بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف

نسیبه ظهرابی

استاد راهنما:

حمیدرضا مومنی

استاد مشاور:

امیرحسین ابوالمعصومی

زمستان ۱۳۹۱

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

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

خانم نسیبه ظهرابی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف** در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱۴ 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	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حمیدرضا مومنی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر امیرحسین ابوالمعصومی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر کامران اکبری مورنانی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر حمید خالو زاده	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر کامران اکبری مورنانی	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تائید است
امضای استاد راهنما:
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

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/ رساله 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/ رساله 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/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ 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 نسیبه ظهرابی دانشجوی رشته کنترل ورودی سال تحصیلی ۸۹ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی 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 می دهم 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: نسیم ظهرابی

تاریخ: ۹۱/۱۲/۱۴

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های 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 نامه (رساله)ی 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 پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر 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 می کند 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 نسیبه ظهرابی دانشجوی رشته کنترل مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: نسیبه ظهرابی

تاریخ و امضا: ۹۱/۱۲/۱۴ Zahrabi

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

خواهران مهربانم

که همیشه یاور و دلسوزم بوده اند

و به تمام کسانی که از ایشان آموختم...

تشکر و قدردانی

به این‌وسیله لازم می‌دانم از استاد گرامی جناب آقای دکتر حمیدرضا مؤمنی که با راهنمایی‌ها و حمایت‌های ارزنده خود، انجام این پایان‌نامه را بر من آسان نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استاد محترم جناب آقای دکتر امیرحسین ابوالمعصومی که با همکاری‌های بی‌دریغ و ارائه پیشنهادات ارزشمندشان اینجانب را در طی مراحل این پایان‌نامه یاری رساندند کمال تقدیر و سپاس را دارم. از دوستان و هم آزمایشگاهی‌های عزیزم به پاس تمام کمک‌ها و همراهی‌های دلسوزانه کمال تشکر را دارم. در پایان از خانواده عزیز، دلسوز و مهربانم به پاس تمام فداکاری‌ها و محبت‌های بی‌دریغشان سپاسگزارم.

چکیده

سیستم‌های هایبرید تصادفی، که متشکل از مودهای پیوسته و مودهای گسسته تصادفی مارکوف به صورت همزمان هستند، در مطالعات اخیر بسیار مورد توجه بوده‌اند. ماتریس نرخ احتمال انتقال به صورت آماری رفتار پرش سیستم از یک مود به مود دیگر را مشخص می‌کند و دسترسی کامل به این ماتریس کنترل سیستم را به مقدار زیادی ساده می کند. در حالی‌که در بیشتر کاربردهای عملی احتمال بدست آوردن کامل احتمال‌های انتقال مورد بحث می‌باشد. در این تحقیق، پس از معرفی سیستم‌های پرش مارکوف و مبانی ریاضی لازم، کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه پیوسته در زمان و به دو صورت بدون تأخیر و تأخیردار می‌باشد. در حالت دوم، تأخیر به دو صورت متغیر با زمان و متغیر با زمان وابسته به مود در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط پایدار تصادفی دینامیک مود لغزشی به دو صورت مستقل از تأخیر و وابسته به تأخیر بدست آمده است. در مرحله بعد کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف پیوسته در زمان همراه با عدم‌قطعیت غیرخطی با رویکرد سینگولار و سطح لغزش انتگرالی صورت گرفته است. پایداری تصادفی قابل قبول دینامیک مود لغزشی با رگولار، ضربه آزاد بودن و پایداری تصادفی سیستم سینگولار حاصل شده است. در مرحله بعد، با اصلاح مدل حداقل برگمن، تأثیر استرس بر روی سیستم قند خون به عنوان یک فرآیند مارکوف در نظر گرفته شده و مدل بدست آمده در قالب یک سیستم پرش مارکوف ارائه شده است. سپس با استفاده از سطح لغزشی خطی و رویکرد سینگولار کنترل مود لغزشی سیستم تنظیم قند خون بدست آمده، مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به ذکر است، تمام قضایای بدست آمده بر پایه ناتساوی‌های ماتریسی خطی می باشد که این یکی از مزیت‌های مهم نتایج ارائه شده در این تحقیق می‌باشد. در پایان مثال‌های شبیه‌سازی مناسب برای تضمین کارایی و اعتبار قضایای ارائه‌شده آورده شده است.

