‌آمیز بوده است.

در مقاله‌ای یاکوونگ دو و همکاران [7] روشی را ارائه دادند که با پیش‌بینی تغییرات خودروهای مجاور، مانورهای تغییر خط را بهینه می‌کند.

هدف در این روش کوتاه کردن زمان مانور تغییر خط، حفظ فاصله امن میان خودروی هدف و خودروهای مجاور، ارضای قیود قوانین راهنمایی و رانندگی و رعایت حدود سرعت می‌باشد. قابل ذکر است که در این روش محققان روی ارائه الگوریتم تصمیم‌گیری<sup>7</sup> و تعیین مسیر کلی متمرکز شده‌اند و خودروی هدف را به صورت جرم نقطه‌ای در نظر گرفته‌اند.

جولیا نیلسون و سوپرگ [8] الگوریتمی برای تصمیم‌گیری در مواقعی که تغییر خط و سبقت گرفتن قابل انجام است ارائه دادند. آن‌ها یک مسیر دو خطه در یک جهت را در نظر گرفتند. این الگوریتم، امکان انجام مانور را براساس مکان موانع ثابت و متحرک و کنترل سرعت عرضی و طولی مطلوب بررسی می‌کند تا هدایت خودرو به هدایت انجام شده توسط یک راننده نزدیک شود.

جیهوئا ژو و همکاران [9] برای ایجاد مسیر از میان تعداد موانع زیاد، از الگوریتم کلاسیک جستجوی تصادفی درختی<sup>8</sup> استفاده کردند. نشان داده شده است که این الگوریتم در موارد استفاده جاده‌های شهری که نیاز به تصمیم‌گیری سریع می‌باشد غیرموثر و کند است. اما در این مقاله روشی سریع با استفاده از این الگوریتم ابداع شده است که از یک الگوی آفلاین بر پایه سناریوهای ترافیکی از پیش محاسبه شده استفاده می‌کند. نتایج تجربی نشان داده شده در این مقاله، سرعت و موثر بودن مسیریابی این روش در محیط‌های پیچیده شهری را تایید می‌کند.

در پژوهشی روبین شوبرت [10] الگوریتمی نوشت تا در مواقعی که خودرو پیام هشدار می‌دهد وارد عمل شده و از میان پاسخ‌های تعریف شده برای هر سناریو، عملکرد مناسب را انتخاب کرده و اعمال می‌کند. الگوریتم ارائه شده شبکه تصمیم‌گیری<sup>9</sup> نام دارد. در این پژوهش کاربرد موثر این روش در انجام مانور در محیط با اطلاعات نامطمئن به خوبی نشان داده شده است.

در مقاله‌ای سمیعی و همکاران [11] یک سناریو برای یک مسیر دو خطه در یک جهت برای انجام مانور تعویض خط در نظر گرفته‌اند و در مجاور خودرو اصلی، چهار خودرو (یکی در جلو خودرو اصلی در خط مشابه، دومی در پشت خودرو اصلی در خط مقابل، سومی در جلو خودرو اصلی در خط هدف و آخرین خودرو در پشت خودرو اصلی و در خط مشابه) در نظر گرفته‌اند و مسیری جهت انجام مانور تعویض خط ارائه دادند که عدم برخورد خودرو اصلی با دیگر خودروها را تضمین می‌کند.

در مطالعات و پژوهش‌های مختلف برای کنترل و تعقیب یک مسیر مشخص و تعیین‌شده از روش‌های متفاوتی استفاده شده است. در مرجع [8] از کنترلر پیش‌بین<sup>10</sup> برای کنترل یک خودرو با مدل دوچرخ استفاده شده است و نشان داده شده است که این کنترلر در سرعت‌های مختلف و مسیرهای پیچ در پیچ دارای عملکرد خوبی است. در بسیاری از مطالعات از کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>11</sup> جهت تعقیب مسیر استفاده شده است از جمله مرجع [1] که از این کنترلر جهت کنترل دینامیک عرضی خودرو بهره گرفته است.

شونن ژائو و همکاران [12] برای کنترل یک خودرو با دینامیک غیرخطی چهار درجه آزادی از روش مود لغزشی استفاده کردند. آن‌ها در این روش با اعمال نیروهای ناهمسان در چرخ‌ها باعث ایجاد گشتاور گردشی<sup>12</sup> و حفظ پایداری در شرایط اورژانسی شدند.

<sup>7</sup> Decision making

<sup>8</sup> Rapidly-exploring Random Tree

<sup>9</sup> Decision network

<sup>10</sup> Model predictive control

<sup>11</sup> PID

<sup>12</sup> Yaw moment

<sup>1</sup> Path tracking

<sup>2</sup> Navigation circle

<sup>3</sup> Elastic band

<sup>4</sup> State lattice planner

<sup>5</sup> Predictive constraint-based planning

<sup>6</sup> Spline-based search tree

عابرین پیاده هستند با چند ضلعی (ترجیحاً مستطیل) مدل شوند، با توجه به این که هر چندضلعی از مجموعه‌ای از پاره‌خطها تشکیل شده است، تابع فاصله زمانی آن از رابطه (1) به دست می‌آید:

$$TD_{Ply/xy}(x, y) = \min_{i=1}^m (TD_{O_i/xy}(x, y)) \quad (1)$$

که در آن  $m$  تعداد اضلاع چندضلعی و  $TD_{O_i/xy}(x, y)$  تابع فاصله زمانی برای ضلع  $i$  ام چند ضلعی می‌باشد که برای تمام نقاط  $(x, y)$  از دستگاه مختصات  $x$ - $y$ ، فاصله زمانی این نقاط را نسبت به ضلع  $i$  مشخص می‌کند. این تابع از رابطه (2) به دست می‌آید:

$$TD_{O_i/xy}(x, y) = 2Q_i^{-1} \left( \text{sign} \left( \frac{x_i'' - x_{i0_i}''}{v_{x_i''/O_i/xy}} \right) + 1 \right)^{-1} \frac{|x_i'' - x_{i0_i}''|}{v_{x_i''/O_i/xy}} \quad (2)$$

که متغیرهای آن در "شکل 1" مشخص شده‌اند.  $x_i''$  محور عمود بر راستای پاره‌خط و  $x_{i0_i}''$  موقعیت اولیه مرکز پاره‌خط را نشان می‌دهد و  $v_{x_i''/O_i/xy}$  سرعت پاره خط در راستای  $x_i''$  نسبت به دستگاه مختصات  $x$ - $y$  است و  $Q_i$  از رابطه (3) به دست می‌آید:

$$Q_i = \text{sign} \left( \text{sign} \left( \frac{l_i}{2} - |y_i'' - y_{i0_i}''(x_i'')| \right) + 1 \right) \quad (3)$$

که در این رابطه  $y_i''$  محور موازی با راستای پاره‌خط و  $l_i$  طول پاره خط است و  $y_{i0_i}''(x_i'')$  از رابطه (4) به دست می‌آید:

$$y_{i0_i}''(x_i'') = y_{i0_i}'' + (x_i'' - x_{i0_i}'') \tan(\theta_i' - \theta_i'') \quad (4)$$

که در این رابطه نیز  $x_{i0_i}''$  و  $y_{i0_i}''$  مربوط به موقعیت اولیه پاره‌خط هستند و  $\theta_i'$  و  $\theta_i''$  زاویه دوران نسبت به دستگاه اولیه  $x$ - $y$  را نشان می‌دهند به طوری که  $x_i''$  راستای حرکت پاره‌خط باشد.

## 2-1-2- تعیین مسیر عبور با استفاده از فاصله زمانی

پس از آن که نقاط نامن اطراف خودرو توسط توابع فاصله زمانی مشخص شدند، لازم است با اتصال نقاط امن مسیری برای حرکت خودرو فراهم شود. به این منظور ابتدا یک دستگاه مختصات محلی  $x$ - $y$  روی خودرو و یک دستگاه مختصات ساکن  $X$ - $Y$  روی جاده به گونه‌ای که محورهای  $x$  و  $X$  در راستای خطوط جاده و محورهای  $Y$  و  $y$  عمود بر آن‌ها باشند در نظر گرفته شده است. توابع فاصله زمانی باید در دستگاه مختصات  $x$ - $y$  بیان شوند تا سرعت موانع سرعت نسبی آن‌ها نسبت به خودرو باشد. اگر فضای دوبعدی مقابل خودرو را با مقطع‌هایی عمود بر محور  $x$  مشخص شوند، در هر مقطع از محور  $x$ ، امن ترین نقطه مقطع، از رابطه (5) به دست می‌آید:

$$y_p(x) = TD^{-1}(T_p(x)) \quad (5)$$

که در آن  $T_p(x)$  بیش‌ترین مقدار فاصله زمانی در مقطع  $x$  است و  $TD^{-1}$  اوپراتوری است که ورودی آن مقدار فاصله زمانی و خروجی آن نقطه‌ای در

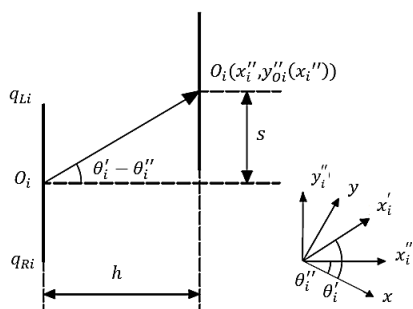


Fig. 1 a segment of line moving in 2D space and the parameters related to it

شکل 1 یک پاره خط در حال حرکت در فضای دو بعدی و پارامترهای مربوط به آن

رن دیانپو و همکاران [13] تعویض خط در جاده‌های منحنی شکل را مورد بررسی قرار دادند و توانستند با استفاده از روش مود لغزشی<sup>1</sup> پایداری و تعقیب مسیر توسط خودرو را تضمین کنند.

