

بهبود مشخصات هدایتی خودرو در سرعت‌های بالا با استفاده از سیستم چهارچرخ فرمان

محمد فرخی
دانشگاه علم و صنعت ایران
Farrokhi@iust.ac.ir

علیرضا الفی
دانشگاه علم و صنعت ایران
a_alfi@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله، به طراحی کنترل‌کننده جدیدی برای بهبود مشخصات هدایتی خودرو با استفاده از سیستم چهارچرخ فرمان پرداخته می‌شود. در این روش، با استفاده از فرماندهی چرخهای عقب خودرو مشابه با چرخهای جلو، رفتار جانبی خودرو کنترل می‌شود، که در آن به منظور کاهش اثرات نویز اندازه‌گیری (فرکانس بالا)، زاویه فرمان چرخهای عقب خودرو با استفاده از روش *Frequency Shaping LQR* (*FSLQR*) تعیین می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده عملکرد مناسب این روش در مقایسه با سیستم مرسوم دوچرخ فرمان می‌باشد. در شبیه‌سازی‌ها از مدل کامل سیستم فرمان به همراه آثار غیرخطی ناشی از کنش میان تایر با سطح جاده و سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: مشخصات هدایتی خودرو - سیستم چهارچرخ فرمان - کنترل بهینه - روش *FSLQR*

۱- مقدمه

رفتار خودرو در حقیقت نشان‌دهنده آثار و نتایج حاصل از عکس‌العمل متقابل میان راننده، خودرو و محیط اطراف می‌باشد. لذا دانستن رفتار راننده، مشخصات خودرو و

مشخصه‌های هندسی و فیزیکی زمین برای طراحی و ارزیابی سیستم‌های بکار رفته در خودرو ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه سیستم خودرو و راننده یک سیستم حلقه بسته است، سیستم فرمان تأثیر مستقیمی بر روی پاسخ و رفتار خودرو دارد بنابراین از یک سو، کنترل زاویه فرمان چرخها به عنوان مؤثرترین عامل برای پایداری و هدایت و از سویی دیگر توسعه تکنولوژی در زمینه طراحی سیستم‌های تعلیق، سبب تحولی جدید در زمینه طراحی سیستم فرمان شد و نهایتاً منجر به ایجاد سیستم چهارچرخ فرمان (*4WS*) گردید [1]. در خودروهای مجهز به سیستم چهارچرخ فرمان، زاویه فرمان چرخهای عقب و جلو به صورت فعال کنترل می‌شوند. در این مقاله زاویه فرمان چرخهای عقب با استفاده از روش *FSLQR*، به منظور بهبود مشخصات هدایتی خودرو در سرعت‌های بالا، کنترل می‌شود. در ادامه این مقاله، ابتدا مدل هدایتی خودرو ارائه خواهد شد. سپس، رفتار جانبی مطلوب خودرو ارائه می‌شود و در بخش انتهایی، کنترل‌کننده *4WS* با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی طراحی می‌گردد.

۲- مدل هدایتی خودرو

در این بخش یک مدل غیرخطی از دینامیک فرمان خودرو ارائه خواهد شد. در دستگاه مرجع متصل به زمین، صفحه XY

گرفتن زاویه فرمان کوچک برای چرخهای جلو (با توجه به این که سرعت خودرو بالا است)، به منظور سهولت در محاسبات از مدل دو چرخ با دو درجه آزادی استفاده می‌کنیم. با فرض انتخاب سرعت جانبی و نرخ چرخش به عنوان متغیرهای حالت و با صرف نظر از آثار انتقال وزن و غلتش داریم [1]

$$m(\dot{V}_y + r \cdot V_x) = 2(F_{Yf} + F_{Yr}) \quad (4)$$

$$I_{zz}\dot{r} = 2L_f F_{Yf} + 2L_r F_{Yr} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن C_f و C_r به عنوان ضرایب سختی چرخهای عقب و جلو، و α_f و α_r به عنوان زاویه لغزش چرخهای عقب و جلو و کوچک بودن زاویه لغزش چرخها، می‌توان رابطه نیروی جانبی چرخها را با زاویه لغزش به صورت خطی در نظر گرفت [3].

