

هدایت غیرخطی مقاوم در راستا و عمود بر خط دید برای برخورد با اهداف متحرک

زارعی، مجید^۱، ولی، احمد رضا^۲، بهنام گل، وحید^{۳*}

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل، دانشکده کنترل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 - ۲- استادیار گروه برق و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران
 - ۳- دانشجوی دکتری مهندسی برق - کنترل، دانشکده کنترل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- (دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۱۰)

چکیده

در این مقاله، طراحی غیرخطی و مقاوم مولفه‌های شتاب رهگیر در دستگاه خط دید برای برخورد با اهداف متحرک ارائه شده است. برای تضمین برخورد با هدف از ایده‌ی ناوبری موازی استفاده شده و مولفه‌ی شتاب هدف در راستای عمود بر خط دید برای صفر کردن نرخ چرخش این خط طراحی می‌شود. همچنین برای کنترل سرعت نزدیک شونده‌ی رهگیر به هدف، مولفه‌ی شتاب در راستای خط دید طراحی و به رهگیر اعمال می‌شود. در روند طراحی به دلیل استفاده از کنترل مد لغزشی، مستقیماً از معادلات غیرخطی حاکم بر هندسه‌ی درگیری استفاده شده و مانور هدف به عنوان نامعینی در نظر گرفته می‌شود. لذا قانون هدایت غیرخطی طراحی شده نسبت به مانور هدف مقاوم خواهد بود. در روش ارائه شده پارامتری برای تنظیم زمان رسیدن به سطوح لغزش و صفر شدن خطا وجود داشته و برای جلوگیری از نوسانات ناخواسته از روش تقریب پیوسته در لایه‌ی مرزی استفاده شده است. از آنجا که تغییر پارامتر طراحی منجر به ایجاد مجدد نوسان می‌شود، در این مقاله از شرط لغزش جدیدی استفاده شده که نوسان را مستقل از مقدار پارامتر طراحی می‌گرداند. لذا پهنای لایه‌ی مرزی فقط یک بار تنظیم می‌شود و با تغییر پارامتر طراحی نیازی به تنظیم مجدد این لایه نیست.

واژه‌های کلیدی: هدایت غیرخطی، اهداف متحرک، کنترل مد لغزشی، نامعینی، نوسانات ناخواسته

مقدمه

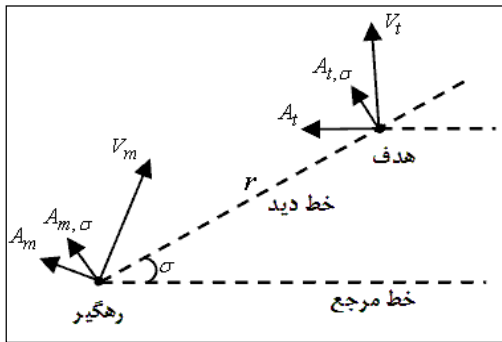
این دسته قوانین هدایت برای رهگیری اهداف مانوردار، ناوبری تناسبی افزوده پیشنهاد شده که نیازمند سنسور اندازه‌گیری و یا محاسبات پیچیده برای تخمین شتاب هدف است [۱ و ۲]. تئوری کنترل مد لغزشی یکی از روش‌های مناسب طراحی برای سیستم‌های غیرخطی و غیرقطعی می‌باشد. بنابراین با استفاده از این روش می‌توان قوانین هدایت را بدون خطی‌سازی معادلات طراحی نمود و متغیرهایی از قبیل مانور هدف را به عنوان نامعینی در نظر گرفت. لذا رهگیری تنها با داشتن کران بالای شتاب هدف انجام شده و نیازی به اندازه‌گیری و یا تخمین دقیق این متغیر در حین رهگیری نمی‌باشد [۳-۵].

بزرگترین نقص کاربردی کنترل مد لغزشی، پدیده‌ی نوسانات ناخواسته است. روش تقریب پیوسته در لایه‌ی مرزی باریک یکی از روش‌های پرکاربرد برای کاهش نوسان است که

ناوبری تناسبی محض اولین قانون هدایت خانواده PN بوده که دستور شتاب را در راستای عمود بر بردار سرعت رهگیر در نظر می‌گیرد. اعمال دستور شتاب در راستای عمود بر خط دید تاثیر بیشتری در صفر کردن نرخ چرخش خط دید دارد و از این رو ناوبری تناسبی حقیقی پیشنهاد شده است [۱ و ۲]. در این قانون هدایت شتاب هدف در راستای خط دید در نظر گرفته نمی‌شود و در صورت اعمال دستور شتاب در این راستا می‌توان سرعت نزدیک شونده‌ی ناوبری را تنظیم نمود [۳].

قوانین هدایت خانواده ناوبری تناسبی با فرض خطی‌سازی معادلات، بهینه بوده و هرچه از حالت خطی فاصله گرفته شود، از بهینگی آنها کاسته شده و حتی ممکن است واگرا شود. در

که در آن σ و $\dot{\sigma}$ زاویه و نرخ چرخش خط دید، r برد نسبی، \dot{r} - سرعت نزدیک شونده‌گی، $A_{m,\sigma}$ و $A_{t,\sigma}$ به ترتیب مولفه‌های شتاب رهگیر و هدف در راستای عمود بر خط دید و $A_{m,r}$ و $A_{t,r}$ به ترتیب مولفه‌های شتاب رهگیر و هدف در راستای خط دید می‌باشند.



شکل ۱- سینماتیک نسبی رهگیر و هدف در مختصات دو بعدی

سیگنال‌های کنترلی در این مقاله، مولفه‌های شتاب رهگیر در دستگاه خط دید است. برای این منظور ابتدا با توجه به معادله‌ی اول رابطه‌ی (۱)، مولفه‌ی شتاب رهگیر در راستای عمود بر خط دید طوری طراحی می‌شود که نرخ چرخش خط دید بین رهگیر و هدف را در مدت زمان محدودی به همسایگی کوچکی از صفر همگرا کند. در صورت صفر شدن این متغیر، خط دید نخواهد چرخید و با برقراری شرط $\dot{\sigma} < 0$ یعنی نزدیک شدن رهگیر به هدف، طبق ایده‌ی ناوبری موازی برخورد حتمی خواهد بود [۱۳ و ۱۴]. سپس با توجه به معادله‌ی دوم رابطه‌ی (۱)، مولفه‌ی شتاب رهگیر در راستای خط دید طوری طراحی می‌شود که سرعت نزدیک شونده‌گی در یک مدت زمان محدود به مقدار مطلوبی برسد. در هر دو حالت نیز شتاب هدف به عنوان نامعینی فرض شده و بدون اندازه‌گیری یا تخمین، اثر آن در نظر گرفته می‌شود [۳].

