

# سومین کنفرانس بین المللی کامپیوتر، برق و مخابرات

## 3rd International Congress on Computer, Electrical and Communication

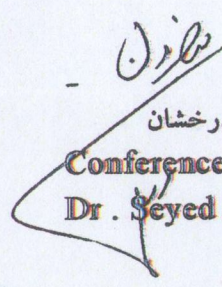
### گواهی مقاله برتر

جناب آقای اسرار خانم حرم بلوچ زاده - علی کریم پور - نامسر برینز  
احتراماً مقاله ارائه شده شما با عنوان "نشر الکترونیک مبتنی بر مدل سیم سوئیچ نمونه خطی نامعین با ورودی خارجی"

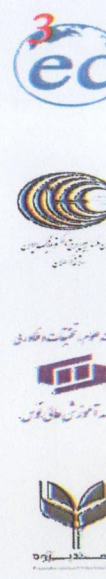
در سومین کنفرانس بین المللی کامپیوتر، برق و مخابرات که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۸/۰۶ در شهر مشهد مقدس برگزار شد ارجحی نیم به اطلاع می رساند

که مقاله حضرتعالی در این کنفرانس مورد ارزیابی بیات علمی قرار گرفت و در رتبه مقالات برتر گزینش گردید.

توفیق رفیق راه شاد و همه دلسوزان عرصه های علم و صنعت باد.

  
دبیر علمی  
دکتر سید علیرضا درخشان  
Conference Scientific Manager  
Dr. Seyed Alireza Derakhshan

رئیس کنفرانس  
پروفسور علی بهفروز  
Congress Chair  
Professor Ali Behforouz





## کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی

مریم بلوچ زاده<sup>۱</sup>، علی کریم پور<sup>۲</sup>، ناصر پرز<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

این مقاله کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی شامل اغتشاش خارجی و عدم قطعیت پارامتری را ارائه می کند. سیگنال سوئیچ از قبل معلوم است و ورودی خارجی کنترل به گونه ای طراحی می شود که تابع هزینه مینیمم شود. روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به منظور کنترل بهینه سیستم های سوئیچ شونده معین به صورت موثری استفاده شده است. به کارگیری روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل برای سیستم سوئیچ شونده نامعین با چالش های مختلفی روبه رو است. در این مقاله برای غلبه بر این مشکلات، یک مدل مناسب معرفی می شود. سپس عدم قطعیت های سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی به وسیله کنترل کننده تاخیر زمانی مقاوم جبران می شوند و به وسیله کنترل پیش بین مبتنی بر مدل ورودی خارجی کنترل طراحی می شود. کارائی و عملکرد روش پیشنهادی با انجام تجزیه و تحلیل پایداری و نتایج شبیه سازی بررسی و ارائه می شود.

**واژگان کلیدی:** پیش بین مبتنی بر مدل، سیستم سوئیچ شونده، اغتشاش خارجی، عدم قطعیت

پارامتری

## مقدمه

سیستم های سوئیچ شونده یک نوع خاص از سیستم های هابرید است، که شامل چندین زیر سیستم و یک قانون سوئیچ است که زیر سیستم فعال را در هر زمان سوئیچ مشخص می کند. سیستم های سوئیچ شونده در بیشتر زمینه ها مثل رباتیک، سیستم های قدرت و پروسه های صنعتی کاربرد دارد، چندین مثال در (Martin and Egerstedt, ۲۰۱۰) و (Nikolakopoulos and Alexis, ۲۰۱۳) ارائه شده است.

به دلیل کاربردهای فراوان سیستم های سوئیچ شونده، آنالیز پایداری و طراحی کنترل این چنین سیستم ها در مقالات (Zhao et al, ۲۰۱۳)، (Zhao et al, ۲۰۱۲) و (Saxnour Mahani and Hemkaran, ۱۳۹۲) بیان شده است. در برخی مقالات که در زمینه کنترل بهینه سیستم های سوئیچ شونده ارائه شده است، سیستم سوئیچ شونده را به صورت ترکیبی از زیر سیستم های خطی در نظر می گیرند (رضائی آل و همکاران، ۱۳۹۳)، (X. Liu et al, ۲۰۱۴) و (Ezzine and Haddad, ۱۹۸۹). و در بعضی دیگر از مقالات سیستم سوئیچ شونده به صورت ترکیبی از زیر سیستم های غیرخطی است (Zhai et al, ۲۰۱۴)، (Lin et al, ۲۰۱۳)، (Liu and Gong, ۲۰۱۴)، (Li et al, ۲۰۱۴)، (Heydari and Balakrishnan, ۲۰۱۳)، (Riedinger and Morarescu, ۲۰۱۴)، (Corona et al, ۲۰۱۴)، (Qin et al, ۲۰۱۴)، (Sigal and Ben-Asher, ۲۰۱۳).