بهروز مشهدی و همکاران [14] با استفاده از سیستم کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی، گشتاور در راستای دوران و زاویه فرمان<sup>2</sup> را کنترل کردند. آن‌ها خطای زاویه سر خودرو و انحراف از مسیر عرضی را به عنوان ورودی استفاده کردند تا در نهایت کنترلر بتواند زاویه فرمان و گشتاور گردشی مورد نیاز را محاسبه و اعمال کند و خودرو بتواند مسیر مطلوب را دنبال کند. فیتزی یاکوب و یاسوچیکا موری [15] کنترلری جهت کنترل عرضی یک خودرو با سه درجه آزادی طراحی کردند، آن‌ها مدل تایر خودرو را با تقریب خطی در نظر گرفتند. این کنترلر با استفاده از تابع لاگر<sup>3</sup>، ضمن تضمین پایداری خودرو هنگامی که باد در حال وزیدن است، مسیر مطلوب را دنبال می‌کند.

چالش اصلی در مطالعات، یافتن مسیری بدون برخورد در محیط‌های پیچیده شهری ضمن در نظرگیری ابعاد خودرو می‌باشد. در بسیاری مطالعات تنها موانع ثابت وجود دارد [1]. در برخی مطالعات ابعاد خودرو و یا موانع به صورت نقطه‌ای [6] و [7]، یا به صورت یک تابع پتانسیل دفعی [4] و یا دایره [2] در نظر گرفته شده‌اند. در مسیریابی انجام شده در این پژوهش ابعاد خودرو دقیقاً در نظر گرفته شده است. برای بهبود نتایج حاصل از مقالات، روش فاصله زمانی در این پژوهش جهت یافتن مسیری، توسعه داده شده است و سپس با استفاده از روش استفاده شده در مرجع [11] از نظر عدم برخورد بهینه شده است.

در ابتدا در قسمت 2 این پژوهش محاسبات طراحی مسیر برای خودرو آورده شده است، به این ترتیب که در قسمت 2-1 روش فاصله زمانی توضیح و توسعه داده شده است. در قسمت 2-2 با در نظر گرفتن پیچیده‌ترین سناریو، مسیری بهینه برای ایجاد مسیر مانور تعویض خط ایجاد شده است که در آن شتاب عرضی و دینامیک خودرو لحاظ شده است. در قسمت 3 مدل دوچرخ با دو درجه آزادی برای خودرو در نظر گرفته شده و جهت کنترل مسیر ایجاد شده از روش مود لغزشی استفاده شده است و در انتها در قسمت 4 دو محیط شهری پیچیده در نظر گرفته شده است و سودمندی روش در تعیین مسیر و عدم برخورد با موانع در محیط‌های پیچیده نشان داده شده است.

## 2- طراحی مسیر

### 2-1-2- مسیریابی

مسأله تصمیم‌گیری در محیط‌هایی که موانع زیادی دارند و مکان آن‌ها در لحظات آینده مشخص نمی‌باشد از جمله مسائلی است که در مطالعات متعدد به آن اشاره شده است. در این قسمت برای طراحی مسیر، روش «تعیین مسیر عبور با استفاده از توابع فاصله زمانی» توسعه داده شده است و از آن برای مسیریابی استفاده می‌گردد.

### 2-1-1- تعیین زمان برخورد

توابع فاصله زمانی توابعی هستند که با توجه به بردار سرعت اجسام و هندسه آن‌ها، مناطق نامن موجود در مسیر خودرو را از سایر مناطق متمایز می‌کنند تا سیستم تصمیم‌گیری بتواند مسیری عاری از برخورد را برای خودرو تعیین کند. اگر موانع اطراف خودرو را که مهم‌ترین آن‌ها سایر خودروهای عبوری و

<sup>1</sup> Sliding mode controller

<sup>2</sup> Steering angle

<sup>3</sup> Lauger

در نظر گرفتن سرعت خودرو، شتاب عرضی نیز در ابتدا و انتهای انجام مانور صفر می‌باشد. (شرایط مرزی در روابط (11) نشان داده شده‌اند.)

$$y|_{t=0} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} y|_{t=t_m} = -H \\ \dot{y}|_{t=0} = 0 \\ \dot{y}|_{t=t_m} = 0 \\ \ddot{y}|_{t=0} = 0 \\ \ddot{y}|_{t=t_m} = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

مدت زمان انجام مانور  $t_m$  و مقدار فاصله میان خطوط وسط جاده  $H$  می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی نشان داده شده در روابط (11) منحنی تغییر خط به صورت معادله (12) به دست می‌آید:

$$y(t) = \left(\frac{-6H}{t_m^6}\right)t^5 + \left(\frac{15H}{t_m^4}\right)t^4 + \left(\frac{-10H}{t_m^3}\right)t^3 \quad (12)$$

تصمیم‌گیری درباره تعویض خط باید در بحرانی‌ترین شرایط حضور خودروها صورت گیرد. در این پژوهش برای بحرانی‌ترین حالت حضور، سه خودروی دیگر در نظر گرفته شده است. (شکل 2) در این شکل E خودروی تغییر خط دهنده، A خودروی مقابل واقع در خط مشابه، B خودروی مقابل واقع در خط هدف و D خودروی پشت واقع در خط هدف هستند. از آن‌جا که خودروی پشت سر واقع در خط مشابه تاثیر چندانی در تصمیم‌گیری ندارد از وجود آن صرف‌نظر شده است.

برای اطمینان از این‌که خودروی اصلی با هیچ‌کدام از خودروهای موانع برخورد نمی‌کند، باید چهار قید زیر مطابق با "شکل 2" برقرار باشد:

1. در هنگام انجام مانور فاصله عرضی گوشه جلو سمت چپ خودروی E از گوشه عقب سمت راست خودروی A حداقل به اندازه  $C_1$  فاصله داشته باشد. (شکل 2 «الف»)

2. در نقطه پایانی مانور و منتقل شدن خودرو E به خط هدف، حداقل فاصله آن با خودروی B به اندازه  $C_2$  باشد (شکل 2 «ب»).

3. در هنگام انجام مانور، فاصله عرضی گوشه عقب سمت راست خودروی E از گوشه جلو سمت چپ خودروی D حداقل دارای مقدار  $C_3$  بوده و پس از اتمام مانور و منتقل شدن به خط هدف نیز فاصله طولی آن دو از یکدیگر حداقل به اندازه  $C_4$  باشد (شکل 2 «ج»).

4. شتاب عرضی ایجاد شده هنگام انجام مانور، با توجه به اصطکاک میان جاده و تایر قابل حصول باشد.

الگوریتم تصمیم‌گیری گفته شده، با بررسی داده‌های دریافت شده از حسگرها، امکان تولید مسیر با رعایت تمامی قیدهای ذکر شده پیشین را

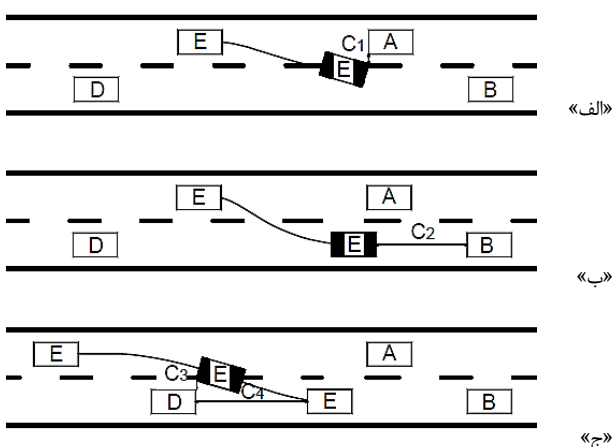


Fig. 2 Definition of constraints in lane change maneuver  
شکل 2 تعریف قیود در یک مانور تعویض خط

این مقطع است که دارای این فاصله زمانی می‌باشد. با توجه به این‌که  $T_p(x)$  بیش‌ترین مقدار فاصله زمانی در مقطع  $x$  است، در کل فضای  $xy$  از  $T_p(x)$  رابطه (6) به دست می‌آید:

$$T_p(x) = \max_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left( \min_{k=1}^n (TD_{O_k/xy}(x, y)) \right) \quad (6)$$