کنترل مد لغزشی هموار

سیستم تک ورودی-تک خروجی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f + u \quad (2)$$

که در آن $x^{(n)} = f(x) + (X)u$ خروجی مورد نظر و u ورودی کنترل می‌باشد. تابع $f(x)$ به صورت زیر می‌باشد:

منجر به کاهش دقت کنترلی می‌شود [۶]. البته با استفاده از متغیرهای بیشتر در تعریف سطح لغزش، می‌توان از این کاهش دقت به مقدار قابل توجهی جلوگیری کرد [۷ و ۸]. در روش لایه‌ی مرزی با افزایش مقدار پارامترهای طراحی، سیگنال کنترلی دوباره شروع به نوسان کرده و پهنای لایه‌ی مرزی نیاز به تنظیم مجدد دارد. برای حل این مشکل، روش‌های متعددی از جمله کنترل تطبیقی ارائه شده است [۶]. مد لغزشی مرتبه بالا روش دیگری برای حذف نوسان است که دارای محاسبات پیچیده‌تری می‌باشد [۹ و ۱۰]. این روش نیز در مراجع [۱۱ و ۱۲] برای هموار کردن سیگنال کنترلی استفاده شده است.

در این مقاله با استفاده از کنترل مد لغزشی، قوانین هدایتی در راستا و عمود بر خط دید طراحی شده است. هدف کنترلی بر اساس ایده‌ی ناوبری موازی، صفر شدن نرخ چرخش خط دید بوده و در راستای خط دید نیز دستور شتابی برای تنظیم سرعت نزدیک شونده‌گی اعمال می‌شود. برای جلوگیری از رخ دادن نوسانات ناخواسته از روش تقریب پیوسته در لایه‌ی مرزی باریک استفاده شده و به دلیل تعریف شرط لغزشی متفاوت از روش استاندارد، پهنای لایه‌ی مرزی مستقل از پارامترهای طراحی فقط یکبار تنظیم می‌گردد. با شبیه‌سازی روش ارائه شده در دو سناریوی درگیری متفاوت، عملکرد قانون هدایت طراحی شده در راستای عمود بر خط دید با قانون هدایت ناوبری تناسبی ایده‌آل و قانون هدایت طراحی شده در مرجع [۱۱] که از مد لغزشی مرتبه دوم برای حذف نوسان استفاده کرده است مقایسه می‌شود. کارایی قانون هدایت طراحی شده در راستای خط دید در کنترل سرعت نزدیک شونده‌گی نیز بررسی خواهد شد. همچنین تاخیر سیستم کنترل رهگیر در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود.

فرمول‌بندی مسئله

سینماتیک نسبی بین رهگیر و هدف

با توجه به سینماتیک نسبی رهگیر و هدف در حالت دو بعدی در شکل (۱)، معادلات حالت حرکت در مختصات قطبی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\dot{\sigma}) &= -\frac{2\dot{r}\dot{\sigma}}{r} + \frac{A_{t,\sigma}}{r} - \frac{A_{m,\sigma}}{r} \\ \frac{d}{dt}(\dot{r}) &= r\dot{\sigma}^2 + A_{t,r} - A_{m,r} \end{aligned} \quad (1)$$

سیستم است. این ورودی کنترل، شامل تابع ناپیوسته علامت بوده و زمانیکه سطح S به نزدیکی صفر می‌رسد، نوسانات ناخواسته‌ای را ایجاد می‌کند. برای برطرف کردن این مشکل در این مقاله از شرط لغزش مرجع [۱۷] به صورت رابطه (۹) استفاده می‌شود:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta S^2 \quad (۹)$$

جمله‌ی سمت راست رابطه‌ی (۹) متفاوت از شرط لغزش (۶) در روش طراحی کنترل مد لغزشی استاندارد می‌باشد، با این تفاوت که در آن تابع پیوسته‌ی S^2 جایگزین تابع قدرمطلق شده است [۱۷-۱۵]. با این تغییر، ورودی کنترل شکل کلی رابطه‌ی (۱۰) را خواهد داشت که علاوه بر تضمین پایداری زمان محدود، سیگنال کنترلی هموارتری تولید می‌کند.

$$u = u_{eq} - \eta S - \alpha \text{Sign}(S) \quad (۱۰)$$

با توجه به روابط (۸) و (۱۰) مشاهده می‌شود که افزایش مقدار پارامتر η در رابطه‌ی (۸)، بهره‌ی تابع ناپیوسته را بزرگتر کرده که باعث افزایش نوسان خواهد شد. اما در رابطه‌ی (۱۰) پارامتر η در تابع ناپیوسته‌ی علامت ضرب نشده و افزایش آن منجر به افزایش نوسان نخواهد شد. همچنین با انتگرال گیری از طرفین رابطه (۸) می‌توان نوشت:

$$\int_{S(t=0)}^{\varepsilon} \frac{dS}{S} \leq \int_0^{t_r} -\eta dt \Rightarrow \quad (۱۱)$$

$$t_r \leq (\ln S(t=0) - \ln(\varepsilon)) / \eta$$

t_r زمان رسیدن متغیر S به دقت ε از صفر می‌باشد. یعنی مسیرهای سیستم بعد از گذشت مدت زمان t_r با دقت ε نزدیک به سطح $S=0$ خواهند بود و با توجه به رابطه‌ی (۹) چون سطح لغزش $S=0$ جاذب می‌باشد، از این زمان به بعد نیز مسیرها به سطح لغزش نزدیکتر شده و در نهایت به آن می‌رسند. با توجه به رابطه‌ی (۹)، مدت زمان رسیدن S به دقت ε ، با تغییر مقدار η قابل تنظیم است [۱۷].