$$F_{Yf} = C_f \cdot \alpha_f \quad \text{و} \quad F_{Yr} = C_r \cdot \alpha_r \quad (6)$$

با مفروضات فوق و ترکیب معادلات (4) تا (6)، معادلات دینامیکی خطی فرمان خودرو به فرم زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{c_f + c_r}{m V_x} & -V_x - 2 \frac{L_f c_f - L_r c_r}{m V_x} \\ -2 \frac{L_f c_f + L_r c_r}{I_{zz} \cdot V_x} & -2 \frac{L_f^2 c_f + L_r^2 c_r}{I_{zz} \cdot V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \frac{c_f}{m} \\ \frac{L_f c_f}{I_{zz}} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} 2 \frac{c_r}{m} \\ -2 \frac{L_r c_r}{I_{zz}} \end{bmatrix} \delta_r \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

معادله اخیر را می‌توان به فرم بسته

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (9)$$

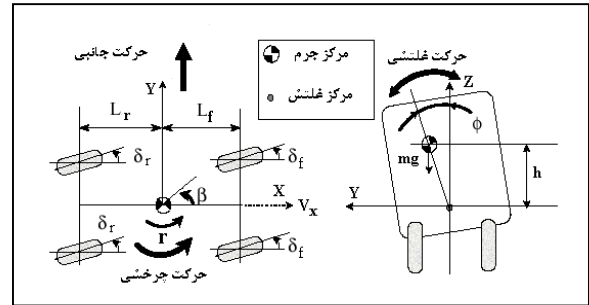
نمایش داد. با در نظر گرفتن حالت دائمی و معادله (8)، رفتار جانبی مطلوب برای خودرو به صورت زیر بدست می‌آید [4].

$$V_{y\text{des}} = 0 \quad (10)$$

$$r_{\text{des}} = \frac{V_x}{(L_f + L_r) + K_{us} V_x^2 / g} \delta_f \quad (11)$$

که در این روابط g شتاب جاذبه زمین و K_{us} ضریب کند فرمانی است. به دلیل وجود خطای مدلسازی، اغتشاش

موازی با سطح جاده می‌باشد که X هم‌جهت با جهت اولیه حرکت، Y سمت چپ آن و Z به سمت بالا می‌باشد. مدل خودرو دارای سه درجه آزادی شامل سرعت جانبی V_y ، نرخ چرخش r و نرخ غلتشی ϕ می‌باشد، که زاویه فرمان چرخهای جلو، δ_r زاویه فرمان چرخهای عقب و β زاویه لغزش بدنه خودرو می‌باشد (شکل 1).



شکل 1- مدل سیستم سه درجه آزادی 4WS

برای مدل خودروی 4WS با 3 درجه آزادی، معادلات دیفرانسیل زیر بیان کننده وضعیت خودرو می‌باشند [2]:

$$m(\dot{V}_y + r \cdot V_x) - m_s \cdot h \cdot \ddot{\phi} = 2(F_{Yfl} + F_{Yrl} + F_{Yfr} + F_{Yrr}) \quad (1)$$

$$I_{zz}\dot{r} - I_{zx}\ddot{\phi} = L_f(F_{Yfr} + F_{Yfl} + \frac{\partial F_f}{\partial \phi'_f} \cdot \frac{\partial \phi'_f}{\partial \phi} \cdot \phi) - L_r(F_{Yrr} + F_{Yrl} + \frac{\partial F_r}{\partial \phi'_r} \cdot \frac{\partial \phi'_r}{\partial \phi} \cdot \phi) \quad (2)$$

$$I_{xx}\ddot{\phi} - I_{xz}\dot{r} = -(L_{\phi f} + L_{\phi r}) \cdot \phi - (L_{\dot{\phi} f} + L_{\dot{\phi} r}) \cdot \dot{\phi} \quad (3)$$