کلید واژه: سیستم های پرش مارکوف، پایداری تصادفی، کنترل مودلغزشی، ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم، تأخیر متغیر بازمان، تأخیر وابسته به مود، رویکرد سینگولار، ناتساوی های ماتریسی خطی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۲
۱-۳- ضرورت انجام کار و نوآوری تحقیق ۵
۱-۴- ساختار گزارش ۷

فصل ۲- تعاریف و مبانی ریاضی لازم ۱۰
۲-۱- مقدمه ۱۰
۲-۲- فرآیندهای مارکوف ۱۰
۲-۲-۱- زنجیره مارکوف زمان گسسته ۱۱
۲-۲-۲- زنجیره مارکوف زمان پیوسته ۱۳
۲-۳- معرفی سیستم های سوییچ شده تصادفی پرش مارکوف ۱۶
۲-۳-۱- مثالهای کاربردی ۱۷
۲-۳-۱-۱- سیستم تولید ۱۷
۲-۳-۱-۲- هلی کوپتر VTOL ۱۸
۲-۳-۱-۳- مدار الکتریکی با سوییچ تصادفی ۱۹
۲-۴- بررسی پایداری تصادفی سیستم های پرش مارکوف ۲۰
۲-۴-۱- تعریف پایداری ۲۰
۲-۴-۱-۱- عملگر مشتق متوسط ۲۲
۲-۵- بررسی سیستم های پرش مارکوف دارای تأخیر ۲۶
۲-۵-۱- تأخیر در سیستم های دینامیکی ۲۶
۲-۵-۲- تأخیر در سیستم های پرش مارکوف ۲۷
۲-۵-۲-۱- تأخیر ثابت حالت ۲۷
۲-۵-۲-۲- تأخیر متغیر با زمان ۲۹
۲-۵-۲-۳- تأخیر وابسته به مود ۲۹
۲-۵-۲-۴- انواع تأخیر از نظر نحوه تأثیر در دینامیک سیستم ها ۲۹
۲-۶- روش کنترل مود لغزشی ۳۱
۲-۶-۱- روش کنترل مود لغزشی در سیستم های پرش مارکوف ۳۲
۲-۷- نتیجه گیری ۳۲

فصل ۳- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم ۳۳
۳-۱- مقدمه ۳۳
۳-۲- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف بدون تأخیر با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم ۳۳
۳-۲-۱- مقدمه ای بر اهمیت کار و نوآوری ۳۳
۳-۲-۲- معرفی سیستم تحت کنترل و تعاریف لازم ۳۴
۳-۲-۲-۱- معرفی سیستم تحت کنترل ۳۴
۳-۲-۲-۲- فرم رگولار سیستم تحت کنترل (بدون تأخیر) ۳۶
۳-۲-۳- پایداری تصادفی دینامیک مود لغزشی ۳۷
۳-۲-۴- طراحی کنترل کننده مود لغزشی و بدست آوردن قانون کنترل برای سیستم بدون تأخیر ۳۹
۳-۳- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف تأخیردار با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم ۴۲
۳-۳-۱- مقدمه ای بر اهمیت کار ۴۲
۳-۳-۲- معرفی سیستم تحت کنترل و تعاریف لازم ۴۲
۳-۳-۲-۱- فرم رگولار سیستم تحت کنترل (همراه با تأخیر) ۴۴
۳-۳-۳- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف همراه با تأخیر متغیر با زمان و ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم ۴۴
۳-۳-۳-۱- پایداری تصادفی مستقل از تأخیر دینامیک مود لغزشی ۴۵
۳-۳-۴- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف همراه با تأخیر متغیر با زمان وابسته به مود و ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم ۴۹
۳-۳-۴-۱- پایداری تصادفی وابسته به تأخیر دینامیک مود لغزشی (طراحی اول) ۴۹
۳-۳-۴-۲- پایداری تصادفی وابسته به تأخیر دینامیک مود لغزشی (طراحی دوم) ۵۴
۳-۳-۵- طراحی کنترل کننده مود لغزشی و بدست آوردن قانون کنترل برای سیستم تأخیردار ۶۴
فصل ۴- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف با رویکرد سینگولار ۶۷
۴-۱- مقدمه ۶۷
۴-۲- کنترل مود لغزشی سیستم های پرش مارکوف با رویکرد سینگولار و سطح لغزشی انتگرالی ۶۷
۴-۲-۱- معرفی سیستم تحت کنترل و تعاریف لازم ۶۷
۴-۲-۲- کنترل مود لغزشی سیستم پرش مارکوف و بدست آوردن قانون کنترل ۷۱
۴-۳- مدلسازی و کنترل مود لغزشی سیستم تنظیم قند خون با رویکرد سینگولار ۷۷
۴-۳-۱- مقدمه ۷۷
۴-۳-۲- معرفی سیستم تنظیم قند خون برگمن و تعاریف لازم ۷۹
۴-۳-۳- مدل پرش مارکوف سیستم تنظیم قندخون با در نظر گرفتن استرس ۷۹
۴-۳-۴- کنترل مود لغزشی سیستم تنظیم قند خون با رویکرد سینگولار ۸۰
فصل ۵- نتایج و شبیه سازی ها ۸۴