طراحی قانون هدایت

در این بخش با استفاده از روش ارائه شده در بخش (۲-۲) و رابطه‌ی (۱)، مولفه‌های شتاب رهگیر در راستا و عمود بر خط دید طراحی می‌شوند.

قانون هدایت در راستای عمود بر خط دید

با توجه به ایده‌ی ناوبری موازی ابتدا سطح لغزشی با استفاده از

$$f = f_{nom} + f_{un} \quad , \quad |f_{un}| \leq \alpha \quad (۳)$$

f_{nom} قسمت قطعی و f_{un} بخش غیر قطعی تابع f می‌باشد که دقیقاً معلوم نیست، ولی کران بالای آن با ثابت α محدود شده است. طبق تئوری کنترل مد لغزشی، متغیر S بر اساس خطای ردیابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \tilde{x} \quad (۴)$$

که در آن $\tilde{x} = x - x_d$ خطای ردیابی و x_d حالت مطلوب است. در این صورت مسئله‌ی ردیابی معادل باقی ماندن بر روی سطح S و هم ارز با رابطه‌ی $S=0$ می‌باشد.

کنترل مد لغزشی از دو بخش تشکیل می‌شود. بخش اول یا کنترل معادل، زمانی که در سیستم نامعینی وجود ندارد طراحی می‌گردد. در این صورت تغییرات S صفر بوده و کنترل معادل با برقراری $\dot{S}=0$ تعیین می‌شود. بخش دوم یا بخش رساننده برای در نظر گرفتن نامعینی‌ها به کنترل معادل اضافه شده و S را در مدت زمان محدودی به صفر می‌رساند [۶]. برای طراحی بخش رساننده ابتدا تابع کاندید لیاپانوفی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (۵)$$

در کنترل مد لغزشی استاندارد برای اثبات پایداری باید شرط لغزش رابطه‌ی (۶) برقرار گردد [۶]:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (۶)$$

که در آن η یک ثابت مثبت بوده و ورودی کنترل باید طوری تعیین گردد که این شرط برقرار شود. با انتگرال گیری از طرفین این رابطه تضمین می‌شود که متغیر S در مدت زمان محدودی به صورت رابطه‌ی (۷) $|S(t=0)|/\eta$ به صفر خواهد رسید [۶].

$$t_r \leq |S(t=0)|/\eta \quad (۷)$$

در روش استاندارد، ورودی کنترل حالت کلی رابطه‌ی (۸) را خواهد داشت [۶]:

$$u = u_{eq} - (\eta + \alpha) \text{Sign}(S) \quad (۸)$$

که در آن u_{eq} کنترل معادل، η پارامتری برای تنظیم مدت زمان رسیدن به سطح لغزش و α کران بالای نامعینی

متغیر نرخ چرخش خط دید به صورت زیر تعریف می شود:

$$S = \dot{\sigma} \quad (12)$$

در این صورت مسئله‌ی رهگیری، معادل $S = 0$ می باشد. کنترل معادل برای زمانیکه در سیستم نامعینی وجود ندارد با برقراری $\dot{S} = 0$ و با استفاده از روابط (۱) و (۱۲) به دست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{S} = \frac{d}{dt}(\dot{\sigma}) &= -\frac{2\dot{r}\dot{\sigma}}{r} - \frac{A_{m,\sigma}}{r} + \frac{A_{t,\sigma}}{r} = 0 \Rightarrow \\ A_{m,\sigma_{eq}} &= -2\dot{r}\dot{\sigma} \end{aligned} \quad (13)$$

$A_{m,\sigma_{eq}}$ کنترل معادل بوده و زمانیکه در سیستم نامعینی وجود ندارد (هدف در راستای عمود بر خط دید بدون مانور باشد)، نرخ چرخش خط دید را در مقدار ثابتی حفظ خواهد کرد که این مقدار ثابت در صورت طراحی بخش رساننده، مقدار صفر خواهد بود. حال برای در نظر گرفتن شتاب هدف در راستای عمود بر خط دید (نامعینی سیستم) جمله‌ای به صورت زیر به کنترل معادل اضافه می شود [۱۷]:

$$A_{m,\sigma} = A_{m,\sigma_{eq}} - kS \quad (14)$$

k نیز جمله‌ی رساننده می باشد و به نحوی طراحی می شود که جاذب بودن سطح لغزش $S = 0$ تضمین شود. برای این منظور با تعریف تابع لیاپانوفی مانند رابطه‌ی (۵)، شرط کافی برای اینکه متغیر S در مدت زمان محدودی به فاصله‌ی ε از صفر برسد، برقراری شرط لغزش (۹) می باشد [۱۷]. لذا با استفاده از روابط (۱۲-۱۴) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} = S\left(\frac{kS}{r} + \frac{A_{t,\sigma}}{r}\right) \leq -\eta S^2 \Rightarrow \\ -k \geq \eta r + \frac{A_{t,\sigma}}{S} \end{aligned} \quad (15)$$

در صورتی که $-k$ برابر با بیشینه مقدار سمت راست رابطه‌ی (۱۵) انتخاب شود، همواره شرط لغزش (۹) را برقرار می سازد. لذا خواهیم داشت:

$$-k = \eta r_0 + \frac{\alpha}{|S|} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = (kr + r\dot{\sigma})\left(A_{t,\sigma} + k_1 \operatorname{sgn}(kr + r\dot{\sigma})\right) \leq \\ -c\left(\frac{1}{2}((kr + r\dot{\sigma}))^2\right)^\beta \Rightarrow \end{aligned}$$

در این رابطه α کران بالای شتاب هدف در راستای عمود بر خط دید و r_0 مقدار اولیه‌ی برد نسبی می باشد. با این انتخاب برای k و با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴)،

$$\begin{aligned} \dot{V} = (kr + r\dot{\sigma})\left(A_{t,\sigma} + k_1 \operatorname{sgn}(kr + r\dot{\sigma})\right) \leq \\ -c\left(\frac{1}{2}((kr + r\dot{\sigma}))^2\right)^\beta \Rightarrow \end{aligned}$$

قانون هدایت در راستای عمود بر خط دید به شکل زیر تعیین می شود:

$$A_{m,\sigma} = -2\dot{r}\dot{\sigma} + c\dot{\sigma} + \alpha \operatorname{sign}(\dot{\sigma}) \quad (17)$$

که در آن $c = \eta r_0$ است. با مقایسه‌ی قانون هدایت رابطه (۱۷) با خانواده‌ی ناوبری تناسبی می توان استنباط کرد که جمله‌ی اول سمت راست رابطه‌ی (۱۷) متناظر با ناوبری تناسبی حقیقی با ثابت ناوبری ۲ بوده و جملات بعدی برای در نظر گرفتن مانور هدف می باشند. در این قانون هدایت برخلاف ناوبری تناسبی افزوده شده نیازی به تخمین و یا اندازه‌گیری شتاب هدف نیست.