برخلاف بررسی و طراحی کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم های نامعین بدون سوئیچ (Rawlings and Mayne, ۲۰۰۹) به کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم های سوئیچ شونده نامعین پرداخته نشده است. اکثر مقالات از در نظر گرفتن عدم قطعیت به دلیل سخت شدن مسئله کنترل بهینه، صرف نظر می کنند. در صورتی که به منظور کنترل بهینه سیستم های سوئیچ شونده در کاربردهای عملی، نیاز به در نظر گرفتن عدم قطعیت است. زیرا مدل نامی سیستم های سوئیچ شونده با مدل واقعی سیستم متفاوت است. که این تفاوت به صورت عدم قطعیت هایی شامل اغتشاش خارجی و عدم قطعیت پارامتری است که رنج وسیعی از عدم قطعیت ها را در بردارد. این مقاله به مطالعه سیستم های سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی می پردازد. این کلاس رنج وسیعی از سیستم های سوئیچ شونده را در برمی گیرد. این نوع از سیستم های سوئیچ شونده شامل زیرسیستم های خطی نامعین با ورودی خارجی است.

ما به دنبال طراحی کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی به وسیله ترکیب دو روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل و کنترل تاخیر زمانی مقاوم هستیم. به منظور رسیدن به این هدف روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل را به سیستم های سوئیچ شونده خطی بسط می دهیم. شایان ذکر است از آن جا که روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل بر اساس مدل است، در این راه ابتدا یک مدل گسسته خطی برای سیستم سوئیچ شونده ارائه می شود، اغتشاش خارجی و عدم قطعیت پارامتری به عنوان کل عدم قطعیت در مدل در نظر گرفته می شوند. سپس عدم قطعیت آن جبران می شود تا بتوان از توسعه روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به منظور کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده، استفاده کرد.

ساختار مقاله به این ترتیب سازماندهی شده است. در بخش دوم مدل سازی سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی بررسی شده است. در بخش سوم کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی

شامل کنترلر تأخیر زمانی مقاوم و روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، ارائه شده است. در بخش چهارم آنالیز پایداری و در بخش پنجم نتایج شبیه سازی ارائه شده است. نهایتاً در بخش ششم به نتیجه گیری مقاله پرداخته شده است.

## ۲- مدل سازی سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی

سیستم سوئیچ شونده زیر را در نظر بگیرید:

$$\ddot{x} = a_i \dot{x} + h_i x + b_i u + d \quad (1)$$

$a_i, x_i, u, h_i, b_i, d$  به ترتیب زیرسیستم فعال، حالت زیر سیستم ام، ورودی زیر سیستم، ضریب مشتق حالت زیرسیستم ام، ضریب بهره زیر سیستم ام و اغتشاش تصادفی زیر سیستم ام. با استفاده از عبارات های نامی در معادله (۱) معادله به این صورت حاصل می شود:

$$\ddot{x} = \hat{a}_i \dot{x} + \hat{h}_i x + \hat{b}_i u + \varphi_i \quad (2)$$

که  $\hat{a}_i, \hat{b}_i, \hat{h}_i$  به ترتیب عبارات های نامی برای عبارات های حقیقی  $a_i, b_i, h_i$  هستند.  $\varphi_i$  عدم قطعیت زیرسیستم ام است. عدم قطعیت از جایگزینی (۱) در (۲) به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\varphi_i = (a_i - \hat{a}_i) \dot{x} + (h_i - \hat{h}_i) x + (b_i - \hat{b}_i) u + d \quad (3)$$

عدم قطعیت  $\varphi$  شامل عدم قطعیت پارامتری و اغتشاشات خارجی است. معادله فضای حالت (۲) به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{A}_i \mathbf{E} + \mathbf{B}_i \mathbf{U} + \mathbf{g} \psi_i \quad (4)$$

که  $\mathbf{E}, \mathbf{U}, \mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i, \mathbf{g}$  بردار حالت، بردار ورودی، ماتریس حالت، ماتریس بهره و ماتریس ضریب عدم قطعیت است. جزئیات بدین صورت است:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \hat{h}_i & \hat{a}_i \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{b}_i \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با استفاده از معادله (۵) و استفاده کردن دوره نمونه برداری  $\sigma$  که ثابت مثبت کوچک است، یک سیستم متغیر با زمان گسسته خطی بدست خواهد آمد. با جایگزینی  $k\sigma$  در  $t$  برای  $k=1,2,\dots$  و سپس تقریب زدن  $\dot{\mathbf{E}}$  به صورت  $\dot{\mathbf{E}} = (\mathbf{E}(t+\sigma) - \mathbf{E}(t)) / \sigma$  یک مدل گسسته به فرم زیر بدست خواهد آمد:

$$\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{A}_{i,k} \mathbf{E}_k + \mathbf{B}_{i,k} \mathbf{U}_k + \mathbf{g}_k \psi_{i,k} \quad (6)$$

که  $\mathbf{E}_k = \mathbf{E}(k\sigma), \mathbf{A}_{i,k} = \mathbf{I} + \sigma \mathbf{A}_i(\sigma k), \mathbf{B}_{i,k} = \sigma \mathbf{B}_i(\sigma k), \mathbf{U}_k = \mathbf{U}(\sigma k), \mathbf{g}_k = \sigma \mathbf{g}$  و  $\psi_{i,k}$  عدم قطعیت است.