که در معادلات اخیر، L_f و L_r به ترتیب فاصله مرکز ثقل از محور عقب و جلو، $L_{\phi f}$ و $L_{\phi r}$ سختی غلتشی جلو و عقب ناشی از کمک فنر تعلیق، $L_{\dot{\phi} f}$ و $L_{\dot{\phi} r}$ دمپینگ غلتشی عقب و جلو ناشی از کمک فنر تعلیق، m_{uf} و m_{ur} به ترتیب جرم گیرارتجاعی مربوط به چرخهای جلو و عقب، m_s جرم ارتجاعی و F_Y معرف نیروی جانبی وارد بر تایرها می‌باشد.

3- رفتار جانبی مطلوب خودرو

با توجه به این که سرعت جانبی و نرخ چرخش مهمترین نقش را در رفتار جانبی خودرو ایفا می‌کنند، و با در نظر

$$u = \frac{-1}{R} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (i=1,2) \quad (15)$$

که در آن \mathbf{P} ، ماتریس مثبت متقارنی است که در معادله ریکاتی صدق می‌کند. همچنین باید در نظر داشت که با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱)، $\dot{\mathbf{P}}$ در معادله ریکاتی برابر صفر است. با توجه به این که روش LQR روشی مبتنی بر مدل می‌باشد. این بدان معنی است که مدل سیستم در تمام فرکانس‌ها دقیق است، در حالی که می‌دانیم در فرکانس‌های بالا دارای خطای مدلسازی هستیم و لذا در عمل اثرات نویز اندازه‌گیری را در نظر نگرفته‌ایم. در روش $FSLQR$ به منظور کاهش آثار فرکانس‌های سریع سیستم روی تابع هزینه، یک وزن فرکانسی تعریف می‌شود [6]. برای دستیابی به این موضوع، با استفاده از رابطه پارستوال در حوزه فرکانس، تابع هزینه (۱۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{x}^*(j\omega) \mathbf{Q} \mathbf{x}(j\omega) + u^*(j\omega) R u(j\omega) d\omega] \quad (16)$$

در این رابطه $\mathbf{x}(j\omega)$ تبدیل فوریه $\mathbf{x}(t)$ و $\mathbf{x}^*(j\omega)$ مزدوج مختلط ترانواده $\mathbf{x}(j\omega)$ می‌باشند. در روش پیشنهادی ($FSLQR$)، تابع هزینه از رابطه (۱۶) تبعیت می‌کند، به طوری که وزن‌های R و \mathbf{Q} توابعی از فرکانس می‌باشند و در تمامی فرکانس‌ها خاصیت هرمیتی دارند. این بدان معنی است که

$$R^*(j\omega) = R(j\omega) \quad \text{و} \quad \mathbf{Q}^*(j\omega) = \mathbf{Q}(j\omega) \quad (17)$$

همچنین فرض می‌کنیم که درایه‌های $\mathbf{Q}(j\omega)$ و $R(j\omega)$ توابع کسری از چند جمله‌ای‌هایی از توانهای زوج w باشند و ابعاد ماتریس $\mathbf{Q}(j\omega)$ برابر p و رتبه ماتریس $R(j\omega)$ کامل و برابر m باشد. اکنون می‌توان ماتریس‌های $\mathbf{F}_1(j\omega) \in \mathfrak{R}^{p \times n}$ و $\mathbf{F}_2(j\omega) \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ را به گونه‌ای پیدا کرد که

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(j\omega) &= \mathbf{F}_1^*(j\omega) \mathbf{F}_1(j\omega) \\ R(j\omega) &= \mathbf{F}_2^*(j\omega) \mathbf{F}_2(j\omega) \end{aligned} \quad (18)$$