که در آن  $TD_{O_k/xy}(x, y)$  از رابطه (2) به دست می‌آید و  $n$  مجموع تعداد اضلاع موانع است و  $y_{\min}$  بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر  $y$  را نشان می‌دهند. حال به منظور ایجاد پیوستگی در مسیر و نیز حرکت دادن خودرو بین خطوط جاده، رابطه (7) به رابطه (6) اضافه شده است.

$$RF_L = \max_{i=1}^{n_L} \left( \alpha T_s - \beta \left| Y - \frac{Y_{L_i} + Y_{L_{i+1}}}{2} \right|^\gamma \right) \quad (7)$$

این تابع، تابع جاده نام دارد و در آن  $n_L$  تعداد خطوط جاده و  $Y_{L_i}$  موقعیت  $i$  امین خط جاده را نشان می‌دهد.  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای مثبتی هستند به طوری که  $(\beta, \gamma < 1 < \alpha)$  و  $T_s$  که دارای بعد زمان می‌باشد، کمترین مقدار فاصله زمانی‌ای است که به ما اطمینان می‌دهد که اگر خودرو در نقطه‌ای با این فاصله زمانی قرار گرفته باشد، در امنیت به سر می‌برد. به این ترتیب رابطه (6) به صورت رابطه (8) اصلاح می‌شود:

$$T_p(x) = \max_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left( \min_{k=1}^n (TD_{O_k/xy}(x, y), RF_L) \right) \quad (8)$$

سرانجام مسیر عبور با استفاده از روابط (5) و (8) به دست می‌آید.

## 2-2- تولید خط مسیر<sup>1</sup>

استفاده از روش فاصله زمانی در ترکیب با روش‌های تولید مسیر (چندجمله‌ای و یا اسپلاین‌ها) برای سناریوهایی که فاصله موانع به حد کافی زیاد می‌باشد نتایج قابل قبول می‌دهد و عدم برخورد گوشه‌های خودروها با یکدیگر را تضمین می‌کند اما در سناریوهایی که فاصله خودروها کم و بحرانی است و نیاز است در شرایطی با کمترین میزان مسافت طی شده و بدون برخورد به خودروهای اطراف (خودروهای واقع در جلو در خط مشابه خودرو اصلی، پشت در خط مشابه خودرو اصلی و پشت در خط هدف و جلو در خط هدف) که با فواصل کم از یکدیگر قرار دارند تغییر خط صورت گیرد، احتمال برخورد مشاهده می‌شود.

از این‌رو برای بهینه کردن و اطمینان از عدم برخورد در طول مسیر، روش عنوان شده در منبع [11] استفاده شده است.

خودرو دارای سرعت طولی ثابت بوده و از شتاب طولی آن صرف نظر شده است. این فرض هنگام انجام مانور تعویض خط در شرایط معمولی فرضی نزدیک به واقعیت است. بنابراین می‌توان معادله مسیر حرکت برحسب زمان را به صورت معادله چند جمله‌ای درجه پنج (9) در نظر گرفت:

$$y(t) = a t^5 + b t^4 + c t^3 + d t^2 + e t + f \quad (9)$$

از مشتق معادله (9) زاویه خودرو با خط وسط جاده به صورت معادله (10) به دست می‌آید:

$$\theta_E(t) = \tan^{-1}(y'(t)) = \tan^{-1}(5 a t^4 + 4 b t^3 + 3 c t^2 + 2 d t + e) \quad (10)$$

در معادله (9) و (10)  $y$  جابه‌جایی عرضی خودرو،  $t$  زمان و  $\theta_E$  زاویه سر خودرو نسبت به خط جاده است.  $a$  تا  $f$  پارامترهای چندجمله‌ای می‌باشند. برای تعیین این پارامترها از شرایط شروع و پایان منحنی تغییر خط استفاده شده است. سرعت عرضی خودرو در لحظه شروع و پایان هر مانور برابر صفر است و جابه‌جایی عرضی در نقطه پایانی به مقدار  $H$  اضافه یا کم شده است. با ثابت

<sup>1</sup> Trajectory planning

در لحظه موردنظر، موقعیت طولی و عرضی دو خودرو نسبت به یکدیگر از روابط (17) و (18) تبعیت می‌کند:

$$x_B - x_E = s_0 + v_{Ex}t_d + \frac{v_{Ex}^2}{2a_{Eb}} + l_{Ef} + l_{Br} \quad (17)$$

$$y_B = y_E \quad (18)$$

در عبارات بالا  $x_B$ ،  $x_E$ ،  $y_B$  به ترتیب موقعیت طولی و عرضی مرکز جرم خودرو  $B$  و  $E$  تا انتهای آن و  $l_{Ef}$  فاصله طولی مرکز جرم خودرو  $E$  تا ابتدای آن می‌باشد.

اعمال قید سوم:

خودرویی پشت و در خط هدف قرار دارد پس بدیهی است که گوشه عقب و سمت راست خودرو اصلی و گوشه جلو و سمت چپ خودرو پشت با یکدیگر حداقل فاصله  $C_3$  داشته باشند. (شکل 4)

مشابه آن چه برای اولین قید انجام شد، از طریق حل چهار معادله مربوط به این حالت، زمان موردنظر از این قید به دست می‌آید.

اعمال قید چهارم:

در این حالت خودروی دیگری در مسیر وجود ندارد، در نتیجه کمترین زمانی که می‌توان در آن تعویض خط انجام گیرد و با توجه به اصطکاک بین جاده و تایر قابل حصول باشد به دست می‌آید.

اعمال قید پنجم:

شدیدترین مانور تعویض خط ممکن، مانور باید علاوه بر مشتق‌پذیری و پیوستگی، قیود دینامیکی حاکم بر خودرو را نیز ارضا نماید به عبارتی باید توجه شود که شتاب عرضی با توجه به اصطکاک میان جاده و تایر قابل حصول باشد. بیش‌ترین شتاب برای یک مسیر منحنی درجه پنج با شرایط مرزی بیان شده در رابطه‌های شماره (11) در زمانی برابر با رابطه (19) انجام می‌شود:

$$t = \frac{3 \pm \sqrt{3}}{6} t_m \quad (19)$$

در زمان به دست آمده، شتاب بیشینه به صورت رابطه (20) می‌باشد:

$$(a_y)_{\max} = \frac{5.77}{t_m^2} H \quad (20)$$

در هر مانور باید شتاب عرضی بیشینه ایجاد شده را بررسی نمود تا از نظر پایداری و راحتی در بازه قابل قبول برای یک خودرو باشد.

رابطه تجربی به دست آمده برای به دست آوردن زمان مانور در شدیدترین وضعیت ممکن برحسب سرعت طولی و مقدار اصطکاک در مرجع [11] به صورت رابطه (21) بیان شده است:

$$t_m(\mu, v_x) = \frac{(\mu(8 + 0.5v_x) + 5)}{10\mu} \quad (21)$$

این مقدار، زمان کمینه تعویض خط قابل حصول، در حالتی که مقدار سرعت طولی و اصطکاک بین تایر و جاده مشخص است، می‌باشد.

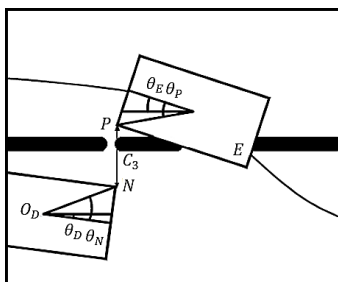


Fig. 4 Lateral constraint between ego vehicle and vehicle behind on the target lane

شکل 4 قید بین دو خودرو اصلی و خودرو عقب در خط هدف

بررسی کرده و در صورت امکان، اجازه انجام مانور را به همراه مدت زمان پیشنهادی ارائه می‌کند.

برای انجام هر مانور تعویض خط، مدت زمان انجام آن مانور به عنوان پارامتر اصلی تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود. سپس با بررسی زمان‌های به دست آمده از ارضای هر یک از قیود، تعویض خط انجام می‌شود. در ادامه نحوه محاسبه مدت زمان مانور براساس هر یک از قیود، بیان می‌شود.

اعمال قید اول:

خودرویی مقابل و در خط مشابه با خودروی اصلی قرار دارد و سیستم تصمیم به تعویض خط می‌گیرد.

برای لحظه‌ای که مختصات طولی نقاط  $M$  و  $P$  بر هم منطبق می‌شوند حداقل فاصله عرضی  $C_1$  میان این دو نقطه در نظر گرفته شده است. قید اعمال شده به صورت معادله (13) قابل بیان است:

$$y_A(t) - y_E(t) = C_1 + \overline{O_A M} \sin(\theta_M - \theta_A(t)) + \overline{O_E P} \sin(\theta_P - \theta_E(t)) \quad (13)$$

شرط انطباق طولی نقطه  $M$  و  $P$  به صورت معادله (14) قابل بیان است:

$$x_A - \overline{O_A M} \cos(\theta_M - \theta_A(t)) = x_E + \overline{O_E P} \cos(\theta_P - \theta_E(t)) \quad (14)$$

در معادلات (13) و (14)  $y_A$  و  $y_E$  مکان عرضی خودروهای  $A$  و  $E$  و  $x_A$  و  $x_E$  مکان طولی خودروهای  $A$  و  $E$  در لحظه موردنظر می‌باشد.  $\theta_A$ ،  $\theta_M$ ،  $\theta_P$ ،  $\theta_E$  نیز مشخصات هندسی خودروها می‌باشند که در "شکل 3" مشخص شده‌اند.

