



## کنترل نرخ یاو (چرخش) یک خودروی الکتریکی چهار چرخ محرک

<sup>۱</sup> نسیم باقری، <sup>۲</sup> حسن علیپور

<sup>۱</sup> گروه مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران، nasim.bagheri.70@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران، hasan.alipour2006@gmail.com

### چکیده

در این مقاله یک کنترل کننده با استفاده از روش کنترل مد لغزشی برای حفظ پایداری خودروی الکتریکی چهار چرخ محرک بدون دیفرانسیل با موتورهای درون چرخ طراحی شده است. در این روش با بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی نلدر مید به تعیین پارامتر سیگنال های مرجع پرداخته و سپس ردیابی سیگنال های مرجع بررسی می شود، همچنین به منظور کاهش اثرات چترینگ موجود در روش کنترل مد لغزشی به سبب سوچینگ کنترل فرکانس بالا، کنترل مد لغزشی مرتبه بالا ارائه شده که باعث بهبود ردیابی سیگنال های مرجع در شرایط بحرانی می شود. در نهایت ارزیابی کنترل کننده پیشنهادی با انجام شبیه سازی در نرم افزار- های MATLAB و CARSIM تایید می شود.

**واژه های کلیدی:** خودروی الکتریکی چهار چرخ محرک، کنترل مد لغزشی، کنترل نرخ یاو، موتور درون چرخ

### ۱- مقدمه

ملاحظات زیست محیطی و ملاحظات اقتصادی، عوامل مؤثر در تولید خودروهایی پاکیزه، کارآمد و مناسب جهت حمل و نقل شهری می باشند. خودروها بخشی از زندگی روزمره ما را تشکیل می دهند. با این حال مواد و گازهای متصاعد شونده از آگزوز خودروها با موتور احتراق داخلی منبع عمده آلوده سازی شهری هستند که خود اثرات گلخانه ای را به همراه دارد و در نهایت به گرم شدن کره زمین می انجامد. وابستگی به نفت به عنوان منبع مطلق انرژی جهت خودروها، کاهش منابع سوختی و وجود نوسان های شدید در بازار عرضه، دیگر موضوعاتی است که لزوماً ایجاد تغییر در تکنولوژی های متداول مورد استفاده در صنعت خودرو را گوشزد می کند [۱]. بنابراین برای کاهش مشکلات زیست محیطی و ملاحظات اقتصادی، خودروهای الکتریکی با ساختارهای مختلف پیشنهاد گردیده است. در ساختار خودرو با موتورهای درون چرخ، قابلیت کنترل چرخ به صورت مستقیم وجود دارد و هر چرخ آن به وسیله یک موتور الکتریکی به حرکت در می آید. موتورهای الکتریکی می توانند در فضای درون چرخ قرار بگیرند که به نام موتورهای درون چرخ شناخته می شوند [۲]. یکی از مشکلات عمده این خودروها می توان به ایجاد یک سیستم کنترل برای هماهنگی بین موتورهای جهت حفظ تعادل خودرو در مانورها و پیچ ها اشاره کرد. بنابراین سیستم کنترل ضمن کنترل گشتاور هر چرخ به منظور ایجاد هماهنگی بین موتورها، امکان کمک به راننده در اصلاح مسیر و افزایش پایداری در سطوح مختلف را نیز فراهم می کند. در مرجع [۳] برای تعیین

سیگنال های مرجع، کنترل کننده ای پیشنهاد گردیده که ضمن حفظ پایداری از قابلیت های عملکردی خودرو نیز کاهش پیدا نکند که برای تعیین پارامترهای سیگنال های مرجع از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و روش بهینه سازی نلدر مید استفاده گردیده است. در مرجع [۴] کنترل کننده ای پیشنهاد شده است که در طراحی این کنترل کننده از روش کنترل مد لغزشی به عنوان روش پایه جهت ردیابی سیگنال های مرجع استفاده می شود. در مرجع [۵] برای رفع اثرات چترینگ موجود در ردیابی سیگنال های مرجع با استفاده از کنترل مد لغزشی معمولی، روش کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا ارائه گردیده است.

در این مقاله یک روش جدید کنترل مد لغزشی معمولی با سطح لغزش انگرالی جهت پایداری خودروی الکتریکی چهار چرخ محرک بدون دیفرانسیل پیشنهاد شده است. همچنین از روش کنترل مد لغزشی مرتبه بالاتر نیز در جهت بهبود اثرات چترینگ استفاده شده است. در ادامه در بخش ۲ مدل دینامیکی خودرو و در بخش ۳ ساختار کنترل کننده پیشنهادی توضیح داده می شود. در بخش ۴ نتایج شبیه سازی ارائه شده و در نهایت در بخش ۵ نتیجه گیری انجام می شود.

### ۲- مدل سازی دینامیکی خودرو

مدل ها با چند درجه آزادی می توانند برای کنترل پایداری خودروی چهار چرخ محرک استفاده شوند. در این مقاله مدل خودرو با سه درجه آزادی می باشد. مدل انتخابی باید حداقل شرایط زیر را دارا باشد:

۱- دینامیک طولی و جانبی خودرو را باید در برداشته باشد.

۲- دینامیک چرخیدن چرخ ها به صورت مستقل در نظر گرفته شود.



# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

که  $F_{xi}$  ( $i = fl, fr, rl, rr$ ) نیروهای طولی وارد بر چرخ،  $F_{yi}$  ( $i = fl, fr, rl, rr$ ) نیروهای جانبی وارد بر چرخ،  $M$  وزن خودرو،  $\rho_a$  چگالی هوا،  $C_D$  ضریب کشش هوا،  $A$  سطح مقطع خودرو،  $\delta$  زاویه فرمان خودرو،  $l_f$  و  $l_r$  فاصله از مرکز ثقل خودرو به ترتیب برای محور جلو و عقب و  $l_s$  نصف فاصله بین دو چرخ عقب خودرو می باشد. روابط فوق را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \gamma - \frac{C_a v^2}{M} \\ -v_x \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + B_y F_y + B_x F_x \quad (3)$$

که  $F_x = [F_{xfl} \ F_{xfr} \ F_{xrl} \ F_{xrr}]^T$  نیروی طولی تایلر و  $F_y = [F_{yfl} \ F_{yfr} \ F_{yrl} \ F_{yrr}]^T$  نیروی جانبی تایلر هستند که می توان با مدل تایلر بر اساس اندازه گیری نرخ لغزش تایلر، زاویه لغزش و بار نرمال محاسبه کرد و ماتریس  $B_x$  و  $B_y$  را می توان به صورت زیر تعریف نمود [۶]:

$$B_x = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos \delta & 1 & 1 \\ l_f \sin \delta - l_s \cos \delta & l_f \sin \delta + l_s \cos \delta & -l_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{M} & \frac{\cos \delta}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ \frac{l_f \sin \delta - l_s \cos \delta}{I_z} & \frac{l_f \sin \delta + l_s \cos \delta}{I_z} & 1 - \frac{l_s}{I_z} & 1 - \frac{l_s}{I_z} \end{bmatrix}$$

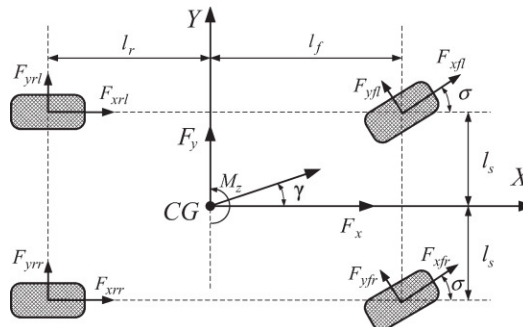
$$B_y = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\times \begin{bmatrix} -\sin \delta & -\sin \delta & 0 & 0 \\ l_f \cos \delta + l_s \sin \delta & l_f \cos \delta - l_s \sin \delta & -l_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{\sin \delta}{M} & -\frac{\sin \delta}{M} & 0 & 0 \\ \frac{l_f \cos \delta + l_s \sin \delta}{I_z} & \frac{l_f \cos \delta - l_s \sin \delta}{I_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## ۱-۲- بررسی مدل سه درجه آزادی

در صورت در نظر نگرفتن حرکت های غلتش و جهش برای خودرو در صفحه افقی، سه درجه آزادی برای حرکت طولی، جانبی و چرخشی (یاو) وجود دارد. شماتیکی از مدل خودرو در شکل ۱، نشان داده شده است [۳].



شکل ۱: مدل خودرو با سه درجه آزادی در صفحه افقی [۳]

در شکل ۱، CG بیانگر مرکز ثقل خودرو می باشد. معادلات خودرو برای حرکت در جهت طولی، جانبی و یاو (چرخشی) را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} \dot{v}_x = v_y \gamma - \frac{C_D}{M} V_x^2 + \frac{1}{M} F_x, \\ \dot{v}_y = -v_x \gamma + \frac{1}{M} F_y, \\ \dot{\gamma} = \frac{1}{I_z} M_z \end{cases} \quad (1)$$

که  $v_x$  و  $v_y$  به ترتیب سرعت های طولی و جانبی و  $\gamma$  نرخ یاو خودرو می باشد. با استفاده از شکل ۱،  $F_x$  و  $F_y$  و  $M_z$  را می توان به صورت زیر بیان کرد [۳].

$$F_x = (F_{xfl} + F_{xfr}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr}$$

$$F_y = (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta - (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + F_{yrl} + F_{yrr}$$

$$M_z = (F_{yfl} \sin \delta - F_{xfl} \cos \delta + F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta) l_s + (F_{xrr} - F_{xrl}) l_s - (F_{yfr} + F_{yrr}) l_r + ((F_{xfr} + F_{xfl}) \cos \delta + (F_{xfr} + F_{xfl}) \sin \delta) l_f \quad (2)$$



# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

$$\begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{M} & \frac{\cos \delta}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ \frac{l_f \sin \delta - l_s \cos \delta}{I_z} & \frac{l_f \sin \delta + l_s \cos \delta}{I_z} & 1 - \frac{l_s}{I_z} & 1 - \frac{l_s}{I_z} \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{fl} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{fr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{rl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{rr} \end{bmatrix},$$

$$U = [u_{fl}, u_{fr}, u_{rl}, u_{rr}]^T,$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_y \gamma - \frac{C_a V^2}{M} \\ 0 \end{bmatrix} + B_y F_y - B \begin{bmatrix} I\dot{w}_{fl} \\ I\dot{w}_{fr} \\ I\dot{w}_{rl} \\ I\dot{w}_{rr} \end{bmatrix}$$

## ۲-۲- مدل چرخ و تایر

چرخ و تایر دو بخش اساسی در تعیین مدل دینامیکی خودرو هستند، بنابراین در این بخش مدل تایر و کمیت های مهم چرخ و تایر نظیر لغزش طولی و جانبی خودرو، نیروهای عمودی وارد بر چرخ خودرو معرفی و محاسبه می شوند.