قانون هدایت در راستای خط دید

در این بخش ابتدا سطح لغزشی به صورت زیر تعریف می شود:

$$S = \dot{r} - \dot{r}_d \quad (18)$$

در این صورت با طراحی قانون کنترلی که متغیر S را به صفر برساند، سرعت نزدیک شوندگی به مقدار مطلوب \dot{r}_d خواهد رسید. بنابراین در صورتی که هدف شتابی در راستای خط دید داشته باشد یا تغییرات سرعت وجود داشته باشد، رهگیر قادر به برخورد با هدف خواهد بود.

همانند بخش قبل ابتدا کنترل معادل برای زمانیکه در سیستم نامعینی وجود ندارد، با برقراری شرط $\dot{S} = 0$ به صورت زیر تعیین می شود:

$$\begin{aligned} \dot{S} = \dot{r} - \dot{r}_d = -r\dot{\sigma}^2 - A_{m,r} + A_{t,r} = 0 \Rightarrow \\ A_{m,r_{eq}} = -r\dot{\sigma}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

برای در نظر گرفتن مانور هدف در راستای خط دید، جمله‌ای به صورت زیر به کنترل معادل اضافه می شود:

$$A_{m,r} = A_{m,r_{eq}} - kS \quad (20)$$

ابتدا زمان محدود بودن قانون هدایت پیشنهادی و تاثیر تغییر پارامتر c در آن بررسی شده و سپس عملکرد قانون هدایت پیشنهادی (Smooth SMG) در دو سناریوی درگیری متفاوت با ناوبری تناسبی ایده آل (IPN)، قانون هدایت طراحی شده در مرجع [۱۱] (SSOSM Law) و قانون هدایت طراحی شده در راستای خط دید مرجع [۳] مقایسه می شود.

دستور شتاب صادر شده توسط قانون هدایت طراحی شده در مرجع [۱۱] با تعریف سطح لغزشی به صورت $S = r\dot{\sigma} - c\sqrt{r}$ از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$A_m = \frac{1}{\cos(\gamma_m - \sigma)} \left(-N\dot{r}\dot{\sigma} - \frac{c\dot{r}}{2\sqrt{r}} + k_1 |r\dot{\sigma} - c\sqrt{r}|^{\frac{2}{3}} \text{sign}(r\dot{\sigma} - c\sqrt{r}) \right) \quad (24)$$

که در آن γ_m زاویه‌ی بردار سرعت رهگیر با خط مرجع بوده و $N = 4$ در نظر گرفته شده است. این قانون هدایت در راستای عمود بر بردار سرعت رهگیر طراحی شده است.

همچنین در مرجع [۳] با استفاده از کنترل مد لغزشی استاندارد و روش تقریب پیوسته دستور شتاب در راستای خط دید طراحی شده است.

بررسی زمان محدود بودن قانون هدایت

در این بخش عملکرد قانون هدایت پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف c مورد بررسی قرار می گیرد. در این حالت شتاب هدف در راستای عمود بر خط دید برابر با مقدار ثابت ۴۰ متر بر مجذور ثانیه فرض می شود. همچنین رهگیر و هدف در راستای خط دید بدون شتاب فرض می شوند.

با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) با افزایش c ، بیشینه اندازه‌ی دستور شتاب افزایش یافته و زمان صفر شدن نرخ چرخش خط دید (متغیر S) کاهش می یابد. البته حداکثر مقدار c در عمل باید محدود شود، در غیر این صورت مانند افزایش ثابت ناوبری تناسبی منجر به ناپایداری قانون هدایت خواهد شد. همچنین همانطور که مشاهده می شود، لایه‌ی مرزی تنها یکبار برای حالت $c = 1500$ تنظیم شده و با افزایش مقدار این پارامتر بدون تنظیم مجدد لایه‌ی مرزی هیچ نوسانی در دستور شتاب و متغیر لغزش رخ نداده است.

با توجه به نمودار سرعت نزدیک شونده‌ی در شکل (۴)، با افزایش c از کاهش این متغیر جلوگیری می شود و مدت زمان رهگیری کاهش خواهد یافت.

k نیز طوری تعیین می شود که جاذب بودن سطح لغزش $S=0$ تضمین شود. برای دستیابی به این هدف، با در نظر گرفتن تابع لیاپانف (۵)، جمله‌ی k طوری تعیین می شود تا شرط لغزش (۹) برقرار شود. برای برقراری این شرط با استفاده از روابط (۱۸) تا (۲۰) خواهیم داشت:

$$-kS^2 + A_{t,r}S \leq -\eta S^2 \Rightarrow k \geq \frac{A_{t,r}}{S} + \eta \quad (21)$$

در صورتی که k برابر با بیشینه مقدار سمت راست رابطه‌ی بالا انتخاب شود، شرط لغزش (۹) را همواره برآورده می سازد.

$$k = \frac{\alpha_2}{|S|} + \eta \quad (22)$$

که در آن α_2 کران بالای شتاب هدف در راستای خط دید است. بنابراین با استفاده از روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۲)

$$\dot{V} = (kr + r\dot{\sigma}) \left(A_{t,\sigma} + k_1 \text{sgn}(kr + r\dot{\sigma}) \right) \leq -c \left(\frac{1}{2} ((kr + r\dot{\sigma}))^2 \right)^\beta \Rightarrow$$

قانون هدایت در راستای خط دید به صورت زیر به دست می آید:

