



## شناسایی رفتار عملگر از جنس کامپوزیت‌های فلزی پلیمری یونی به روش پارامترهای وابسته به متغیر حالت

علی یوسفی<sup>1</sup>، حسین معین خواه<sup>2\*</sup>، داود محبی کلهری<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

3- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\* زاهدان، صندوق پستی 987-98155، hmoein@eng.usb.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آبان 1394

پذیرش: 04 دی 1394

ارائه در سایت: 26 دی 1394

کلید واژگان:

کامپوزیت فلزی پلیمری یونی

پلیمر الکترواکتیو

شناسایی

پارامتر وابسته به حالت

### چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری فلزی یونی گروهی از مواد پلیمری الکترواکتیو هستند که بر اثر اعمال ولتاژهای پایین و در نتیجه حرکت کاتیون‌های داخل پلیمر، دچار تغییر شکل مکانیکی می‌شوند. این مواد کاربردهای زیادی در علوم مختلف از قبیل رباتیک، تجهیزات مهندسی پزشکی و ماهیچه-های مصنوعی دارند. از آنجا که در مکانیزم تحریک این عملگرها اصول شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی حاکم است، بنابراین جزو مسایل چند حوزه‌ای قرار می‌گیرند. لذا مدل کردن آن‌ها براساس قوانین فیزیکی کار بسیار پیچیده و طاقت فرسای است. در این پژوهش، یک مدل گسسته جدید با پارامترهای وابسته به متغیرهای حالت جهت شناسایی رفتار غیرخطی عملگر کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی ارائه می‌شود. رفتار غیرخطی سیستم شناسایی شده، توسط ضرایبی که تابعی از حالت‌های ورودی و خروجی هستند نشان داده می‌شود. با استفاده از الگوریتم پارامترهای وابسته به متغیر حالت (اس‌دی‌پی) مدل عملگر از اطلاعات ورودی-خروجی سیستم شناسایی شده و پارامترهای متغیر سیستم که تابعی از ورودی‌ها و خروجی‌های لحظات قبل هستند تخمین زده می‌شوند. روش پیشنهادی با نتایج موجود مقایسه شده که نتایج بدست آمده بیانگر دقت بالای مدل پیشنهادی می‌باشد.

## Identification of Ionic Polymer Metal Composite Actuator Using State-Dependent Parameter Method

Ali Yousefi<sup>1</sup>, Hossein Moeinkhah<sup>1\*</sup>, Davod Mohebi Kalhori<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Department of Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

\*P.O.B. 98155-987, Zahedan, Iran, hmoein@eng.usb.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 November 2015  
Accepted 25 December 2015  
Available Online 16 January 2016

#### Keywords:

Ionic polymer metal composite (IPMC)  
Electro-active polymer (EAP)  
Identification  
State-dependent parameter (SDP)

### ABSTRACT

Ionic polymer metal composite (IPMC) actuator is a group of electro-active polymers (EAPs) which bend in response to a relatively low electrical voltage because of the motion of cations in the polymer network. IPMC has a wide range of applications in robotics, biomedical devices and artificial muscles. The modeling of the IPMC actuator is a multi-physics task as it involves the electricity, chemistry, dynamics and control fields. Due to its complexity and nonlinearity, IPMC modeling is difficult in terms of mathematics and its behavior is still not fully agreed upon by researchers. This paper presents a novel discrete-time model with state-dependent parameters (SDP) for identification of the nonlinear response of an IPMC actuator. A single-input single-output nonlinear identification algorithm is formulated and demonstrated for an IPMC actuator that exhibits both soft and hard nonlinearities. The nonlinear characteristics of the identified system are represented with coefficients which are a function of the input and output states. Following the SDP algorithm, the model is identified from input-output data to represent the model parameters as functions of past inputs and outputs. The proposed modeling approach is validated using an existing model and shows exact representation of the non-linear behavior of the IPMC actuator.

### 1- مقدمه

شان در صنایع مختلف از قبیل رباتیک، وسایل مهندسی پزشکی و ماهیچه‌های مصنوعی شدت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [1-3]. این مواد برای اولین بار در سال 1992، توسط شاهین‌پور کشف شد و در سال 1998 به‌طور رسمی معرفی گردید [4]. بیشترین کاربرد این مواد به‌عنوان عملگر و حس‌گر است. به‌نظر می‌رسد با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد و قابلیت‌های ویژه‌ای که جهت کار در شرایط آب و هوایی مختلف (از جمله

کامپوزیت‌های پلیمری فلزی یونی<sup>1</sup>، گروه جدیدی از مواد الکترواکتیو پلیمری هستند، که در مواجهه با یک میدان الکتریکی کوچک تغییر شکل‌های وسیع از خود نشان می‌دهند. اخیراً مواد الکترواکتیو پلیمری به خاطر کاربرد وسیع-

1- Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Yousefi, H. Moeinkhah, D. Mohebi Kalhori, Identification of Ionic Polymer Metal Composite Actuator Using State-Dependent Parameter Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 300-306, 2016 (in Persian)

می‌آیند. این پارامترها بیانگر مفاهیم فیزیکی یا فرآیندی هستند [14,13]. اما در مدل فیزیکی، که پیشرفته‌ترین و درعین حال پیچیده‌ترین روش برای شناسایی رفتار یک عملگر کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی است، قوانین حاکم بر انتقال یون‌ها و همچنین اثرات الکتریکی - مکانیکی و الکتریکی - شیمیایی مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مدل‌سازی این مواد به این روش، باید معادلات دیفرانسیل با مشتق‌های جزئی مورد تحلیل قرار گیرند [15-17]. به دلیل پیچیدگی مدل‌های فیزیکی بسیاری از محققان از مدل‌های جعبه سیاه و جعبه خاکستری استفاده نموده‌اند. از جمله سیستم‌هایی که در رابطه با شناسایی رفتار این نوع عملگر تاکنون ارائه شده است، می‌توان به مدل نام و همکاران که در سال 2012 ارائه شد، اشاره نمود [18]. سیستم آن‌ها یک مدل جعبه سیاه و غیرخطی فازی خودکار واپس‌گرا به همراه بهینه‌سازی به روش الگوریتم کلونی زنبور عسل بود. در سال 2013، عنابستانی و همکاران از یک مدل جعبه سیاه جهت شناسایی رفتار عملگر از جنس کامپوزیت‌های پلیمری فلزی یونی استفاده کردند [19].

مدل آن‌ها نیز شامل 2 بخش اصلی بود. یک بخش شامل یک سیستم فازی - عصبی تطبیقی و بخش دیگر شامل یک سیستم خودکار واپس‌گرا با ورودی خارجی غیرخطی بود. در سال 2014 کاپونتو و همکاران یک مدل جعبه خاکستری را برای شناسایی رفتار عملگرهای موردنظر پیشنهاد دادند [20]. آن‌ها خواص غیرخطی این نوع عملگر را با یک مدار الکتریکی مدل کردند. همچنین آن‌ها توابع یک و چند هدفه‌ی بهینه‌سازی را جهت تخمین پارامترهای مدل خود به کار بردند. آن‌ها برای مقایسه تغییر مکان مدل پیشنهادی خود و تغییر مکان واقعی عملگر از الگوریتم ژنتیک سود بردند و سعی نمودند که خطای موجود را به کمک الگوریتم ژنتیک به حداقل برسانند.

