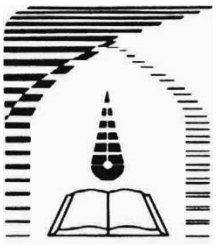
بسم الله الرحمن الرحیم



دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه‌ی دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

بررسی و تعمیم روش زیرفضا برای شناسایی تأخیرهای متغیر با زمان در سیستم‌های چندمتغیره

ایمان شفی خانی

استاد راهنما:

دکتر امین رمضانی

استاد مشاور:

دکتر حمید رضا مؤمنی

زمستان ۱۳۹۳

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای ایمان شفی خانی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **بررسی تعمیم روش زیر فضا برای شناسایی تاخیرهای متغیر با زمان در سیستم های چند متغیره** در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد کنترل پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رشته علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر امین رمضانی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر حمیدرضا مومنی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد صالح تواضعی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم‌افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایش‌نامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب ایمان شفی‌خانی دانشجوی رشته مهندسی برق – نظریه کنترل ورودی سال تحصیلی ۱۳۹۱ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف این‌جانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدین‌وسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: ایمان شفی‌خانی

تاریخ: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱

آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی- پژوهشی دانشگاه است، بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه‌ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسي برق- نظريه كنترل است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر امين رمضاني و مشاوره جناب آقای دکتر حميدرضا مومني از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: این‌جانب ايمان شفي‌خاني دانشجوی رشته مهندسي برق- نظريه كنترل مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: ايمان شفي‌خاني

تاریخ و امضا: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱

چکیده

با توجه به گسترش شگرف روش‌های شناسایی زیرفضا طی دو دهه‌ی اخیر، این روش‌ها توجه بسیاری از مهندسان را به خود جلب نموده‌اند. علت اصلی جذابیت روش‌های مذکور را می‌توان در سهولت شناسایی سیستم-های چندمتغیره و نیز شناسایی صورت فضای حالت سیستم، که برای آن روش‌های طراحی کنترل‌کننده و ابزار تحلیل پایداری بسیاری موجود است، خلاصه نمود. در این پایان‌نامه، مسئله‌ی تعمیم روش‌های زیرفضا به سیستم-های چندمتغیره دارای تاخیرهای متغیر با زمان بررسی می‌شود. برای انجام این کار اگر تخمین مناسبی از تاخیرهای زمانی در هر نمونه در دست باشد، با انتقال مناسب داده‌ها می‌توان سیستم مورد نظر را به‌صورت بازگشتی شناسایی نمود. از آنجاییکه روش‌های بازگشتیِ زیرفضا به وفور در دسترس هستند، تمرکز این پژوهش بر ارائه‌ی روشی بازگشتی جهت تخمین تاخیرهای زمانی سیستم چندمتغیره می‌باشد. همچنین با توجه به قوت روش‌های زیرفضا در شناسایی جعبه-سیاه، حتی‌الامکان فرض می‌شود که هیچ‌گونه اطلاعات اولیه‌ای راجع به ساختار سیستم در دسترس نیست. این فرض، مزیت روش ارائه شده در این پایان‌نامه را نسبت به روش‌های موجود تخمین تاخیر نمایان می‌سازد. در پایان نیز کارایی روش ارائه شده توسط چند مثال شبیه‌سازی تائید می‌گردد.

کلید واژه: شناسایی سیستم، زیرفضا، تاخیر زمانی، متغیر با زمان

فهرست مطالب

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و
فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه روش‌های شناسایی زیرفضا ۳
۱-۳- هدف و ضرورت انجام پژوهش و کاربردهای آن ۵
۱-۴- ساختار گزارش ۵
فصل ۲- تعریف مسئله ۶
۲-۱- مقدمه ۶
۲-۲- مقدمه‌ای بر هدف پژوهش ۶
۲-۳- بررسی اجمالی روش‌های مرسوم تخمین تأخیر متغیر با زمان ۷
۲-۴- بررسی یک روش اخیر برای تخمین تأخیرهای متغیر با زمان بر اساس روش زیرفضا ۹
۲-۴-۱- تشریح ریاضی مسئله ۹
۲-۴-۲- بررسی کاراییِ روش با یک مثال ۱۲
۲-۴-۳- مشکلات و محدودیت‌های روش مذکور و تعریف مسئله ۱۳
۲-۵- نتیجه‌گیری ۱۴
فصل ۳- مروری بر شناسایی زیرفضا ۱۵
۳-۱- مقدمه ۱۵
۳-۲- مباحث اساسی در شناسایی زیرفضا ۱۵
۳-۲-۱- مدل‌ها، نمادگذاری‌ها و مفروضات ۱۵
۳-۲-۲- شناسایی حلقه باز ۲۰
۳-۳- شناسایی بازگشتی به روش زیرفضا ۲۲
۳-۳-۱- تئوری روش بازگشتی بر اساس کمینه‌ی مربعات مقید ۲۲