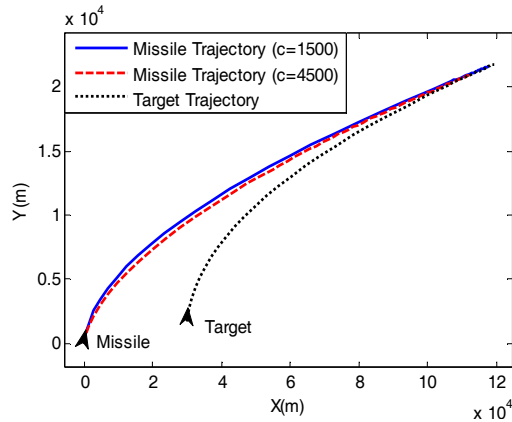
$$A_{m,r} = -r\dot{\sigma}^2 + \eta(\dot{r} - \dot{r}_d) + \alpha_2 \text{sign}(\dot{r} - \dot{r}_d) \quad (23)$$

در این قانون هدایت نیز با تغییر مقدار η می توان مدت زمان رسیدن متغیر S به دقت ε از سطح لغزش را تنظیم نمود.

نتایج شبیه سازی

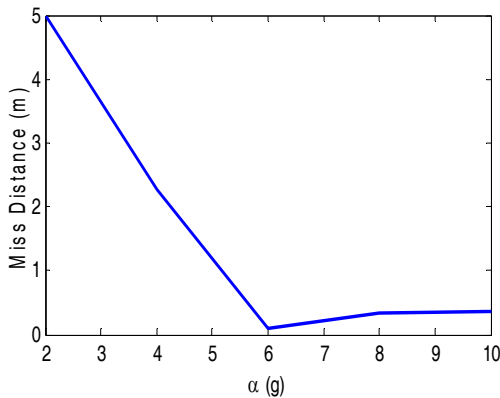
در این قسمت با استفاده از شبیه سازی به بررسی عملکرد قانون هدایت طراحی شده پرداخته شده است. در تمامی شبیه سازی-ها، سرعت نزدیک شونده‌ی اولیه ۶۳۶/۴ متر بر ثانیه و نرخ چرخش خط دید اولیه ۰/۱۴۱ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته می شوند. مکان اولیه‌ی رهگیر در فضای کارترین $r_{m0} = [0 \ 0]^T m$ و مکان اولیه هدف $r_{t0} = [30000 \ 2000]^T m$ فرض می شوند. دینامیک خودخلبان و رهگیر نیز به صورت تاخیر مرتبه اول با ثابت زمانی ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته می شود. به منظور هموارتر شدن دستور شتاب صادر شده، در شبیه سازی قانون هدایت پیشنهادی در روابط (۱۷) و (۲۳)، $\alpha_2 = 2$ ، $\eta = 0.15$ ، $\alpha = 20, 30, 40$ ، $c = 1500, 3000, 4500$ بجای تابع ناپیوسته‌ی $\text{sign}(\cdot)$ از تابع پیوسته‌ی $\tanh(\cdot)$ استفاده شده است که آرگومان این توابع در رابطه (۱۷) $(\dot{\sigma})$ و در رابطه (۲۳) $(\dot{r} - \dot{r}_d)$ است.

شود که با تغییر مقدار c ، زمان برخورد کاهش یافته و انرژی مورد نیاز را می توان تنظیم نمود.



شکل ۵- مسیر برخورد رهگیر و هدف به ازای مقادیر مختلف c

در شکل (۶) تاثیر تغییرات پارامتر α بر فاصله از دست دهی برای حالتی که شتاب هدف $6g$ می باشد، رسم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، کمترین فاصله ی از دست دهی به ازای بهترین انتخاب پارامتر α (شتاب هدف) حاصل شده و هر چقدر پارامتر α از این مقدار اختلاف داشته باشد فاصله از دست دهی افزایش خواهد یافت.

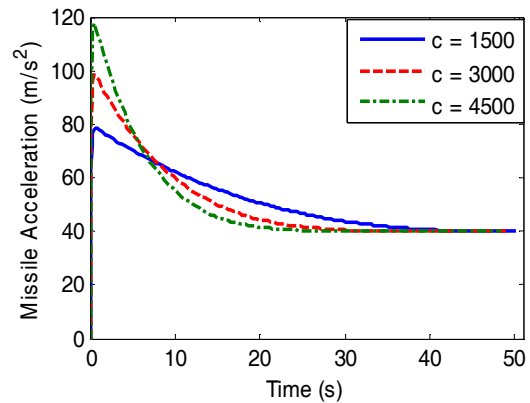


شکل ۶- فاصله از دست دهی بر حسب تغییرات پارامتر α

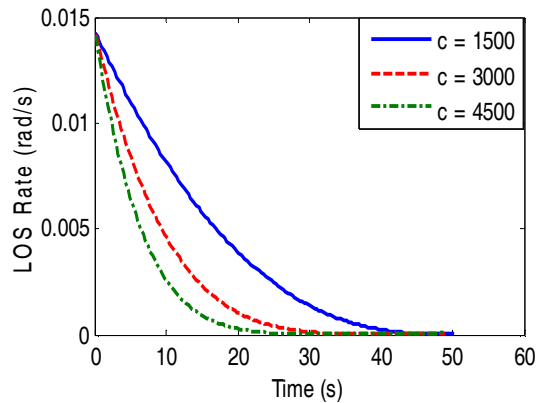
جدول ۱- مقایسه مشخصات بدست آمده توسط قانون هدایت

پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف c

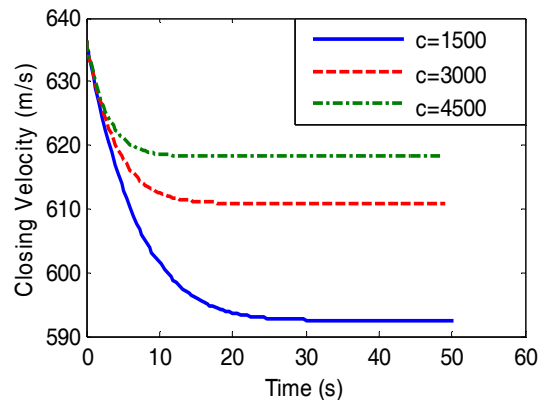
مقدار C	زمان برخورد (ثانیه)	انرژی کنترلی
۱۵۰۰	۵۰/۲	۱۳۶۰۰۰
۳۰۰۰	۴۸/۹	۱۳۴۱۰۰
۴۵۰۰	۴۸/۳	۱۳۵۸۰۰



شکل ۲- دستور شتاب صادر شده توسط قانون هدایت پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف c



شکل ۳- نرخ چرخش خط دید به ازای مقادیر مختلف c



شکل ۴- سرعت نزدیک شونده به ازای مقادیر مختلف c

در شکل (۵) نیز کاهش زمان برخورد رهگیر با هدف با افزایش مقدار c مشاهده می شود.