با داشتن نقطه شروع مانور از قسمت 1-2 و با حل هم‌زمان معادلات (9)، (10)، (13) و (14) برای زمانی که نقاط  $M$  و  $P$  انطباق طولی می‌یابند، کمترین زمان ممکن جهت انجام مانور به دست می‌آید که با  $t_m$  نشان داده شده است. قابل ذکر است این دستگاه معادلات غیرخطی با استفاده از روش عددی نیوتن حل شده است.

اعمال قید دوم:

خودرویی مقابل و در خط هدف قرار دارد و خودروی اصلی بعد از تعویض خط می‌بایست فاصله ایمن را تا این خودرو نگه دارد. فاصله ایمن میان این دو خودرو به صورت رابطه (15) نشان داده شده است:

$$C_2 = S_0 + \frac{v_{Ex}^2}{2a_{Eb}} \quad (15)$$

$$S_0 = TS(v_{Ex} - v_B) \quad (16)$$

در رابطه (16) فاصله ایمن بعد از کاهش سرعت (که در قسمت 1-2 در روش فاصله زمانی میزان فاصله ایمن برابر با مقدار مسافتی که دو خودرو در مدت زمان  $TS$  به هم نزدیک می‌شوند، در نظر گرفته شد)،  $v_{Ex}$  مقدار سرعت طولی خودرو و  $a_{Eb}$  حداکثر شتاب ترمزگیری خودرو است.

در این روش فرض بر این است خودروی مقابل در اثر برخورد با مانعی به طور ناگهانی به سرعت صفر می‌رسد.

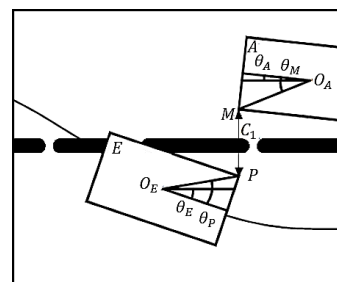


Fig. 3 Lateral constraint between ego vehicle and vehicle in front on the same lane

شکل 3 قید بین دو خودرو اصلی و خودرو عقب در همان خط

موارد ذکر شده می‌باشند و از مرجع [17] استخراج شده‌اند که به علت تفصیل از ذکر روابط آن صرف نظر شده است.

روش در نظر گرفته شده برای کنترل این سیستم غیرخطی (با یک ورودی) روش مود لغزشی است. عدم قطعیت‌های این سیستم در جرم و مقدار ضریب اصطکاک چرخ با زمین است. مطابق آنچه در مرجع [18] آورده شده است، سیستم به صورت معادله (26) تعریف می‌شود:

$$\dot{X}^2 = f(X) + b(X)U(t) \quad (26)$$

سیستم از رسته دو است و بردار  $X$  در این معادله بردار متغیرهای حالت و مشتقات آن است و به صورت رابطه (27) می‌باشد:

$$X = [\dot{y} \quad \Omega_z] \quad (27)$$

از معادلات حاکم بر سیستم  $f$  و  $b$  به صورت روابط (28) و (29) حاصل می‌شود:

$$f = \left( \frac{F_{ry} + F_w}{m} - \Omega_z v_x \right) \cos\psi \quad (28)$$

$$b = \cos\psi \frac{F_{fy}}{m} \quad (29)$$

هدف این است که ورودی  $U(t)$  در معادله (26) طوری تعیین شود که علی‌رغم وجود عدم قطعیت در  $f(X)$  و  $b(X)$ ، متغیرهای حالت  $X$  مقادیر مطلوب خود را تعقیب کنند.

برای این که  $X_d$  توسط  $X$ ، با اعمال یک ورودی محدود  $U$  تعقیب شود، شرایط اولیه خروجی مطلوب  $X_d(0)$  باید برابر شرایط اولیه سیستم باشد.

(رابطه (30))

$$X_d(0) = X(0) \quad (30)$$

خطا و سطح لغزش به صورت روابط شماره (31) و (32) تعریف شده اند:

$$\tilde{Y} = Y - Y_d \quad (31)$$

$$S = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^1 \int_0^t \tilde{X} d\tau = \dot{y} + \lambda y - \dot{y}_d - \lambda y_d \quad (32)$$

در ادامه با صفر قرار دادن رابطه (33) مقدار  $\hat{\delta}_f$  به دست می‌آید (رابطه (34))

و ورودی فرمان  $\delta_f$  از رابطه (36) حاصل می‌شود. در این رابطه از

چترینگ جلوگیری می‌کند. (رابطه (35))  $\hat{b}$  میانگین هندسی  $b_{\min}$  و  $b_{\max}$  می‌باشد.

$$\dot{S} = v_x \sin\psi + v_y \cos\psi + \Omega_z (v_x \cos\psi - v_y \sin\psi) + \lambda \dot{y} - \dot{y}_d - \lambda \dot{y}_d \quad (33)$$

$$\hat{\delta}_f = \cos^{-1}(-\hat{b}^{-1} \cos\psi^{-1} (\Omega_z (v_x \cos\psi - v_y \sin\psi) + \lambda \dot{y} - \dot{y}_d - \lambda \dot{y}_d + f \cos\psi)) \quad (34)$$

$$\text{sat}(S) = \min \left\{ 1, \max \left( -1, \frac{S}{\theta} \right) \right\} \quad (35)$$

$$\delta_f = \hat{b}^{-1} [\hat{\delta}_f - K \text{sat}(S)] \quad (36)$$

در پایان این بخش ضرایب کنترلی  $K$ ،  $\lambda$  و  $\theta$  طوری تعیین شده‌اند که کنترلر به خوبی  $\dot{Y}$  و متعاقباً  $Y$  را کنترل می‌کند.

با اعمال ورودی فرمان  $\delta_f$  به معادلات خودرو و حل آن‌ها با استفاده از روش عددی دورمند پرنس<sup>2</sup> در نرم‌افزار متلب حرکت عرضی مطلوب به دست می‌آید.

#### 4- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم مسیریابی ارائه شده در قسمت 2-1 برای یک آزادراه دارای چهار خط مسیر در یک جهت نوشته شده است.

حسگرها توانایی تشخیص موانع اطراف خود را دارند و به محض تشخیص یک سناریوی کامل با بررسی چهار خودروی موجود در یک سناریوی پیچیده (عنوان شده در قسمت 2-2) شروع به تصمیم‌گیری و انجام مانور می‌کنند. لازم به ذکر است حسگرها وجود یا عدم وجود هر چهار خودرو را بررسی کرده

حال با توجه به زمان‌های به دست آمده از هر یک از قیود تعریف شده، کمترین آن‌ها جواب مناسبی جهت ارضای تمام قیود خواهد بود. (که در پایان می‌بایست با مقدار زمان قابل حصول در قید پنجم مقایسه شود و امکان اعمال این زمان بررسی شود).

ملاحظه می‌شود 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.

#### 3- مدل دینامیکی و کنترل مسیر خودرو

مدل دینامیکی خودرو بخش مهمی از پژوهش به حساب می‌آید چرا که برای اثبات موثر بودن قوانین کنترلی اعمالی از آن استفاده می‌شود. مدل دینامیکی خودرو دارای تعداد زیاد درجات آزادی می‌باشد که شبیه‌سازی تمام آن درجات پیچیده می‌باشد و لزومی به شبیه‌سازی تمام درجات آن نیست. در این پژوهش برای طراحی کنترلی یک مدل به اندازه کافی ساده برای سیستم در نظر گرفته شده است، همانند آنچه در "شکل 5" مشخص است این مدل یک مدل دوچرخ و شامل دو درجه آزادی حرکت در راستای  $Y$  و دوران در راستای  $Z$  می‌باشد. سرعت طولی ثابت در نظر گرفته شده است و مدل تایر مدل غیرخطی پژو<sup>1</sup> است. مدل در نظر گرفته شده از مرجع [16] استخراج شده است و در همان مرجع صحت‌گذاری شده است.

$$m(a_y + \Omega_z v_x) = F_{ry} + F_{fy} \cos\delta_f - F_{fx} \sin\delta_f \quad (22)$$

$$I_z \dot{\Omega}_z = (F_{fy} \cos\delta_f - F_{fx} \sin\delta_f) l_1 - F_{ry} l_2 \quad (23)$$

در معادلات (22) و (23)،  $m$  جرم خودرو،  $l_1$  فاصله مرکز ثقل خودرو تا چرخ جلو،  $l_2$  فاصله مرکز ثقل خودرو تا چرخ عقب،  $v_x$  سرعت طولی خودرو،  $a_y$  شتاب عرضی،  $\Omega_z$  شتاب دورانی در راستای محور  $Z$ ،  $\delta_f$  زاویه فرمان،  $I_z$  ممان اینرسی دورانی در راستای  $Z$  و  $F_{ry}$  و  $F_{fy}$  نیروهای اصطکاکی چرخ که از مدل تایر پژو به دست می‌آید. (مقدار  $F_{fx}$  صفر فرض شده است.)

