

## طراحی یک تخمین گر بر پایه‌ی اصل دوگانی، به منظور تخمین بر خط تأخیر زمانی نامعلوم و متغیر با زمان در سیستم‌های LTI

هادی چهکندی نژاد<sup>۱\*</sup>، محسن فرشاد<sup>۲</sup> و رمضان هاونگی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹	در این مقاله یک رویکرد نوین، برای تخمین آنلاین تأخیر زمانی، در سیستم‌های پیوسته زمان LTI، با تأخیر متغیر با زمان و نامعلوم در ورودی کنترلی، طراحی شده است. واضح است که تابع تبدیل لاپلاس یک سیستم تأخیردار، شامل یک عامل تأخیر زمانی است. در این مقاله فرض بر این است که تنها پارامتر نامعلوم و متغیر با زمان در سیستم، پارامتر تأخیر زمانی سیستم است. ایده‌ی اصلی مورد استفاده در طراحی رویکرد پیشنهادی، بر پایه‌ی برقراری اصل دوگانی بین کنترلر و رویکرد می‌باشد. به این صورت که، بطور غیر مستقیم، از ساختار کنترلر تطبیقی مدل مرجع (MRAS)، برای طراحی یک تخمین گر، استفاده می‌شود. بدین منظور قسمت‌های اصلی در یک سیستم کنترلی MRAS، به نحوی سازمان دهی می‌شوند که طراحی کنترلر، منجر به طراحی تخمین گر تأخیر، در مسئله‌ی دوگان خواهد شد. در واقع قاعده‌ی تطبیق، در مسئله‌ی طراحی کنترلر، همان مکانیزم تخمین گر در مسئله‌ی دوگان را بیان خواهد نمود. همچنین در راستای محاسبه‌ی مکانیزم تخمین، از دو روش مبتنی بر تئوری لیاپانوف و مبتنی بر قاعده‌ی MIT، استفاده می‌شود. نهایتاً نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد نسبتاً مطلوب تخمین گر پیشنهادی در مواجهه با تأخیر-های متغیر با زمان و نامعلوم را نشان می‌دهند.
<b>واژگان کلیدی:</b> اصل دوگانی، سیستم‌های LTI، تأخیر متغیر با زمان، عدم قطعیت، تخمین گر تأخیر، قاعده‌ی تطبیق.	

### ۱- مقدمه

تأخیر در فرآیند طراحی کنترل کننده، تنها راهکار مواجهه با این مسئله می‌باشد. حتی در حالتی که بتوان سیستم حلقه باز را بدون هیچ گونه تأخیری مدل سازی کرد، باید به این نکته توجه شود که فرآیند کنترل حلقه بسته، یعنی اندازه گیری، تصمیم گیری و عکس العمل کنترل کننده، خود یک تأخیر در ورودی سیستم تحت کنترل ایجاد خواهد کرد که این تأخیر نیز می‌تواند تحت تأثیر محیط متغیر باشد. سیستم‌های با تأخیر زمانی یک کلاس از سیستم‌های با ابعاد بی نهایت را معرفی می‌کند که به مکانیزم‌هایی مانند انتشار، انتقال، ترافیک، فرسودگی، انعطاف پذیری، لختی و

کنترل سیستم‌های تأخیردار از جمله مسائل روز دنیای مهندسی کنترل است. وجود پدیده تأخیر در اکثر سیستم‌های واقعی و مصنوعات دست بشر سبب شده است که توجه محققین بسیاری به این مسئله جلب شود. اهمیت این موضوع از آنجا ناشی می‌گردد که حضور تأخیر در حلقه‌ی کنترلی، انحراف سیستم از عملکرد مطلوب را به دنبال دارد و در صورت لحاظ نشدن تمهیدات لازم برای آن، می‌تواند حتی موجب ناپایداری سیستم گردد. از آنجا که تأخیر ذاتی، جزء جدا نشدنی از سیستم تأخیردار است لحاظ نمودن

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hchahkandin@birjand.ac.ir

۱. دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند.

زمان (قطعی یا غیرقطعی) نیز مواجه خواهد شد. در شرایطی که تأخیر زمانی متغیر و نامعلوم باشد، اغلب با آن به شکل یک پارامتر دارای عدم قطعیت برخورد می‌شود و موضوع مقاوم بودن طراحی در برابر تغییر این پارامتر مطرح می‌گردد. کنترل مقاوم، همواره، در برابر عدم قطعیت‌های با تغییرات آرام و نرم، استراتژی‌های کنترلی مناسبی را برای عدم قطعیت‌های پارامتری ارائه می‌دهد [۲-۳]، اما اگر بطور خاص این عدم قطعیت‌ها دارای تغییرات ناآرامی باشند، مطمئناً کنترل تطبیقی انتخاب مناسب‌تری خواهد بود. یک زیربخش مهم در سیستم‌های کنترلی تطبیقی غیرمستقیم، زیر بخش تخمین گر سیستم تحت کنترل می‌باشد. در این مقاله، فرض بر این است که تنها پارامتر نامعلوم سیستم، تأخیر زمانی آن می‌باشد. در بحث تخمین پارامتر تأخیر زمانی، در این پژوهش یک روش جدید با سرعت و دقت تخمین نسبتاً بالایی ارائه می‌شود. در ادامه‌ی این بخش، در بخش ۱-۱ تاریخچه‌ای مختصر از کارهایی که تاکنون در حوزه‌ی سیستم‌های با تأخیر متغیر با زمان انجام شده‌است، ارائه می‌شود و در بخش ۱-۲ به چالش‌های روش‌های کنترلی موجود پرداخته می‌شود. در بخش ۲، ساختار سیستم مورد مطالعه معرفی خواهد شد، سپس در بخش ۳، طراحی تخمین گر پیشنهادی برای تخمین تأخیر متغیر، ارائه خواهد شد. نهایتاً در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی‌ها برای یک سیستم نمونه، نمایش داده خواهد شد و در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و تحلیل عملکرد تخمین گر پیشنهادی، پرداخته خواهد شد.

#### ۱-۱- ادبیات پژوهش

عمده پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های تأخیر زمانی متغیر، به سه دسته‌ی کلی زیر تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول (شناسایی و تخمین تأخیر): دشواری شناسایی تأخیر زمانی، از این حقیقت ناشی می‌شود که مدل فرآیند نسبت به پارامتر تأخیر، غیرخطی است. براساس مقالاتی که در مرجع [۴] مورد بررسی قرار گرفته است، روش‌های شناسایی تأخیر به چهار دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: (الف) روش‌های تقریب تأخیر زمانی، (ب) روش‌های پارامتر صریح تأخیر زمانی، (ج) روش‌های ناحیه و زمان و (د) روش‌های آماری مراتب بالاتر. روش‌های زیادی از این دسته‌بندی در مقالات ارائه شده‌اند [۴-۱۱]، که در بحث‌های کنترل تطبیقی و کنترل بلادرنگ، عمدتاً از روش‌های دسته‌ی (الف) و (ب) استفاده شده‌است.

سایر عواملی که پس از افت زمانی ایجاد می‌کنند، مربوط می‌شود. در کل سیستم‌های تأخیردار از دیدگاه معین بودن و متغیر بودن تأخیر زمانی به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- سیستم‌های تأخیردار معین با تأخیر ثابت
  - ۲- سیستم‌های تأخیردار نامعین با تأخیر ثابت
  - ۳- سیستم‌های تأخیردار معین با تأخیر متغیر
  - ۴- سیستم‌های تأخیردار نامعین با تأخیر متغیر
- که هر یک از آن‌ها در سیستم‌های مختلف ظاهر می‌شوند. در دسته چهارم، مطرح کردن الگوریتم کنترلی که قادر به تحقق پایداری و یا عملکرد ردیابی مناسب باشد اهمیت بسیاری دارد. در حالت کلی تأخیر می‌تواند در بردار حالت یا ورودی باشد که در این مقاله منظور از تأخیر زمانی، تأخیر موجود در ورودی می‌باشد. در بیشتر سیستم‌های واقعی تأخیر زمانی بطور ذاتی یا بر اثر شرایط محیطی، عملکرد سیستم را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. مشکلاتی که بطور عمده در روند کنترل حلقه بسته‌ی سیستم‌های دارای تأخیر زمانی بوجود می‌آیند به دلایل زیر می‌باشند [۱]:

- ۱- اثر اغتشاش در سیستم احساس نمی‌شود مگر اینکه زمان قابل توجهی از وقوع آن سپری شده باشد.
- ۲- تأثیر عمل کنترلی پس از طی یک مدت زمان طولانی در متغیر کنترل شونده احساس می‌شود.
- ۳- عمل کنترلی که بر اساس خطای واقعی فعلی سیستم تولید شده‌است در واقع سعی در اصلاح وضعیتی از سیستم را خواهد داشت که از لحظاتی قبل سرچشمه گرفته‌است.
- ۴- از آنجا که معادلات سیستم نسبت به پارامتر تأخیر زمانی غیر خطی می‌باشد حساسیت مشخصه‌های کنترلی به این پارامتر نسبتاً بالا می‌باشد و لذا به این دلیل معمولاً محققان با توجه به ذات نامعین تأخیر زمانی، معمولاً به دنبال طراحی‌های مقاوم می‌باشند.
- ۵- تغییر تأخیر زمانی تابع تبدیل حلقه‌باز در سیستم‌های کنترلی حلقه بسته منجر به تغییر حاشیه‌ی فاز (و غیر مستقیم اندازه) می‌گردد و می‌تواند موجب ناپایداری سیستم حلقه بسته و یا کاهش پایداری نسبی و نا-مطلوب شدن مشخصه‌های پاسخ گذرای سیستم گردد. با توجه به غیرخطی بودن رفتار سیستم نسبت به عامل تأخیر، با تغییر تأخیر در طول زمان، تکنیک‌های طراحی برای اتخاذ عکس العمل کنترلی مناسب در این شرایط، پیچیده‌تر می‌گردد، چرا که طراح با یک سیستم متغیر با

راستای ارائه‌ی معیارهایی برای تضمین پایداری مقاوم، صورت گرفته‌است [۲۹-۲۷].