در این مقاله، انتگرال مجذور دستور شتاب اعمال شده به رهگیر به عنوان معیاری برای مقایسه ی انرژی در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر درج شده در جدول (۱)، مشاهده می-

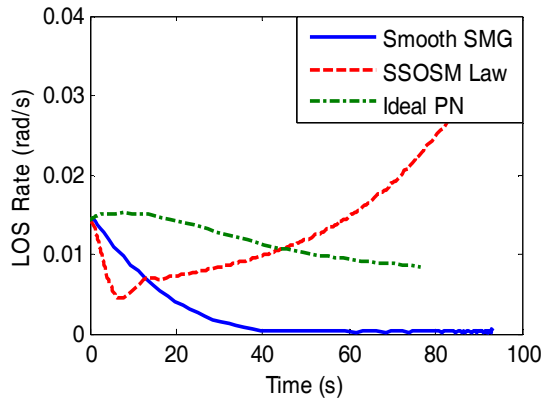
سناریوی اول

در این سناریو عملکرد قانون پیشنهادی با دو قانون هدایت دیگر مقایسه می‌شود. در این حالت هدف با شتاب ثابت ۲۰ متر بر مجذور ثانیه در راستای عمود بر خط دید و ۲ متر بر مجذور ثانیه در راستای خط دید پرواز می‌کند. در این سناریو $c = 1500$ ، $\alpha = 20$ می‌باشد. توجه شود که در این سناریو نیز در راستای خط دید شتابی به رهگیر اعمال نمی‌شود.

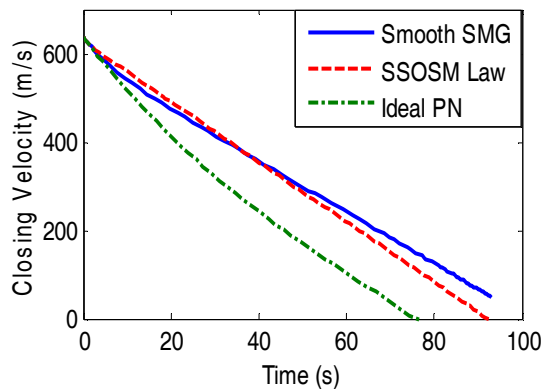
با توجه در شکل (۷)، قانون پیشنهادی $\beta = 0.5$ دستورات شتاب همواری داشته و با بیشینه اندازه شتاب کوچکتر، در انتهای درگیری شتاب هدف را دنبال می‌کند. در شکل (۸)، قانون پیشنهادی نرخ چرخش خط دید را در مدت زمان محدودی به صفر رسانده اما دو قانون هدایت دیگر توانایی کنترل آن را ندارند.

همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود، در قانون پیشنهادی سرعت نزدیک شونده در لحظه برخورد برابر با ۵۰ m/s بوده اما در قوانین هدایت دیگر قبل از رسیدن به هدف این متغیر به صفر می‌رسد. لذا در این سناریو دو قانون هدایت دیگر قادر به رهگیری هدف نیستند. در صورت منفی شدن این متغیر، رهگیر و هدف در حال دور شدن از یکدیگر بوده و هدف از دست رهگیر فرار می‌کند.

با توجه به مقادیر درج شده در جدول (۲)، در قانون هدایت پیشنهادی، رهگیر در مدت زمان ۹۳/۱ ثانیه بدون فاصله‌ی از دست‌دهی با هدف برخورد می‌کند اما در قانون هدایت SSOSM در مدت زمان ۹۲/۷ و در IPN در مدت زمان ۷۶/۵ سرعت نزدیک شونده منفی شده و فاصله‌ی از دست‌دهی در این لحظه به ترتیب برابر با ۱۱۲۰ و ۸۹۲۰ متر می‌باشد.



شکل ۸- نرخ چرخش خط دید در سناریوی درگیری اول



شکل ۹- سرعت نزدیک شونده در سناریوی اول

جدول ۲- مقایسه مشخصات بدست آمده در سناریوی اول

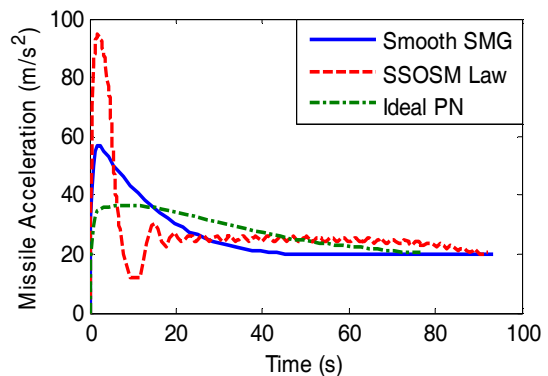
قانون هدایت	زمان اتمام شیب سازی (ثانیه)	انرژی کنترلی	فاصله از دست‌دهی (متر)
SMG	۹۳/۱	۷۰۸۹۰	۰
SSOSM Law	۹۲/۷	۸۷۱۵۰	۱۱۲۰
IPN	۷۶/۵	۶۳۳۹۰	۸۹۲۰

سناریوی دوم

در این سناریو هدف در راستای عمود بر خط دید مانند شکل (۱۰) دارای مانورهای متغیری است. در کل بیشینه مقدار مانور هدف برابر با ۳۰ متر بر مجذور ثانیه و $c = 1300$ ، $\alpha = 30$ می‌باشد. در راستای خط دید نیز رهگیر و هدف شتابی ندارند.