در ادامه به ارائه راه حلی برای روش $FSLQR$ می‌پردازیم. برای حل، دو متغیر کمکی \bar{x} و \bar{u} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$\begin{aligned} \bar{x}(j\omega) &= \mathbf{F}_1(j\omega) \mathbf{x}(j\omega) \\ \bar{u}(j\omega) &= \mathbf{F}_2(j\omega) u(j\omega) \end{aligned} \quad (19)$$

اگر ماتریس $\mathbf{F}_1(j\omega)$ سره (یعنی تعداد صفرهای هر درایه‌اش کمتر از تعداد قطب‌های آن درایه باشد) و تابعی کسری از

خارجی و تغییر پارامترها در سیستم واقعی، معادله (۹) به فرم زیر تصحیح می‌شود.

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A}) \mathbf{X}(t) + (\mathbf{B} + \Delta \mathbf{B}) \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (12)$$

یا

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathbf{d}(t) \quad (13)$$

که در آن $\mathbf{d}(t) = \Delta \mathbf{A} \mathbf{X}(t) + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t)$ می‌باشد. ترم $\mathbf{d}(t) = [d_1(t) \quad d_2(t)]$ در برگیرنده تغییر پارامترها و خطای مدلسازی به واسطه خواص غیرخطی دینامیک‌های فرمان و اغتشاش خارجی از جمله باد جانبی و ناهموار بودن سطح جاده می‌باشد. در [5]، جهت طراحی سیستم کنترلی $4WS$ از تئوری کنترل بهینه استفاده شده است، به طوری که با بکارگیری روش LQR ، سیستم کنترلی $4WS$ اهداف کنترلی مورد نظر را تامین می‌نماید. این امر منجر به کمینه کردن تابع معیار $J = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + R \delta_r^2) dt$ با صرف نظر کردن از دینامیک $\mathbf{d}(t)$ (به دلیل این که از قبل اطلاعاتی از آن در دسترس نیست) می‌گردد که در آن \mathbf{Q} و R پارامترهای وزندار می‌باشند. در این مقاله از یک سو چون اطلاعاتی از دینامیک $\mathbf{d}(t)$ در دسترس نیست، و از سوی دیگر به منظور کاهش حساسیت کنترل‌کننده نسبت به نویز اندازه‌گیری (نویز فرکانس بالا)، جهت تعیین میزان زاویه فرمان چرخهای عقب از روش $FSLQR$ استفاده می‌کنیم.

۴- طراحی کنترل‌کننده $4WS$

به منظور طراحی کنترل‌کننده $4WS$ در ابتدا روش $FSLQR$ معرفی شده [6] و سپس مراحل طراحی بیان می‌گردد. سیستم $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t)$ با شرایط اولیه $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$ را در نظر بگیرید که در آن $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ بردار حالت سیستم و $\mathbf{u} \in \mathfrak{R}^{m \times 1}$ بردار ورودی می‌باشد. در طراحی کنترل‌کننده به روش LQR با زمان نامحدود، \mathbf{u} به گونه‌ای انتخاب می‌شود که تابع معیار زیر کمینه شود.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T R \mathbf{u}) dt \quad (14)$$

که در آن R و \mathbf{Q} پارامترهای وزندار می‌باشند. توجه داریم که چون ورودی سیستم زاویه فرمان چرخهای عقب می‌باشد، R یک ماتریس نیست. لذا قانون کنترلی حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$u(t) = k_1 x(t) + k_2 z_1(t) + k_3 z_2(t) \quad (27)$$

که در آن $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3]$. از روابط (۲۰) و (۲۱) داریم

$$\begin{aligned} z_1 &= (j\omega I - A_1)^{-1} B_1 x \\ z_2 &= (j\omega I - A_2)^{-1} B_2 u \end{aligned} \quad (28)$$