یکی از روش‌های خاص، جهت شناسایی رفتار سیستم‌های غیرخطی روش پارامترهای وابسته به متغیر حالت (اس‌دی‌پی)<sup>2</sup> است. این روش اولین بار توسط یانگ در سال 1984 ارائه گردید [21]. در این روش برای شناسایی تأثیر هر پارامتر بر سیستم مورد شناسایی، در ابتدا کل اطلاعات سیستم را بر مبنای همان پارامتر منظم کرده و پس از انجام عملیات شناسایی اطلاعات سیستم مجدداً به حالت اولیه خود بازگردانده می‌شود. این عمل به تعداد پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم تکرار می‌شود. در واقع با این عمل تأثیر هر پارامتر بر سیستم به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت با جمع کردن تأثیر تمامی پارامترهای سیستم مورد بررسی، خروجی سیستم را می‌توان پیش‌بینی نمود. تاکنون از این روش استفاده‌های زیادی جهت شناسایی و کنترل سیستم‌های مختلف غیرخطی شده است. از آن جمله می‌توان به بکارگیری این روش توسط تیلور و همکاران اشاره نمود [22]. آن‌ها با ترکیب کردن روش اس‌دی‌پی با سیستم کنترلی خود، متوجه شدند که سیستم موردنظر به‌صورت مطلوب‌تری قابلیت کنترل پذیری دارد. آن‌ها با بکارگیری این روش توانستند یک بیل مکانیکی را خیلی بهتر از قبل مورد شناسایی و کنترل قرار دهند. در سال 2005، کلنو و همکاران با استفاده از اس‌دی‌پی، تأثیرات پارامترهای گوناگون را بر نرخ تورم ایالات متحده آمریکا در سال‌های 1988 تا 2003 را بررسی کردند [23].

در این پژوهش برای اولین بار سعی خواهد شد تا رفتار عملگرهای کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی، به کمک روش اس‌دی‌پی مورد شناسایی قرار گیرد. جهت دقت بیشتر پاسخ دو پارامتر مربوط به ورودی‌های لحظه‌های قبل

محیط‌های مرطوب) را دارند، در آینده‌ای نزدیک جایگزینی مناسب برای بسیاری از حس‌گرهای سنتی باشند. به‌طور کل عملگرهای ساخته شده از این مواد، بسیار سبک وزن و هوشمند هستند و از یک غشای پلیمری که توسط دو الکتروود احاطه شده است، تشکیل می‌شوند و آن‌ها را می‌توان در ابعاد و اندازه‌های گوناگونی با توجه به کاربرد موردنظر تولید نمود [5,6]. درعین حال این مواد دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. از جمله این‌که نیروی تولیدی آن‌ها به‌عنوان عملگر خیلی زیاد نیست و همچنین نمی‌توان به آن‌ها ولتاژها و فرکانس‌های بالا اعمال کرد و باید در محدوده‌ی مشخصی ولتاژهای ورودی اعمال گردد تا پدیده‌ی الکترولیز رخ ندهد [7].

به‌طور خاص، اختلاف پتانسیل و ولتاژ اعمال شده به این دو الکتروود، باعث حرکت یون‌های با بار مخالف شده و سبب جمع شدن یون‌ها به یک سمت و در نتیجه خم شدن عملگر می‌شود و در نتیجه‌ی آن، تغییر شکل مایکروسکوپی در قطعه ایجاد می‌گردد. در این حالت ماده به‌عنوان عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرد [8]. (شکل 1) رفتار عملگر موردنظر را در مواجهه با ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد.

همچنین این مواد به‌عنوان حس‌گر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، به این صورت که با تحمیل تغییر شکل مکانیکی به قطعه، حرکت اجباری در یون‌ها ایجاد شده و در نتیجه باعث تولید اختلاف پتانسیل در دو الکتروود می‌شود [9]. با وجود این‌که مواد فوق کاربردهای روزافزونی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند و دامنه‌ی کاربرد آن‌ها به‌طور چشمگیری در حال افزایش است، اما هنوز محققان در حال تحقیق درباره شناسایی و پیش‌بینی رفتار این مواد در برابر ولتاژهای ورودی مختلف با فرکانس‌های گوناگون می‌باشند. زیرا شرایط آب و هوایی مختلف، جنس الکتروودها، نوع پلیمر به کار گرفته‌شده، ابعاد قطعه و بروز برخی پدیده‌ها از جمله بازگشت به حالت پایدار<sup>1</sup> که در این مواد رخ می‌دهد [10,11]، کار شناسایی رفتار آن‌ها را پیچیده کرده است.

تاکنون مدل‌های مختلفی برای شناسایی رفتار و عملکرد مواد مذکور ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را در 3 گروه کلی: 1- مدل جعبه سیاه، 2- مدل جعبه خاکستری و 3- مدل جعبه سفید (مدل فیزیکی) تقسیم‌بندی نمود. در مدل جعبه سیاه، مدل تنها بر اساس روابط بین ورودی‌ها و پاسخ سیستم به دست می‌آید. در این حالت، مدل به‌شدت به نمونه‌ی مورد بررسی و شرایط آزمایش وابسته است. بنابراین هر چه تعداد آزمایش‌ها در این مدل بیشتر باشد، نتایج به‌دست‌آمده قابل اعتمادتر خواهند بود [12].

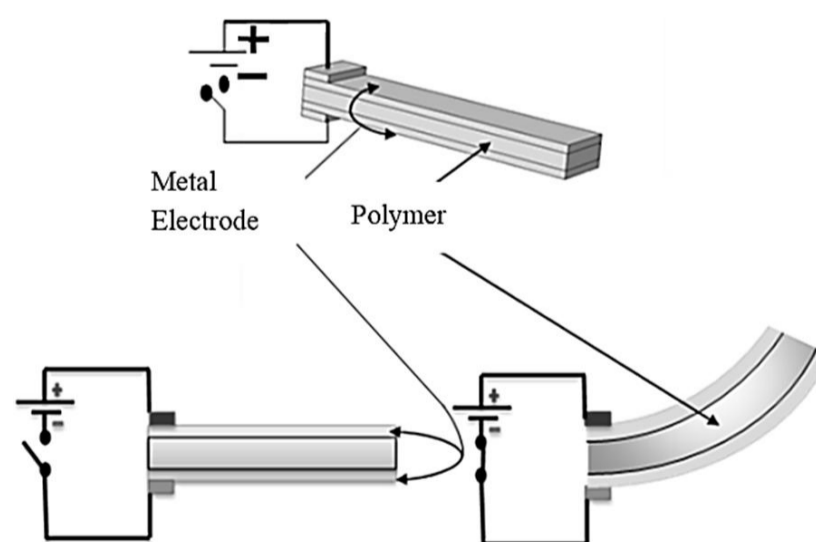


Fig. 1 The effect of applying voltage to the IPMC actuator

شکل 1 اثر اعمال ولتاژ بر عملگر کامپوزیت پلیمری فلزی یونی در مدل جعبه خاکستری، پارامترهای ماده بر اساس نتایج تجربی به دست