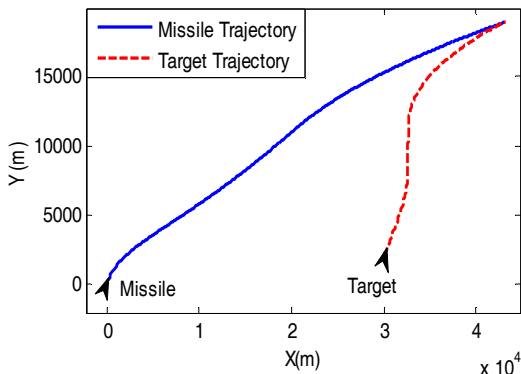
با توجه در شکل (۱۰)، قانون هدایت پیشنهادی $\beta = 0.5$ دستورات شتاب همواری داشته و بعد از گذشت ۱۵ ثانیه با دقت خوبی شتاب هدف را دنبال می‌کند.

همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، قانون پیشنهادی نرخ چرخش خط دید را در مدت زمان محدودی به



شکل ۷- دستورات شتاب صادر شده توسط قوانین هدایت در سناریوی درگیری اول

در شکل (۱۳) نیز برای قانون هدایت پیشنهادی، مسیر برخورد رهگیر و هدف در سناریوی دوم مشاهده می‌شود. با توجه به مقادیر درج شده در جدول (۳)، در قانون هدایت پیشنهادی، رهگیر در مدت زمان کوتاهتر و با صرف انرژی کمتری با هدف برخورد می‌کند.



شکل ۱۳- مسیر برخورد رهگیر و هدف در قانون هدایت پیشنهادی

جدول ۳- مقایسه مشخصات بدست آمده از قوانین هدایت در

سناریوی درگیری دوم

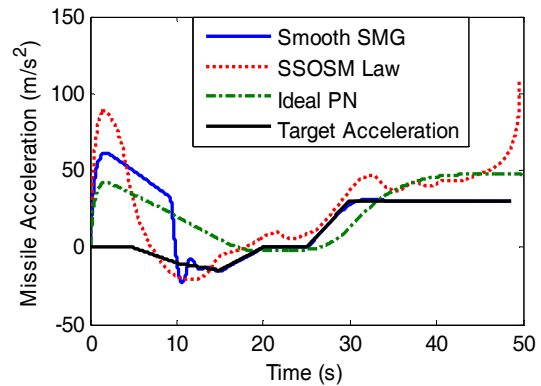
قانون هدایت	زمان برخورد (ثانیه)	انرژی کنترلی
SMG	۴۸/۶	۴۲۶۰۰
Shtessel's Law	۴۹/۴۶	۷۷۵۰۰
IPN	۵۰/۸۵	۵۵۵۰۰

اعمال دستور شتاب در راستای خط دید

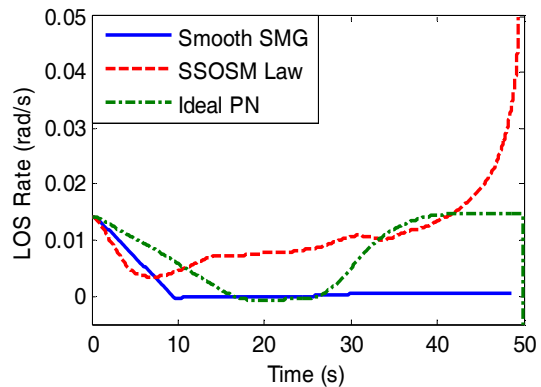
در این بخش تاثیر اعمال دستور شتاب در راستای خط دید بررسی می‌شود. در این حالت شتاب هدف در راستای عمود بر خط دید ۲۰ متر بر مجذور ثانیه و در راستای خط دید ۲ متر بر مجذور ثانیه است. سرعت نزدیک شونده‌گی مطلوب نیز $c=640$ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین در این سناریو $c=1200$ ، $\alpha=20$ ، $\eta=0.15$ ، $\alpha_2=2$ می‌باشد.

نمودارهای شتاب هدف و رهگیر در راستای خط دید در شکل (۱۴) رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود قانون هدایت پیشنهادی دستور شتاب همواری داشته و در انتهای درگیری شتاب هدف را دنبال می‌کند. دستور شتاب مرجع [۳] دارای نوسان بوده و برای کاهش این نوسان باید پهنای لایه‌ی مرزی را افزایش داد که منجر به کاهش دقت کنترلی می‌شود.

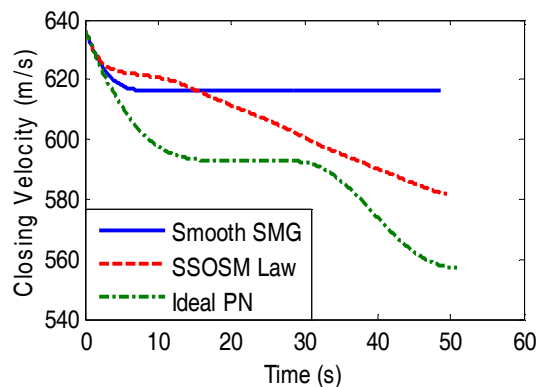
صفر رسانده اما دو قانون هدایت دیگر توانایی کنترل آن را ندارد.



شکل ۱۰- دستور شتاب صادر شده در سناریوی دوم



شکل ۱۱- نرخ چرخش خط دید در سناریوی دوم



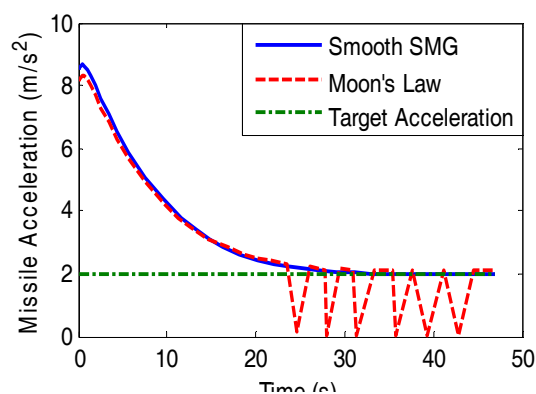
شکل ۱۲- سرعت نزدیک شونده‌گی رهگیر به هدف در سناریوی دوم

در شکل (۱۲) در قانون هدایت پیشنهادی از کاهش سرعت نزدیک شونده‌گی جلوگیری شده و مدت زمان رهگیری کاهش خواهد یافت. لذا عملکرد قانون هدایت در مقابل اهداف مانور دار بهتر خواهد بود.