## ۳. کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی

در این بخش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی، شامل کنترلر تأخیر زمانی مقاوم و کنترل پیش بین مبتنی بر مدل ارائه می شود. عدم قطعیت  $\varphi_{i,k}$  شامل عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش خارجی است. همان طور که می بینید سیستم سوئیچ شونده گسسته خطی نامعین با ورودی خارجی (۶) دارای عدم قطعیت  $\varphi_{i,k}$  است که برای به کارگیری کنترلر بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، باید ابتدا این عدم قطعیت را جبران نمود.

### ۱.۳ قانون کنترل تأخیر زمانی مقاوم

کنترل بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به عنوان کنترل بهینه سیستم های خطی معین به کار برده شده است. برای به کارگیری کنترل بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به منظور کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده گسسته خطی نامعین با ورودی خارجی (۶)، از کنترل تأخیر زمانی مقاوم به منظور جبران کردن عدم قطعیت استفاده خواهد شد. این نوع از تخمین عدم قطعیت در کنترل امپدانس مقاوم سیستم تعلیق هیدرولیک (Fateh, ۲۰۰۹) و کنترل ربات های انعطاف پذیر (Fateh, ۲۰۱۲a) و کنترل تکراری مینیمم زمان-مینیمم اندازه (Fateh et al, ۲۰۱۳) به صورت موفقیت آمیزی استفاده شده است.

به منظور آنالیز پایداری فرضیات زیر را در نظر می گیریم:

فرض اول: به منظور یک موقعیت لازم برای طراحی کردن کنترل کننده مقاوم، عدم قطعیت باید از کانال های مشابه ورودی کنترل به سیستم وارد شود. از آن جایی که در سیستم (۲) عدم قطعیت  $\varphi_{i,k}$  از کانال مشابه ورودی کنترل به سیستم وارد می شود، شرایط تطبیق برقرار است.

به عنوان یک شرط لازم برای طراحی کردن کنترل مقاوم، اغتشاش خارجی  $d$  در (۱) باید محدود باشد.

فرض دوم: اغتشاش خارجی  $d$  به صورت زیر محدود است:

$$\|d\| \leq d_{\max} \quad (۷)$$

که  $d_{\max}$  ثابت مثبت است.

یک قانون کنترل دو ترمی پیشنهاد خواهد شد. ترم اول کنترل کننده بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به عنوان کنترل کننده بهینه است و ترم دوم یک کنترل کننده تأخیر زمانی مقاوم است. بنابراین سیستم (۲) به صورت زیر ارائه می شود:

$$\mathbf{E}_{k+1} = \mathbf{A}_{i,k} \mathbf{E}_k + \mathbf{B}_{i,k} u_{1,k} + \mathbf{B}_{i,k} u_{2,k} + \mathbf{g}_k \varphi_{i,k} \quad (۸)$$

که  $u_{i,1}(k)$  و  $u_{i,2}(k)$  ترم های اول و دوم قانون کنترل هستند. اگر کل عدم قطعیت  $\varphi_{i,k}$  جبران شود، عملکرد سیستم کنترل پیشرفت داده خواهد شد. عدم قطعیت به صورت کامل جبران خواهد شد اگر:

$$\mathbf{B}_{i,k} u_{2,k} = -\mathbf{g}_k \varphi_{i,k} \quad (۹)$$

از آن جایی که  $\varphi_{i,k}$  نامعلوم است، قانون کنترل (۶) اجرا نمی شود. در نتیجه تخمین عدم قطعیت از معادله (۸) به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$\mathbf{g}_k \varphi_{i,k} = \mathbf{E}_{k+1} - \mathbf{A}_{i,k} \mathbf{E}_k - \mathbf{B}_{i,k} u_{1,k} - \mathbf{B}_{i,k} u_{2,k} \quad (۷)$$

از آن جایی که  $E_{k+1}$  در مرحله  $k$  ام در دسترس نیست.  $\mathbf{g}_k \varphi_{i,k}$  نمی تواند محاسبه شود. بنابراین، به جای آن از مقدار قبلی  $\mathbf{g}_k \varphi_{i,k}$  به صورت زیر استفاده خواهد شد:

$$\mathbf{g}_{k-1} \varphi_{i,k-1} = \mathbf{E}_k - \mathbf{A}_{i,k-1} \mathbf{E}_{k-1} - \mathbf{B}_{i,k-1} u_{1,k-1} - \mathbf{B}_{i,k-1} u_{2,k-1} \quad (۸)$$