۳-۳-۲- مزایا و معایب روش نامبرده ۲۵
۳-۴- نتیجه‌گیری ۲۶
فصل ۴- ارائه‌ی روشی برای تخمین تأخیر زمانی به روش زیرفضا ۲۷
۴-۱- مقدمه ۲۷
۴-۲- الگوریتم اصلی و قضایای مرتبط ۲۷
۴-۲-۱- قضیه‌ی اساسی الگوریتم بازگشتی ۲۷
۴-۲-۲- استفاده از ضریب فراموشی در الگوریتم ۳۲
۴-۲-۳- بحث در مورد تابع معیار ۳۳
۴-۲-۴- بیان الگوریتم‌ها به‌طور خلاصه ۳۴
۴-۲-۵- مسائل مربوط به نویز ۳۵
۴-۳- نتیجه‌گیری ۴۲
فصل ۵- شبیه‌سازی ۴۳
۵-۱- مقدمه ۴۳
۵-۲- مثال‌های شبیه‌سازی شده ۴۳
۵-۲-۱- تخمین تأخیر برای یک سیستم فرضی ۴۳
۵-۲-۲- بررسی اثر ضریب فراموشی ۴۵
۵-۲-۳- تخمین تأخیر برای یک سیستم چندمتغیره دارای زیر سیستم‌های انتگرالی ۴۷
۵-۲-۴- مقایسه‌ی معیار ارائه‌شده با معیار آستانه‌ای ۴۹
۵-۲-۵- تخمین تأخیر در حضور نویز ۵۲
۵-۲-۶- تخمین تأخیر برای یک سیستم هیبرید ۵۳
۵-۳- نتیجه‌گیری ۵۶
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۵۷
۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۵۷
۶-۲- پیشنهادات ۵۸
فهرست مراجع ۶۰
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۶۴

واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی..... ۶۷

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
امیدریاضی	E
نویز	e
توان سیگنال	P
مقدار تکین ماتریس	σ
میدان اعداد حقیقی	$\mathbb{R}$
دلتای کرونکر	δ_{ij}
ضرب ماتریسی کرونکر	$\otimes$
اندازه‌ی طیفی	$\|\cdot\|_2$
اندازه‌ی فروبنیوس	$\|\cdot\|_F$

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: ضرایب ماتریسهای وزنی متناظر با چند روش زیرفضا ۲۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: تخمین تأخیر با روش پیشنهادی [۴۱]: مدل طراحی و مدل واقعی یکسان هستند. ۸

شکل ۲-۲: تخمین تأخیر با روش پیشنهادی [۴۱]: مدل طراحی و مدل واقعی متفاوت می باشند. ۸

شکل ۲-۳: پاسخ‌های ضربه، زمانی که ورودی‌ها جداگانه تحریک شده باشند. ۱۳

شکل ۵-۱: تخمین تأخیر زمانی برای یک سیستم چندمتغیره‌ی پایدار. تخمین توسط الگوریتم ۱ و بدون استفاده از ضریب فراموشی انجام شده است. ۴۴

شکل ۵-۲: تخمین تأخیر زمانی برای یک سیستم چندمتغیره‌ی پایدار. تخمین توسط الگوریتم ۲ و با استفاده از ضریب فراموشی $\lambda = 0.9$ انجام شده است. ۴۵

شکل ۵-۳: تخمین تأخیر برای یک سیستم تک متغیره با ضرایب فراموشی مختلف. (أ) $\lambda = 0.95$. (ب) $\lambda = 0.65$. (ج) $\lambda = 0.35$. (د) $\lambda = 0.15$ ۴۶

شکل ۵-۴: تخمین تأخیر برای یک سیستم تک متغیره با ضریب فراموشی $\lambda = 0.95$. بااینکه تأخیر در نمونه‌ی ۵۰ ام تغییر میکند، تخمین به‌دست‌آمده تأخیر واقعی را دنبال میکند. ۴۷