مدل تایر پژو مدلی کامل و دارای تمامی نیروهای جانبی، طولی و همچنین گشتاور خود بازگرداننده است. به طور معمول نیروی عرضی چرخ تابعی از نیروی عمودی ( $F_z$ )، زاویه لغزش چرخ ( $\alpha$ )، زاویه کمبر ( $\gamma$ ) و ضریب اصطکاک چرخ و جاده ( $\mu$ ) می‌باشد. (رابطه (24))

$$F_y = F(\alpha, \gamma, F_z, \mu) \quad (24)$$

$$F = D \sin[C \tan^{-1}\{B \alpha - E(B \alpha - \tan^{-1}(B \alpha))\}] + S \quad (25)$$

در رابطه (24) از رابطه (25) به دست می‌آید. ضرایب  $D$ ،  $C$ ،  $B$ ،  $E$  و  $S$  تابع

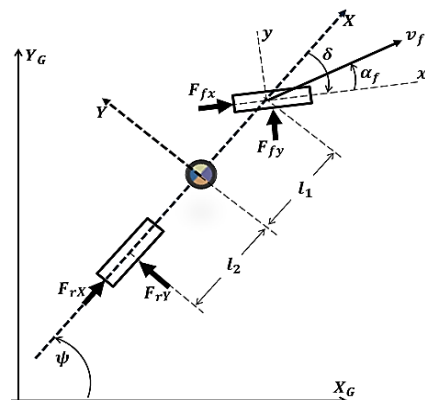


Fig. 5 Vehicle dynamic model

شکل 5 مدل دینامیکی خودرو

<sup>2</sup> Dormand-Prince method

<sup>1</sup> Pacejka

و در الگوریتم به کار می‌برند. خودرو پس از انجام هر مانور تعویض خط، شرایط را بررسی کرده و برای تعویض خط بعدی تصمیم می‌گیرد که به خط راست یا چپ تعویض خط کند و یا در خط جاری به سمت جلو حرکت کند. این الگوریتم سعی می‌کند که خودرو به خط‌های کناری تغییر مسیر دهد و به خط اصلی برگردد. در این قسمت از خودرو خواسته می‌شود دو سناریو را انجام دهد:

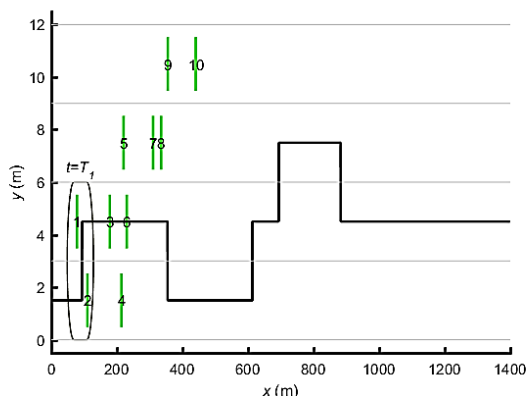
1. از میان موانع "شکل 6" خود را بدون برخورد به پایان مسیر برساند.
2. از میان موانع "شکل 19" خود را بدون برخورد به پایان مسیر برساند.

سرعت خودروی اصلی 100km/h و عرض جاده 3m است و فاصله زمانی و قیود اعمالی به شرح جدول 1 هستند:

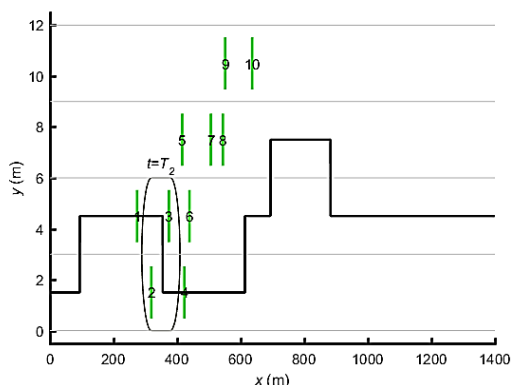
جدول 2 سرعت موانع در سناریوی 1 برحسب کیلومتر بر ساعت

**Table 2** Velocity of the obstacles in scenario 1 (km/h)

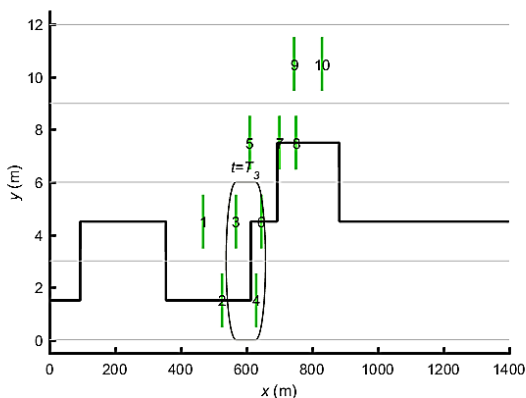
$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$
75	80	75	75	80	80	75	75	80	75



**Fig. 8** Obstacles positions at  $t=T_1$  and the path in that moment  
شکل 8 مکان موانع در  $t=T_1$  و مسیر پیش‌بینی شده در آن لحظه



**Fig. 9** Obstacles positions at  $t=T_2$  and the path in that moment  
شکل 9 مکان موانع در  $t=T_2$  و مسیر پیش‌بینی شده در آن لحظه



**Fig. 10** Obstacles positions at  $t=T_3$  and the path in that moment  
شکل 10 مکان موانع در  $t=T_3$  و مسیر پیش‌بینی شده در آن لحظه

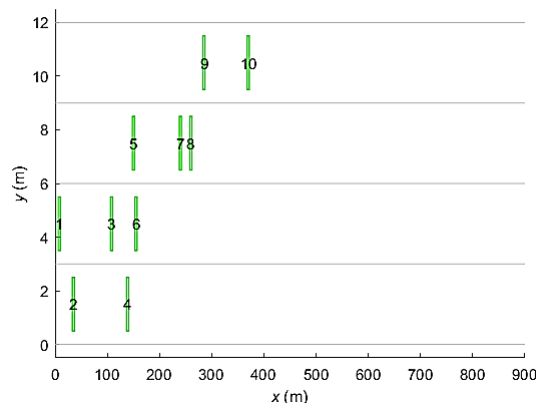
#### 1-4- سناریوی اول

موانع مطابق "شکل 6" در چهار خط قرار گرفته‌اند و سرعت آن‌ها در جدول 2 ذکر شده است. مسیری حاصل از روش فاصله زمانی در "شکل 7" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش فاصله زمانی محل عبور خودرو را از میان موانع در یک مسیر با چهار خط تصمیم‌گیری می‌کند.

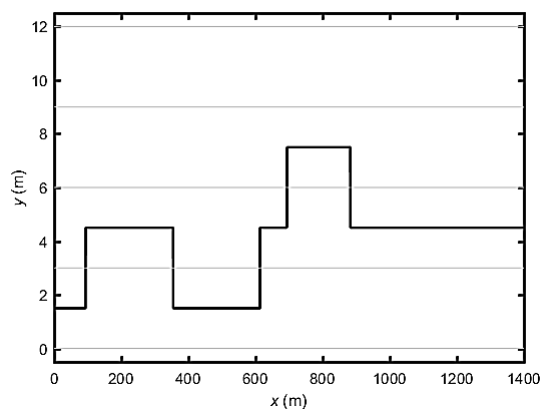
جدول 1 مقادیر قیودها

**Table 1** Constraints

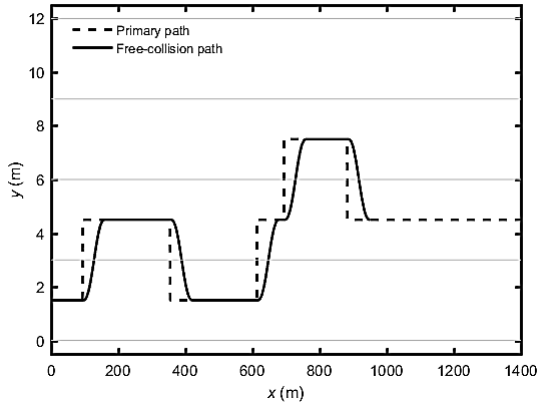
$C_3$	$S_0$	$C_1$	$T_s$
1 (m)	15 (m)	1 (m)	2 S