لذا رابطه (۲۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$\begin{aligned} [I - k_3 (j\omega I - A_2)^{-1} B_2] u(j\omega) &= \\ [k_1 + k_2 (j\omega I - A_1)^{-1} B_1] x(j\omega) \end{aligned}$$

بنابراین قانون کنترل بهینه از رابطه زیر بدست می‌آید

$$u_{optimal} = [I - k_3 (j\omega I - A_2)^{-1} B_2]^{-1} [k_1 + k_2 (j\omega I - A_1)^{-1} B_1] x(j\omega) \quad (29)$$

۵- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در دو بخش ارائه می‌شود. در بخش نخست، عملکرد سیستم $4WS$ با کنترل‌کننده $FSLQR$ با عملکرد سیستم $2WS$ مقایسه می‌شود. شبیه‌سازی‌های این بخش برای یک خودرو که بر روی سطح جاده خشک حرکت می‌کند، صورت گرفته است. در بخش دوم، عملکرد کنترل‌کننده‌های ذکر شده در مقابل اغتشاش (باد جانبی) و تغییر پارامترها صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن نرخ چرخش، زاویه لغزش بدنه، نرخ غلتش و زاویه غلتش با ورودی فرمان مطابق با شکل (۲) برای خودرو و با در نظر گرفتن مدل غیرخطی برای تایر [7] ارائه می‌شود. برخی از پارامترهای مدل در جدول ۱ آورده شده است. در بخش اول، با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به سیستم $2WS$ با دارا بودن مقدار زاویه لغزش بدنه کمتر، پاسخ گذرای بهتر و مقدار حالت دائمی کمتر برای نرخ چرخش دارای عملکردی مناسب‌تری است. گرچه تغییرات نرخ غلتش در سیستم $2WS$ بطئی‌تر است. در بخش دوم شبیه‌سازی‌ها، به مقایسه عملکرد سیستم‌های هدایتی مفروض در مقابل تغییر شرایط سطح جاده و تغییر پارامترهای خودرو پرداخته می‌شود. تغییر پارامترها، شامل ممان اینرسی حول محور Z و جرم خودرو با فاکتور تغییر ۰/۰۵ با معادلات $\tilde{m} = m \cdot (1 + P)$ و

چند جمله‌ای‌هایی بر حسب $j\omega$ باشد، در این صورت می‌توان فضای حالتی برای آن به فرم زیر در نظر گرفت:

$$\dot{\bar{x}} = C_1 z_1 + D_1 x \quad \text{و} \quad \dot{z}_1 = A_1 z_1 + B_1 x \quad (20)$$

اگر شرایط ارائه شده برای $F_1(j\omega)$ ، در مورد $F_2(j\omega)$ نیز برقرار باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت یک سیستم خطی نمایش داد.

$$\dot{\bar{z}}_2 = A_2 z_2 + B_2 u \quad (21)$$

با ترکیب روابط (۲۰)، (۲۱) و (۹) معادلات کلی به فرم زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ B_1 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (22)$$

معادله اخیر را به فرم $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_t \mathbf{X} + \mathbf{B}_t \mathbf{u}$ نمایش می‌دهیم

که در آن $\mathbf{X} = [x \ z_1 \ z_2]^T$ ، $\mathbf{B}_t = [\mathbf{B} \ 0 \ \mathbf{B}_2]^T$

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & 0 \\ \mathbf{B}_1 & \mathbf{A}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}$$

و می‌توان تابع هزینه (۱۶) را به فرم زیر نوشت:

$$\mathbf{J} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\mathbf{X}^T \ \mathbf{u}^T \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_1^T \mathbf{C}_1 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_1^T \mathbf{D}_1 & \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_2^T \mathbf{D}_2 \\ 0 & 0 & \mathbf{D}_2^T \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \right] dt \quad (23)$$

حال با تعریف $\mathbf{R} = \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2$ ، $\mathbf{N} = [0 \ 0 \ \mathbf{C}_2^T \mathbf{D}_2]^T$ و