ترم  $g_{k-1}\varphi_{i,k-1}$  قابل محاسبه است. زیرا همه عبارت‌ها در سمت راست معادله (۸) معلوم و در دسترس هستند. بنابراین، قانون کنترل مقاوم به صورت زیر پیشنهاد داده خواهد شد:

$$B_{i,k}u_{2,k} = -g_{k-1}\varphi_{i,k-1} \quad (9)$$

با جایگزینی (۸) در (۹) بخش دوم قانون کنترل به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$B_{i,k}u_{2,k} = -E_k + A_{i,k-1}E_{k-1} + B_{i,k-1}u_{1,k-1} + B_{i,k-1}u_{2,k-1} \quad (10)$$

### ۲,۳ کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

اگر عدم قطعیت به خوبی جبران شود، کنترل کننده بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به صورت مؤثری استفاده خواهد شد. با جایگزینی (۹) در (۸) معادله بدین صورت نتیجه خواهد شد:

$$E_{k+1} = A_{i,k}E_k + B_{i,k}u_{1,k} + g_k\varphi_{i,k} - g_{k-1}\varphi_{i,k-1} \quad (11)$$

کنترل کننده تأخیر زمانی مقاوم به خوبی نقش خود را ایفا می‌کند، زیرا اثر آن به خوبی در معادله (۱۱) نمایان است. عدم قطعیت  $g_k\varphi_{i,k}$  در (۲.۷) به  $g_k\varphi_{i,k} - g_{k-1}\varphi_{i,k-1}$  در (۱۱) کاهش یافته است. به منظور به کار بردن کنترل بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، مدل نامی به فرم سیستم سوئیچ شونده خطی از (۱۱) به صورت زیر پیشنهاد خواهد شد:

$$E_{k+1} = A_{i,k}E_k + B_{i,k}u_{1,k} \quad (12)$$

سپس کنترل کننده بهینه به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل (Borrelli et al, ۲۰۱۴) به سیستم‌های سوئیچ شونده توسعه داده و اجرا می‌شود.

روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل یک الگوریتم کنترل است که یک مسئله کنترل بهینه را به صورت آنلاین حل می‌کند. استراتژی افق دور شونده طبق الگوریتم زیر اجرا می‌شود (Borrelli et al, ۲۰۱۴):

الف) در زمان  $k$  و برای حالت سیستم در زمان  $k$  ( $E_k$ )، یک مسئله کنترل بهینه حلقه باز برای مدت چند زمان بعدی اجرا می‌شود و یک دنباله ورودی کنترل حاصل می‌شود.

ب) در زمان  $k$  ورودی اول از دنباله کنترل بهینه به سیستم اعمال می‌شود.

پ) الگوریتم در زمان  $k+1$  برای حالت جدید  $E_{k+1}$  تکرار می‌شود.

این الگوریتم برای سیستم (۱۲) به صورت زیر انجام می‌شود (Borrelli et al, ۲۰۱۴):

تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J(k) = E^T(k+N|k)PE(k+N|k) + \sum_{l=0}^{N-1} [E^T(k+l|k)QE(k+l|k) + u^T(k+l|k)Ru(k+l|k)] \quad (13)$$

دنباله کنترل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$G_i = \begin{bmatrix} B_{i,k} & 0 & \dots & 0 \\ A_{i,k}B & B_{i,k} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A_{i,k}^{N-1}B & A_{i,k}^{N-2}B_{i,k} & \dots & B_{i,k} \end{bmatrix} \quad M_i = \begin{bmatrix} A_{i,k} \\ A_{i,k}^2 \\ \vdots \\ A_{i,k}^N \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\bar{Q} = \text{blockdiag} \{Q, \dots, Q, P\} \quad \bar{R} = \text{blockdiag} \{R, \dots, R\}, \bar{R} > 0$$

$$u_1^*(k) = -\left(G_i^T \bar{Q} G_i + \bar{R}\right)^{-1} G_i^T \bar{Q} M_i x(k)$$

اولین ورودی اعمال می شود و دوباره الگوریتم تکرار می شود. به عنوان مثال اگر  $N=4$  باشد، ورودی به صورت زیر نتیجه می شود:

$$u_1^*(k) = -[1 \ 0 \ 0 \ 0] \left(G_i^T \bar{Q} G_i + \bar{R}\right)^{-1} G_i^T \bar{Q} M_i x(k) \quad (15)$$

#### ۴ آنالیز پایداری

قانون کنترل نهایی از (۱۰) و (۱۵) بدست خواهد آمد.

تحت فرض دوم و شرایط تطبیق، بردار حالت  $E$  در سیستم (۴) و کل عدم قطعیت  $\varphi_i$  در معادله (۳) محدود هستند. بنابراین  $\varphi_i$  محدود است.