چرخ دارای دو نوع لغزش می باشد: لغزش طولی و جانبی خودرو. در عمل انعطاف پذیری طبیعی لاستیک تایر باعث می شود مسافتی که به وسیله تایر طی می شود با مسافت محیطی آن متفاوت باشد، لذا برای این پدیده از عبارت لغزش طولی استفاده می شود. لغزش طولی چرخ  $i$  ام به صورت زیر نشان داده شده است [۳].

$$S_i = \frac{w_i R_{eff} - V_{xi}}{\max(V_{xi}, w_i R_{eff})} \quad (11)$$

در این رابطه  $R_{eff}$  شعاع موثر چرخ،  $w_i$  سرعت زاویه ای چرخ  $i$  ام و  $V_{xi}$  سرعت طولی مرکز چرخ  $i$  ام است. اگر نرخ زاویه کمبر<sup>۱</sup> (زاویه ای که چرخ های جلو به حالت عمودی دیده می شوند، با سطح زمین می سازد) و نرخ تغییر فرم شعاعی تایر صفر باشد، می توان این رابطه را به صورت نسبت سرعت جانبی مرکز چرخ به سرعت طولی مرکز تعریف کرد و در غیر این صورت از همان تعریف اصلی استفاده می شود. در رابطه (۱۲) زاویه لغزش جانبی برای چرخ های جلو با  $\theta_{vf}$  و برای چرخ های عقب با  $\theta_{vr}$  نشان داده شده است. در صورت کوچک بودن این زاویه می توان نیروهای جانبی وارد بر تایر را به صورت زیر محاسبه کرد:

حرکات مکانیکی موتور بسیار آهسته تر از دینامیک الکترومغناطیسی موتور است. بنابراین می توان در محاسبات از دینامیک و موتورهای محرک و درایو آن ها صرف نظر کرد. بنابراین موتورهای درون چرخ و درایو آن ها می تواند به وسیله بهره  $k_i (i = fl, fr, rl, rr)$  به صورت زیر مدل شود:

$$k_i = \frac{T_i}{u_i} \quad (6)$$

که  $i \in Q := \{fl, fr, rl, rr\}$  چرخ های خاص را نشان می دهد،  $T_i$  گشتاور خروجی موتور درون چرخ و  $u_i$  سیگنال کنترلی گشتاور برای محرک موتور و  $k_i$  بهره کنترلی محرک الکتریکی می باشد [۳]. حرکت دورانی چرخ در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$I\dot{w}_i = k_i u_i - R_{eff} F_{xi} \quad (7)$$

که  $w_i$  سرعت زاویه ای تایر بر ثابته و  $R_{eff}$  شعاع موثر تایر در متر است. بنابراین معادلات قبل را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$F_{xi} = \frac{k_i u_i - I\dot{w}_i}{R_{eff}} \quad (8)$$

بنابراین داریم:

$$F_x = \frac{1}{R_{eff}} \begin{bmatrix} k_{fl} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{fr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{rl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{fl} \\ u_{fr} \\ u_{rl} \\ u_{rr} \end{bmatrix} - \frac{1}{R_{eff}} \begin{bmatrix} I\dot{w}_{fl} \\ I\dot{w}_{fr} \\ I\dot{w}_{rl} \\ I\dot{w}_{rr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

با توجه به مطالب بیان شده، می توان معادلات حالت سیستم را با انتخاب سرعت طولی و نرخ یاو به عنوان متغیرهای فضای حالت برای خودروی الکتریکی چند چرخ محرک به صورت زیر تعریف کرد [۶].

$$\dot{X} = f(X) + BKU \quad \text{with} \quad X = \begin{bmatrix} v_x \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$B = \frac{B_x}{R_{eff}} = \frac{1}{R_{eff}} \times$$



# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

## ۳-۱ تعیین سرعت طولی و نرخ یا مرجع

در طراحی کنترل کننده برای خودروی چهارچرخ یکی از اولویتهای مهم حفظ پایداری خودرو بدون کاهش قابلیت عملکرد خودرو شامل شتاب گیری، شیب پیمایی و سرعت ثابت بیشینه می باشد. سیگنال سرعت طولی خودرو نیز می تواند نماینده ای از این قابلیت ها باشد. بنابراین با استفاده از سیگنال شتاب طولی درخواستی ( $a_{rx}$ ) که خود با توجه به وضعیت پدال ترمز و گاز به دست می آید، می توان مرجع سرعت طولی  $V_{xref}$  را محاسبه نمود [۳].

$$V_{xref} = V_{x0} + \int_{t_0}^t a_{rx} dt \quad (15)$$

در رابطه فوق  $V_{x0}$  نیز سرعت طولی خودرو در لحظه  $t_0$  می باشد. سیگنال مهم و موثر دیگر، مرجع نرخ یا  $\gamma_{ref}$  می باشد که با توجه به زاویه فرمان چرخ خودرو  $\delta_{sw}$  و سرعت طولی خودرو قابل محاسبه است.