جدول 1 معیار یانگ برای انتخاب مدل مناسب جهت شناسایی سیستم

Table 1 Young's criterion for choosing an appropriate model for system identification

R	den	num	$\delta$	YIC
1	3	3	2	-9.786
2	3	3	1	-6.515
3	3	2	2	-14.149
4	3	1	1	-14.126
5	3	2	1	-7.273
6	3	3	3	-9.656
7	3	1	2	-11.875
8	3	2	3	-11.689
9	2	3	2	-5.510
10	2	3	3	-6.989
11	2	3	1	-1.353
12	2	2	2	-7.524
13	2	2	3	-2.745
14	2	1	3	-11.782
15	3	1	3	-8.761
16	2	2	1	-8.348
17	3	3	4	-8.646
18	2	1	2	-10.706
19	2	3	4	-5.536
20	2	2	4	-8.020

R: شماره سطر هر یک از مدل‌های پیشنهادی

den: متغیرهای مربوط به خروجی‌های لحظه‌های قبل

num: متغیرهای مربوط به ورودی‌های لحظه‌های قبل

$\delta$ : تعداد لحظه‌های تأخیر سیستم

YIC: معیار یانگ

طبق معیار یانگ هر چه عدد مربوط به این معیار مقدار کوچک‌تری به خود بگیرد، مدل مربوط به آن سطر جهت شناسایی با ارزش‌تر و دارای خطای کمتری است. جهت انتخاب مدل موردنظر از بین این مدل‌های پیشنهادی باید نکات زیادی را مدنظر قرار داد. ممکن است خطای یک مدل نسبت به مدلی دیگر کمی کمتر باشد اما در مقابل تعداد متغیرهای آن بسیار زیاد باشد، در نتیجه همیشه باید بین میزان خطای موجود و پیچیدگی سیستم یک توازن برقرار کرد. زیرا در سیستمی که بیش‌ازحد پیچیده و دارای متغیرهای خیلی زیاد است احتمال ایجاد خطاهای محاسباتی نیز بالاتر می‌رود.

با توجه به توضیحات فوق، در این پژوهش دو پارامتر مربوط به ورودی لحظه‌های قبل و سه پارامتر مربوط به خروجی لحظه‌های قبل، مربوط به مدل سطر سوم (جدول 1) که در آن معیار یانگ دارای کمترین مقدار در بین مدل‌های پیشنهادی دیگر است، جهت شناسایی در نظر گرفته شده است. بنابراین (رابطه 2) به صورت (رابطه 3) خلاصه می‌شود.

$$\Phi^T(k) = [y(k-1) \ y(k-2) \ y(k-3) \ u(k-2) \ u(k-3)] \quad (3-الف)$$

$$\theta(k) = \{\alpha_1\{\Phi^T(k)\}, \alpha_2\{\Phi^T(k)\}, \alpha_3\{\Phi^T(k)\}, \beta_0\{\Phi^T(k)\}, \beta_1\{\Phi^T(k)\}\}^T \quad (3-ب)$$

در (رابطه 3)، مجهولات مسئله که باید مورد شناسایی قرار بگیرند پارامترهای مدل یا همان بردار  $\theta(k)$  می‌باشند. بردار  $\Phi^T(k)$  که حالت‌های لحظات قبل و مقادیر  $y(k)$  که خروجی واقعی سیستم است، معلومات مسأله‌ی مورد بررسی هستند.

(شکل 2) نمودار گردش شناسایی به روش اس‌دی‌پی را نشان می‌دهد.

و سه پارامتر مربوط به خروجی لحظه‌های قبل، جهت شناسایی در نظر گرفته می‌شود. ساختار کلی این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود.

توضیحات تفصیلی در مورد روش شناسایی اس‌دی‌پی به همراه فرمولاسیون مسأله، در بخش دو ارائه خواهد شد. در بخش سوم شناسایی رفتار عملگر موردنظر و تحلیل و ارزیابی مدل پیشنهادی براساس نتایج موجود مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها بحث و نتیجه‌گیری در بخش چهارم ارائه خواهد شد.

## 2- روش شناسایی پارامترهای وابسته به متغیر حالت

همان‌طور که مشخص گردید عملگرهای کامپوزیتی پلیمری فلزی یونی، دارای رفتار به شدت غیرخطی و متغیر با زمان هستند. اگر پارامترها تابعی از متغیرهای حالت یا ورودی باشند بنابراین سیستم به شدت غیرخطی بوده و در این حالت روش پارامترهای متغیر با زمان (تی‌وی‌پی)<sup>1</sup>، قادر به تخمین رفتار غیرخطی سیستم نخواهد بود. لذا در این‌گونه مسائل روش قدرتمند اس‌دی‌پی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده‌ی این روش مدلینگ، اولین بار توسط یانگ ارائه شد [21]. در این پژوهش برای اولین بار از روش تخمین پارامترهای تفسیرپذیر (اس‌دی‌پی)، جهت شناسایی رفتار عملگرهای کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی، استفاده شده است. این روش شناسایی مشابه شناسایی به روش تی‌وی‌پی (فیلتر کالمن) است، با این تفاوت که در روش تی‌وی‌پی، داده‌ها برحسب زمان به‌طور طبیعی مرتب سازی شده‌اند و چون زمان بنا بر ماهیت خود دارای توالی است احتیاجی به مرتب کردن داده‌ها برحسب زمان نداریم. ولی در روش اس‌دی‌پی، بحث اصلی یکنواخت سازی و مرتب کردن داده‌ها برحسب پارامترهای وابسته است. در واقع اگر بتوان داده‌ها را برحسب پارامتر یا پارامترهای موردنظر مرتب‌سازی نمود، شناسایی رفتار سیستم غیرخطی توسط روش اس‌دی‌پی به‌خوبی انجام می‌شود. در غیر این صورت این روش قادر به شناسایی رفتار سیستم نخواهد بود.

در حالت ساده تک ورودی-تک خروجی، مدل ریاضی حاکم بر مسئله جهت شناسایی سیستم مورد بررسی به صورت (رابطه 1) در نظر گرفته می‌شود.

$$y(k) = \Phi^T(k)\theta(k) + e(k); \quad e(k) = \mathcal{N}(0, \hat{\sigma}^2) \quad (1)$$

که  $y(k)$  خروجی واقعی سیستم یا همان جابجایی انتهای عملگر در هر لحظه،  $\Phi$  بردار حالت‌های سیستم و  $\theta$  بردار پارامترهای مدل می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\Phi^T(k) = [y(k-1) \ y(k-2) \ \dots \ y(k-n) \ u(k-\delta) \ \dots \ u(k-\delta-m)] \quad (2-الف)$$

$$\theta(k) = \{\alpha_1\{\Phi^T(k)\}, \alpha_2\{\Phi^T(k)\}, \dots, \alpha_n\{\Phi^T(k)\}, \beta_0\{\Phi^T(k)\}, \beta_1\{\Phi^T(k)\}, \dots, \beta_m\{\Phi^T(k)\}\}^T \quad (2-ب)$$

در رابطه (2)،  $\alpha_i\{\Phi^T(k)\}, i = 1, 2, \dots, n$  و  $\beta_j\{\Phi^T(k)\}, j = 0, 1, \dots, m$  پارامترهای وابسته به حالت می‌باشند.