دسته‌ی سوم (روش‌های کنترلی ارائه‌شده با اهدافی مانند ردیابی): اهمیت کنترل سیستم‌های با تأخیر زمانی متغیر، محققان را بر آن داشته‌است که در راستای ارضای اهداف عالی کنترلی نیز، در پژوهش‌های خود به دنبال طراحی کنترل‌کننده‌هایی باشند که در برابر تغییرات پارامتر حساس تأخیر زمانی، دارای مقاومت یا وفق‌پذیری قابل قبولی باشند، برخی از این کنترلرها عبارت‌اند از: کنترل‌کننده‌های مقاوم [۳۰-۳۲]، کنترل‌کننده‌های فازی [۳۳]، کنترل‌کننده‌های پیش بین [۳۴-۳۷]، کنترل‌کننده‌های مود لغزشی [۳۸ و ۳۹]، کنترل‌کننده‌های بهینه [۴۰-۴۲].

لازم‌به‌ذکر است که، برای سیستم‌های LTI در حالتی که تأخیر زمانی متغیر و نامعلوم باشد، اغلب کنترل‌کننده‌های ارائه‌شده از نوع تطبیقی [۴۳-۴۸] می‌باشند.

#### ۱-۲- چالش‌های روش‌های کنترلی موجود

با تأمل بر روی کارهای انجام‌شده در حیطه‌ی کنترل سیستم‌های با تأخیر زمانی متغیر، به نظر می‌رسد مشکلات و چالش‌هایی در آن‌ها وجود داشته‌باشد. بطور کلی در تمامی کارهای انجام‌شده برای سیستم‌های تأخیردار باند تغییرات و عدم قطعیت تأخیر زمانی، نسبتاً کوچک فرض شده‌است. در مورد کنترل‌کننده‌های مقاوم و مود لغزشی، گرچه این کنترل‌کننده‌ها در باندهای کوچک عدم قطعیت، پاسخ نسبتاً مناسبی دارند، اما از آنجا که ذات این کنترل‌کننده‌ها، واحد و ثابت می‌باشد، پاسخ سیستم کنترلی، در انحرافات زیاد از مدل نامی، حتی با مدل‌سازی دقیق عدم قطعیت‌ها، دارای مشخصه‌های گذرای نامطلوبی خواهد بود، خصوصاً اگر تغییرات پارامتر تأخیر زمانی، سریع باشد. به‌طور خاص در کنترل‌رهای مود لغزشی، تغییرات وسیع و سریع تأخیر زمانی، باعث ایجاد چترینگ و در نتیجه بالارفتن سعی کنترلی می‌شود. در مورد کنترل‌کننده‌های پیش‌بین و بهینه، این کنترلرها اغلب برای کنترل سیستم‌هایی ارائه شده‌اند که تأخیر زمانی آنها معلوم (ثابت یا متغیر) باشد، زیرا در حالتی که پارامتر تأخیر، نامعلوم و متغیر باشد، عملکرد این کنترلرها ضعیف می‌باشد، چرا که هر دوی این کنترلرها دارای عملیات بهینه‌سازی می‌باشند

بطور خاص، برای تخمین تأخیر متغیر، در سیستم‌های LTI<sup>۱</sup> مقالات زیادی منتشر شده‌است [۱۹-۱۲].

در [۵] دو شیوه‌ی شناسایی مبتنی بر چند جمله‌ای ای<sup>۲</sup>B گسترش‌یافته، در حوزه‌ی گسسته زمان ارائه‌شده‌اند که بوسیله‌ی آن تأخیر سیستم به همراه سایر پارامترها تخمین زده می‌شود. در [۶] روش‌های فرآپارامتریزه برای مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی در سیستم‌های تک ورودی تک خروجی و همچنین چندورودی چندخروجی با استفاده از روش‌های بازگشتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در [۷ و ۸] شناسایی حلقه بسته و زمان حقیقی سیستم‌های تأخیردار بر مبنای تکنیک‌های تخمین جبری غیرمجانبی که توسط Fliess بنا نهاده شده‌است، مورد توجه قرار گرفته‌است، که این روش‌ها بر مبنای ضرب کانولوشن است.

مرجع [۹] نیز به بحث در مورد تخمین پارامترهای فرآیند‌های تک‌ورودی تک‌خروجی تأخیردار، با استفاده از روش گرادیان در حوزه‌ی زمان و در حالت حلقه‌باز پرداخته‌است، همچنین همگرایی پارامترهای مدل به پارامترهای سیستم در وضعیت بدون تأخیر و با تأخیر بررسی شده‌است. در [۱۲] الگوریتم‌های شناسایی ساختارمتغیر ارائه شده‌است که امکان تخمین هم‌زمان پارامترها و تأخیر را می‌دهد، این الگوریتم‌ها بر مبنای استفاده از مدل سیستم به‌عنوان سطوح لغزش می‌باشند که در آن، ابتدا به جای پارامترها یا تأخیرهای نامعلوم از تخمین‌های متناظر با آن‌ها جایگزین می‌گردد سپس الگوریتم تخمین به نحوی طراحی می‌شود که همگرایی به سطوح لغزشی را تضمین کند.

دسته‌ی دوم (معیارهای ارائه شده برای پایداری و پایداری مقاوم): به‌طور کلی تأخیر زمانی در سیستم حلقه‌باز یک عامل غیرمینیمم فاز می‌باشد، در بسیاری از مقالات این مهم به اثبات رسیده‌است که پایداری حلقه‌های کنترلی در حضور تأخیر، شدیداً نسبت به پارامتر تأخیر زمانی، حساس است، لذا این موضوع، محققان را به سمتی سوق داده‌است که در بحث طراحی کنترل‌کننده‌ها برای این‌گونه سیستم‌ها، پژوهش‌های زیادی را در زمینه‌ی ارائه‌ی معیارهایی معتبر، برای ایجاد یک حاشیه‌ی پایداری امن، انجام دهند [۲۶-۲۰]. بطور خاص نیز، برای سیستم‌های LTI با عدم قطعیت در عامل تأخیر زمانی، تلاش‌های زیادی در

<sup>۲</sup> B-polynomial

<sup>۱</sup> Linear Time Invariant Systems

$$G(s) = C_g(sI - A_g)^{-1}B_g \quad (۳)$$

و عامل  $e^{-d(t)s}$  تابع تبدیل لاپلاس تأخیر زمانی است. در روابط (۱) و (۲)،  $d(t)$  همان تأخیر زمانی ورودی سیستم است که در این مقاله فرض می‌شود، متغیر با زمان و نامعلوم است. همچنین فرض می‌شود که سیستم موردنظر به استثنای عامل تأخیر زمانی، یک سیستم خطی و تغییر-ناپذیر با زمان می‌باشد. به‌طور کلی در مسائل کنترلی مربوط به این‌گونه از سیستم‌ها، فرض‌های زیر همواره در مورد تأخیر زمانی، برقرار می‌باشند [۵۰]:

$$(۱) \quad d(t) \geq 0 \quad \text{این فرض علیت سیستم را تضمین می‌کند و} \quad d_{\min} \leq d(t) \leq d_{\max}$$

$$(۲) \quad d(t) \leq \infty \quad \text{این فرض تضمین می‌کند که همه ورودی‌های سیستم، سرانجام به سیستم خواهند رسید.}$$

$$(۳) \quad \dot{d}(t) < 1 \quad \text{این فرض تضمین می‌کند که سیستم هرگز ورودی‌هایی را دریافت نخواهد کرد که قدیمی‌تر از ورودی‌های دریافت‌شده باشند.}$$

$$(۴) \quad \dot{d}(t) > -\infty \quad \text{این فرض تضمین می‌کند که تأخیر زمانی نمی‌تواند فوراً ناپدید شود و بایستی بصورت تدریجی از بین برود.}$$

هدف اصلی در این مقاله، طراحی یک تخمین‌گر دقیق و سریع، برای پارامتر نامعلوم و متغیر با زمان تأخیر زمانی می‌باشد.