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_1^T \mathbf{C}_1 & 0 \\ \mathbf{C}_1^T \mathbf{D}_1 & \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

مسئله $FSLQR$ به یک مسئله LQR به فرم زیر تبدیل می‌شود.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_t \mathbf{X} + \mathbf{B}_t \mathbf{u}$$

$$\mathbf{J} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\mathbf{X}^T \ \mathbf{u}^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N}^T & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \right] dt \quad (25)$$

بنابراین قانون کنترل بهینه به صورت زیر در می‌آید:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{P} \mathbf{B}^T + \mathbf{N}^T) \mathbf{X} = \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (26)$$

که در آن \mathbf{P} از حل معادله ریکاتی زیر بدست می‌آید:

$$-\mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} + (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{N})^T \mathbf{P} - \mathbf{Q} = \mathbf{0}$$

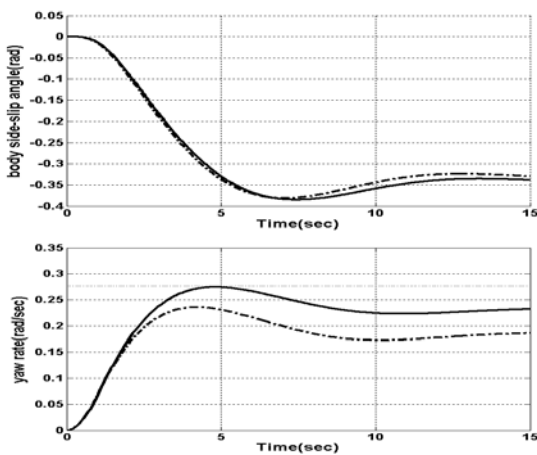
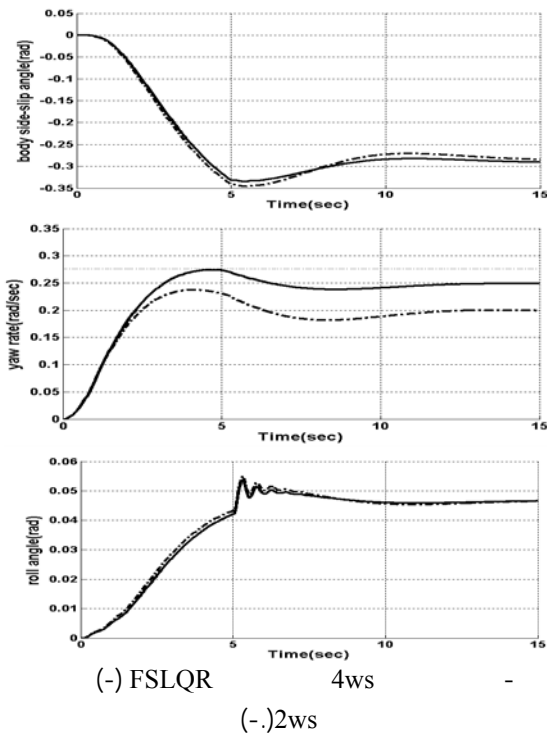
قانون کنترل بهینه (۲۶) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

۶- نتیجه گیری

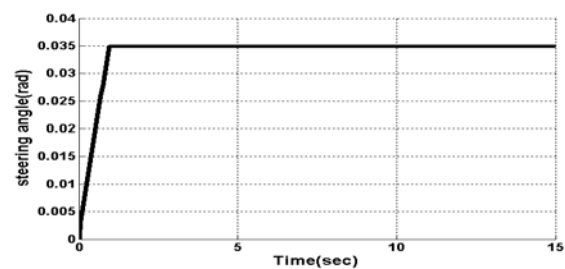
در این مقاله، روشی جدید برای کنترل رفتار جانبی خودرو با طراحی کنترل کننده $FSLQR$ که ضمن بهبود مشخصات هدایتی خودرو (نرخ چرخش)، با کاهش زاویه لغزش بدنه، اثرات نویز اندازه گیری را نیز مرتفع می نماید. پیشنهاد می شود به منظور بهبود مشخصات هدایتی خودرو از تلفیق روش ترمز ضدقفل با روش چهارچرخ فرمان استفاده شود.