شکل ۵-۵: تخمین تأخیر زمانی توسط الگوریتم ۱ برای یک سیستم چندمتغیره دارای زیرسیستم‌های انتگرالی. ۴۸

شکل ۵-۶: تخمین تأخیر زمانی توسط الگوریتم ۲ برای یک سیستم چندمتغیره دارای زیرسیستم‌های انتگرالی با $\lambda = 0.9$. ۴۹

شکل ۵-۷: تخمین تأخیرهای زمانی یک سیستم چندمتغیره با استفاده از معیار ارائه‌شده در [۴۴] ۵۰

شکل ۵-۸: تخمین تأخیرهای زمانی یک سیستم چندمتغیره با استفاده از الگوریتم ۲ ، $\lambda = 0.9$ و معیار پیشنهادی با پارامترهای $\kappa_1 = 10$ و $\kappa_2 = 1$ ۵۰

شکل ۵-۹: تخمین تأخیر زمانی سیستم (۵-۴) با استفاده از الگوریتم ۲ ، $\lambda = 0.9$ و معیار پیشنهادی با فرض $\kappa_2 = 1$ و $\kappa_1 = 0.1$ (أ)، $\kappa_1 = 1$ (ب)، $\kappa_1 = 10$ (ج) و $\kappa_1 = 100$ (د). ۵۱

شکل ۵-۱۰: تخمین تأخیر زمانی یک سیستم چندمتغیره در حضور نویز سفید توسط الگوریتم ۱ ..... ۵۲

شکل ۵-۱۱: تخمین تأخیر زمانی یک سیستم چندمتغیره در حضور نویز سفید توسط الگوریتم ۲ با $\lambda = 0.9$ ۵۳

شکل ۵-۱۲: تأخیر زمانی متناظر با ۴۵۰۰ نمونه برای سیستم **هیبریدی (۵-۱۱)** ۵۴

شکل ۵-۱۳: پاسخ سیستم هیبرید به ورودی PRBS با دامنه‌ی ۲ ..... ۵۵

شکل ۵-۱۴: تخمین تأخیر زمانی سیستم هیبرید (۵-۱۱) توسط الگوریتم ۲ با $\lambda = 0.9$ ۵۵

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

هدف از شناسایی سیستم[1]، ساختن مدل‌های ریاضی برای سیستم‌های دینامیکی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای پی بردن به اهمیت این زمینه کافی است نیم‌نگاهی به بعضی از کاربردهای آن ازجمله در زمینه‌های مهندسی کنترل، مهندسی مکانیک، بیولوژی، فیزیولوژی، هواشناسی و اقتصاد بیندازیم: مهندسان از مدل توصیف‌کننده‌ی رابطه‌ی میان جریان سوخت و سرعت شافت یک موتور توربوجت برای بهینه‌سازی راندمان و پایداری عملکرد موتور استفاده می‌کنند؛ بیولوژیست‌ها و فیزیولوژیست‌ها از روش‌های شناسایی سیستم در کاربردهایی مانند پاسخ مردمک چشم و کنترل ضربان قلب بهره می‌جویند؛ در علوم هواشناسی و اقتصاد نیز مدل‌های ریاضی بر اساس این‌گونه روش‌ها برای پیش‌بینی وضع هوا و بازار اقتصادی به دست می‌آید. به‌طور خاص در مهندسی کنترل نیازمند آن هستیم که پیش از هرگونه طراحی یا تشخیص عیب، مدل قابل قبولی از سیستم در دست داشته باشیم. همچنین با توجه به وفور روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌ی مبتنی بر مدل، نقش شناسایی سیستم در سیستم‌های کنترل پررنگ‌تر می‌نماید.