$$\gamma_{ref} = \begin{cases} \gamma_t & \text{if } (|\gamma_t| < \frac{\mu \cdot g}{V_x}) \\ \frac{\mu \cdot g}{V_x} \text{sign}(\gamma_t) & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (16)$$

with  $\gamma_t = \frac{GR \cdot k_a \cdot V_x}{l \cdot (k_b V_x^2 + 1)(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \delta_{sw}$

پارامترهای مورد استفاده در جدول زیر آمده است:

جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه نرخ یا مرجع

| پارامتر                        | واحد | سمبل                | مقدار             |
|--------------------------------|------|---------------------|-------------------|
| ثابت زمانی                     | s    | $\tau_2$ و $\tau_1$ | ۰/۰۳۶۰۱ و ۰/۰۳۶۰۱ |
| فاصله طولی بین مرکز چرخ ها     | M    | l                   | ۲/۵۸              |
| ضریب چسبندگی بین تایر و جاده   | -    | $\mu$               | ۰/۸۵              |
| نسبت تبدیل اتصال مکانیکی فرمان | -    | GR                  | ۱۶                |

لازم به ذکر است که مقادیر بهره مدل مرجع ( $k_a$ ) و ضریب پایداری ( $k_b$ ) ( موجود در رابطه فوق نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار متلب بهینه سازی شده که در ادامه به نحوه روند بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک در متلب می پردازیم.

## ۳-۱-۱ بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک در متلب

$$\begin{aligned} F_{yfr} &\cong F_{yfl} \cong C_f(\delta - \theta_{vf}) \\ F_{yrr} &\cong F_{yrl} \cong C_r(-\theta_{vr}) \\ \theta_{vf} &= \tan^{-1} \left( \beta + \frac{l_f \gamma}{V_x} \right) \\ \theta_{vr} &= \tan^{-1} \left( \beta - \frac{l_r \gamma}{V_x} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

که  $C_r$  و  $C_f$  ضرایب سختی پیچیدن چرخ های جلو و عقب و  $\beta$  زاویه لغزش بدنه خودرو می باشد که مقدار  $\beta$  نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (13)$$

یکی دیگر از پدیده های مهم پدیده جابجایی یا انتقال بار است. سیستم تعلیق و جرم فنری در خودرو منجر به جابجایی بار در هنگام شتاب گیری، ترمز کردن و حرکت چرخشی خودرو می شود که این باعث می شود نیروی عمودی وارد بر مرکز چرخ ها  $F_{zfi}$  تغییر کند. اعمال نیرو به مرکز چرخ می تواند به وسیله بار نرمال (نیروی عمودی وارد بر تایر) تحت تاثیر قرار گیرد، بنابراین لازم است که مدل سازی شود. نیروهای عمودی وارد بر مرکز چرخ ها را می توان به صورت زیر محاسبه نمود [۷]:

$$\begin{cases} F_{zfl} = m_w g + \frac{Mgl_r}{2(l_r+l_f)} - \frac{Mh_{CG}a_x}{2(l_r+l_f)} - \frac{Mh_{CG}a_y}{4l_s} \\ F_{zfr} = m_w g + \frac{Mgl_r}{2(l_r+l_f)} - \frac{Mh_{CG}a_x}{2(l_r+l_f)} + \frac{Mh_{CG}a_y}{4l_s} \\ F_{zrl} = m_w g + \frac{Mgl_f}{2(l_r+l_f)} + \frac{Mh_{CG}a_x}{2(l_r+l_f)} - \frac{Mh_{CG}a_y}{4l_s} \\ F_{zrl} = m_w g + \frac{Mgl_f}{2(l_r+l_f)} + \frac{Mh_{CG}a_x}{2(l_r+l_f)} + \frac{Mh_{CG}a_y}{4l_s} \end{cases} \quad (14)$$

که  $h_{CG}$  ارتفاع مرکز گرانش،  $a_x$  و  $a_y$  به ترتیب شتاب طولی و جانبی خودرو می باشد.

## ۳- طراحی کنترل کننده

خودروی الکتریکی چهار چرخ محرک بدون دیفرانسیل دینامیک پیچیده ای دارد و با افزایش تعداد موتورهای محرک در این خودرو احتمال بروز خطا نسبت به خودروهای دیفرانسیل دار بیشتر است و همچنین قابلیت اطمینان در این خودروها پایین بوده و هنگام بروز خطا، کنترل آن سخت می باشد. بنابراین انتخاب کنترل کننده ای که در عین سادگی در ساختار، بتواند در زمان قابل قبولی خودرو را پایدار کرده و در ضمن مقاومت بالایی در برابر بروز خطا و عدم قطعیت در مدل داشته باشد مورد اهمیت است. با توجه به خصوصیات بیان شده، انتخاب روش کنترل مد لغزشی مناسب به نظر می رسد. در طراحی این کنترل کننده ابتدا به بررسی تعیین سرعت طولی مرجع و تعیین نرخ یا مرجع می پردازیم.



# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

$$s = \begin{bmatrix} S_v \\ S_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_v + \lambda_v \int e_v dt \\ e_\gamma + \lambda_\gamma \int e_\gamma dt \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\text{with } \begin{cases} e_v = v_x - v_{xref} \\ e_\gamma = \gamma - \gamma_{ref} \end{cases}$$

که  $\lambda_v$  و  $\lambda_\gamma$  ضرایب ثابت هستند،  $e_v$  و  $e_\gamma$  به ترتیب سیگنال خطا برای سرعت خودرو و نرخ یا هستند. همچنین سیگنال های محرک ورودی برای موتورهای درون چرخ را می توان به صورت معادله زیر محاسبه نمود:

$$\begin{bmatrix} u_{fl} \\ u_{fr} \\ u_{rl} \\ u_{rr} \end{bmatrix} = -K^{-1} B^{-1} \left( \begin{bmatrix} f_1(v_x, \gamma) \\ f_2(v_x, \gamma) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{v}_{xref} \\ \dot{\gamma}_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_v + \lambda \int e_v dt \\ e_\gamma + \lambda \int e_\gamma dt \end{bmatrix} \right) + k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & +1 \\ 1 & -1 \\ 1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(S_v) \\ \text{sgn}(S_\gamma) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

در اینجا  $k$  ثابت کلید زنی بوده و برای خودروی مفروض در این کنترل کننده  $50$  - انتخاب شده است و همچنین  $k'$  براساس تاثیر گشتاور موتورهای درون چرخ بر سرعت طولی خودرو و نرخ یا تعیین می شود.

در نهایت استفاده از تابع علامت اغلب می تواند دلیل چترینگ<sup>۳</sup> باشد. در نتیجه برای داشتن سیگنال های کنترل کوچکتر و کاهش چترینگ می توان از تابع  $\text{sat}$  یا  $\text{tan}$  به جای تابع علامت استفاده کرد. اشکال اصلی مدهای لغزشی مربوط به اثر چترینگ به سبب سوئیچینگ کنترل فرکانس بالا می باشد. برای غلبه بر این عیب، ایده مد لغزشی مرتبه بالا ارائه شده است. در مد لغزشی مرتبه بالا سیگنال های محرک ورودی برای موتورهای درون چرخ از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\begin{bmatrix} u_{fl} \\ u_{fr} \\ u_{rl} \\ u_{rr} \end{bmatrix} = -k^{-1} B^{-1} \left( \begin{bmatrix} f_1(v_x, \gamma) \\ f_2(v_x, \gamma) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{v}_{xref} \\ \dot{\gamma}_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_v + \lambda \int e_v dt \\ e_\gamma + \lambda \int e_\gamma dt \end{bmatrix} \right) + \left[ \begin{bmatrix} k_1 \cdot k' \text{sgn}(S_v) \\ k_2 \cdot k' \text{sgn}(S_\gamma) \end{bmatrix} \right] \quad (20)$$

در بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک در متلب اولین گام تعیین تابع هزینه مورد نظر می باشد که در مقاله حاضر، تابع هزینه را به صورت مجموع مربعات خطا در نظر گرفته ایم:

$$\text{Cost function} = \sum_{i=0}^k (\gamma - \gamma^*)^2 \quad (17)$$

که  $\gamma$  نرخ یا و  $\gamma^*$  نرخ یا مرجع می باشد. سپس با تنظیم فایل تابع هزینه مورد نظر و تعیین تعداد متغیرهای مورد محاسبه و مقدار حد بالا برابر  $0.1$  و حد پایین برابر صفر و با در نظر گرفتن  $70\%$  زاد و ولد و تعداد نخبه برابر  $2$ ، بهینه سازی را برای  $1000$  نسل انجام داده و نتایج زیر حاصل می شود:

$$k_a = 9.877 \times 10^{-2}$$

$$k_b = 2.101 \times 10^{-2}$$

با توجه به سرعت پایین محاسبه در الگوریتم ژنتیک و زمان بر بودن محاسبات انجام شده در این الگوریتم برای محاسبه دقیق مقادیر  $k_a$  و  $k_b$  و ثابت های زمانی  $\tau_1$  و  $\tau_2$  از روش نلدر مید در محیط نرم افزاری متلب استفاده شده است. مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک نیز به عنوان حدس اولیه روش بهینه سازی نلدر مید استفاده می شود. در این روش با تنظیم پارامترهای موجود در شبیه سازی برای  $287$  نسل بهینه سازی انجام شده و نتایج به صورت زیر قابل رویت است:

$$k_a = 2.685 \times 10^{-2}$$

$$k_b = 1.788 \times 10^{-2}$$

$$\tau_1 = 3.601 \times 10^{-2}$$

$$\tau_2 = 3.601 \times 10^{-2}$$

با قراردادن پارامترهای بدست آمده در رابطه سیگنال های مرجع و انجام آزمایش مشاهده خواهیم کرد تعیین و ردیابی سیگنال های مرجع با دقت بالایی انجام شده است.