جدول ۱- برخی از پارامترهای خودرو

$m = 1298.84 \text{ kg}$	$V_x = 33.33 \text{ m/s}$
$L_f = 1 \text{ m}$	$L_r = 1.45 \text{ m}$
$L_{\varphi f} = 37300 \text{ Nm/rad}$	$L_{\varphi r} = 30500 \text{ Nm/rad}$

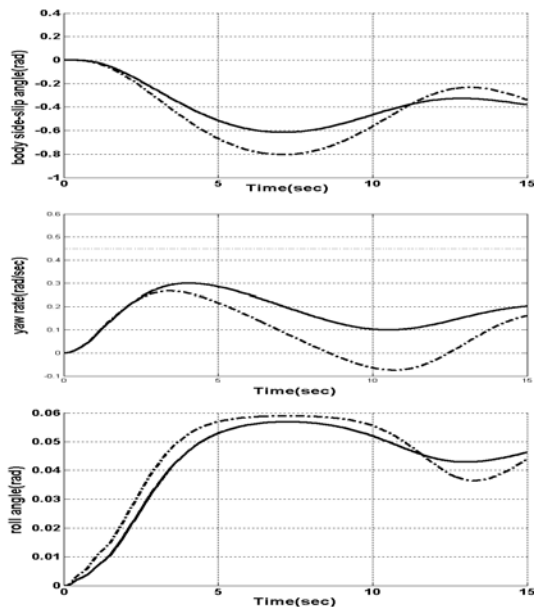


با تغییر ممان اینرسی حول محور Z و جرم خودرو، کنترل کننده پیشنهادی دارای رفتار گذرای بهتر، دارای مقدار حالت دائمی کمتر برای نرخ چرخش، مقدار زاویه لغزش بدنه کمتر و دارای زاویه غلتش هموارتر و نرخ غلتش با نوسانات کمتر نسبت به سیستم $2WS$ می باشد. با تغییر شرایط سطح جاده، که در برگزیده تغییر ضریب لغزش از مقدار 0.05 برای هر چهار چرخ (سطح جاده خشک) به مقدار 0.2 برای چرخها (سطح جاده برفی) در ثانیه ۵ می باشد، کنترل کننده $FSLQR$ دارای عملکرد مناسب تری با دارا بودن کمترین تغییرات در کمترین زمان برای رسیدن به حالت دائمی در نرخ چرخش می باشد. ضمن این که مقدار حالت دائمی آن نسبت به سیستم $2WS$ کمتر و حالت گذرای آن بهتر می باشد. مقدار افزایش در زاویه لغزش بدنه کنترل کننده $FSLQR$ قابل چشم پوشی است. علاوه بر این زاویه غلتش در کنترل کننده $FSLQR$ دارای همواری بیشتر نسبت سیستم فرمان دوچرخ معمولی می باشد. در نتیجه نرخ غلتش سیستم چهارچرخ با کنترل کننده $FSLQR$ ، دارای نوسانات کمتر نسبت سیستم $2WS$ می باشد. همچنین با توجه به شکل (۷) مشاهده می شود که با تغییر سرعت طولی خودرو به مقدار 50 m/s سیستم فرمان دوچرخ از مسیر منحرف شده در حالی که سیستم $4WS$ با کنترل کننده پیشنهادی به خوبی مسیر را طی می کند. به طور کلی می توان چنین نتیجه گرفت که کنترل کننده $FSLQR$ نسبت به سیستم $2WS$ با بهبود در پاسخ چرخش، کاهش زاویه لغزش بدنه خودرو، کاهش زاویه غلتش و افزایش پایداری در مقابل اغتشاش دارای عملکرد نزدیکتری با رفتار مطلوب خودرو دارد و مقاومتر می باشد.