روش‌های شناسایی سیستم از جهات مختلف به دسته‌های گوناگونی تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، دسته‌بندی روش‌های شناسایی به روش‌های پارامتری[2] و روش‌های غیر پارامتری[3] می‌باشد. روش‌های پارامتری، مدل سیستم را بر اساس یک ساختار ریاضی و پارامترهای وابسته‌اش شناسایی می‌کنند حال‌آنکه در روش‌های غیر پارامتری، مدل سیستم مستقیماً بر اساس پاسخ آن شناسایی می‌گردد. در میان روش‌های پارامتری، روش شناسایی زیرفضا[4] به دلایلی که خواهیم گفت توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در این روش مدل فضای حالت سیستم شناسایی می‌شود که با توجه به اینکه روش‌های فراوانی جهت تخمین، کنترل و طراحی بر اساس مدل فضای حالت وجود دارد، این روش بسیار معمول و مورداستفاده می‌باشد. به‌علاوه، با توجه به این امر که مدل فضای حالت شناسایی می‌شود، در این روش شناسایی هیچ تفاوتی میان سیستم‌های چندمتغیره و تک‌متغیره قائل نیستیم و بنابراین به مشکلات پارامتریزه کردن[5] که در روش‌های دیگر برای شناسایی سیستم‌های چندمتغیره وجود دارد بر نخواهیم خورد. همچنین، روش‌های شناسایی زیرفضا بر اساس و پایه‌ی الگوریتم‌های عددی چون تجزیه مقادیر تکین[6] و تجزیه‌ی QR استوار

---

[1] System identification

[2] Parametric

[3] Nonparametric

[4] Subspace identification

[5] Parameterization

[6] Singular value decomposition

می‌باشند که ازنظر عددی، الگوریتم‌های مقاوم[1] می‌باشند. به‌اضافه‌ی موارد فوق، در این روش‌ها مرتبه فرایند حین شناسایی تخمین زده می‌شود و از این حیث، نیازمند اطلاعات قبلی در مورد سیستم نخواهیم بود. این ویژگی بارز روش‌های مذکور، شناسایی مدل‌های جعبه سیاه[2] را بدون هیچ مشکلی ممکن می‌سازد. همچنین بااینکه مدل‌های تخمین زده‌شده خطی هستند، دینامیک بسیاری از فرایندهای غیرخطی را با دقت قابل قبولی توصیف می‌نمایند که این امر موجب سهولت در طراحی یا اهداف دیگر کنترلی می‌شود. این نقاط قوت ذکرشده بیانگر این نکته هستند که روش‌های شناسایی زیرفضا برای شناسایی مدل‌ها انتخاب مناسبی می‌باشند و درنتیجه، بسط روش‌های موردنظر برای موارد و شرایط متفاوت مانند سیستم‌های دارای ویژگی خاص و یا شرایط کارکردی[3] گوناگون، می‌تواند سودمند باشد.

برای مثال، در شناسایی سیستم‌ها برخی اوقات به فرایندهایی برخورد می‌کنیم که دارای تأخیر زمانی[4] می‌باشند. درواقع بسیاری از فرایندهای صنعتی دارای چنین تأخیرهایی هستند. این‌گونه تأخیرها را می‌توان هم به عوامل خارجی و هم به عوامل ذاتی سیستم نسبت داد. قبل از اینکه بخواهیم الگوریتم‌های شناسایی را برای فرایندهای دارای تأخیر زمانی پیاده‌سازی کنیم، باید ابتدا تأخیرهای زمانی تخمین زده شوند. در غیر این صورت، مرتبه مدل‌های شناسایی شده بیشتر از مدل واقعی خواهد شد که دقت مدل را به‌صورت نامطلوبی تحت تأثیر قرار خواهد داد. تأخیرهای زمانی نیز می‌توانند متغیر با زمان باشند (برای مثال [۵- ۱] را ببینید). مسئله تخمین تأخیر برای سیستم‌هایی که دارای تأخیرهای زمانی متغیر هستند اهمیتی دوچندان می‌یابد به‌گونه‌ای که اگر شناسایی را بدون توجه به تأخیر زمانی انجام دهیم، معمولاً مرتبه مدل به دست آمده بسیار بیشتر از مدل واقعی خواهد بود که نه‌تنها خطای میان خروجی مدل و خروجی واقعی سیستم افزایش می‌یابد، تحلیل و طراحی را نیز دشوارتر می‌نماید. در زمینه‌ی تخمین تأخیرهای متغیر با زمان روش‌های کارآمد متعددی پیشنهاد شده است که طبیعتاً هرکدام از آن‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند و در طی پایان‌نامه به این روش‌ها اشاره‌ای خواهیم نمود. پس از این مرحله می‌توان با بهره‌گیری از فن‌های خاصی، تابع تبدیل سیستم را که دارای تأخیر نیست شناسایی نمود. اکنون با توجه به این نکته که روش‌های شناسایی زیرفضا روش‌های معقول و سودمندی برای شناسایی فرایندها می‌باشد، یافتن راه‌هایی جهت گسترش این روش‌ها برای سیستم‌های خطی که دارای تأخیرهای زمانی متغیر با زمان هستند بسیار سودمند خواهد بود. لذا در این پایان‌نامه بر آن هستیم که به هدف ذکرشده جامه‌ی عمل بپوشانیم.