### ۳- تخمین‌گر تأخیر پیشنهادی

بطور کلی تخمین‌گر، یک سیستم دینامیکی است که با استفاده از ورودی و خروجی سیستم واقعی، یک یا چند پارامتر مجهول از سیستم واقعی را تخمین می‌زند. به‌طور خاص در این مقاله هدف، طراحی یک سیستم تخمین‌گر است که با استفاده از ورودی و خروجی سیستمی با معادله (۲)، تنها پارامتر مجهول و متغیر با زمان سیستم، بصورت آنالین و با سرعت قابل‌قبولی شناسایی شود. بلوک دیاگرام ساده‌ای از سیستم و تخمین‌گر تأخیر، در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، ورودی‌های تخمین‌گر، همان ورودی و خروجی سیستم واقعی، و تنها خروجی تخمین‌گر، تخمینی از تأخیر زمانی ( $\hat{d}(t)$ ) می‌باشد. در این مقاله با استفاده از یک ترفند و به‌طور غیر مستقیم، از ساختار کنترل تطبیقی مستقیم [۵۱]، برای طراحی یک تخمین‌گر، سود جسته

و در صورتی که تأخیر متغیر و نامعلوم باشد، طراح با یک مسئله بهینه‌سازی متغیر با زمان (و برنامه‌ریزی نشده) سر و کار خواهد داشت، که حل آن به علت پیچیدگی محاسباتی، خود باعث به‌وجود آمدن تأخیر زمانی، در فرآیند کنترل، در حالت زمان حقیقی، می‌شود [۴۹]. همچنین، کنترل‌کننده‌های هوشمند، مانند فازی و عصبی، به‌علت پیچیدگی‌های محاسباتی و تصمیم‌گیری موجود در شبکه، سرعت انتشار آن‌ها نسبت به زمان حقیقی، بعضاً کم می‌باشد، که این خود باعث به‌وجود آمدن تأخیرهای زمانی، در حلقه‌های کنترلی می‌شود. در نهایت، کنترل‌کننده‌های تطبیقی ارائه‌شده برای سیستم‌های با تأخیر متغیر و نامعلوم، عمدتاً از نوع کنترل‌کننده‌های غیرمستقیم و مبتنی بر تخمین تأخیر می‌باشند. لذا عملکرد آن‌ها مستقیماً متأثر از عملکرد تخمین‌گر تأخیر می‌باشد. اهمیت طراحی بهینه‌ی تخمین‌گر، آنجا نمایان می‌شود که عملکرد نامطلوب آن، یعنی کاهش سرعت و دقت تخمین، موجب کاهش سرعت و دقت وفق‌پذیری کنترلر، و لذا کاهش سرعت عکس‌العمل‌های کنترلی می‌گردد، که این موضوع باعث ظاهر شدن خطاهای حالت‌گذرای نامطلوب، در پاسخ سیستم کنترلی می‌شود.

### ۲- بیان مسئله

سیستم مورد مطالعه در این پژوهش یک سیستم LTI و پایدار<sup>۱</sup> BIBO می‌باشد، معادلات فضای حالت و تابع تبدیل لاپلاس سیستم مفروض به فرم زیر می‌باشند:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A_g X(t) + B_g u_c(t - d(t)) \\ y(t) = C_g X(t) \end{cases} \quad (۱)$$

$$P(s, t) = G(s)e^{-d(t)s} \quad (۲)$$

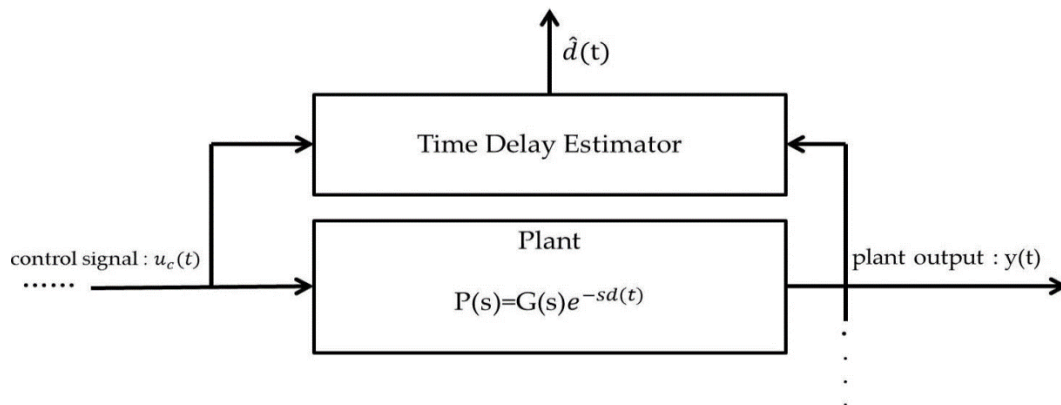
که در آن  $t$  متغیر حوزه زمان حقیقی و  $X(t) \in R^n$  بردار متغیرهای حالت سیستم می‌باشد و اسکالرهای  $u_c(t)$  و  $y(t)$  به ترتیب سیگنال‌های ورودی کنترلی و خروجی سیستم می‌باشند.

$A_g, B_g, C_g$  ماتریس‌های معلوم و ثابت با ابعاد مناسب (به ترتیب  $n \times n, n \times 1, 1 \times n$ ) می‌باشند.  $s$  متغیر حوزه‌ی لاپلاس و  $P(s, t)$  تابع تبدیل سیستم، در یک زمان مشخص مانند  $t$  می‌باشد که در آن  $G(s)$  از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید:

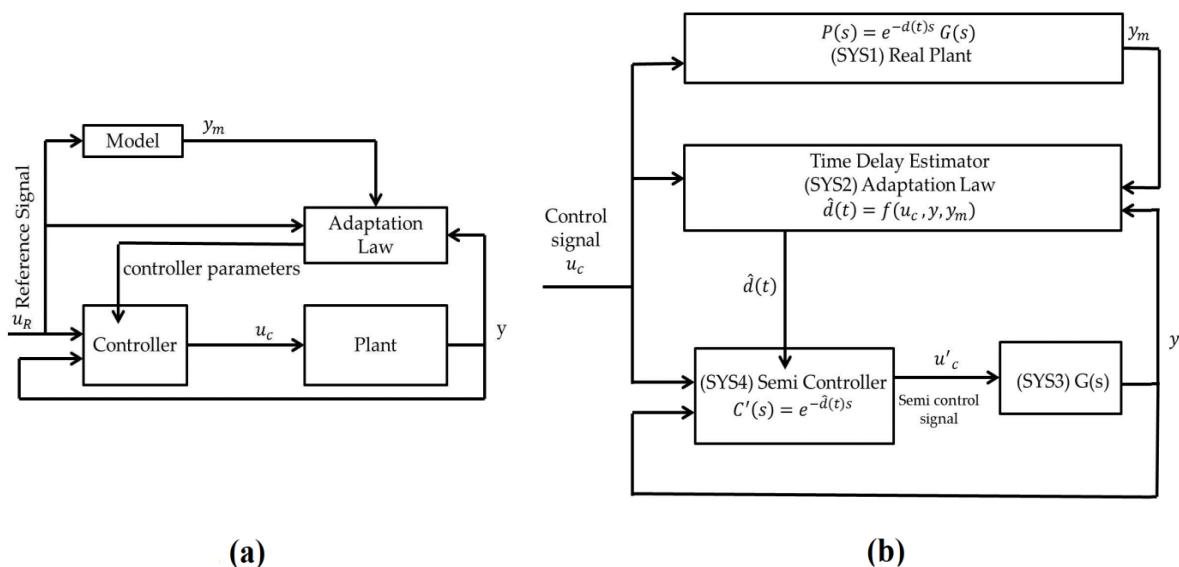
<sup>۱</sup> Bounded Input Bounded Output Stable

موجود در بلوک دیاگرام شکل 2-b با  $C'(s)$  نمایش داده شده است، از آنجایی که هدف دنبال شده در این بلوک دیاگرام، تخمین تأخیر می باشد،  $C'(s)$  یک شبه کنترلر خواهد بود و خروجی آن نیز یک سیگنال شبه کنترلی می باشد، که با  $u'_c$  نمایش داده شده است. در واقع خروجی اصلی این بلوک دیاگرام، خروجی بلوک قاعده‌ی تطبیق خواهد بود، که همان تخمین تأخیر زمانی می باشد. لازم به ذکر است که در شکل 2-b، نقش ورودی مرجع را بازی می کند، که در حقیقت، در فرآیند کنترلی اصلی، همان ورودی کنترلی برای سیستم واقعی  $(P(s))$  می باشد (سیگنال تولید شده توسط کنترلر اصلی). همچنین SYS1 مدل مرجع (در حقیقت سیستم تحت کنترل  $P(s)$ ) و SYS2 بلوک قاعده‌ی تطبیق (در حقیقت مکانیزم تخمین-گر) و SYS3 سیستم تحت کنترل (در حقیقت همان SYS4 و سیستم واقعی بدون عامل تأخیر یا همان  $G(s)$ ) یک شبه کنترلر (در حقیقت تخمین عامل تأخیر)، می باشد.