از آن جایی که کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل،  $u_1$  را به گونه ای محاسبه می کند که سیستم (۱۲) پایدار است. دلیل محدود بودن عبارت  $g_k \varphi_{i,k} - g_{k-1} \varphi_{i,k-1}$  که در سیستم (۱۴) بصورت ورودی اختلال قابل تغییرات محدود خواهد بود. بنابراین سیستم خطی گسسته (۱۱) خروجی محدود  $E_{k+1}$  را تحت ورودی محدود  $g_k \varphi_{i,k} - g_{k-1} \varphi_{i,k-1}$  تولید می کند. قانون کنترل تأخیر زمانی مقاوم (۱۰) نقش اصلی را در جبران کردن عدم قطعیت بازی می کند. اگر تفاوت بین مدل نامی (۱۲) و سیستم حقیقی (۱) زیاد باشد، سیستم حلقه بسته (۱۱) در معرض عدم قطعیت بزرگ قرار می گیرد. عدم قطعیت باقی مانده در سیستم حلقه بسته (۱۱) از مقدار بزرگ  $g_k \varphi_{i,k} - g_{k-1} \varphi_{i,k-1}$  به مقدار کوچکتر  $g_k \varphi_{i,k} - g_{k-1} \varphi_{i,k-1}$  تغییر می یابد.

در نتیجه، عملکرد سیستم کنترل بوسیله کاهش دادن عدم قطعیت باقی مانده پیشرفت می کند. در صورتی که عدم قطعیت نرم باشد و سیستم روی هر مد به اندازه کافی بماند، عدم قطعیت باقی مانده خیلی کوچک خواهد شد.

#### ۵. نتایج شبیه سازی

الگوریتم کنترل پیشنهاد شده منجر به قانون (۱۵) به همراه جبران عدم قطعیت توسط معادله (۱۰) بیان شده است بر روی سیستم سوئیچینگ با دو زیر سیستم (۱۶) به کار می رود.

$$\ddot{x} = a_i \dot{x} + h_i x + b_i u + d \quad (16)$$

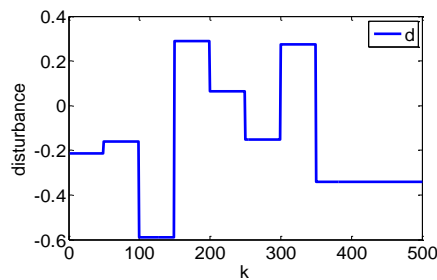
پارامترهای موتور در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای سیستم سوئیچ شونده

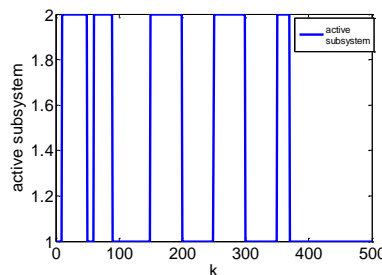
زیر سیستم	$a_i$	$h_i$	$b_i$

۱	-۳	-۴	۵
۲	-۱	-۶	۸

به منظور نمایش عملکرد قانون کنترل پیشنهاد شده در (۱۵) همراه با جبران عدم قطعیت توسط معادله (۱۰) و عملکرد قانون کنترل در (۱۵) بدون جبران عدم قطعیت تعدادی شبیه سازی ارائه خواهد شد. ممکن است عدم قطعیت شامل اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت پارامتری باشد. بنابراین، به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل در حضور عدم قطعیت پارامتری، تمامی پارامترهای مدل نامی که در قانون کنترل به کار رفته اند، برابر ۸۰٪ مقادیر حقیقی آن ها در نظر گرفته شده اند. اغتشاش خارجی اعمالی به سیستم سوئیچ شونده با تابع تصادفی با میانگین صفر و انحراف معیار ۰/۲ در شکل ۱ نمایش داده شده است. اگرچه در این بخش مثال هایی از عدم قطعیت محدود برای چک کردن عملکرد کنترل به کار می بریم، در واقع عدم قطعیت نامعلوم است. پارامترهای موجود در الگوریتم کنترل پیش بین مبتنی بر مدل  $N_{mpc} = 4$  و  $Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$  و  $P = Q^T$  است. سیگنال سوئیچ از پیش تعیین شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱. اغتشاش اعمالی به سیستم سوئیچ شونده