برای رسیدن به این هدف کافی است که بتوانیم تأخیرهای زمانی را تخمین بزنیم. زیرا پس از داشتن تأخیر می‌توان با فرض این‌که حلقه‌های سیستم با هم هیچ‌گونه تقابلی[5] ندارند، سیستم چندمتغیره را

---

[1] Robust

[2] Black-box model

[3] Operational conditions

[4] Time-delay

[5] Interaction

به‌صورت تعدادی سیستم تک خروجی-چند ورودی در نظر گرفت و برای هر حلقه، ورودی‌های سیستم را به‌اندازه‌ی تأخیرهای متناظرشان جابجا کرد و سپس سیستم موردنظر را شناسایی نمود. لذا شناسایی سیستم‌های مفروض شامل دو بخش مجزای تخمین تأخیرهای زمانی متغیر و بخش شناسایی می‌باشد که چون روش‌های شناسایی بازگشتیِ موجود روش‌های کارآمدی می‌باشند، تمرکز ما در این پایان‌نامه بر بخش تخمین تأخیرهای زمانی به روش زیرفضا خواهد بود.

۱-۲- تاریخچه روش‌های شناسایی زیرفضا

تولد روش‌های شناسایی سیستم را می‌توان سال ۱۹۶۵ دانست. در این سال دو مقاله‌ی بنیادی ارائه گشت که زمینه را برای شروع و پیشرفت روش‌های شناسایی سیستم فراهم نمود. آستروم و بوهلین در [۶] ، با استفاده از مدل‌های پارامتری ورودی-خروجی زمینه را برای روش‌های بیشینه‌ی درستنمایی[۱] آماده ساختند که این روش‌ها در ادامه به‌عنوان روش‌های موفق شناسایی خطای پیش‌بینی[۲] شناخته شدند. در [۷]، هو[۳] و کالمن اولین راه‌حل به تئوری تحقق فضای حالت را ارائه کردند که در ادامه به تئوری تحقق تصادفی منجر شد. این موضوع در دهه‌های بعد موجب پیدایش روش‌های شناسایی زیرفضا گشت. اکثر روش‌های شناسایی زیرفضا را می‌توان برحسب قضیه‌ی یکپارچه کننده‌ی ارائه‌شده در [۸] بیان نمود. بر اساس این قضیه، اکثر روش‌های مذکور را می‌توان به‌صورت تجزیه مقدار تکین یک ماتریس وزن دهی شده تفسیر کرد. همچنین برای این روش‌ها، خواص آماری چون سازگاری[۴] و کارایی[۵] در [۹-۱۴] بررسی شدند و نشان داده شد که این روش‌ها تخمین قابل قبولی را از ماتریس‌های سیستم ارائه می‌دهند. بااین‌حال، تخمین‌های به‌دست‌آمده توسط این روش‌ها در وضعیت حلقه بسته دارای بایاس بودند. علت این امر این است که در وضعیت حلقه بسته ورودی سیستم و نویز دارای همبستگی هستند (در این وضعیت فرض تعامد نویز بر ورودی صحت ندارد) و درنتیجه تخمین‌های به‌دست‌آمده در شرایط حلقه بسته با مقدار واقعی‌شان تفاوت قابل‌توجهی داشت. راه‌حل‌هایی برای رفع این مشکل در [۱۵-۱۸] آورده شده است. اکثر این روش‌ها دارای یک پیش-مرحله می‌باشند که در طی آن پارامترهای مارکوف سیستم یا فرایندِ ابداع[۶] از طریق یک مدل HOARX[۷] تخمین زده می‌شوند.