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل جهت شناسایی به روش اس‌دی‌پی، معیارهای گوناگونی وجود دارد. در این پژوهش با توجه به ورودی اولیه‌ای که جهت آموزش شبکه به سیستم اعمال شد، معیار یانگ برای انتخاب تعداد متغیرهای حالت در نظر گرفته شده است. (جدول 1)، بیست مدل پیشنهادی جهت در نظر گرفتن متغیرهای حالت را نشان می‌دهد.

به دست آمده، به خوبی توانایی پیش‌بینی رفتار غیرخطی عملگر را دارا می‌باشد. بنابراین معیار مناسبی برای سنجش میزان دقت روش شناسایی مورد بررسی در این پژوهش خواهد بود. تابع تبدیل مورد استفاده به صورت (رابطه‌ی 13) ارائه می‌شود.

$$T(s) = \frac{0.0003917s^2 + 0.0182s + 0.01998}{s^4 + 7.923s^3 + 30.76s^2 + 151s + 66.79} \quad (13)$$

با اعمال سیگنال‌های شناسایی مناسب به تابع تبدیل (رابطه‌ی 13)، ورودی و خروجی‌های لازم برای شناسایی به روش اس‌دی‌پی به دست می‌آید. سپس با استفاده از الگوریتم ارائه شده در (بخش 2-1) پارامترهای متغیر موردنظر تخمین زده شده و در نهایت با ارائه یک مدل ریاضی که وابسته به ورودی‌ها و خروجی‌های لحظات قبل است، رفتار عملگر کامپوزیت فلزی پلیمری یونی نسبت به سیگنال‌های دلخواه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پس از انجام شناسایی به روش مذکور، تابعی به صورت (رابطه‌ی 14)

برای مدل کردن رفتار عملگر موردنظر ارائه می‌شود.

$$y(k) = \alpha_1 \{\Phi^T(k)\}y(k-1) + \alpha_2 \{\Phi^T(k)\}y(k-2) + \alpha_3 \{\Phi^T(k)\}y(k-3) + \beta_0 \{\Phi^T(k)\}u(k-2) + \beta_1 \{\Phi^T(k)\}u(k-3) + e(k) \quad (14)$$

با توجه به این که یکی از سیگنال‌های پرکاربرد و مهم در زمینه‌ی شناسایی یک سیستم دینامیکی سیگنال نویز سفید است، این سیگنال را به سیستم اعمال کرده و عمل شناسایی رفتار عملگر انجام می‌شود. ضرایب تابع ارائه شده در (رابطه‌ی 14)، که وابسته به پارامترهای مدل مورد شناسایی می‌باشند، با بالاترین دقت ممکن شناسایی شده و مقادیر آن‌ها به دست می‌آیند. بدیهی است که تابع فوق براساس ورودی و خروجی‌های گذشته‌ی سیستم، عمل شناسایی را انجام داده و سپس با تخمین ضرایب این تابع می‌توان پس از آن واکنش سیستم را به هر ورودی دلخواه دیگر پیش‌بینی و مورد ارزیابی قرار داد.

در روش اس‌دی‌پی، برای این که تغییرات خروجی ملایم‌تر شود و بتوان عمل شناسایی را به خوبی انجام داد، لازم است که خروجی سیستم را مرتب‌سازی کرد. (شکل 3)، خروجی مرتب‌سازی شده سیستم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در (شکل 3) مشخص است، تغییرات برحسب زمان بسیار شدید است. ولی زمانی که خروجی مرتب شده و برحسب خروجی‌های لحظه‌ی قبل رسم می‌شود، تغییرات خروجی یکنواخت و نرم‌تر خواهد شد.