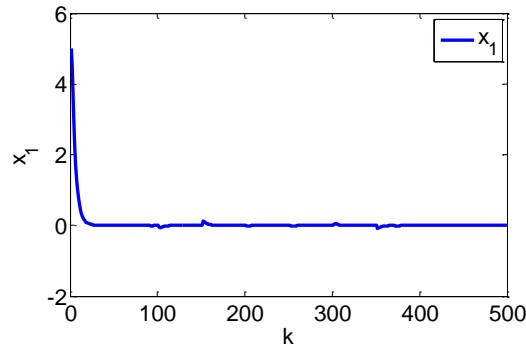


شکل ۲. زیر سیستم فعال در هر مرحله

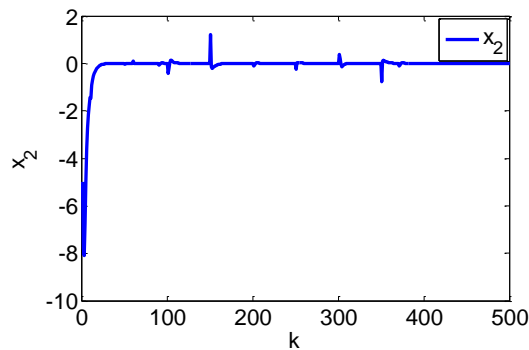
شبیه سازی اول: قانون کنترل (۱۵) و (۱۰) به منظور کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده (۱۶) به کار می بریم. حالت های اولیه برابر  $[0, 5, -0, 5]$  است و طبق تابع هزینه ما به دنبال رسیدن به حالت  $[0, 0]$  است. مسیر حالت ها در شکل های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. ماکزیمم خطای نهایی از مرحله ۴۰۰ به بعد حالت اول و دوم به ترتیب برابر  $4.3 \times 10^{-5}$  و  $8.7 \times 10^{-5}$  است.



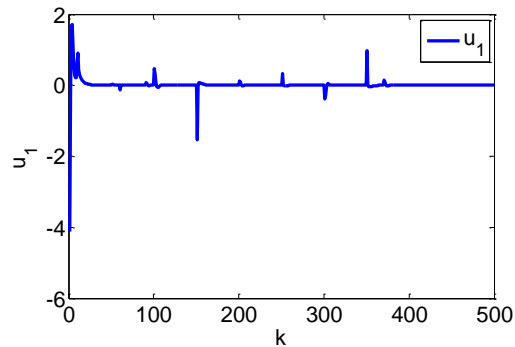
ورودی کنترل برای ما هزینه دارد و سعی در کم کردن آن داریم. ورودی اول که به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل تعیین می شود، در شکل ۵ نمایش داده شده است. ورودی دوم که به جبران عدم قطعیت می پردازد در شکل ۶ نمایش داده شده است. تابع هزینه نتیجه شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.



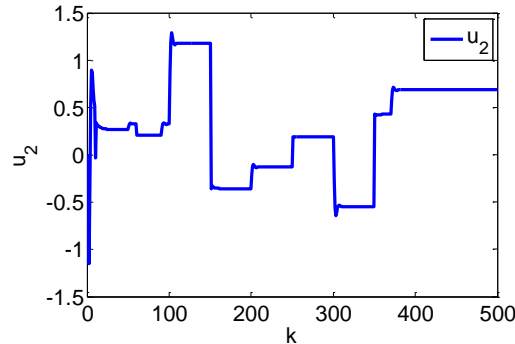
شکل ۳. مسیر حالت اول با جبران عدم قطعیت



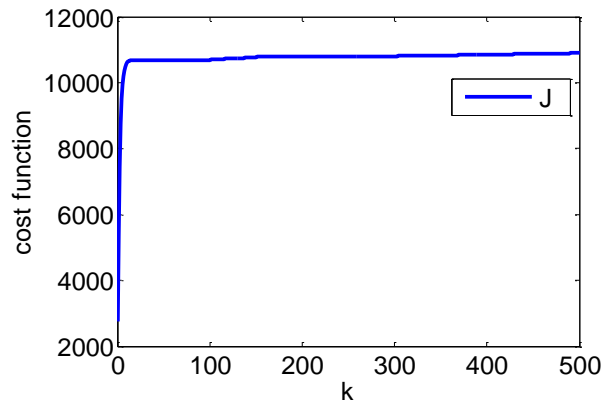
شکل ۴. مسیر حالت دوم با جبران عدم قطعیت



شکل ۵. ورودی اول حاصل از کنترل پیش بین مبتنی بر مدل



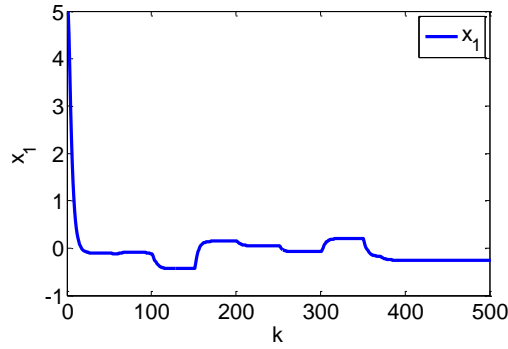
شکل ۶. ورودی جبران کننده عدم قطعیت



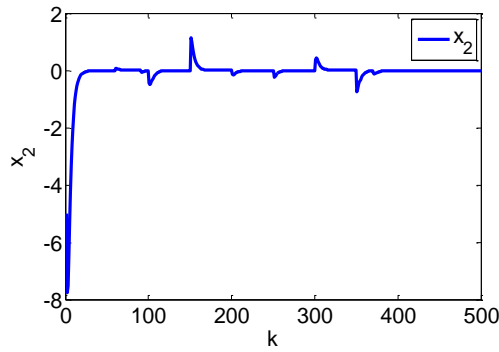
شکل ۷. تابع هزینه نتیجه شده در شبیه سازی اول