شده است. شکل 2-a ساختار کلی یک کنترل کننده‌ی تطبیقی مستقیم را نشان می دهد. در این بلوک دیاگرام کنترلی، همان ورودی مرجع (خروجی مطلوب) می باشد. بلوک دیاگرام شکل 2-b به طور خاص، برای این مقاله طرح شده است. با توجه به شکل 2-b، با در نظر گرفتن سیستم واقعی  $(P(s))$  به عنوان مدل مرجع، و سیستم  $G(s)$  به عنوان سیستم تحت کنترل، و در نظر گرفتن تخمین عامل تأخیر زمانی، یعنی  $e^{-\hat{d}(t)s}$ ، به عنوان یک کنترلر تطبیقی، با پارامتر قابل تنظیم  $\hat{d}(t)$ ، هدف، طراحی یک قاعده‌ی تطبیق خواهد بود، به نحوی که با تنظیم تنها پارامتر کنترلر (که تخمینی از تأخیر زمانی است)، خروجی سیستم  $G(s)$ ، به سمت خروجی سیستم واقعی همگرا شود. هدف از طراحی این بلوک دیاگرام، فقط بدست آوردن یک تخمین، از تأخیر زمانی سیستم واقعی است، و طراحی کنترلر یک فرآیند مجزا است، که در این مقاله مدنظر نویسندگان نیست. لذا به همین علت، کنترل کننده‌ی



شکل ۱: دیاگرام کلی تخمین گر تأخیر زمانی



شکل ۲: (a) ساختار کلی کنترلر تطبیقی مدل مرجع [۵۳]، (b) ساختار کلی تخمین گر پیشنهادی

$$e(t) = y(t) - y_m(t) = C'(p) \cdot G(p) \cdot u_C(t) - y_m(t) \quad (۸)$$

با فرض  $\theta = \theta(t) = \hat{d}(t)$  و جای‌گذاری رابطه‌ی (۴) در (۸)، سیگنال خطا برابر با رابطه‌ی (۹) خواهد شد.

$$e(t) = \left( \frac{1 - \frac{\theta p}{2}}{1 + \frac{\theta p}{2}} \right) \cdot G(p) \cdot u_C(t) - y_m(t) \quad (۹)$$

لازم به ذکر است که در معادلات فوق،  $p$  یک اپراتور مشتق‌گیر است، یعنی  $p = \frac{d}{dt}$ . با استفاده از معادله (۹)، بردار  $\varphi(t)$  بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\varphi(t) = -\frac{d}{d\theta} \{e(t)\} = -\frac{p}{(1 + \frac{\theta p}{2})^2} G(p) \cdot u_C(t) \quad (۱۰)$$

که می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی (۱۱) بازنویسی کرد.

$$\varphi(t) = -H(p) \cdot G(p) \cdot u_C(t) \quad (۱۱)$$

که در آن  $H(p)$  مطابق رابطه‌ی (۱۲) تعریف می‌شود.

$$H(p) = \frac{p}{(1 + \frac{\theta p}{2})^2} \quad (۱۲)$$

از آنجایی که  $\theta$  مجهول می‌باشد، به منظور حداکثر شدن سرعت تخمین، مقدار پارامتر  $\theta$  در  $H(p)$  برابر با  $\theta_{min}$  یا همان  $d_{min}$  فرض می‌شود (برای دستیابی به حداکثر سرعت تخمین). نهایتاً، با توجه به اسکلر بودن  $\varphi(t)$ ، مطابق رابطه‌ی (۱۳)،  $\Phi(t)$  تشکیل خواهد شد.

$$\Phi(t) = \frac{\varphi(t)}{\alpha + \varphi(t)^T \varphi(t)} = \frac{\varphi(t)}{\alpha + \varphi(t)^2} \quad (۱۳)$$

لذا با توجه به رابطه‌ی (۵) داریم:

$$\dot{\theta}(t) = p \cdot \theta(t) = \gamma e(t) \Phi(t) \quad (۱۴)$$

در نتیجه قاعده تطبیق، برای تنظیم پارامتر شبه‌کنترلر، مطابق رابطه‌ی (۱۵) محاسبه خواهد شد.

$$\theta(t) = \frac{\gamma}{p} e(t) \Phi(t) = \frac{\gamma}{p} e(t) \frac{\varphi(t)}{\alpha + \varphi(t)^2} \quad (۱۵)$$

لازم به ذکر است که رابطه‌ی (۱۵) در واقع بیان‌کننده‌ی مکانیزم تخمین‌گر پیشنهادی به روش MIT می‌باشد. با فرض معادل بودن اپراتور  $p$  (در حوزه زمان) و متغیر  $s$  (در حوزه لاپلاس)، شکل (۳) نشان‌دهنده‌ی بلوک دیاگرام تخمین‌گر پیشنهادی به روش MIT می‌باشد.

دو روش مرسوم در محاسبه‌ی قاعده‌ی تطبیق، ارائه شده در [۵۱]، روش‌های مبتنی بر توابع لیاپانوف و قاعده‌ی MIT<sup>۱</sup> هستند. در این مقاله، با استفاده از هر دو روش به طراحی قاعده‌ی تطبیق پرداخته خواهد شد. با توجه به اینکه از شبه‌کنترلر  $C'(s) = e^{-\hat{d}(t)s}$ ، بطور مستقیم نمی‌توان در طراحی و محاسبه‌ی قاعده‌ی تطبیق استفاده نمود، می‌توان به عنوان یک جایگزین، از تقریب‌های پده‌ی مرتبه‌اول، دوم و یا بالاتر آن، به عنوان ساختار شبه‌کنترلر، استفاده کرد. در این مقاله از تقریب پده‌ی مرتبه‌ی اول استفاده شده است. بدیهی است که، برای بالاتر بردن دقت تخمین، می‌توان از تقریب‌های مراتب بالاتر استفاده نمود. لذا رابطه‌ی (۴)، ساختار شبه‌کنترلر  $C'(s)$  را نشان خواهد داد.

$$C'(s) = \frac{1 - \frac{\hat{d}s}{2}}{1 + \frac{\hat{d}s}{2}}, \quad \hat{d} = \hat{d}(t) \quad (۴)$$

لازم به ذکر است که شروط زیر به منظور همگرایی تخمین‌گر بایستی همواره برقرار باشند:

۱- سیستم از دیدگاه تأخیر-خروجی، بایستی حتماً به طور یکنواخت رویت‌پذیر باشد.

۲- ورودی حتماً بایستی برای سیستم تحریک پایا باشد.

### ۱-۳- روش اول: طراحی مکانیزم تخمین‌گر با استفاده از قاعده‌ی MIT نرمالیزه

با توجه به آنچه که در مرجع [۵۱] ارائه شده است، قاعده‌ی تطبیق در روش MIT، با استفاده از رابطه‌ی (۵) بیان می‌شود.

$$\dot{\theta}(t) = \gamma e(t) \Phi(t) \quad (۵)$$

که در آن  $\theta(t)$  بردار پارامترهای قابل تنظیم کنترلر و  $\gamma$  بهره‌ی تطبیق است. همچنین  $e(t)$  و بردار  $\Phi(t)$ ، به ترتیب از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

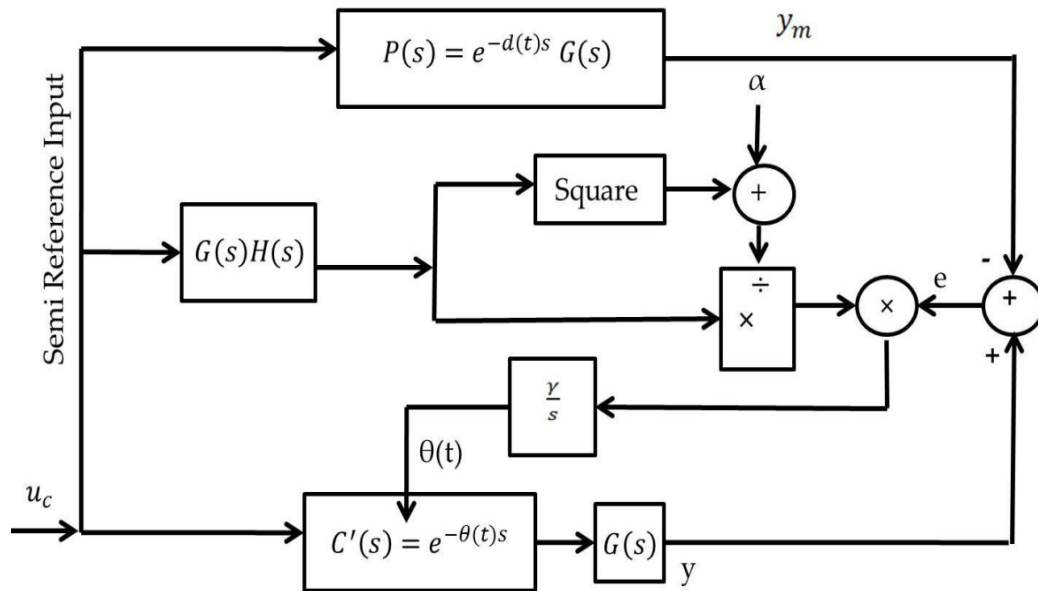
$$e(t) = y(t) - y_m(t) \quad (۶)$$

$$\begin{cases} \Phi(t) = \frac{\varphi(t)}{\alpha + \varphi(t)^T \varphi(t)} \\ \varphi(t) = -\frac{d}{d\theta} \{e(t)\} \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن،  $y(t)$  خروجی سیستم  $G(s)$  و  $y_m(t)$  خروجی سیستم  $P(s)$  می‌باشد و  $\alpha$  یک عدد ثابت بزرگتر از صفر می‌باشد. با توجه به شکل 2-b می‌توان سیگنال خطا  $(e(t))$  را بصورت رابطه‌ی (۸) نوشت.