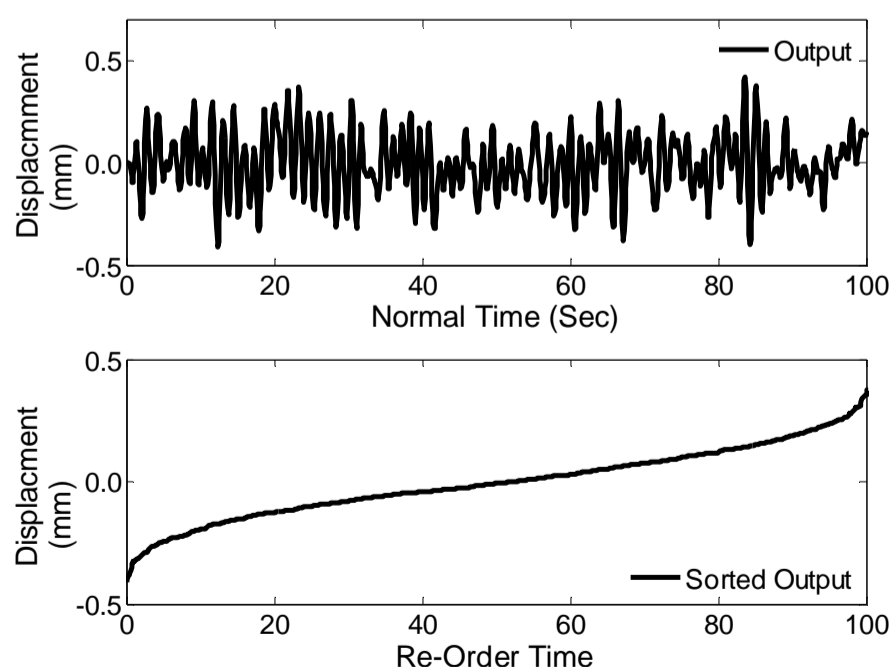


Fig. 3 The main output and sorted output of the system

شکل 3 خروجی اصلی و خروجی مرتب‌سازی شده سیستم

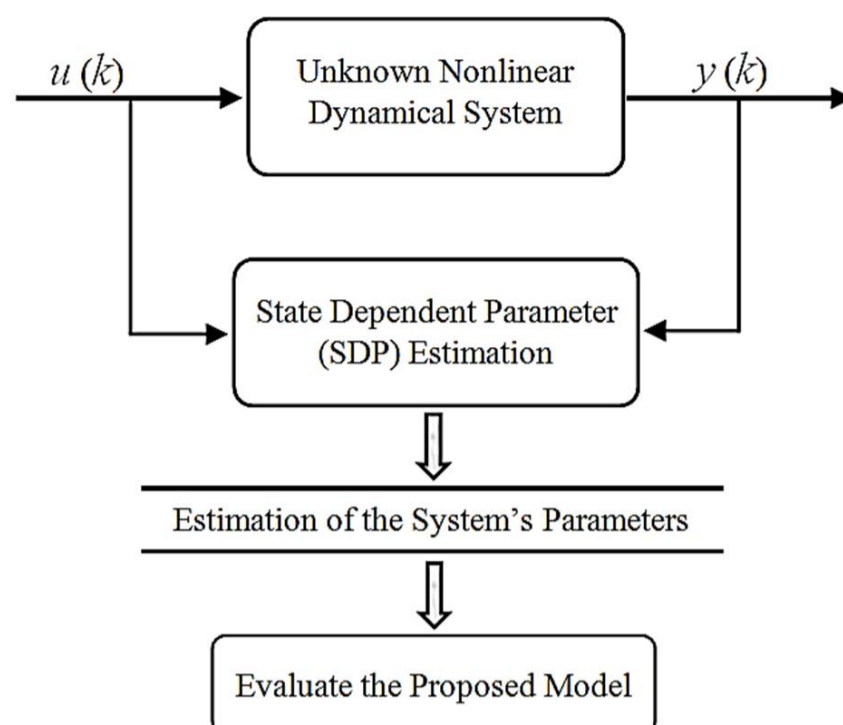


Fig. 2 Flowchart of the state-dependent parameters estimation method

شکل 2 نمودار گردش روش شناسایی اس‌دی‌پی

### 1-2- الگوریتم شناسایی تفسیرپذیر

جهت شناسایی پارامترهای وابسته از الگوریتم بازگشتی تفسیرپذیر زیر که شامل سه قسمت اصلی است، استفاده می‌شود [21].

الف - پیش‌بینی

$$\hat{\theta}(k|k-1) = A\hat{\theta}(k-1) \quad (4)$$

$$P(k|k-1) = AP(k-1)A^T + DQ_{nvr}D^T \quad (5)$$

ب - تصحیح

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k|k-1) + g(k)\{y(k) - \Phi^T(k)\hat{\theta}(k|k-1)\} \quad (6)$$

$$g(k) = P(k|k-1)\Phi(k)[1 + \Phi^T(k)P(k|k-1)\Phi(k)]^{-1} \quad (7)$$

$$P(k) = P(k|k-1) - g(k)\Phi^T(k)P(k|k-1) \quad (8)$$

$$P^*(k) = \hat{\sigma}^2 P(k) \quad (9)$$

ج - هموارسازی پس‌رو

$$\hat{\theta}(k|N) = \hat{\theta}(k) - P^*(k)A^T\lambda(k) \quad (10)$$

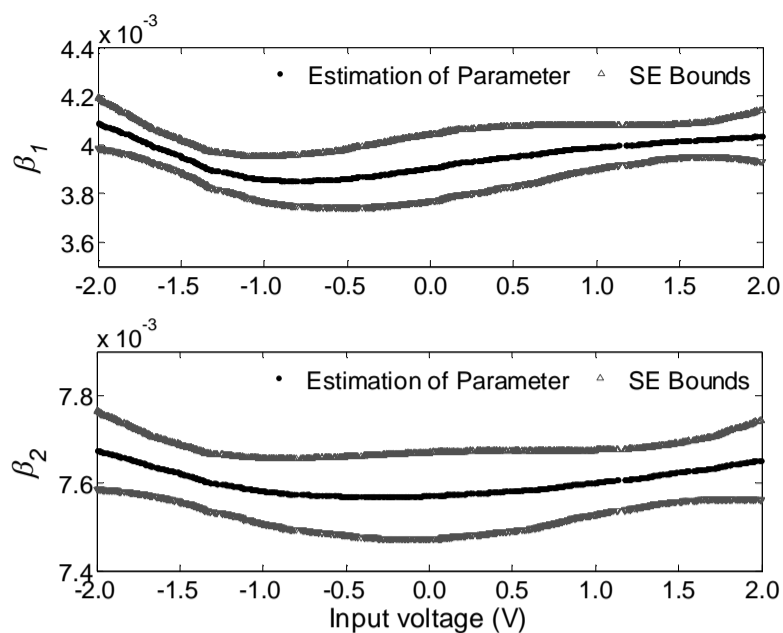
$$\lambda(k-1) = \left[ I_p - P^*(k) \frac{\Phi(k)\Phi^T(k)}{\hat{\sigma}^2} \right]^T \left\{ A^T\lambda(k) - \frac{\Phi(k)}{\hat{\sigma}^2} [y(k) - \Phi^T(k)A\hat{\theta}(k-1)] \right\} \quad (11)$$

به ازای  $\lambda(N) = 0$  مقدار  $P^*(k|N)$  طبق (رابطه‌ی 12) به دست می‌آید.

$$P^*(k|N) = P^*(k) + P^*(k)AP^*(k+1|k)^{-1} [P(k+1|N) - P^*(k+1|k)P^*(k+1|k)]^{-1}AP^*(k) \quad (12)$$

### 3- شناسایی رفتار عملگر به روش اس‌دی‌پی و ارزیابی آن

جهت شناسایی رفتار عملگر از تابع تبدیل به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی موجود استفاده شده است [24,17]. این تابع تبدیل، که پس از آزمایش‌های گوناگون بر روی چندین نمونه از عملگر در ولتاژها و فرکانس‌های مختلف



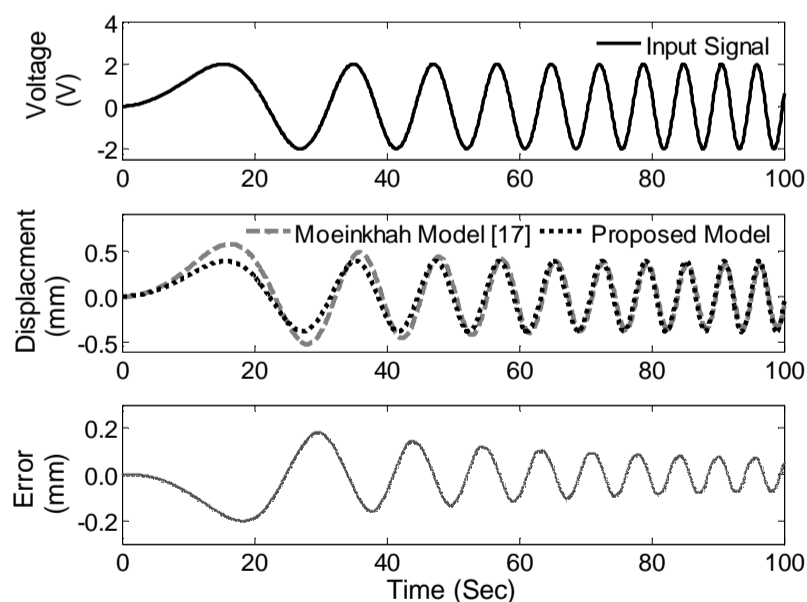
**Fig. 6** Changes coefficient input values according to the input white noise signal

شکل 6 تغییرات ضرایب ورودی تابع پیشنهادی براساس ورودی سیگنال نویز سفید

حال با داشتن تغییرات پارامترهای نشان داده شده در (شکل‌های 5 و 6) و با استفاده از (رابطه 14) می‌توان پاسخ سیستم را به ورودی‌های مختلف پیش-بینی نمود. جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، خروجی تابع حاصل از شناسایی به روش اس‌دی‌پی با تغییر مکان واقعی عملگر [17] مقایسه می‌شود.