**Fig. 6** Position of the obstacles in scenario 1  
شکل 6 مکان قرارگیری موانع در سناریو 1



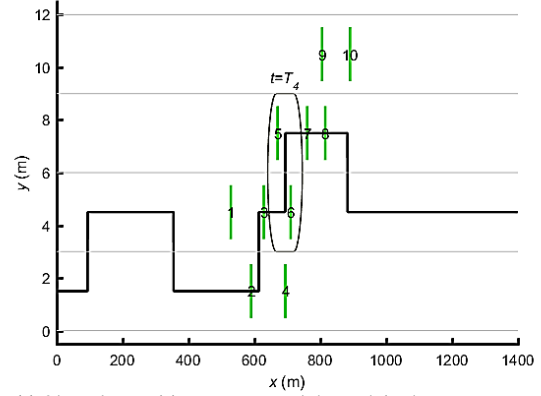
**Fig. 7** The primary path produced from time interval method  
شکل 7 مسیر تولید شده اولیه از روش فاصله زمانی



**Fig.13** Primary path (from time interval method) and improved free-collision path

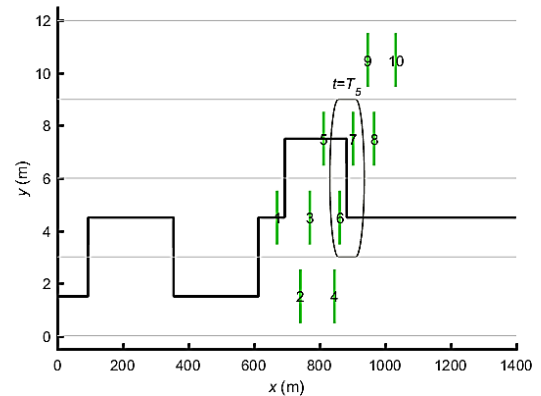
شکل 13 مسیر اولیه (حاصل از روش فاصله زمانی) و مسیر بهینه شده و بدون برخورد

مطابق با روش توضیح داده شده در قسمت 2-2 برای هر تعویض خط در طول مسیر، زمان متناسب با آن به دست می‌آید و مسیر اولیه به صورت "شکل 14" بهینه می‌شود. در این شکل هر دو مسیر نشان داده شده‌اند. در "شکل 14" مکان خودروی اصلی و موانع اطراف در زمان مماس شدن گوشه‌های دو خودروی اصلی و خودروی جلویی در همان خط نشان داده شده است و عدم برخورد آن‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت مسیر به دست آمده به وسیله کنترلر مد لغزشی کنترل می‌شود. در "شکل 15" مسیر به دست آمده از مدل خودرو هنگام اعمال ورودی کنترلی مد لغزشی در کنار ورودی مطلوب نشان داده شده است، مشاهده می‌شود انحراف خودرو از مسیر مطلوب مقدار قابل قبول دارد.



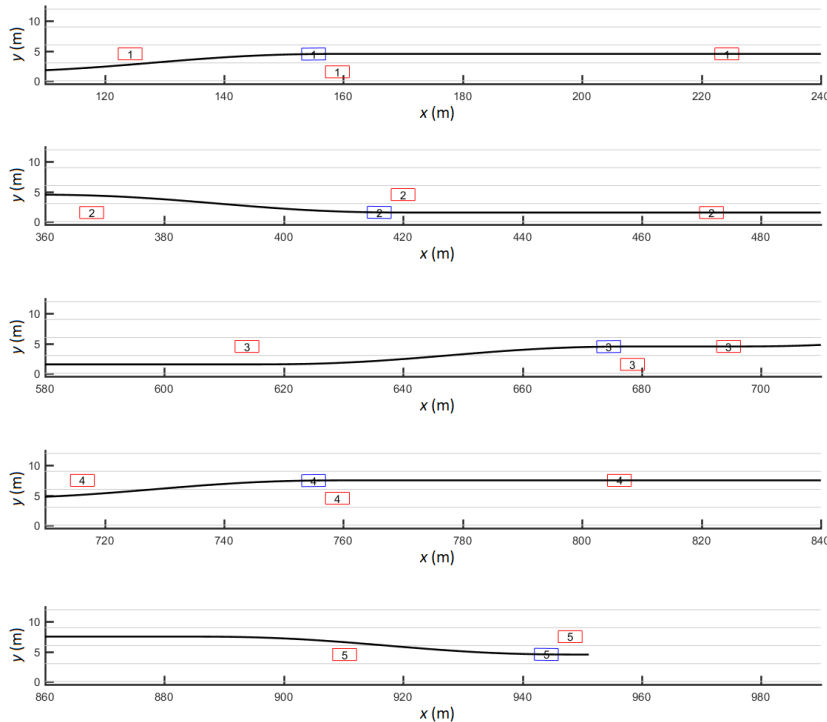
**Fig. 11** Obstacles positions at  $t=T_4$  and the path in that moment

شکل 11 مکان موانع در  $t=T_4$  و مسیر پیش‌بینی شده در آن لحظه



**Fig. 12** Obstacles positions at  $t=T_5$  and the path in that moment

شکل 12 مکان موانع در  $t=T_5$  و مسیر پیش‌بینی شده در آن لحظه



**Fig. 14** Position of main vehicle and the obstacles at the critical moment in each maneuver of produced path

شکل 14 مکان خودرو اصلی و موانع در لحظه بحرانی در هر تعویض خط در مسیر تولید شده



نتایج و نمودارهای سناریوی دوم نیز متناظر با آنچه در سناریوی اول بیان شد، در این بخش ارائه شده‌اند.

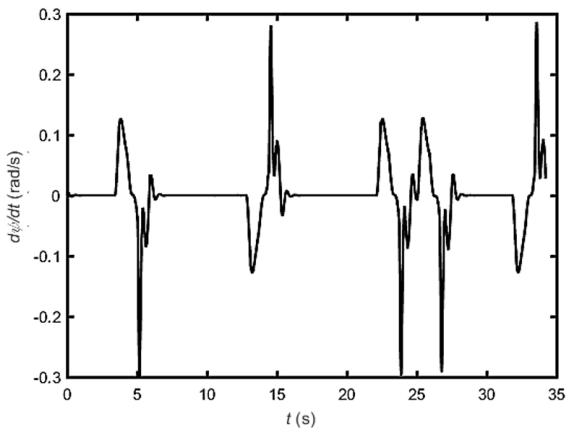


Fig. 18 Yaw velocity of the vehicle model

شکل 18 سرعت دورانی خروجی از مدل خودرو

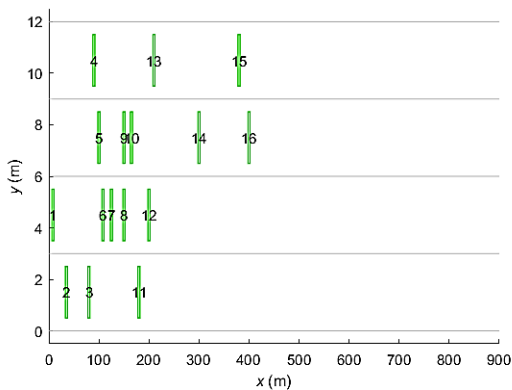


Fig. 19 Position of the obstacles in scenario 2

شکل 19 مکان قرارگیری موانع در سناریو 2

جدول 3 سرعت موانع 1 تا 8 در سناریوی 2 برحسب کیلومتر بر ساعت

Table 3 Velocity of the obstacles (1- 8) in scenario 2 (km/h)

$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$
75	80	80	75	60	75	80	80

جدول 4 سرعت موانع 9 تا 16 در سناریوی 2 برحسب کیلومتر بر ساعت

Table 4 Velocity of the obstacles (9 -16) in scenario 2 (km/h)

$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$	$V_{16}$
70	85	75	80	75	80	70	75

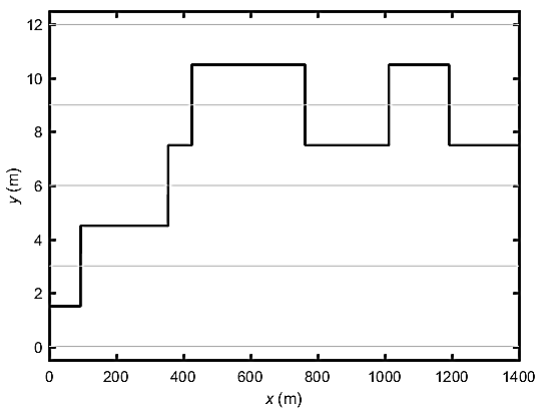


Fig. 20 The primary path produced from time interval method

شکل 20 مسیر تولید شده اولیه از روش فاصله زمانی

در ادامه ورودی فرمان کنترلی ساخته شده توسط کنترلر مدول لغزشی، شتاب جانبی خودرو و سرعت زاویه دورانی خودرو به ترتیب در "شکل 16، 17 و 18" نشان داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود محدوده شتاب جانبی خودرو مقدار مطلوبی دارد و از حد مجاز قابل تحمل برای یک خودرو سواری تجاوز نکرده است.

#### 4-2- سناریوی دوم

موانع مطابق "شکل 19" در چهار خط قرار گرفته‌اند و سرعت آن‌ها در جدول 3 و 4 ذکر شده‌اند.