<sup>1</sup> Massachusetts Institute of Technology Rule

سعی می‌شود که این معادله، مستقل از ورودی‌ها و خروجی‌ها - ها، پایدار گردد. لازم به ذکر است که، تابع لیاپانوف مذکور، با هدف حداقل‌سازی برخی از ترم‌های اضافی موجود در معادله‌ی دیفرانسیل خطا، تعریف می‌گردد و قاعده‌ی تطبیق نیز از مشتق تابع لیاپانوف استخراج می‌شود، به‌نحوی که بر- قراری این قاعده، باید موجب شود که مشتق تابع لیاپانوف همواره (نیمه) معین منفی گردد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام تخمین-گر تأخیر پیشنهادی با استفاده از روش MIT

(۱۸) و (۱۹)، با اندکی محاسبات و به راحتی معادله‌ی دینامیک خطا، مطابق رابطه‌ی (۲۰) بدست خواهد آمد.

$$\dot{e}(t) = -\left(\frac{2}{\theta} - \frac{2}{\theta_r}\right)y(t) + \left(\frac{2}{\theta} - \frac{2}{\theta_r}\right)r(t) - \frac{2}{\theta_r}e(t) \quad (20)$$

که در آن  $r(t)$  لاپلاس معکوس  $R(s)$  می‌باشد. با توجه به آنچه که در بخش دوم مقاله گفته شد،  $\theta_r$  بایستی همواره مثبت باشد، لذا باید یک تابع لیاپانوف مثبت معین، به‌نحوی تعریف شود که معادله‌ی دیفرانسیل خطا، مستقل از  $r(t)$  و  $y(t)$  همواره پایدار باشد و خطا به سمت صفر میل کند. با توجه به این مطالب، یک تابع لیاپانوف مطابق رابطه‌ی (۲۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$V(e(t), \Delta\theta) = \frac{1}{2}e(t)^2 + \frac{1}{2\gamma}\left(\frac{2}{\theta} - \frac{2}{\theta_r}\right)^2 \quad (21)$$

که در آن  $\gamma$  بهره‌ی تطبیق و  $\Delta\theta$  تابعی از اختلاف بین  $\theta$  و  $\theta_r$  است. واضح است که با حداقل‌شدن این تابع لیاپانوف، اولاً خطا حداقل خواهد شد و ثانیاً تخمین تأخیر به سمت مقدار واقعی تأخیر میل خواهد کرد. به راحتی و با اندکی

۲-۳ روش دوم: طراحی مکانیزم تخمین‌گر با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف

با توجه به مرجع [۵۱]، روند کلی طراحی در این روش، به اینصورت است که ابتدا معادله‌ی دینامیک خطا ( $\dot{e}(t)$ ) محاسبه می‌شود، سپس با تعریف یک تابع لیاپانوف مناسب،

با توجه به شکل 2-b و با تعریف  $R(s) = G(s) \cdot U_c(s)$  روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب بیان‌کننده‌ی خروجی سیستم  $P(s)$  و  $G(s)$  در حوزه‌ی لاپلاس خواهند بود.

$$Y(s) = e^{-\hat{d}(t)s} \cdot R(s) \quad (16)$$

$$Y_m(s) = e^{-d(t)s} \cdot R(s) \quad (17)$$

که  $Y(s)$ ،  $U_c(s)$  و  $Y_m(s)$  به ترتیب تبدیل لاپلاس سیگنال‌های  $y(t)$ ،  $u_c(t)$  و  $y_m(t)$  می‌باشد.

با فرض اینکه  $\hat{d}(t) = \theta(t) = \theta$  تخمینی از تأخیر و  $d(t) = \theta_r(t) = \theta_r$  مقدار واقعی تأخیر، در هر لحظه از زمان باشد، با در نظر گرفتن تقریب پده‌ی مرتبه‌ی اول برای عامل تأخیر زمانی، روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب، بصورت زیر بازنویسی خواهند شد.

$$Y(s) = \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \cdot R(s) \quad (18)$$

$$Y_m(s) = \frac{1 - \frac{\theta_r}{2}s}{1 + \frac{\theta_r}{2}s} \cdot R(s) \quad (19)$$

با توجه به تعریف خطا در رابطه‌ی (۶) و با استفاده از روابط

تخمین گر، سیگنال  $\theta(t)$  می باشد.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش برای انجام شبیه سازی های مختلف و ارزیابی تخمین گر پیشنهادی، یک سیستم نمونه ی مرتبه ی اول با تابع تبدیل زیر انتخاب شده است.

$$P(s) = \frac{1}{(1+s)} e^{-s.d} \quad (26)$$

که در آن  $d = d(t)$ ، یک تأخیر متغیر با زمان و نامعلوم است. به منظور طراحی تخمین گر تأخیر، بایستی بازه ی تغییرات تأخیر مشخص باشد، لذا فرض می شود  $d_{min} = 0 \leq d \leq d_{max} = 1$ .

در شکل (۵) به عنوان نمونه، تأثیر تأخیر متغیر با زمان سینوسی و پالس متناوب، بر روی یک ورودی سینوسی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود سیگنال سینوسی ورودی، پس از عبور از بلوک تأخیر دهنده، شدیداً دچار تغییر می شود و از حالت استاندارد خود خارج می شود. در چنین وضعیتی، قطعاً در مسئله ی کنترلی ردیابی سیگنال مرجع نیز چالش هایی به وجود خواهد آمد.

در این شکل سیگنال ورودی برابر است با  $u_c(t) = 5 \sin(0.5\pi t)$  که در شکل (۵-a) نمایش داده شده است. سیگنال تأخیر زمانی اعمال شده، در تشکیل شکل (۵-b) برابر است با  $d(t) = 0.5 + 0.45 \sin(\pi t)$  و در تشکیل شکل (۵-c) سیگنال تأخیر زمانی عبارت است از یک موج پالس متناوب دوسطحی (به ترتیب، سطح با ارزش ۰/۰۵ و سطح با ارزش ۰/۹۵) با دوره ی تناوب ۲ ثانیه و عرض پالس ۱ ثانیه.

محاسبات، با استفاده از رابطه ی (۲۰)، می توان مشتق تابع لیاپانوف فوق را نسبت به زمان، مطابق رابطه ی (۲۲) نوشت.

$$\dot{V}(e(t), \Delta\theta) = -\frac{2}{\theta_r} e(t)^2 + \left(\frac{2}{\theta} - \frac{2}{\theta_r}\right) \times (e(t) \cdot (r(t) - y(t)) - 2\dot{\theta} \frac{1}{\gamma \theta^2}) \quad (22)$$

با توجه به مثبت بودن  $\theta_r$  برای اینکه  $\dot{V}(e(t), \Delta\theta)$  یک تابع (نیمه) معین منفی گردد، بایستی رابطه ی (۲۳) برقرار گردد.

$$\dot{\theta} = \frac{\gamma}{2} \theta^2 \cdot e(t) \cdot (r(t) - y(t)) \quad (23)$$

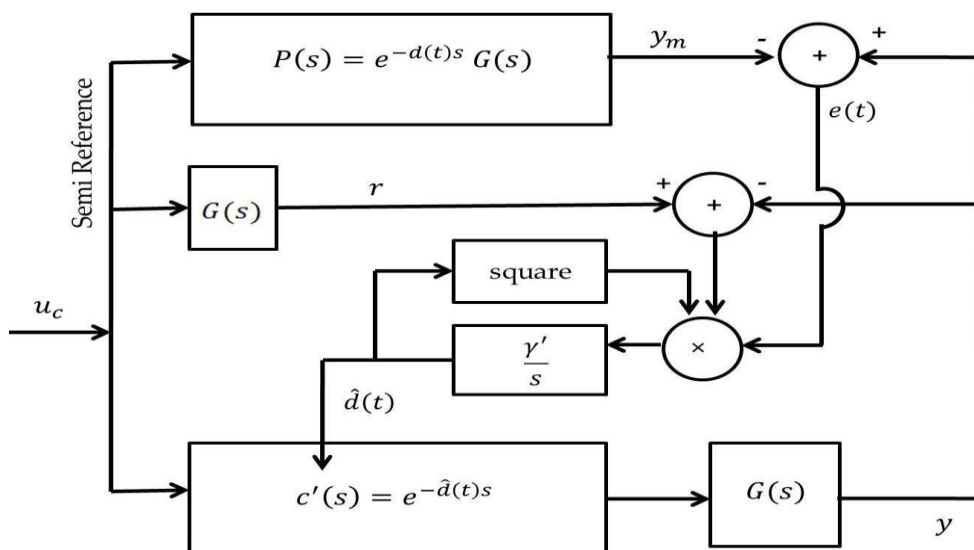
با برقراری رابطه ی (۲۳)،  $\dot{V}$  معادل رابطه ی (۲۴) خواهد بود و لذا همان طور که مشاهده می شود،  $\dot{V}$  یک تابع نیمه معین منفی، خواهد شد.

$$\dot{V}(e(t), \Delta\theta) = -\frac{2}{\theta_r} e(t)^2 \quad (24)$$

با در نظر گرفتن  $\frac{\gamma}{2} = \gamma'$  به عنوان یک بهره ی تطبیق جدید و با استفاده از رابطه ی (۲۳)، می توان قاعده ی تطبیق را برای تنظیم شبه کنترلر، مطابق رابطه ی (۲۵) نوشت. لازم به ذکر است که این معادله در واقع، همان مکانیزم تخمین گر تأخیر را ارائه می دهد.