شکل ۲- زاویه فرمان

شکل ۶- عملکرد سیستم 4ws با کنترل کننده FSLQR (-) و سیستم 2ws (-) با تغییر شرایط سطح جاده



شکل ۷- عملکرد سیستم 4ws با کنترل کننده FSLQR (-) و سیستم 2ws (-) با تغییر سرعت طولی خودرو

۷- مراجع

[1] Y.Furukawa, N.Yuhara, S.Sano, H.Fakeda and Y.Matsushita, "A Review of Four-Wheel Steering Studies From The Viewpoint of Vehicle Dynamics And Control", Vehicle System Dynamics, pp.151-186, 1989.

[2] A.Ohnuma and L.D.Metz, "Controlability and Stability Aspect of actively Controlled 4WS Vehicles", SAE Paper, pp.1481-1449, 1989.

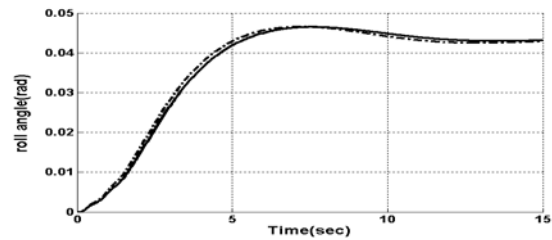
[3] N.E.Sanchez, "Nonlinear Dynamics and Control of a Four-Wheel Steering Vehicle Using Symbolic Approach", Int .J.of Vehicle Design, pp.81-98, 1994.

[4] D.E.D.Williams and W.M.Haada, "Nonlinear Control of Roll Moment Distribution to Influence Vehicle Yaw Characteristics", IEEE Tarns on Fuzzy Systems, pp.110-116, 1995.

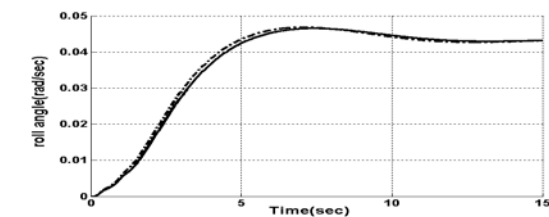
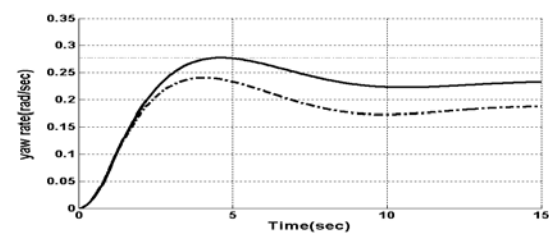
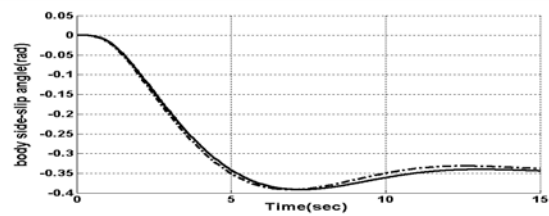
[5] علیرضا الفی، کنترل فازی سیستم فرمان چهارچرخ خودرو، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۰.

[6] B.D.O.Anderson and J.B.Moore, "Optimal Control: Linear and Quadratic Methods", Prentice Hall, New Jercey, 1990.

[7] E.C.Yeh and R.H.Wu, "Open-Loop Design For decoupling Control of A Four-Wheel-Steering Vehicle", Int.J.of vehicle Design, Vol.10, pp.703-726, 1989.



شکل ۸- عملکرد سیستم 4ws با کنترل کننده FSLQR (-) و سیستم 2ws (-) با تغییر I_{ZZ}



شکل ۹- عملکرد سیستم 4ws با کنترل کننده FSLQR (-) و سیستم 2ws (-) با تغییر M_{tot}