## ۳-۲ ردیابی سیگنال های مرجع

برای این طراحی، از روش کنترل مد لغزشی به عنوان یک روش پایه استفاده شده است. کنترل مد لغزشی، یکی از ابزارهای موثر برای پایدارسازی سیستم ها با عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی می باشد. روش کنترل مد لغزشی انتخاب مناسبی برای سیستم هایی با دینامیک مدل شده غیر دقیق و یا با عدم قطعیت غیر پارامتریک می باشد. در روش کنترل مد لغزشی سطح لغزش می تواند به صورت معادله زیر برای سرعت طولی و نرخ یا تعریف شود [۶]:

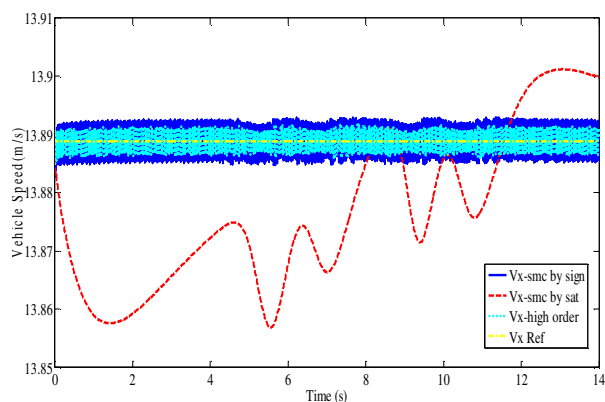


# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

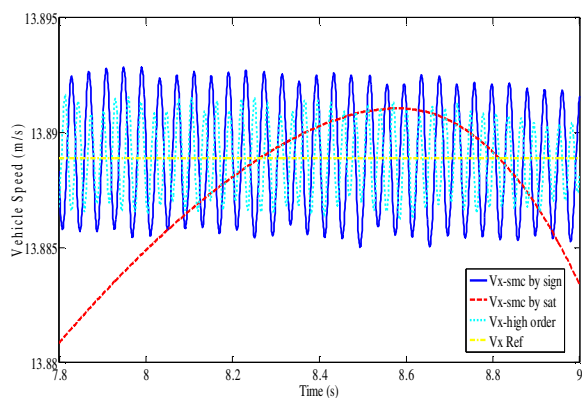
دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

خودرو، نرخ یاو مرجع را با دقت بالا دنبال می کند و همچنین مشاهده می شود که کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat و کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالاتر دارای نوسان کمتری نسبت به کنترل کننده مد لغزشی با تابع علامت بوده و منحنی نرخ مرجع یاو را ردیابی می کنند.

شکل ۵، منحنی سیگنال محرک ورودی چهار چرخ در مانور Dlc Quick start را در کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat نشان می دهد.



شکل ۱: منحنی سرعت خودرو در مانور Dlc Quick start



شکل ۲: بزرگنمایی منحنی سرعت خودرو در مانور Dlc Quick start در فاصله ۷/۸ تا ۹ ثانیه

که در این معادله S سطح لغزش است که به صورت انتگرالی در نظر گرفته شده و مقدار  $k_1$  برابر ۵۰- و مقدار  $k_2$  برابر ۴۰- انتخاب شده است. مقادیر  $f_1(v_x, \gamma)$  و  $f_2(v_x, \gamma)$  نیز معادلات فضای حالت سیستم می- باشد.

## ۴- نتایج شبیه سازی

یک خودروی کلاس C با کنترل کننده پیشنهادی در محیط نرم افزار MATLAB و CARSIM شبیه سازی شده است. پارامترهای خودروی مفروض در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: پارامترهای مدل خودروی مفروض

| پارامترها                                  | واحد     | مقدار  | سمبل     |
|--------------------------------------------|----------|--------|----------|
| جرم خودرو                                  | kg       | ۱۵۵۴   | M        |
| جرم معلق خودرو                             | kg       | ۱۲۷۰   | m        |
| جرم کل چرخ                                 | kg       | ۷۱     | $m_w$    |
| شعاع موثر تایر                             | m        | ۰/۳۰۸  | $R_{ef}$ |
| نصف فاصله ی عرضی بین مراکز دو چرخ          | m        | ۰/۷۷   | $l_s$    |
| فاصله ی طولی بین مرکز چرخ جلو و مرکز گرانش | m        | ۱/۰۱۶  | $l_f$    |
| فاصله ی طولی بین مرکز چرخ عقب و مرکز گرانش | m        | ۱/۵۶۴  | $l_r$    |
| ضریب کشش آئرو دینامیک                      | -        | ۰/۳    | $C_d$    |
| اینرسی یاو خودرو                           | $kg.m^3$ | ۱۵۳۶/۷ | $I_z$    |

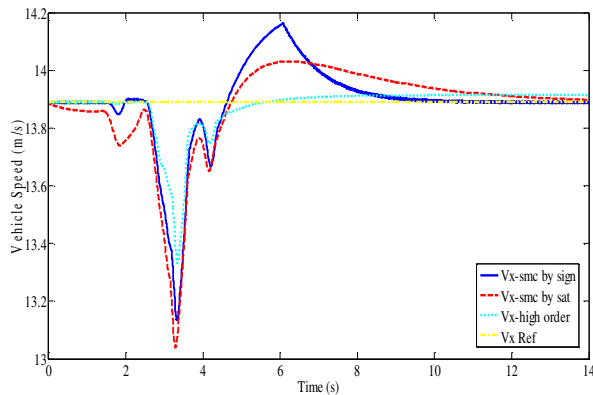
عملکرد خودرو برای مسیر رانندگی با مانور Dlc Quick start<sup>۲</sup>، فرض شده است که خودرو در طی ۱۴ ثانیه با سرعت ثابت ۵۰ کیلومتر بر ساعت و ضریب اصطکاک سطح جاده با تایر ۰/۸۵ می باشد. نمودارهای مقایسه سرعت خودرو، نرخ یاو، سیگنال های محرک ورودی برای کنترل کننده مد لغزشی معمولی با تابع علامت و مد لغزشی با تابع sat و برای کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا شبیه سازی شده است. شکل ۱، منحنی سرعت خودرو و شکل ۳، منحنی نرخ یاو خودرو را در مانور Dlc Quick start نشان می دهد، مشاهده می شود که کنترل ردیابی نرخ یاو