---

[1] Maximum likelihood

[2] Prediction error

[3] Ho

[4] Consistency

[5] Efficiency

[6] Innovation process

[7] High-order Autoregressive with Exogenous Inputs

به دلیل نیاز به وجود الگوریتم‌های با بار محاسباتی کم و همچنین با توجه به شرایط عملی که ما را نیازمند شناسایی به‌صورت برخط می‌کند، تعدادی الگوریتم بازگشتی برای روش‌های شناسایی زیرفضا ارائه گشته‌اند. در اکثر این الگوریتم‌ها از تئوری‌هایی استفاده شده است که اصالتاً متعلق به زمینه‌ی پردازش سیگنال آرایه‌ای[1] می‌باشند. برای مثال تعدادی از الگوریتم‌های مرتبط با ایجاد کمی تغییرات در نتایج به‌دست‌آمده در [۱۹] برای محاسبه‌ی تجزیه مقادیر تکین به‌صورت بازگشتی استفاده می‌کنند [۲۰,۲۱]. دسته‌ی دیگری از الگوریتم‌های بازگشتی مشابه بر اساس انتشاردهنده[2] در [۲۲] آورده شده‌اند. به‌علاوه، الگوریتم‌های بازگشتی مؤثری برای شناسایی سیستم‌های حلقه بسته معرفی شده‌اند [۲۳, ۲۴].

تلاش‌هایی برای تعمیم روش‌های شناسایی زیرفضا به مدل‌های خطای در متغیرها[3] انجام شده است که برای استفاده عملی مناسب می‌باشند. برای مثال در [۲۵] تمهیداتی برای حذف بایاس تخمین در نظر گرفته شده و در [۲۶] شناسایی زیرفضا برای سیستم‌های موردنظر در وضعیت حلقه بسته تعمیم یافته است. همچنین یک روش زیرفضا جهت شناسایی سیستم‌های خطی با پارامترهای متغیر با زمان[4] و سیستم‌های دوخطی[5] در [۲۷] ارائه شده است.

گاهی اوقات اطلاعاتی از سیستم در دست است که تمایل به استفاده از آن‌ها در شناسایی وجود دارد (مانند تأخیر زمانی، بهره حالت ماندگار و ...). در این راستا برای استفاده از اطلاعات اولیه در شناسایی زیرفضا می‌توان به دو مقاله [۲۸,۲۹] اشاره نمود. در [۲۸] اطلاعات پیشین را می‌توان در یک چارچوب بیزیَن[6] وارد الگوریتم شناسایی کرد. مشکل این کار در اینجاست که باید در هر نمونه یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی حل شود که این امر بار محاسباتی را بسیار افزایش می‌دهد. راه‌حل ارائه‌شده در [۲۹] مشکل مذکور را نداشته و در طی آن اطلاعات اولیه به‌راحتی و بدون نیاز به بهینه‌سازی غیرخطی قابل‌استفاده می‌باشند. نکته کلیدی در این روش استفاده از الگوریتم کمینه مربعات مقید[7] و بیان قیدها (اطلاعات اولیه) به‌صورت معادلات خطی می‌باشد. البته این روش برای زمانی که تعداد داده زیاد است مشکل‌ساز است چراکه در این حالت بُعد ماتریس موجود در معادله کمینه مربعات زیاد شده و محاسبه معکوس آن بسیار زمان‌بر خواهد بود. برای رفع این مشکل، روشی بازگشتی در [۳۰] ارائه شده است که نه‌تنها بار محاسباتی را کاهش می‌دهد، به‌راحتی از مضارب لاگرانژ[8] برای واردکردن اطلاعات قبلی بهره می‌جوید.

---

[1] Array signal processing

[2] Propagator

[3] Errors-in-variables

[4] Linear parameter-varying

[5] Bilinear

[6] Bayesian

[7] Constrained least square

[8] Lagrange Multipliers

برای شناسایی سیستم‌های چندمتغیره‌ی حلقه بسته با تأخیر ثابت در [۳۱] الگوریتمی ارائه شده است. مزیت این روش این است که با در نظر گرفتن تأخیر، مرتبه‌ی مدل‌های به‌دست‌آمده با مرتبه‌ی سیستم همخوانی دارد. بااین‌حال الگوریتم نامبرده در اکثر موارد قادر به شناسایی همزمان حلقه‌های سیستم نیست و درنتیجه باید مصالحه‌ای میان حلقه‌ها صورت گیرد.

از کارهای اخیر نیز می‌توان به پژوهشی برای بهبود سازگاری روش‌های زیرفضا بر اساس فیلتر کالمن غیر حالت ماندگار[1] اشاره کرد [۳۲]. این مقاله مشکل سازگاری روش‌های شناسایی زیرفضا را به دلیل افق داده‌ی محدود و همچنین مسائل مربوط به شرایط حلقه بسته بررسی می‌کند و راه‌حلی بر مبنای پارامتریزه کردن مدل بر اساس فیلتر کالمن غیر حالت ماندگار ارائه می‌دهد. همچنین در [۳۳] تعمیمی از شناسایی زیرفضا به سیستم‌های مقیاس وسیع داده شده است.