شبیه سازی دوم: قانون کنترل (۱۵) به منظور کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده (۱۶) به کار می بریم و ورودی جبران کننده عدم قطعیت را حذف کردیم. طبق شبیه سازی اول، حالت اولیه برابر  $[0.5, -0.5]$  است و طبق تابع هزینه هدف رسیدن به حالت  $[0, 0]$  است. مسیر حالت ها در شکل های ۸ و ۹ نمایش داده شده است. ماکزیمم خطای نهایی از مرحله ۴۰۰ به بعد حالت اول و دوم به ترتیب برابر  $2.5 \times 10^{-1}$  و  $1.7 \times 10^{-4}$  است. مقادیر خطا به دلیل حذف کنترل تاخیر زمانی مقاوم بسیار

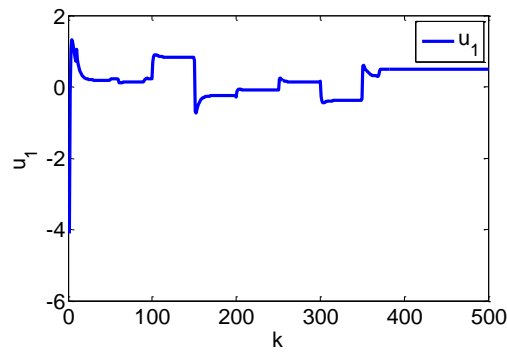
افزایش یافته است. ورودی اول که به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل تعیین می شود، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. به دلیل افزایش خطای حالت در این شبیه سازی نسبت به خطای حالت در شبیه سازی اول، مقدار تابع هزینه ارائه شده در شکل ۱۱ از تابع هزینه در شبیه سازی اول بیشتر است.



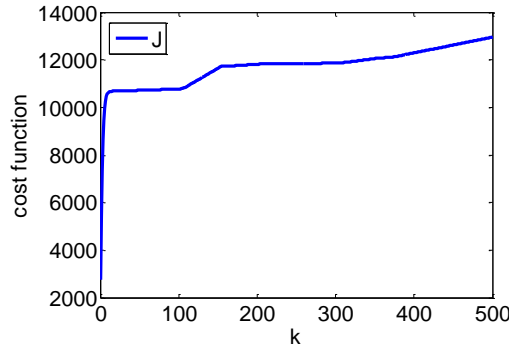
شکل ۸. مسیر حالت اول بدون جبران عدم قطعیت



شکل ۹. مسیر حالت دوم بدون جبران عدم قطعیت



شکل ۱۰. ورودی اول حاصل از کنترل پیش بین مبتنی بر مدل



شکل ۱۱. تابع هزینه نتیجه شده در شبیه سازی دوم

### بحث و نتیجه گیری

در این مقاله کنترل پیش بین مبتنی بر مدل سیستم سوئیچ شونده خطی نامعین با ورودی خارجی ارائه شد. عدم قطعیت می تواند شامل عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش خارجی باشد که رنج وسیعی از عدم قطعیت را در بردارد. ورودی کنترل با هدف مینیمم کردن تابع هزینه طراحی می شود. کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به منظور کنترل بهینه سیستم های معین به صورت موثری استفاده شده است. در این مقاله برای غلبه بر مشکلات به کارگیری روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به

منظور کنترل بهینه سیستم سوئیچ شونده نامعین از کنترل تأخیر زمانی مقاوم به منظور جبران عدم قطعیت استفاده شده است. نتایج شبیه سازی کارائی روش پیشنهادی و همچنین تأثیر مطلوب کنترل تأخیر زمانی مقاوم در جبران عدم قطعیت را به خوبی نشان داد. لازم به ذکر است که در این مقاله سیستم سوئیچ شونده به صورت گسسته در نظر گرفته شده است، بنابراین در این مقاله حداقل زمان ماندگاری برابر با پریود نمونه برداری است. شایان ذکر است که روش پیشنهادی در کاربردهای عملی که سیستم سوئیچ شونده همراه با عدم قطعیت است، با توجه به جبران عدم قطعیت و لحاظ شدن زمان ماندگاری کارائی بسیار مطلوبی در پی دارد.

### منابع :

- خاطره سخنور ماهانی، علی کریم پور و ناصر پریرز، ۱۳۹۲، پایدارسازی سیستم های همگن سوئیچ شونده با استفاده از تابع لیپانوف مشترک، ژورنال کنترل، جلد ۷، شماره ۲، صفحه ۱۹-۱۱.
- محمدرضا رضائی آل، علی وحیدیان کامیاد و ناصر پریرز، ۱۳۹۳، کنترل بهینه سیستم های سوئیچ شونده ناخودگردان: رهیافت نامساوی ماتریسی خطی، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۱.