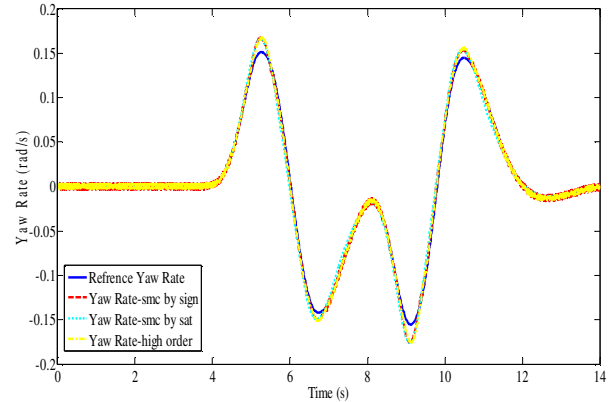
# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیبستر- ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

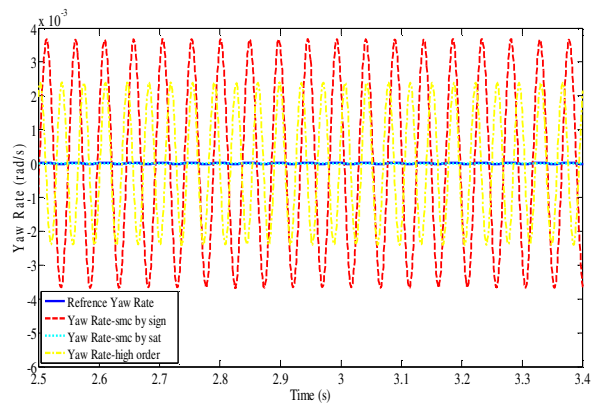
در آزمایشی دیگر خودروی مفروض با سرعت ثابت ۵۰ کیلومتر بر ساعت و ضریب اصطکاک ۰/۸۵ در مانور  $\text{Dlc tight}^4$  در نظر گرفته شده است. در این مانور نیز نمودارهای سرعت، نرخ یاو و سیگنال های محرک ورودی به ازای کنترل کننده مد لغزشی با تابع علامت، کنترل مد لغزشی با تابع sat و کنترل کننده مرتبه بالا رسم و مقایسه گردیده است. شکل ۶، منحنی سرعت خودرو را در مانور  $\text{Dlc tight}$  برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع علامت، کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat و کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا نشان می دهد. مشاهده می شود که سرعت طولی هر سه کنترل کننده، سرعت مرجع را دنبال می کند و کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat و کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا دارای نوسان کمتری نسبت به کنترل کننده مد لغزشی با تابع علامت می باشد. شکل ۷، منحنی ردیابی مقادیر مرجع نرخ یاو را برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع علامت، کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat و کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا نشان می دهد. همان طور که قابل مشاهده است هر سه کنترل کننده نرخ یاو مرجع را دنبال می کنند. شکل ۸، نیز منحنی سیگنال های محرک ورودی چهار چرخ در مانور  $\text{Dlc tight}$  برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat نشان می دهد.



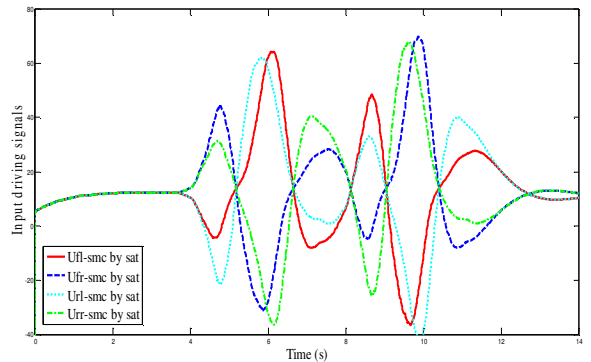
شکل ۶: منحنی تغییرات سرعت خودرو در مانور  $\text{Dlc tight}$



شکل ۳: منحنی نرخ یاو مرجع و نرخ یاو خودرو در مانور  $\text{Dlc Quick start}$



شکل ۴: بزرگ نمایی منحنی نرخ یاو مرجع و نرخ یاو خودرو مانور  $\text{Dlc Quick start}$  در فاصله ۲/۵ تا ۳/۴ ثانیه



شکل ۵: منحنی سیگنال های محرک ورودی چهار چرخ برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat در مانور  $\text{Dlc Quick start}$





# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پایداری خودرو های الکتریکی چهار چرخ محرک مورد مطالعه قرار گرفته و سعی بر بهبود آن شده است. با استفاده از کنترل کننده مد لغزشی معمولی جهت کنترل پایداری جانبی خودرو به کار گرفته شده است. کارایی کنترل کننده پیشنهادی با انجام شبیه سازی در محیط نرم افزاری MATLAB و CARSIM تایید گردیده است. نتایج شبیه سازی دقت بالای کنترل کننده در دنبال کردن سیگنال های مرجع را نشان می دهد. همچنین در ردیابی از کنترل کننده مد لغزشی مرتبه بالا نیز به دلیل پایداری و مقاوم بودن و نوسان کمتر نسبت به مد لغزشی معمولی نیز استفاده شده است و نتایج به دست آمده از این کنترل کننده بیان کننده بهبود اثرات چترینگ در ردیابی سیگنال های مرجع می باشد. کنترل کننده پیشنهادی ضمن سادگی در ساختار، دقیق و کاربردی بوده و برای استفاده عملی در شرکت های تولید خودرو مناسب می باشد.