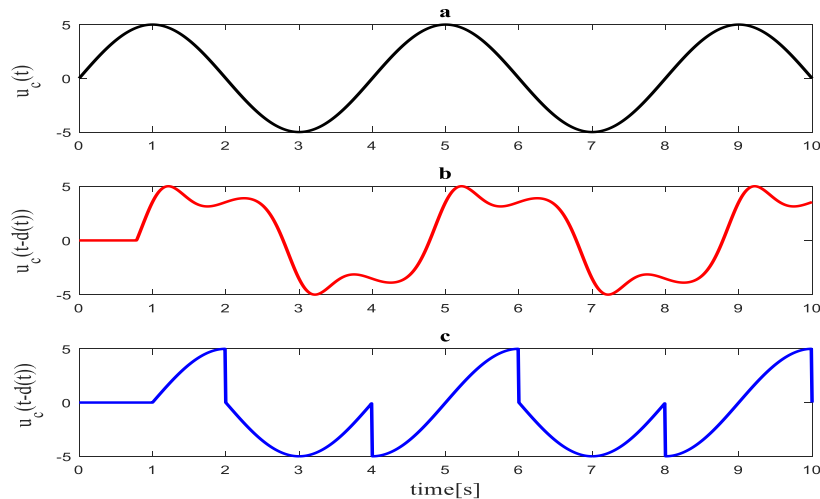
$$\dot{\theta}(t) = \int \gamma' \cdot \theta(t)^2 \cdot e(t) \cdot (r(t) - y(t)) dt \quad (25)$$

با فرض معادل بودن اپراتور انتگرالگیر ( $\int$ ) (در حوزه زمان) و تابع تبدیل  $\frac{1}{s}$  (در حوزه لاپلاس)، شکل (۴) نشان دهنده ی بلوک دیاگرام تخمین روش لیاپانوف می باشد. لازم به ذکر است که برای هر دو بلوک دیاگرام (۳) و (۴) خروجی



شکل ۴: بلوک دیاگرام تخمین گر تأخیر پیشنهادی با استفاده از روش لیاپانوف





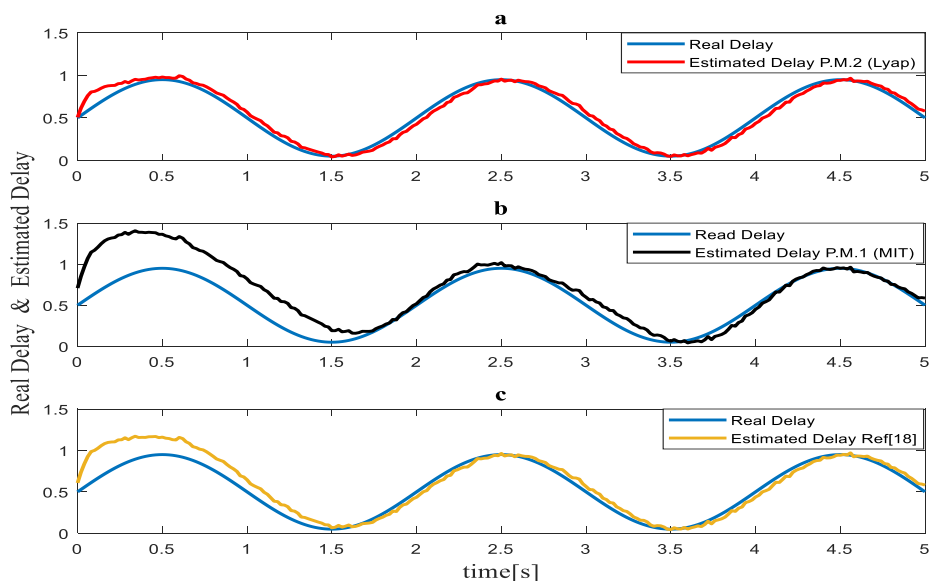
شکل ۵: مقایسه‌ی سیگنال ورودی قبل از اعمال تأخیر و سیگنال ورودی بعد از عبور از بلوک تأخیردهنده

(a) سیگنال ورودی بدون تأخیر، (b) سیگنال ورودی در حضور تأخیر سینوسی، (c) سیگنال ورودی در حضور تأخیر پالس متناوب

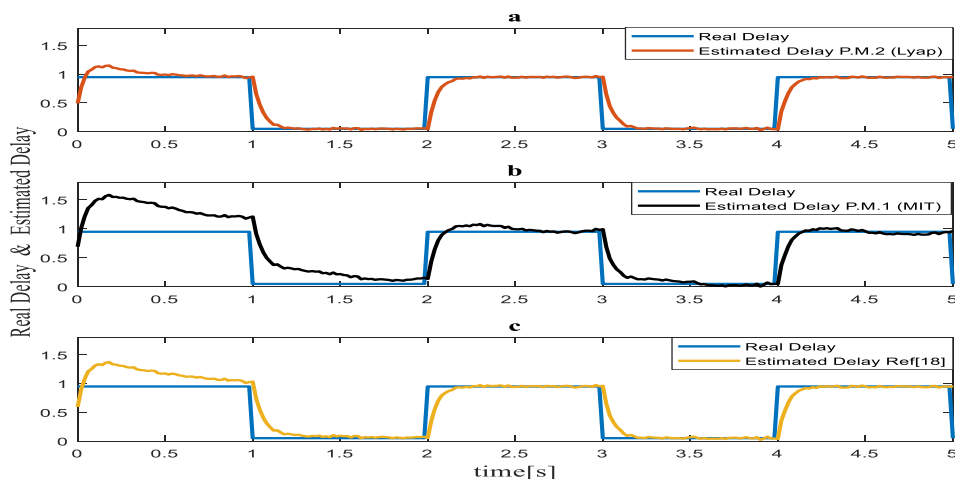
تخمین‌گر پیشنهادی اول و تخمین‌گر ارائه شده در مرجع [۱۸] مشاهده می‌شوند. برای این نوع تأخیر نیز به منظور مقایسه‌ی دقیق بین عملکرد این تخمین‌گرها، شاخص میانگین مربعات خطای تخمین (MSE) برای هر سه تخمین‌گر محاسبه شده، که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق آنچه که در شکل‌ها و جداول ارائه شدند، می‌توان گفت، دقت تخمین‌گر پیشنهادی دوم، از دقت دو تخمین‌گر دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین از لحاظ زمان اجرا، تخمین‌گر پیشنهادی اول، از دو تخمین‌گر دیگر سریعتر می‌باشد. لازم به ذکر است، در حالتی که باند عدم قطعیت برای پارامتر تأخیر، وسیعتر در نظر گرفته شود، دقت تخمین‌گر پیشنهادی دوم، با اختلاف زیاد، از دو تخمین‌گر دیگر بیشتر می‌باشد، زیرا این تخمین‌گر بر خلاف دو تخمین‌گر دیگر مستقل از میانگین تغییرات تأخیر زمانی، طراحی شده است و به نوعی تخمین‌گر پیشنهادی دوم، مقاوم‌تر طراحی شده است. این موضوع کاملاً در شکل (۸) مشهود است. در این شکل عملکرد هر سه تخمین‌گر برای یک تأخیر زمانی پلکانی چند سطحی، قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وسیعتر شدن بازه‌ی عدم قطعیت برای تأخیر زمانی، برتری عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی دوم، نسبت به دو تخمین‌گر دیگر، بارزتر و روشن‌تر می‌شود. در جدول ۳ نیز دقت سه تخمین‌گر، برای این نوع از تأخیر زمانی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌ها در راستای تخمین دو نوع تأخیر زمانی مختلف، برای سیستم با معادله‌ی (۲۶) ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که، سیگنال ورودی سیستم، به منظور شناسایی، از نوع سینوسی با معادله‌ی  $u_c(t) = 5 \sin(0.5\pi t)$  در تمامی شکل‌ها و جداول، دو روش پیشنهادی (روش اول و دوم) و یک روش کارآمد (ارائه شده در [۱۴] و [۱۸]) با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شکل ۶، عملکرد تخمین‌گرهای پیشنهادی (۱) و (۲) و همچنین عملکرد روش [۱۸] را در تخمین تأخیر زمانی سینوسی نشان می‌دهد.