طراحی شده و نسبت به مانورهای هدف مقاوم می‌باشند. در روش پیشنهادی، قابلیت تنظیم مدت زمان رسیدن به سطوح لغزش وجود داشته که منجر به بهبود عملکرد قانون هدایت می‌شود. همچنین استفاده از شرط لغزش جدید، منجر به مستقل شدن نوسان سیگنال کنترلی از تغییر مقدار پارامترهای طراحی شده و تنظیم پهنای لایه‌ی مرزی تنها یک بار صورت می‌گیرد.

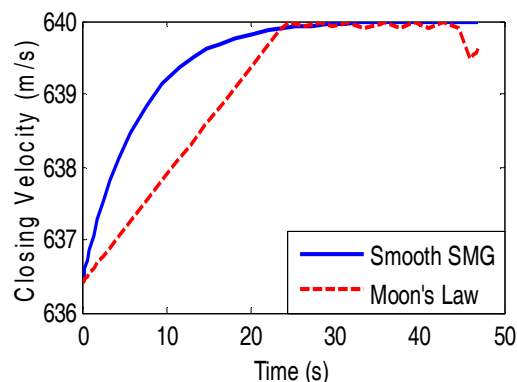
منابع و مراجع

- [1] Zarchan, P. "Tactical and Strategic Missile Guidance", AIAA Series, Vol. 199, 2002
- [2] Siouris, G. M., Missile Guidance and Control Systems, Springer, 2005, pp. 194-228.
- [3] Moon, J., Kim, K., and Kim, Y., "Design of Missile Guidance Law via Variable Structure Control," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 24, No. 4, 2001, pp. 659 - 664
- [4] Lum, K. Y., Xu, J. X., Abidi, K., and Xu, J., "Sliding Mode Guidance Law for Delayed LOS Rate Measurement," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 18 - 21 August, 2008
- [5] بهنام‌گل، و.، محمدزمان، ا.، ولی، ا.، ر.، قهرمانی، ن.، "طراحی قانون هدایت دونقطه‌ای با استفاده از کنترل مد لغزشی"، اولین کنفرانس ملی اویونیک، مرکز ملی هوانوردی ایران، ۱۹-۲۱ تیر ۱۳۹۰
- [6] Slotine, J. J. E., and Li, W., Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991, pp. 276-309
- [7] بهنام‌گل، و.، محمدزمان، ا.، ولی، ا.، ر.، فتاحی، ا.، "طراحی قانون هدایت مد لغزشی با استفاده از سطح لغزش تناسبی-انترگالی، بیستمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه تهران، ۲۶-۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۱
- [8] Innocenti, M., "Nonlinear guidance techniques for agile missiles," Control Engineering Practice, 2001, pp. 1131-1144
- [9] L. Fridman, J. Moreno, and R. Iriarte., Sliding Modes after the First Decade of the 21st Century, Springer, 2011
- [10] H. K. Khalil., Nonlinear Systems, Prentice Hall,



شکل ۱۴- دستور شتاب صادر شده در راستای خط دید توسط قانون هدایت پیشنهادی

با توجه به شکل (۱۵)، در صورت اعمال دستور شتاب در راستای خط دید، سرعت نزدیک شونده‌ی در مدت زمان دلخواهی که با تغییر مقدار پارامتر η در رابطه‌ی (۲۳) قابل تنظیم می‌باشد، به مقدار مطلوب می‌رسد. اما در قانون هدایت مرجع [۳] این متغیر به نزدیکی مقدار مطلوب رسیده که منجر به نوسان در دستور شتاب شده است. در این قانون هدایت برای جلوگیری از رخ دادن نوسان، دقت رسیدن سرعت نزدیک شونده‌ی به مقدار مطلوب کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۵- سرعت نزدیک شونده‌ی برای قانون هدایت پیشنهادی

نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از کنترل مد لغزشی $S = kr + r\dot{\sigma}$ قوانین هدایتی در دستگاه خط دید برای مقابله با اهداف مانوردار طراحی شد. شتاب رهگیر در راستای عمود بر خط دید طبق ایده‌ی ناوبری موازی، برای صفر کردن نرخ چرخش خط دید و مولفه‌ی هم‌راستا با خط دید برای کنترل سرعت نزدیک شونده‌ی طراحی گردید. این قوانین هدایت به صورت غیرخطی

- 1996.
- [11] Shtessel, Y. B., Shkolnikov, I. A., and Levant, A., "Smooth second-order sliding modes : Missile guidance application," *Automatica*, NO 43, 2007, pp. 1470 – 1476
- [12] بهنام گل، و. محمدزمان، ا. ولی، ا. ر. قهرمانی، ن. "طراحی قانون هدایت با استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه دوم زمان محدود"، *مجله کنترل*، جلد ۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۰، صفحه ۳۶-۴۴
- [13] Zhou, D., Sun, Sh., and Teo, K. L., " Guidance Laws with Finite Time Convergence," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 32, No. 6, November–December 2009
- [14] محمدزمان، ا. مومنی، ح. ر. "طراحی قانون هدایت تناسبی - انتگرالی با استفاده از ملاک دایره"، *مجله کنترل*، جلد ۴، ش ۲، ۱۳۸۹، صفحه ۱۱-۱۹
- [15] H. Delavari, A.N. Ranjbar, R. Ghaderi, S. Momani, "Fractional order control of a coupled tank", *Springer Nonlinear Dyn* 61, 2010, pp. 383–397
- [16] K. J. Kim, J. B. Park, Y. H. Choi, "Chattering Free Sliding Mode Control", *SICE-ICASE International Joint Conf*, 2006
- [17] بهنام گل، و. ولی، ا. ر. فتاحی، ا. "استخراج روشی موثر برای حذف نوسانات ناخواسته در کنترل مد لغزشی"، *فصلنامه پژوهش یار*، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ویژه نامه مهندسی برق، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۵۳-۵۹