(شکل 7) پاسخ عملگر به ورودی سیگنال از نوع سینوسی فرکانس متغیر<sup>2</sup> را نشان می‌دهد. همان‌طور که در (شکل 7) مشخص شده است، نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی به روش اس‌دی‌پی به‌طور قابل قبولی به نتایج موجود نزدیک است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد در پالس اول اندکی خطا وجود دارد، اما سیستم شناسایی سریعاً واکنش عملگر را شناسایی کرده و پس از آن خطا به‌طور چشمگیری کاهش یافته است.

شکل‌های 8 و 9، نیز پاسخ مدل پیشنهادی را به ترتیب به سیگنال‌های موج مربعی و دندانه اره‌ای نشان می‌دهند. در مورد پرش‌هایی که در منحنی‌های عکس‌العمل عملگر در هنگام اعمال این سیگنال‌ها اتفاق می‌افتد، باید به خاصیت ذاتی سیگنال‌های پله‌ای اشاره کرد که ماهیت پیدایش آن‌ها از برهم-کنش چندین سیگنال موجی با دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف است و به

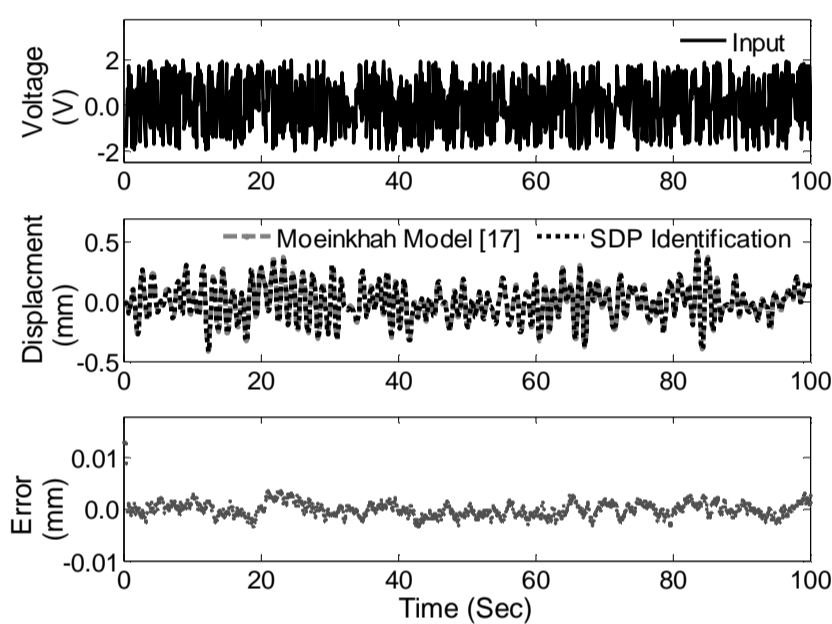


**Fig. 7** Identification of the system response by the SDP method respect to the Chirp input signal

شکل 7 شناسایی پاسخ سیستم به روش اس‌دی‌پی نسبت به ورودی سیگنال سینوسی با فرکانس متغیر

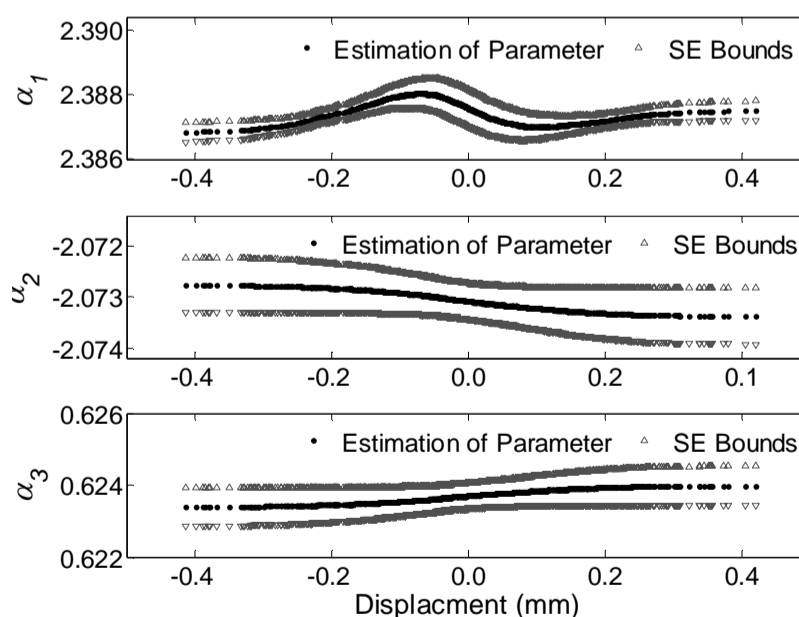
حال با اعمال ورودی و خروجی مربوط به سیگنال نویز سفید، به الگوریتم ارائه شده در (بخش 2-1)، تغییرات پارامترهای سیستم به‌دست آمده و عمل شناسایی انجام خواهد شد. (شکل 4) بیانگر رفتار شناسایی شده عملگر، تحت سیگنال نویز سفید است.

تغییرات پارامترهای وابسته به متغیرهای حالت مربوط به خروجی‌ها و ورودی‌های لحظات قبل سیستم به همراه باند خطای استاندارد<sup>1</sup> آن‌ها به ترتیب در (شکل 5) و (شکل 6) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترها با دقت خوبی شناسایی شده‌اند. دلیل کاهش دقت منحنی‌های شناسایی شده (کم شدن پهنای باند خطای استاندارد) در بعضی محدوده‌ها، عدم وجود تعداد کافی داده‌های شناسایی شده در آن نواحی است. در مورد باند استاندارد خطا، ذکر این نکته ضروری است که هر جا پهنای این باند افزایش یافته است، بدین معنی است که در آن محدوده مقادیر به‌دست آمده برای پارامترها قابل‌اعتمادتر و جایی که پهنای باند خطا کاهش می‌یابد، مقادیر به‌دست آمده کمتر قابل اعتماد هستند.