۱–۳– هدف و ضرورت انجام پژوهش و کاربردهای آن

در مواردی که هیچ‌گونه اطلاعاتی راجع به سیستم نداریم نمی‌توانیم از اکثر روش‌های مرسوم برای تخمین تأخیرهای زمانی متغیر استفاده کنیم. این مسئله، شناسایی جعبه سیاه سیستم‌های خطی دارای تأخیرهای متغیر با زمان را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین نیازمند روشی هستیم که بتواند بدون نیاز به اطلاعات اولیه یا اطلاعات اولیه محدود، تأخیر را تخمین بزند. غیر از عدم نیاز به اطلاعات اولیه، مزیت دیگر این کار این است که در شرایط مناسب، شناسایی برخط سیستم‌های خطی هیبرید به‌راحتی امکان‌پذیر می‌شود و نیازمند دانستن وضعیت[2] کاری سیستم نخواهیم بود.

۱–۴– ساختار گزارش

در ادامه این گزارش، در فصل ۲ تعریفی از مسئله ارائه خواهد شد. برای این کار اشاره‌ای به مشکلات چند روش تخمین تأخیرهای متغیر با زمان خواهیم کرد و با توجه به آن مسئله را به‌صورت دقیق تعریف می‌کنیم. در فصل ۳ مبانی روش‌های شناسایی زیرفضا را به‌طور مختصر توضیح می‌دهیم. همچنین یک روش را برای شناسایی بازگشتی توضیح می‌دهیم. فصل ۴ به ارائه‌ی الگوریتم تخمین تأخیر زمانی بر اساس روش زیرفضا اختصاص دارد. در فصل ۵، تعدادی مثال شبیه‌سازی برای نشان دادن کارایی روش مذکور ارائه خواهد شد. در فصل ۶ نیز نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای ادامه کار بیان خواهیم کرد.

---

[1] Non-steady state Kalman filter

[2] Mode

فصل ۲–تعریف مسئله

۲–۱– مقدمه

در این فصل هدف ما این است که مسئله مورد بررسی در پایان‌نامه را به‌طور دقیق بیان کنیم. برای این کار لازم است تا ابتدا هدف کلی پژوهش ذکر شود تا خط‌مشی تحقیق مشخص گردد. در ادامه به تعدادی از روش‌های مرسوم حوزه‌ی زمان برای تخمین تأخیر زمانی متغیر اشاره خواهد شد و سپس محدودیت‌های این روش‌ها به اختصار بیان می‌شود. همچنین برای درک بهتر مشکلات روش‌های مذکور، یکی از روش‌ها را در نظر گرفته و یک مثال بیان می‌کنیم. در پایان نیز یک روش جدیدِ ارائه‌شده را بیان نموده و پس از اشاره به مزیت‌ها و معایب آن، مسئله پیش رو را به‌طور دقیق مطرح می‌نماییم.

۲–۲– مقدمه‌ای بر هدف پژوهش

مدل زیر یک سیستم چندمتغیره خطی با l خروجی و m ورودی را نشان می‌دهد:

$$\begin{cases} y_1(k)=\sum_{r=1}^{m}\{G_{1r}(q^{-1})u_r(k-1-T_{1r})\}+e_1(k) \\ y_2(k)=\sum_{r=1}^{m}\{G_{2r}(q^{-1})u_r(k-1-T_{2r})\}+e_2(k) \\ \vdots \\ y_l(k)=\sum_{r=1}^{m}\{G_{lr}(q^{-1})u_r(k-1-T_{lr})\}+e_l(k) \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه (۲-۱)، T_{ij} بیانگر تأخیر زمانی از ورودی jام (u_j) به خروجی iام (y_i) می‌باشد. $G_{ij}(q^{-1})$نیز تابع تبدیل بدون تأخیر[1] از ورودی jام به خروجی iام است که ساختار آن به‌صورت زیر می‌باشد:

$$G_{ij}(q)=\frac{B_{ij}(q^{-1})}{A_{ij}(q^{-1})}=\frac{b_0^{ij}+b_1^{ij}q^{-1}+b_2^{ij}q^{-2}+...+b_{n_b}^{ij}q^{-n_b}}{1+a_1^{ij}q^{-1}+a_2^{ij}q^{-2}+...+a_{n_a}^{ij}q^{-n_a}} \qquad (۲-۲)$$

لازم به ذکر است که q^{-1} اپراتور انتقال به عقب[2] به‌اندازه‌ی یک نمونه می‌باشد.