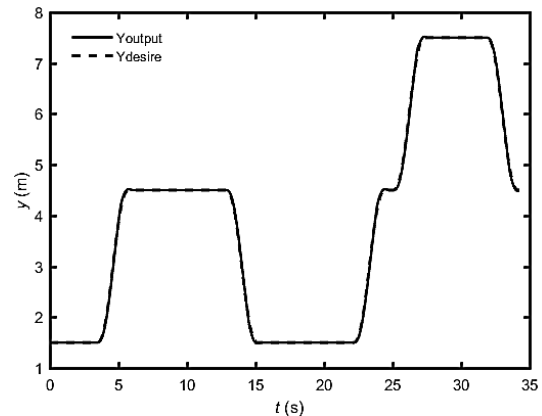


Fig. 15 The desired path and the sliding mode controller output

شکل 15 مسیر مطلوب و خروجی کنترلر مدول لغزشی

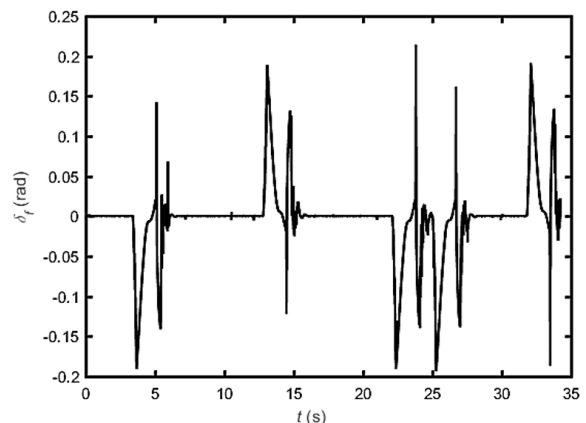


Fig. 16 The steer angle input obtained from sliding mode method

شکل 16 ورودی فرمان کنترلی به‌دست آمده از روش مدول لغزشی

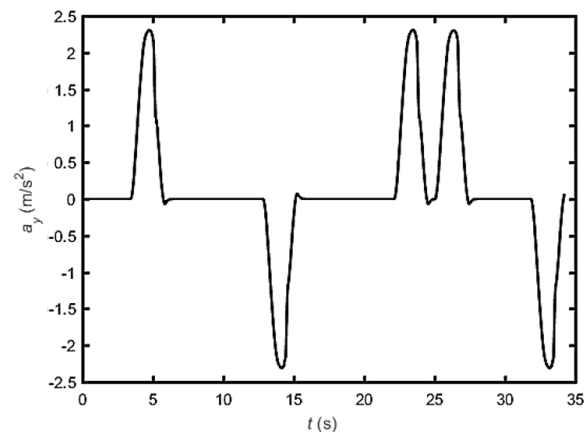


Fig. 17 Lateral acceleration of the vehicle model

شکل 17 شتاب جانبی خروجی از مدل خودرو

در جلو خودرو اصلی و گوشه سمت چپ در عقب خودروی مانع برای تعویض خط به سمت راست) در یک طول قرار می‌گیرند. به صورت مجزا نشان داده شده است و عدم برخورد خودرو اصلی با خودروهای دیگر مشاهده می‌شود. مسیر مطلوب به دست آمده و مسیری که خروجی کنترلر مود لغزشی است در "شکل 24" رسم شده است. با مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌شود کنترلر مود لغزشی عملکرد مطلوبی داشته است. در "شکل 25، 26 و 27" به ترتیب ورودی کنترلی، شتاب عرضی خودرو و سرعت دورانی خودرو را در سناریو دوم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود شتاب عرضی و سرعت دورانی خودرو در محدوده مورد قبول از تحمل خودرو و راحتی سرنشینان قرار دارد.

### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی نوین جهت مسیریابی بین تعداد زیادی از موانع متحرک در یک محیط شهری ارائه شده است که عدم برخورد خودرو با موانع را تضمین می‌کند و ابعاد خودرو را در نظر می‌گیرد. این پژوهش پژوهشی نسبتاً کامل و نزدیک به واقعیت در مسیریابی و عدم برخورد یک خودرو با موانع ثابت و متحرک است و سعی شده است تمام شرایط، نزدیک به آنچه در جاده‌های واقعی اتفاق می‌افتد در نظر گرفته شود. در بسیاری مطالعات تنها موانع ثابت وجود دارد و ابعاد خودرو و یا موانع به طور واقعی در نظر گرفته نشده‌اند. در مسیریابی انجام شده در این پژوهش ابعاد خودرو دقیقاً در نظر گرفته شده است.

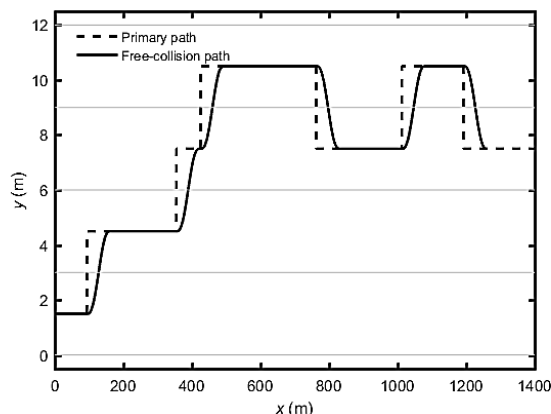


Fig. 21 Primary path (from time interval method) and improved free-collision path

شکل 21 مسیر اولیه (به دست آمده از روش فاصله زمانی) و مسیر بهینه شده و بدون برخورد

"شکل 20" مسیر تولید شده توسط روش فاصله زمانی را نشان می‌دهد. این مسیر توسط روشی که در بخش 2-2 توضیح داده شد بهینه و اصلاح شده است. (مطابق شکل 21)

در "شکل 22" تغییر خط‌های رخ داده در تمام مسیر در لحظه‌ای که دو گوشه خودروها (گوشه سمت چپ در جلو خودرو اصلی و گوشه سمت راست در عقب خودروی مانع برای تعویض خط به سمت چپ و گوشه سمت راست

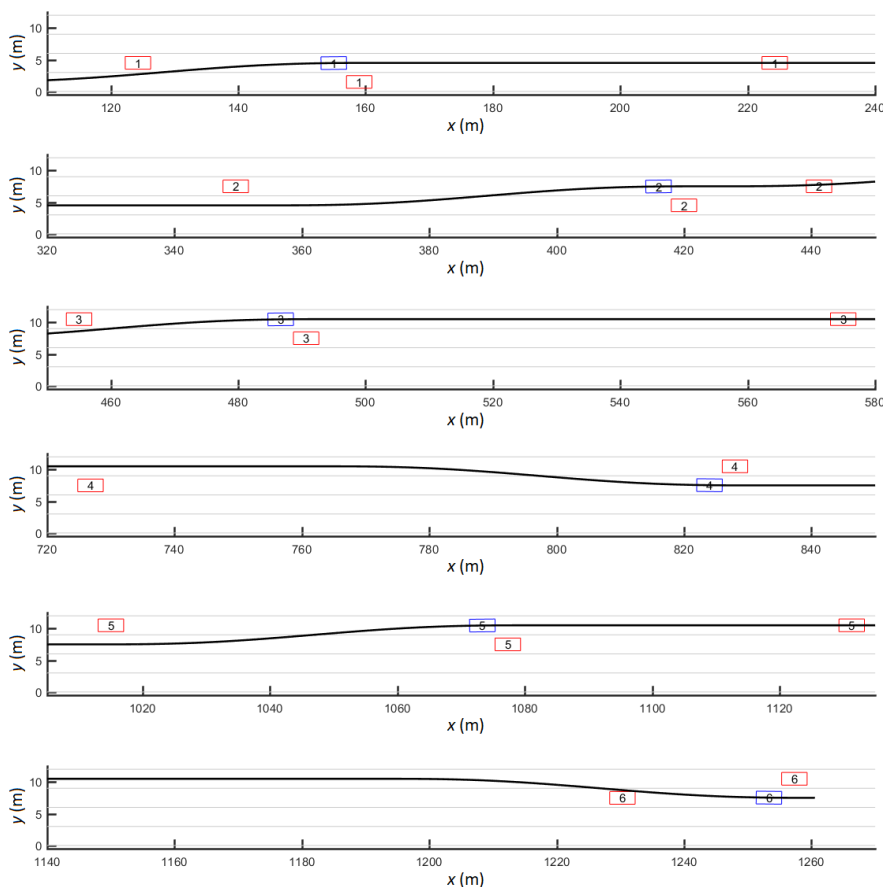


Fig. 22 Position of main vehicle and the obstacles at the critical moment in each maneuver of produced path

شکل 22 مکان خودرو اصلی و موانع در لحظه بحرانی در هر تعویض خط در مسیر تولید شد

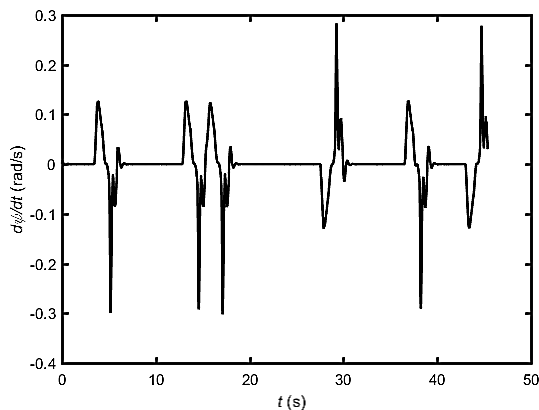


Fig. 26 Yaw velocity of the vehicle model

شکل 26 سرعت دورانی خروجی از مدل خودرو

3- در ابتدا نقاط مختلف محیط، به لحاظ احتمال برخورد درجه‌بندی شده و سپس از به هم پیوستن نقاط با درجه‌های قابل قبول مسیری تشکیل شده است. مسیر به‌دست آمده از نظر عدم برخورد و شتاب عرضی قابل قبول برای یک خودروی شهری بهینه شده و مسیری کاملاً عملی از نظر دینامیک یک خودرو به‌دست آمده است.