**Fig. 4** Identification of the system response by SDP method based on the white noise input signal

شکل 4 شناسایی پاسخ سیستم به روش اس‌دی‌پی نسبت به ورودی سیگنال نویز سفید

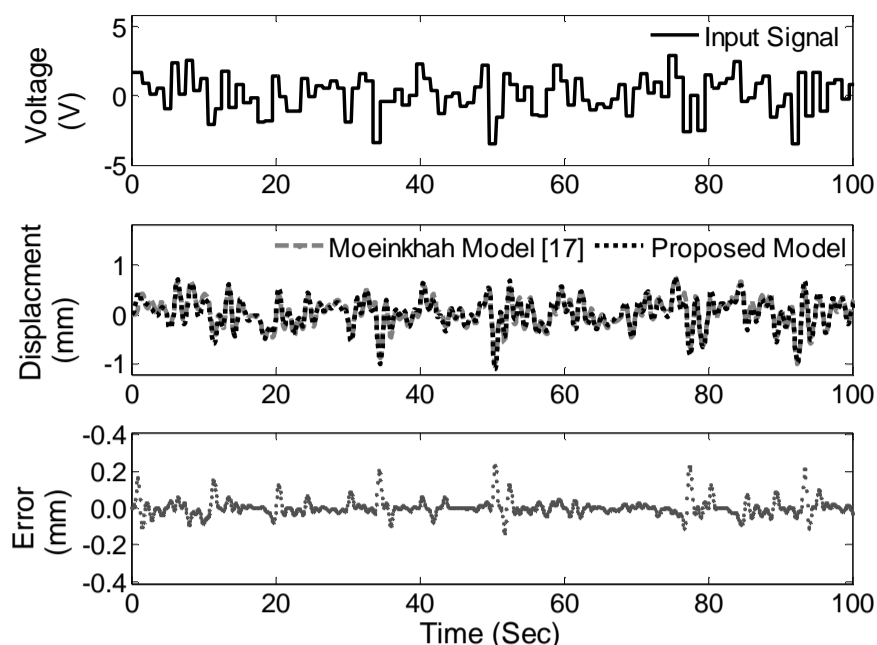


**Fig. 5** Variations of the output coefficients according to the input white noise signal

شکل 5 تغییرات ضرایب خروجی تابع پیشنهادی براساس ورودی سیگنال نویز سفید

2- Chirp Signal

1- Standard Error Bounds (  $SE = \bar{y}(N) + 2\delta(N)$  )



**Fig. 10** Identification the system response by the SDP method respect to a Random input signal

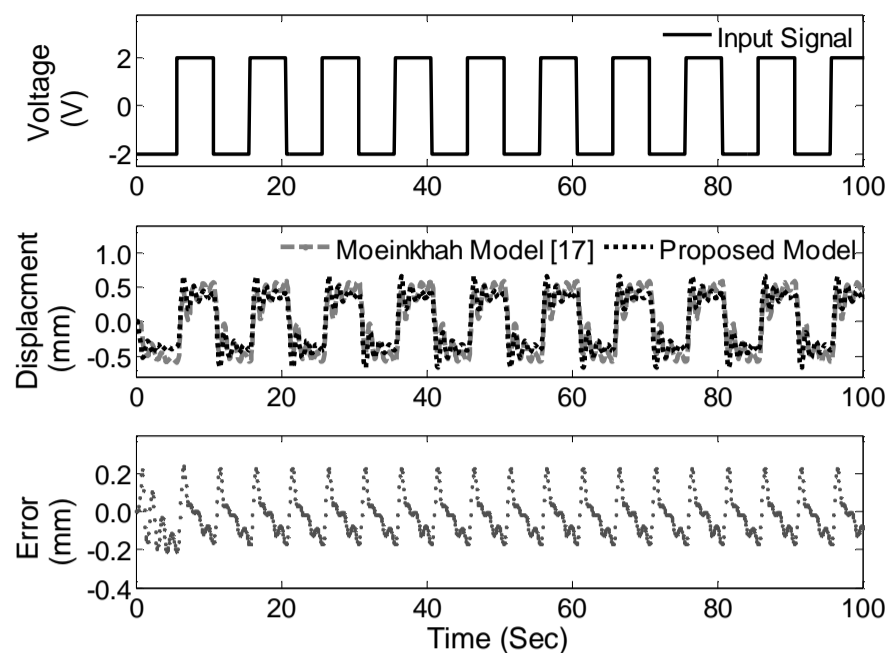
شکل 10 شناسایی پاسخ سیستم به روش اس‌دی‌پی نسبت به ورودی سیگنال تصادفی

شناسایی به روش اس‌دی‌پی بدست آمد. با استفاده از روش اس‌دی‌پی رفتار عملگر بصورت تابعی از ورودی و خروجی‌های لحظات قبل مورد بررسی قرار گرفت. در انتها جهت ارزیابی مدل پیشنهادی واکنش عملگر نسبت به سایر سیگنال‌های اعمالی دلخواه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بخوبی بیانگر این واقعیت بود که مدل پیشنهادی با دقت خوبی رفتار عملگر را پیش‌بینی نموده است. از جمله مزیت‌های روش ارائه شده جهت شناسایی رفتار عملگر کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (1) از آن‌جا که روش اس‌دی‌پی یک روش خاص جهت شناسایی سیستم‌های غیرخطی است و با توجه به رفتار غیرخطی عملگر مورد نظر، به خوبی می‌توان به کمک آن رفتار عملگر را پیش‌بینی نمود.
- (2) به دلیل یکنواخت‌سازی اطلاعات در الگوریتم ارائه شده، با افزایش جملات غیرخطی خطای شناسایی افزایش نمی‌یابد.
- (3) با استفاده از روش پیشنهادی و رابطه بدست آمده برای جابجایی انتهای عملگر رابطه 14، به راحتی می‌توان با دقت خوبی رفتار آن را در برابر هر سیگنال اعمالی محاسبه کرد.
- (4) با دانستن نحوه رفتار عملگر نسبت به هر سیگنال دلخواه، به راحتی می‌توان از سیستم‌های کنترل همزمان جهت کنترل دقیق جابجایی انتهای عملگر استفاده نمود.

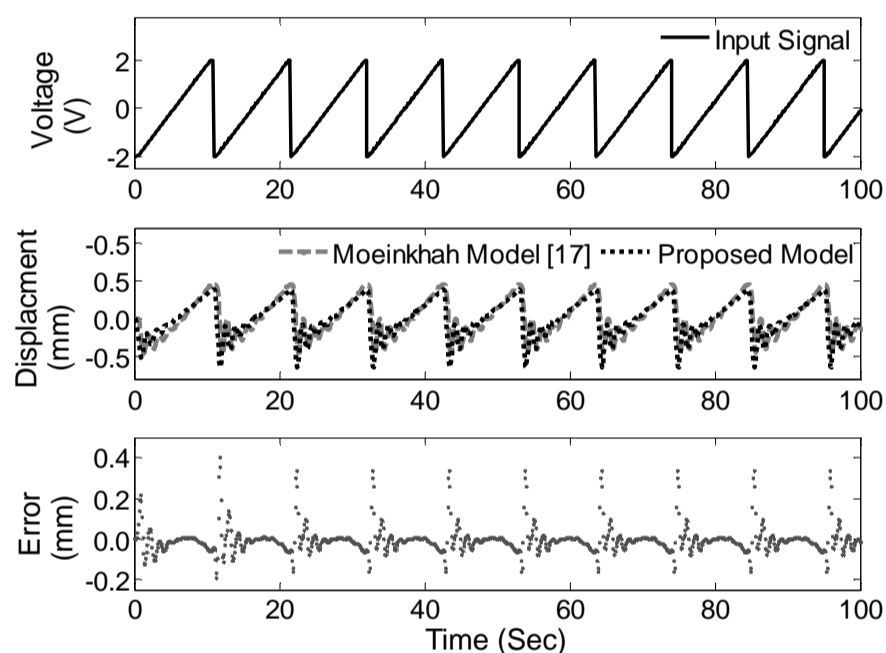
#### 5- فهرست علائم

$A$	ماتریس انتقال $n \times n$
$D$	ماتریس ورودی مرجع در سیستم‌های غیر حداقل مرتبه
$e(k)$	خطای مدل پیش‌بینی شده
$I_p$	ماتریس همانی با ابعاد $p \times p$
$k$	اندیس زمان
$N$	تعداد پارامترها
$P$	ماتریس کواریانس (ضریب پنالتی)
$P^*$	ماتریس عدم قطعیت
$Q_{nvr}$	پارامتر کنترل‌کننده وزن‌ها در خروجی
$SE$	باند خطای استاندارد
$y(k)$	خروجی واقعی سیستم



**Fig. 8** Identification the system response by the SDP method respect to a Square input signal

شکل 8 شناسایی پاسخ سیستم به روش اس‌دی‌پی نسبت به ورودی سیگنال موج مربعی



**Fig. 9** Identification the system response by the SDP method respect to a Normal Repeating Sequence input signal

شکل 9 شناسایی پاسخ سیستم به روش اس‌دی‌پی نسبت به ورودی سیگنال دندانه اره‌ای

دلیل این‌که کامپوزیت‌های فلزی پلیمری یونی در تغییر فرکانس کمی کند عمل می‌کنند پرش‌هایی در منحنی پاسخ عملگر وجود دارد.