هدف نهایی به دست آوردن صورت فضای حالت یا توابع تبدیل سیستم (۲-۱) می‌باشد. فرض می‌شود که حلقه‌های سیستم (۲-۱) با همدیگر تقابلی ندارند و درنتیجه می‌توان هر حلقه را جداگانه شناسایی کرد. اکنون حلقه‌ی sام را در نظر بگیرید. پس از تخمین T_{sj}ها$(j=1,2,...,m)$، می‌توان با در نظر گرفتن

---

[1] Delay-free

[2] Backward shift operator

مجموعه داده‌ی $\{y_s(k), u_1(k-T_{s1}), u_2(k-T_{s2}), ..., u_m(k-T_{sm})\}_{k=1}^{N}$، توابع تبدیل $G_{sj}(q^{-1})$ یا ماتریس-های مربوط به‌صورت فضای حالت را به دست آورد (برای این کار یکی از روش‌های شناسایی بازگشتی زیرفضا در زیرفصل ۳-۳- ارائه خواهد شد). لذا تمرکز اصلی ما در اینجا تخمین T_{ij}ها می‌باشد چراکه ادامه‌ی کار با استعانت از روش‌های شناسایی موجود به‌راحتی محقق می‌گردد.

۲-۳-بررسی اجمالی روش‌های مرسوم تخمین تأخیر متغیر با زمان

معمولاً الگوریتم‌های تخمین تأخیرهای متغیر با زمان از دو مرحله تشکیل می‌شوند [۳۴]: ۱- در نظر گرفتن یک مدل مناسب برای سیستم مورد بررسی و ۲- تخمین تأخیر زمانی بر اساس مدل در نظر گرفته شده. برای مرحله‌ی اول معمولاً نیازمند اطلاعات اولیه می‌باشیم. برای مثال بعضی از روش‌ها درجات چندجمله‌ای‌های B_{ij} و A_{ij} را دانسته فرض می‌کنند و بر این اساس ساختاری برای $G_{ij}\left(q^{-1}\right)$ها در نظر می‌گیرند [۳۵-۴۱]. بعضی از روش‌ها نیز بر اساس مدل فضای حالت سیستم می‌باشند و در آن‌ها ماتریس-های سیستم دانسته فرض می‌شوند [۴۲]. مشخصاً چنین فرض‌هایی بسیار محدودکننده می‌باشد. همچنین روش‌های مذکور نسبت به این اطلاعات پیشین حساس می‌باشند به این معنی که اگر درجه چندجمله‌ای-های A_{ij} و B_{ij} با مقدار واقعی خود متفاوت باشند، تخمین به‌دست‌آمده با مقدار واقعی تأخیر متفاوت است . برای نشان دادن این قضیه، روش ارائه‌شده در [۴۱] را که یک STF[1] می‌باشد برای یک سیستم با فرض مدل‌های متفاوت پیاده‌سازی کرده و سپس تخمین‌های به‌دست‌آمده از این روش را با مقدار واقعی مقایسه می‌کنیم. برای این کار فرض کنید داده‌ها توسط مدل‌های زیر ایجاد شده باشند:

مجموعه داده ۱:

$$y(k) = u(k-1-d); d = 9 \qquad (۳-۲)$$

مجموعه داده ۲:

$$y(k) + 0.6y(k-1) = u(k-1-d); d = 10 \qquad (۴-۲)$$

ورودی سیستم نیز یک دنباله‌ی تصادفی دودویی (RBS)[2] می‌باشد. تخمین تأخیر را برای مجموعه داده‌های ۱ و۲ بر اساس مدل تولیدکننده‌ی مجموعه‌ی داده ۱ به دست می‌آوریم. ابتدا فرض می‌کنیم که مدل سیستم را به‌صورت دقیق داریم یعنی داده‌ها توسط مدل (۲-۳) ایجاد شده‌اند و مدل در نظر گرفته‌شده در طراحی فیلتر همان مدل واقعی می‌باشد. در این صورت تأخیر به‌درستی تخمین زده می‌شود (**شکل ۲-۱:**):

[1] Strong Tracking Filter

[2] Random binary sequence