4- نوآوری این پژوهش گسترش روشی برای مسیریابی و تصمیم‌گیری حرکت از میان موانع متحرک می‌باشد. (بخش 2-1) همچنین استفاده از این روش همراه با روش عنوان شده در بخش 2-2، تضمین می‌دهد در حین انجام تعویض خط در هر بخش از مسیر حرکت خودرو، هیچ‌گونه برخوردی صورت نمی‌گیرد و در طول حرکت فاصله امن میان خودرو و موانع حفظ می‌شود.

5- مدل خودرو شبیه‌سازی شده و مسیر به‌دست آمده توسط روش کنترلی مدول لغزشی کنترل شده است و شتاب عرضی خروجی از خودرو در بازه‌ای قابل قبول (از نظر راحتی و ایمنی) به‌دست آمده است.

6- جهت ارزیابی عملکرد این روش، دو سناریو نسبتاً پیچیده شبیه‌سازی شده‌اند و رفتار خودرو در سناریوهای ترافیکی مختلف مورد آزمون قرار گرفته است. این روش عملکرد قابل قبولی در این سناریوها داشته است.

### 6-مراجع

- [1] M. Fu, K. Zhang, Y. Yang, H. Zhu, M. Wang, Collision-free and kinematically feasible path planning along a reference path for autonomous vehicle, *Proceeding of, IEEE*, pp. 907-912, 2015.
- [2] X. Song, H. Cao, J. Huang, Vehicle path planning in various driving situations based on the elastic band theory for highway collision avoidance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 227, No. 12, pp. 1706-1722, 2013.
- [3] S. Zhang, Y. Wang, Q. Huang, S. Wang, A trajectory planning algorithm for highly automated driving in complex environment, *Proceeding of, IEEE*, pp. 88-93, 2013.
- [4] R. Daily, D. M. Bevely, Harmonic potential field path planning for high speed vehicles, *Proceeding of, IEEE*, pp. 4609-4614, 2008.
- [5] D. Madás, M. Nosratinia, M. Keshavarz, P. Sundström, R. Philippsen, A. Eidehall, K.-M. Dahlén, On path planning methods for automotive collision avoidance, *Proceeding of, IEEE*, pp. 931-937, 2013.
- [6] H. T. Chiang, N. Malone, K. Lesser, M. Oishi, L. Tapia, Path-guided artificial potential fields with stochastic reachable sets for motion planning in highly dynamic environments, *Proceeding of, IEEE*, pp. 2347-2354, 2015.
- [7] Y. Du, Y. Wang, C. Y. Chan, Autonomous lane-change controller via mixed logical dynamical, *Proceeding of, IEEE*, pp. 1154-1159, 2014.
- [8] J. Nilsson, J. Sjöberg, Strategic decision making for automated driving on two-lane, one way roads using model predictive control, *Proceeding of, IEEE*, pp. 1253-1258, 2013.
- [9] L. Ma, J. Xue, K. Kawabata, J. Zhu, C. Ma, N. Zheng, A fast RRT algorithm for motion planning of autonomous road vehicles, *Proceeding of, IEEE*, pp. 1033-1038, 2014.

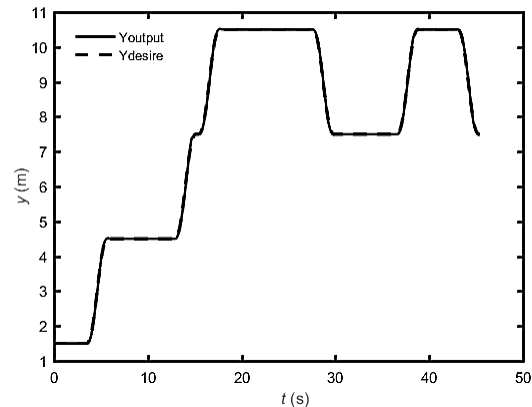


Fig. 23 The desired path and the sliding mode controller output

شکل 23 مسیر مطلوب و خروجی کنترلی مدول لغزشی

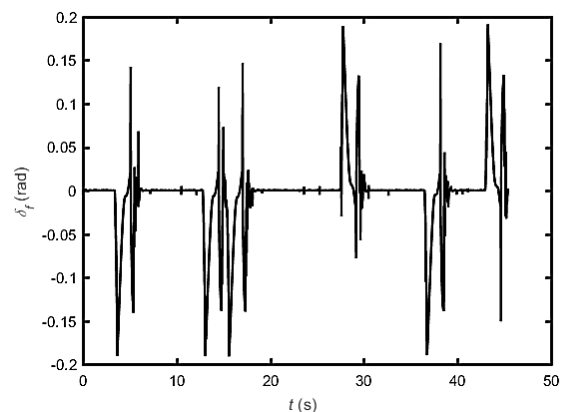


Fig. 24 The steer angle input obtained from sliding mode method

شکل 24 ورودی فرمان کنترلی به‌دست آمده از روش مدول لغزشی

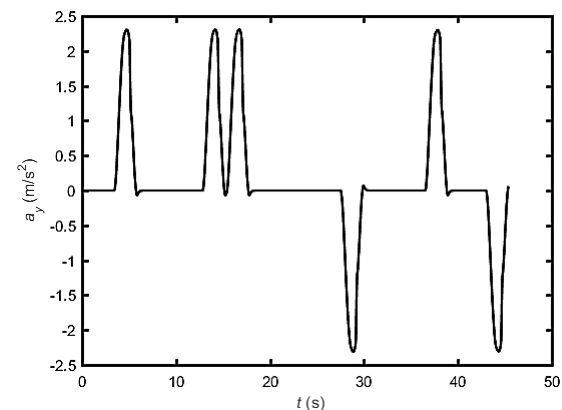


Fig. 25 Lateral acceleration of the vehicle model

شکل 25 شتاب جانبی خروجی از مدل خودرو

- 1- در این پژوهش مسیریابی به صورت آنلاین و بلادرنگ<sup>1</sup> می‌باشد و تصمیم‌گیری با بررسی وقایع در چند ثانیه آینده انجام می‌گیرد و امکان تغییر تصمیم‌گیری در صورت تغییر مکان یا سرعت موانع وجود دارد.
- 2- تعیین مسیر در این پژوهش شامل سه قسمت مسیریابی، انتخاب مسیر مناسب از میان مسیرهای به‌دست آمده و سپس بهینه‌سازی مسیر منتخب از نظر عدم برخورد با موانع می‌باشد. روش‌های در نظر گرفته شده برای هر قسمت با یکدیگر تناسب داشته و نتایج موثر و سودمندی حاصل کرده است.

<sup>1</sup> Real time

- [14] B. Mashadi, M. Mahmoudi-Kaleybar, P. Ahmadizadeh, A. Oveisi, A path-following driver/vehicle model with optimized lateral dynamic controller, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 11, No. 4, pp. 613-630, 2014.
- [15] F. Yakub, Y. Mori, Autonomous car in path following control under side wind effect by laguerre function, *Proceeding of, IEEE*, pp. 61-66, 2013.
- [16] P. P. Ramanata, *Optimal Vehicle path Generator Using Optimization Methods*, Thesis, the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, April 1998.
- [17] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, pp. 184-191: Elsevier, 2005.
- [18] J. J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, pp. 276-310: Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [10] R. Schubert, Evaluating the utility of driving: Toward automated decision making under uncertainty, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 354-364, 2012.
- [11] S. Samiee, S. Azadi, R. Kazemi, A. Eichberger, B. Rogic, M. Semmer, *Performance Evaluation of a Novel Vehicle Collision Avoidance Lane Change Algorithm*, in: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2015*, Eds., pp. 103-116: Springer, 2016.
- [12] S. Zhao, Y. Li, L. Zheng, S. Lu, Vehicle lateral stability control based on sliding mode control, *Proceeding of, IEEE*, pp. 638-642, 2007.
- [13] D. Ren, J. Zhang, J. Zhang, S. Cui, Trajectory planning and yaw rate tracking control for lane changing of intelligent vehicle on curved road, *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 3, pp. 630-642, 2011.