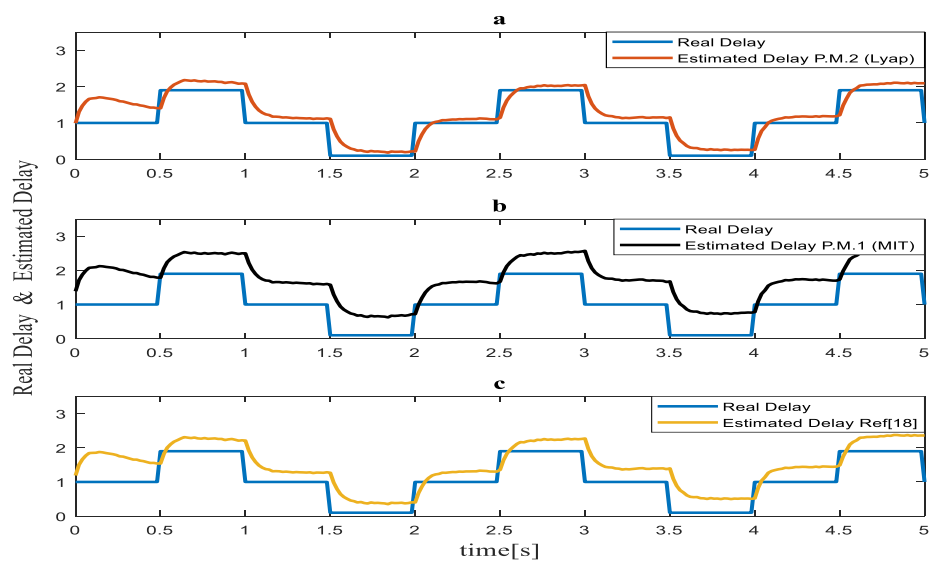
در این شکل تأخیر واقعی سیستم برابر است با  $d(t) = 0.5 + 0.45 \sin(\pi t)$  در قسمت‌های a, b و c، از شکل ۶، به ترتیب عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی دوم، تخمین‌گر پیشنهادی اول و تخمین‌گر ارائه شده در مرجع [۱۸] مشاهده می‌شوند. به منظور مقایسه‌ی دقیق بین عملکرد این تخمین‌گرها، شاخص میانگین مربعات خطای تخمین (MSE) برای هر سه تخمین‌گر محاسبه شده، که در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل (۷) نیز نشان دهنده‌ی عملکرد این تخمین‌گرها، در تخمین تأخیر زمانی پالس متناوب می‌باشد. در این شکل تأخیر واقعی سیستم برابر است با، یک موج پالس متناوب دو سطحی (به ترتیب، سطح با ارزش ۰/۰۵ و سطح با ارزش ۰/۹۵) با دوره‌ی تناوب ۲ ثانیه و عرض پالس ۱ ثانیه. در قسمت‌های a, b و c از شکل (۷) به ترتیب عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی دوم،



شکل ۶: مقایسه‌ی دو تخمین گر پیشنهادی و تخمین گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی سینوسی



شکل ۷: مقایسه‌ی دو تخمین گر پیشنهادی و تخمین گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی پالس متناوب



شکل ۸: مقایسه‌ی دو تخمین گر پیشنهادی و تخمین گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی پلکانی چندسطحی

ساختار کنترلر تطبیقی مستقیم (MRAS<sup>۱</sup>)، برای طراحی یک تخمین‌گر استفاده شد. به‌طور خلاصه قسمت‌های اصلی در یک سیستم کنترلر MRAS (شامل: مدل مرجع، سیستم تحت کنترل، کنترلر قابل تنظیم و قاعده‌ی تطبیق)، به‌نحوی سازمان‌دهی شدند که طراحی کنترلر، منجر به طراحی تخمین‌گر تأخیر، در مسئله‌ی دوگان شود. در واقع قاعده‌ی تطبیق در مسئله‌ی طراحی کنترلر، همان مکانیزم تخمین‌گر در مسئله‌ی دوگان را بیان می‌کند. لازم به ذکر است که در راستای طراحی مکانیزم تخمین (قاعده‌ی تطبیق)، از دو روش مبتنی بر قاعده‌ی MIT و مبتنی بر تئوری پایداری لیاپانوف استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها برای انواع مختلفی از سیگنال تأخیر زمانی، بر روی یک سیستم نمونه انجام گرفتند. تأخیر زمانی سیستم مورد مطالعه با استفاده از رؤیتگرهای پیشنهادی، با دقت و سرعت قابل قبولی و بصورت آنلاین، تخمین زده شد. در عین حال، نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از این است که، تخمین‌گر مبتنی بر تئوری پایداری لیاپانوف، دارای سرعت و دقت نسبتاً بیشتر، از دیگر روش‌ها می‌باشد. همچنین برای تأخیرهای با باند عدم قطعیت نسبتاً وسیع‌تر، عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی دوم (مبتنی بر تئوری پایداری لیاپانوف)، مطلوب‌تر از دیگر تخمین‌گرها گزارش می‌شود. نهایتاً لازم به ذکر است که در راستای بهبود عملکرد تخمین‌گر پیشنهادی می‌توان در روند طراحی تخمین‌گر، از تقریب‌های پده‌ی مراتب بالاتر به‌جای عامل تأخیر زمانی استفاده نمود، که این امر قطعاً موجب بالا رفتن دقت تخمین خواهد شد. نهایتاً پیشنهاد می‌شود با توجه به قابلیت‌های سیستم‌های هوشمند (مانند عصبی و فازی)، در مسائل مدل‌سازی، شناسایی و تخمین [۵۵-۵۲]، از این سیستم‌ها در مسئله‌ی مدل‌سازی و شناسایی سیستم‌های تأخیردار استفاده شود.

جدول ۱: مقایسه‌ی دقت تخمین‌گرهای پیشنهادی و تخمین‌گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی سینوسی

تخمین‌گر تأخیر	میانگین مربعات خطای تخمین (MSE)
روش پیشنهادی اول	۰/۰۴۷۴
روش پیشنهادی دوم	۰/۰۰۳۴
روش ارائه‌شده در مرجع [۱۸]	۰/۰۱۴۵

جدول ۲: مقایسه‌ی دقت تخمین‌گرهای پیشنهادی و تخمین‌گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی پالس متناوب

تخمین‌گر تأخیر	میانگین مربعات خطای تخمین (MSE)
روش پیشنهادی اول	۰/۰۷۵۸
روش پیشنهادی دوم	۰/۰۲۹۷
روش ارائه‌شده در مرجع [۱۸]	۰/۰۴۱۵

جدول ۳: مقایسه‌ی دقت تخمین‌گرهای پیشنهادی و تخمین‌گر مرجع [۱۸] در مسئله‌ی تخمین تأخیر زمانی پلکانی چند-سطحی

تخمین‌گر تأخیر	میانگین مربعات خطای تخمین (MSE)
روش پیشنهادی اول	۰/۴۰۰۹
روش پیشنهادی دوم	۰/۰۹۵۲
روش ارائه‌شده در مرجع [۱۸]	۰/۱۹۸۷

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تخمین‌گر تأخیر زمانی برای کلاس خاصی از سیستم‌های LTI، با تأخیر زمانی متغیر و نامعلوم ارائه شد. واضح است که در فرآیند طراحی کنترلرهای تطبیقی غیرمستقیم، یک رکن اساسی، مکانیزم تخمین پارامترهای سیستم تحت کنترل است. در این مقاله، روشی نوین برای طراحی یک تخمین‌گر نسبتاً سریع و دقیق ارائه شد. ایده‌ی اصلی این روش، برپایه‌ی برقراری اصل دوگانی، بین کنترلر و رؤیتگر می‌باشد، در این مقاله به‌طور غیرمستقیم، از

## مراجع

- [1] J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, "Control of Dead-time Processes", Springer-Verlag, 1<sup>th</sup> ed, London, UK, 2007.
- [2] Q. C. Zhong, "Robust Control of Time-delay Systems", Springer-Verlag, 1<sup>th</sup> ed, London, UK, 2006.
- [3] M. Wu, Y. He, and J. H. She, "Stability Analysis and Robust Control of Time-Delay Systems", Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [4] S. Bjorklund and L. Ljung, "A review of time-delay estimation techniques", 42<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Decision and Control, (IEEE Cat. No.03CH37475), Maui, HI, Vol. 3, 2003, pp. 2502-2507