## ۶- مراجع

[۱] "خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی (ساختارها، نحوه عملکرد، مدلسازی و شبیه سازی)"، تالیف: سیاوش صادقی، انتشارات مشعل، اصفهان، ۱۳۸۷

[2] B. Brant, "Build your own Electric Vehicle," TAB Books, UASA, 1994.

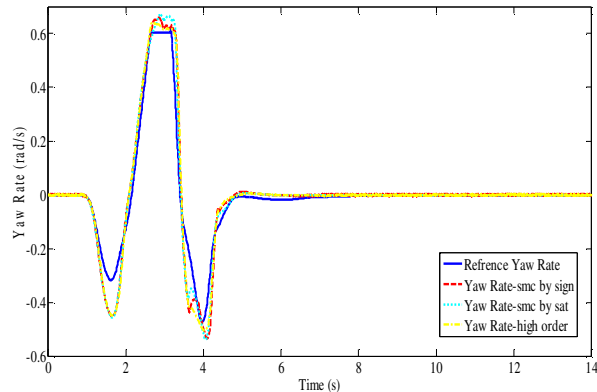
[3] R. Wang, J. Wang, "Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicle", IEEE, vol.60, no.9, pp.4276-4286, 2011.

[4] M. Jang & Ch. Chen, "Sliding mode control of chaos in the cubic chua's circuit system", International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 12, No. 6, 2002.

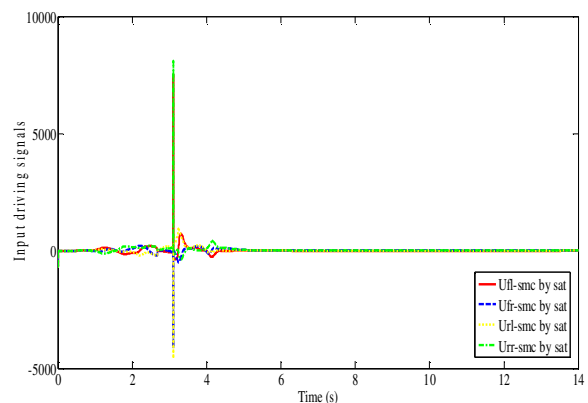
[5] A. Levant, "Universal Single-Input-Single-Output (SISO) Sliding-Mode Controllers With Finite-Time Convergence", IEEE, vol. 46, no. 9, pp.1447-1451, 2001

[6] H. Alipour, M.B.B. Sharifian, "A modified integral sliding mode control to lateral stabilization of 4-wheel independent drive electric vehicles", Veh Syst Dyn, vol.52, no.12, pp.1584-1606, 2014.

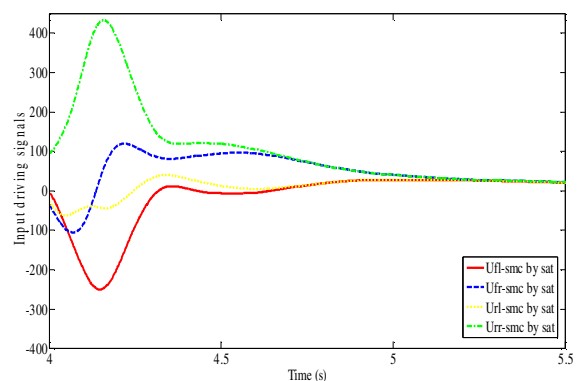
[7] H. Alipour, M. Sabahi, "Lateral stabilization of a four wheel independent drive electric vehicle on slippery roads", Elsevier, vol.30, pp.275-285, 2014.



شکل ۷: منحنی نرخ یاو مرجع و نرخ یاو خودرو در مانور Dlc tight



شکل ۸: منحنی سیگنال های ورودی چهار چرخ برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat در مانور Dlc tight



شکل ۹: بزرگنمایی منحنی سیگنال های محرک ورودی چهار چرخ برای کنترل کننده مد لغزشی با تابع sat در مانور Dlc tight در فاصله ۴ تا ۵/۵ ثانیه





# اولین همایش ملی کاربرد سیستم های هوشمند در مهندسی برق، کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر - ۱۱ اسفند ماه ۱۳۹۴

---

[8] B. Li, A. Goodarzi, A. Khajepour, S. k. Chen, and B. Litkouhi, "An optimal torque distribution control strategy for four-independent wheel drive electric vehicles," *Veh Syst Dyn*, vol.53, pp. 1172-1189, 2015.

[9] A. Goodarzi, and M. Mohammadi, "Stability enhancement and fuel economy of the 4-wheel-drive hybrid electric vehicles by optimal tyre force distribution," *Veh Syst Dyn*, vol. 52, no. 4, pp. 539-561, 2014.

[10] B. Li, A. Goodarzi, A. Khajepour, S. k. Chen, and B. Litkouhi, "An optimal torque distribution control strategy for four-independent wheel drive electric vehicles," *Veh Syst Dyn*, vol.53, pp. 1172-1189, 2015.