در انتها، برای نشان دادن دقت عمل تابع به‌دست آمده جهت پیش‌بینی رفتار عملگر از جنس کامپوزیت فلزی پلیمری یونی، یک سیگنال پیچیده با فرکانس و ولتاژ به‌شدت متغیر به سیستم اعمال شده است. همان‌طور که در شکل 10 مشخص است، تابع به‌دست آمده برای پیش‌بینی رفتار عملگر موردنظر حتی در برابر اعمال این سیگنال نیز خروجی را به‌طور قابل قبولی پیش‌بینی نموده است.

#### 4- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش جدیدی جهت شناسایی رفتار یک عملگر کامپوزیتی فلزی پلیمری یونی براساس روش شناسایی پارامترهای وابسته به حالت ارائه شد. با در نظر گرفتن یک مدل موجود دقیق از رفتار عملگر مورد بررسی و اعمال سیگنال نویز سفید به آن، ورودی و خروجی‌های مورد نیاز برای

- [10] Z. Xue, Y. Tang, X. Duan, Y. Ye, X. Xie, X. Zhou, Ionic polymer-metal composite actuators obtained from sulfonated poly (ether ether sulfone) ion-exchange membranes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 81, pp. 13-21, 2015.
- [11] S. Nemat-Nasser, Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites, *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 5, pp. 2899-2915, 2002.
- [12] R. Kanno, S. Tadokoro, T. Takamori, M. Hattori, K. Oguro, Linear approximate dynamic model of ICPF (ionic conducting polymer gel film) actuator, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, April 22-28, 1996.
- [13] K. M. Newbury, D. J. Leo, Linear electromechanical model of ionic polymer transducers-Part I: Model Development, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 6, pp. 333-342, 2003.
- [14] C. Bonomo, L. Fortuna, P. Giannone, S. Graziani, S. Strazzeri, A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-12, 2007.
- [15] Y. Cha, M. Porfiri, Bias-dependent model of the electrical impedance of ionic polymer-metal composites, *Physical Review E*, Vol. 87, No. 2, pp. 022403.1-022403.16, 2013.
- [16] D. Pugal, K. J. Kim, A. Aabloo, An explicit physics-based model of ionic polymer-metal composite actuators, *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, No. 8, pp. 084904.1-084904.9, 2011.
- [17] H. Moeinkhah, J. Rezaeepazhand, A. Akbarzadeh, Analytical dynamic modeling of a cantilever IPMC actuator based on a distributed electrical circuit, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 5, pp. 055033.1-055033.10, 2013.
- [18] D. N. C. Nam, K. K. Ahn, Identification of an ionic polymer metal composite actuator employing Preisach type fuzzy NARX model and particle swarm optimization, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 183, No. 0, pp. 105-114, 2012.
- [19] M. Annabestani, N. Naghavi, Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 209, No. 1, pp. 140-148, 2014.
- [20] R. Caponetto, S. Graziani, F. Pappalardo, F. Sappullo, Identification of IPMC nonlinear model via single and multi-objective optimization algorithms, *ISA transactions*, Vol. 53, No. 2, pp. 481-488, 2014.
- [21] P. Young, *Recursive estimation and time-series analysis*, Second Edition, pp. 327-356, New York: Springer, 1984.
- [22] C. J. Taylor, E. Shaban, M. Stables, S. Ako, Proportional-integral-plus control applications of state-dependent parameter models, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 221, No. 7, pp. 1019-1031, 2007.
- [23] P. J. Klenow, O. Kryvtsov, State-dependent or time-dependent pricing: does it matter for recent US inflation?, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. CXXIII, No. 3, pp. 863-904, 2005.
- [24] H. Moeinkhah, A. Akbarzadeh, J. Rezaeepazhand, Design of a Robust QFT Position Controller for an IPMC Actuator Using an Analytical Dynamic Model, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 15, pp. 1965-1977, 2013.

خروجی شناسایی شده  $\hat{y}(k)$ 

علائم یونانی

پارامترهای مربوط به خروجی مدل  $\alpha_i$ پارامترهای مربوط به ورودی مدل  $\beta_i$ بردار پارامترهای مدل  $\Theta$ بردار پارامترهای حدس زده شده  $\hat{\Theta}$ بردار مربوط به ضرایب لاگرانژ در حل مسأله بهینه‌سازی  $\lambda$ 

داخل الگوریتم

واریانس خطا  $\sigma^2$ بردار حالت‌های سیستم  $\Phi$ **6- تقدیر و تشکر**

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از دانشگاه سیستان و بلوچستان بابت پشتیبانی علمی از این پژوهش اعلام می‌دارند.

**7- مراجع**

- [1] M. Shahinpoor, K. J. Kim, Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications, *Smart materials and structures*, Vol. 14, No. 1, pp. 197-214, 2005.
- [2] S. Nemat-Nasser, J. Y. Li, Electromechanical response of ionic polymer-metal composites, *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No. 7, pp. 3321-3331, 2000.
- [3] Y. Bar-Cohen, *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges*, Second Edition, SPIE's Electroactive Polymer Actuator and Device, pp. 172-230, Bellingham, WA: SPIE Press monograph, 2004.
- [4] M. Shahinpoor, K. J. Kim, Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals, *Smart materials and structures*, Vol. 10, No. 4, pp. 819-833, 2001.
- [5] K. J. Kim, M. Shahinpoor, A novel method of manufacturing three-dimensional ionic polymer-metal composites (IPMCs) biomimetic sensors, actuators and artificial muscles, *Polymer*, Vol. 43, No. 3, pp. 797-802, 2002.
- [6] K. J. Kim, M. Shahinpoor, Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques, *Smart materials and structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-79, 2003.
- [7] S. Nemat-Nasser, Y. Wu, Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 9, pp. 5255-5267, 2003.
- [8] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. Simpson, J. Smith, Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review, *Smart materials and structures*, Vol. 7, No. 6, pp. 15-30, 1998.
- [9] A. Punning, M. Kruusmaa, A. Aabloo, A self-sensing ion conducting polymer metal composite (IPMC) actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 136, No. 2, pp. 656-664, 2007.