<sup>۱</sup> Model Reference Adaptive System

- [5] A. O. Dwyer and R. Gao, "Comparison of two B-polynomial Methods Application to the Identification of Time delayed Processes", Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference, NUI Maynooth, Ireland, June 2001, pp. 105-111.
- [6] J. Roe, R. Gao and A. Dwyer, "Identification of a Time-delayed Process Model using an Over parameterization Method", Proceedings of the China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies (CICT), DCU, August 2007.
- [7] K. Taarita, L. Belkoura, M. Ksouri and J.P. Richard, "A Fast Identification Algorithm For Systems With Delayed Inputs", International Journal of Systems Science, Taylor & Francis, Vol. 42, No. 3, pp. 449-456. 2011.
- [8] L. Belkoura, J. P. Richard and M. Fliess, "On-line identification of systems with delayed inputs", 17<sup>th</sup> Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), Kyoto, Japon, July 2006.
- [9] A. O'Dwyer and J. V. Ringwood, "Model Parameter And Time Delay Estimation Using Gradient Methods", Proceedings of the Irish Colloquium on DSP and Control, Dublin City University, July 1994, pp. 211-218.
- [10] D. Etter and S. Stearns, "Adaptive estimation of time delays in sampled data systems", in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 29, No. 3, June 1981, pp. 582-587.
- [11] S. Ahmed, B. Huang and S. L. Shah, "Parameter and delay estimation of continuous-time models using a linear filter", Journal of Process Control, Vol. 16, No. 4, April 2006, pp. 323-331.
- [12] S.V. Drakunov, W. Perruquetti, J.-P. Richard and L. Belkoura, "Delay identification in time-delay systems using variable structure observers", Annual Reviews in Control, Vol. 30, Issue 2, 2006, pp. 143-158
- [13] J. Kozłowski and Z. Kowalczyk. "On-line Parameter and Delay Estimation of Continuous-Time Dynamic Systems", Int. J. Appl. Math. Comput. Sci, Vol. 25, Issue 2, June 2015, pp. 223-232.
- [14] V. Léchappé, E. Moulay and F. Plestan, "Dynamic observation-prediction for LTI systems with a time-varying delay in the input", 2016 IEEE 55<sup>th</sup> Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, NV, 2016, pp. 2302-2307.
- [15] C. Lai and P. Hsu, "Design the Remote Control System With the Time-Delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor", in IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 6, No. 1, Feb. 2010, pp. 73-80.
- [16] R.M.C.De Keyser, "ADAPTIVE DEAD-TIME ESTIMATION", 2nd IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Lund, Sweden, Vol. 20, Issue. 2, July 1986, pp. 385-389.
- [17] J. Tuch, A. Feuer and Z. J. Palmor, "Time delay estimation in continuous linear time-invariant systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 4, April 1994, pp. 823-827.
- [18] V. Léchappé, J. De León, E. Moulay, F. Plestan and A. Glumineau, "Delay and state observer for SISO LTI systems", 2015 American Control Conference (ACC), Chicago, IL, 2015, pp. 4585-4590.
- [19] X. Hong and Q. Zhu, "An on-line algorithm of uncertain time delay estimation in a continuous system," 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control, Okayama, 2009, pp. 498-501.
- [20] M. Krstic, "Lyapunov Stability of Linear Predictor Feedback for Time-Varying Input Delay", in IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 55, No. 2, Feb 2010, pp. 554-559.
- [21] N. Nguyen and E. Summers, "On Time Delay Margin Estimation for Adaptive Control and Robust Modification Adaptive Laws", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, Portland, Oregon, 2011.
- [22] Y. Liu, L. -S. Hu and P. Shi, "A novel approach on stabilization for linear systems with time-varying input delay", Applied Mathematics and Computation, Vol. 218, No. 10, 2012 pp. 5937-5947.
- [23] F. Cacace, F. Conte and A. Germani, "State Feedback Stabilization of Linear Systems with Unknown Input Time Delay", IFAC-Papers On Line, Vol. 50, Issue. 1, 2017, pp. 1245-1250.
- [24] Y. Wei and Z. Lin, "A delay-independent output feedback for linear systems with time-varying input delay", International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, pp. 1-11.
- [25] D. Yue and Q. L. Han, "Delayed feedback control of uncertain systems with time-varying input delay", Automatica, Vol. 41, Issue. 2, 2005, pp. 233-240.
- [26] C. Y. Kao and B. Lincoln, "Simple Stability Criteria For Systems With time-Varying Delays", Automatica, Vol. 40, No. 8, August 2004, pp. 1429-1434.

- [27] W. -A. Zhang and L. Yu, "A robust control approach to stabilization of networked control systems with time-varying delays", *Automatica*, Vol. 45, No. 10, October 2009, pp. 2440-2445.
- [28] A. Polyakov, A. Poznyak and J. Richard, "Robust output stabilization of time-varying input delay systems using attractive ellipsoid method", 52<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Florence, 2013, pp. 934-939.
- [29] C. Yuan and F. Wu, " $\mathcal{H}_\infty$  state-feedback control of linear systems with time-varying input delays," 2016 IEEE 55<sup>th</sup> Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas, NV, 2016, pp. 586-591.
- [30] D. B. Pietri, F. Mazenc and N. Petit, "Robust compensation of a chattering time-varying input delay with jumps", *Automatica*, Vol. 92, 2018, pp. 225-234.
- [31] S. Roy and I. N. Kar, "Robust Control of Uncertain Euler-Lagrange Systems with Time-Varying Input Delay," In Proceedings of the Advances in Robotics (AIR '17), ACM, New York, NY, USA, Article 16, 2017, 6 pages.
- [32] R. Matusu and R. Prokop, "Control of systems with time-varying delay: A comparison study", 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation, ACMOS 10, 2010, pp. 125-130.
- [33] J. G. Dawson, "Fuzzy logic control of linear systems with variable time delay", Proceedings of 1994 9<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Control, Columbus, OH, USA, 1994, pp. 5-10.
- [34] D. Srinivasagupta, H. Schättlerb and B. Joseph, "Time-stamped model predictive control: an algorithm for control of processes with random delays", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 8, July 2004, pp. 1337-1346.
- [35] S. Y. Yoon and Z. Lin, "Truncated predictor feedback control for exponentially unstable linear systems with time-varying input delay", *Systems & Control Letters*, Vol. 62, Issue. 10, 2013, pp. 837-844.
- [36] F. Cacace , A. Germani and C. Manes, "Predictor-based control of linear systems with large and variable measurement delays", *International Journal of Control*, Taylor & Francis, Vol. 87, No. 4, 2014, pp. 704-714.
- [37] V. Léchappé and E. Moulay and F. Plestan "Prediction-based control for LTI systems with uncertain time-varying delays and partial state knowledge", *International Journal of Control*, Taylor & Francis, Vol. 91, No. 6, 2018, pp. 1403-1414.
- [38] X. Han, E. Fridman and S.K. Spurgeon, "Sliding mode control in the presence of input delay: A singular perturbation approach", *Automatica*, Vol. 48, Issue. 8, 2012, pp. 1904-1912.
- [39] Y. Farid and N. Bigdeli, "Robust adaptive intelligent sliding model control for a class of uncertain chaotic systems with unknown time-delay", *Nonlinear Dyn*, Vol. 67, No. 3, February 2012, pp. 2225-2240.
- [40] F. Carravetta, P. Palumbo and P. Pepe, "Quadratic Optimal control of linear systems with time-varying input delay," 49<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Atlanta, GA, 2010, pp. 4996-5000.
- [41] F. Cacace, F. Conte and A. Germani, "Memoryless Approach to the LQ and LQG Problems With Variable Input Delay", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 1, 2016, pp. 216-221.
- [42] F. Cacace, F. Conte, A. Germani and G. Palombo, "Optimal control of linear systems with large and variable input delays", *Systems & Control Letters*, Vol. 89, pp. 1-7, 2016.
- [43] J. K. Pieper, B. W. Surgenor and J. Z. Liu, "On Self-Tuning Control of Processes with Time Varying Dead Time" , American Control Conference 1991, Boston, MA, USA, 26-28 June 1991, pp. 2166-2171,
- [44] H. kurzt and W. goedecke, "Digital Parameter-Adaptive Control of Processes with Unknown Dead Time", *Automatica*, Vol. 17, No. I, January 1981, pp. 245-252.
- [45] G. A. Dumont, A. Elnaggar and A. Elshafelt, "Adaptive Predictive Control Of Systems With Time-Varying Time Delay", *International Journal Of Adaptive Control And Signal Processing*, Vol. 7, No. 2, March 1993, pp. 91-101.
- [46] C. Chandra Prasad, V. Hahn, H. Unbehauen and U. Keuchel, "Adaptive Control of a Variable Dead Time Process with an Integrator", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 18, Issue. 15, 1985, pp. 71-75.
- [47] J. P. Nelson and M. J. Balas, "Direct model reference adaptive control of linear systems with input/output delays", *Numerical Algebra, Control & Optimization*, Vol. 3, No. 3, 2013, pp. 445-462.
- [48] M. T. Nihtilä, "Adaptive control of a continuous-time system with time-varying input delay", *Systems & Control Letters*, Vol. 12, Issue. 4, 1989, pp. 357-364.

[49] P. S. Agachi, Z. K..Nagy, M. V. Cristea and A. L. Imre-Lucaci, "Model Based Control", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.

[50] N. B. Liberis and M. Krstic, "Nonlinear Control Under Nonconstant Delays (Advances in Design and Control)", SIAM-Society for Industrial and Applied Mathematics, 24 September 2013.

[51] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive Control", Dover Publications; Second ed, Mineola, New York, December 2008.

[۵۲] حسین شریف‌زاده و مصطفی جزائری، "طراحی تخمین گر حالت و آشکارساز داده غلط سیستم‌های قدرت با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۶، پائیز ۱۳۹۰، صفحه ۱۳-۲۲.

[۵۳] مرضیه حسین‌آبادی، عبدالحسین حداد و حسین نادرپور، "استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی واقع بر بسترهای چند لایه چسبنده"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۴، بهار ۱۳۹۰، صفحه ۶۵-۸۲.

[۵۴] حسین بخشی، غلامرضا قدرتی امیری، محمد خراسانی، محمدرضا فدوی و محمدعلی برخوردار، "تخمین پارامترهای شتاب، سرعت و جابجایی ماکزیمم زمین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۵، شماره ۱۹، زمستان ۱۳۸۸، صفحه ۱۱-۲۱.

[۵۵] نیما امجدی، آشنایی با سیستم‌های هوشمند. چاپ اول، انتشارات دانشگاه سمنان، ایران، ۱۳۸۱.