- Borrelli, F, Bemporad, A and Morari, M, (۲۰۱۴), "predictive control for linear and hybrid systems", Cambridge University Press, ۲۰۱۱, In press (version updated: April ۲۲, ۲۰۱۴).  
Stabilization of switched systems via "Corona. D, Giua. A, and Seatzu, C, (۲۰۱۴),  
Nonlinear Analysis: Hybrid Systems ۱۱, ۱-۱۰."optimal control  
Controllability and Observability of Hybrid "Haddad. A.H, (۱۹۸۹), Ezzine, J and .  
Systems, International Journal of control  
vol. ۴۹, no. ۶, pp .۲۰۴۵-۲۰۵۵.  
Fateh, M.M. (۲۰۰۹), 'Robust Impedance Control of a Hydraulic Suspension System',  
International Journal of Robust and Nonlinear Control, ۲۰, ۸۵۸-۸۷۲.  
Fateh, M.M. (۲۰۱۲a), 'Robust Control of Flexible-joint Robots Using Voltage Control  
Strategy', Nonlinear Dynamics, ۶۷, ۱۵۲۵-۱۵۳۷.  
Fateh, M.M., Ahsani Tehrani, H., and Karbassi, S.M. (۲۰۱۳), 'Repetitive Control of  
Electrically Driven Robot Manipulators', Int. J. Systems Science, vol. ۴۴, no. ۴.  
Optimal switching between controlled "Heydari. A and Balakrishnan. S.N, (۲۰۱۵),  
Neurocomputing ۱۴۹, ۱۶۲۰-۱۶۳۰."subsystems with free mode sequence  
Optimal control algorithms for switched Boolean "Li. F, Lu. X and Yu. Z, (۲۰۱۴),  
Journal of the Franklin Institute ۳۵۱, ۳۴۹۰-۳۵۰۱."network  
Optimal Control of Nonlinear Switched "Lin. Q, Loxton. Rand. K and Teo. L, (۲۰۱۳),  
Periodicals Agency of Shanghai "Systems: Computational Methods and Applications  
University, and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.  
Modelling and optimal control of a time-delayed switched "Liu. C and Gong. Z, (۲۰۱۴),  
Journal of the Franklin Institute ۳۵۱, ۸۴۰-۸۵۶."system in fed-batch process  
Optimal Timing Control of "Liu. X, Zhang. K, Li. S, Fei. S and Haikun Wei, (۲۰۱۴),  
International Journal of Control, "Discrete-Time Linear Switched Stochastic Systems  
Automation, and Systems, ۱۲(۴):۷۶۹-۷۷۶.  
connected, switched Martin. P and Egerstedt. M, (۲۰۱۰), "Optimal timing control of inter  
systems with applications to robotics marionettes", Journal of Discrete Event Dynamic  
Systems, vol. ۲۰, no. ۲, pp.۲۳۳-۲۴۸.  
Nikolakopoulos. G and Alexis. K, (۲۰۱۳), "Switching networked attitude control of an  
unmanned quadrotor", International Journal of Control, Automation and Systems, vol.  
۱۱, no. ۲, pp. ۳۸۹-۳۹۷.

- Optimal tracking control of a class of nonlinear "Qin. C, Zhang. H, Luo. Y, (٢٠١٤),  
, Neural Comput "discrete-time switched systems using adaptive dynamic programming  
& Applic , ٢٤:٥٣١-٥٣٨.
- A numerical framework for optimal control of "Riedinger. P and Morarescu. I, (٢٠١٣),  
, Mathematics and "switched input affine nonlinear systems subject to path constraint  
Computers in Simulation ٩٥, ٦٣-٧٧.
- Optimal Control for Switched Systems with Pre-"Sigal. E, Ben-Asher. Joseph Z, (٢٠١٣),  
, Springer Science+Business Media "defined Order and Switch-Dependent Dynamics  
New York.
- Optimal control of switched "Zhai. J, Shen. B, Gao. J, Feng. E and Yin. H, (٢٠١٤),  
, Journal of Computational and Applied "systems and its parallel optimization algorithm  
Mathematics ٢٦١, ٢٨٧-٢٩٨.
- Optimal control of switched "Zhai. J, Shen. B, Gao. J, Feng. E and Yin. H, (٢٠١٤),  
, Journal of Computational and Applied "systems and its parallel optimization algorithm  
Mathematics ٢٦١, ٢٨٧-٢٩٨.
- switched positive linear Zhao. X, Zhang. L, Shi. P and Liu. M, (٢٠١٢), "Stability of  
١١٣٢-١١٣٧. time switching", Automatica, vol. ٤٨, no. ٦, pp. systems with average dwell  
of switched positive linear Zhao X, Zhang. L and Shi. P, (٢٠١٣), "Stability of a class  
pp. ٥٧٨-٥٨٩. J. of Robust and Nonlinear Control, vol. ٢٣, no. ٥. time-delay systems", Int.