۵-۱- مقدمه..... ۸۴
۵-۲- مثال عددی و نتایج شبیه سازی مربوط به فصل ۳ ..... ۸۴
۵-۲-۱- نتایج شبیه سازی مربوط به قسمت ۳-۲-..... ۸۴
۵-۲-۲- نتایج شبیه سازی مربوط به قسمت ۳-۳-۳-..... ۸۷
۵-۲-۳- نتایج شبیه سازی مربوط به قسمت ۳-۳-۴-..... ۹۰
۵-۳- مثال عددی و نتایج شبیه سازی مربوط به فصل ۴ ..... ۹۳
۵-۳-۱- نتایج شبیه سازی مربوط به قسمت ۴-۲-..... ۹۳
۵-۳-۲- نتایج شبیه سازی مربوط به قسمت ۴-۳-..... ۹۵
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۹۸
۶-۱- نتیجه‌گیری ۹۸
۶-۲- پیشنهادها ۹۹
فهرست مراجع..... ۱۰۱
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی..... ۱۰۶
واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی..... ۱۰۸

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
عملگر امید ریاضی	$E(.)$
عملگر مشتق متوسط تابع $V(.,.)$	$\Im V\ (.,.)$
ماتریس احتمال انتقال در فرآیند مارکوف زمان گسسته	$\Pi[n]$
ماتریس نرخ احتمال انتقال در فرآیند مارکوف زمان پیوسته	Λ
نرخ احتمال انتقال از مود i به مود j	λ_{ij}
یک فرآیند مارکوف زمان-پیوسته متناهی	$r(t)$
ترانهاده عنصر متناظر با عنصر غیرقطری در ماتریس	$*$

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: پارامترهای دینامیک هلی کوپتر VTOL..... ۱۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: یک زنجیره مارکوف زمان پیوسته ۱۳
شکل ۲-۲: مود $r(t)$ و بردار حالت $x(t)$ در زمان t ۱۷
شکل ۵-۱: تغییرات زمانی مود سیستم $r(t)$ ۸۵
شکل ۵-۲: بردار حالت $x_1(t)$ سیستم حلقه بسته ۸۵
شکل ۵-۳: بردار حالت $x_2(t)$ سیستم حلقه بسته ۸۶
شکل ۵-۴: شبیه سازی سیستم حلقه بسته برای ده تحقق فرآیند تصادفی $r(t)$ ۸۶
شکل ۵-۵: قانون کنترل $u(t)$ ۸۶
شکل ۵-۶: تغییرات زمانی مود سیستم $r(t)$ ۸۸
شکل ۵-۷: مسیرهای حالت $x_1(t)$ و $x_2(t)$ سیستم حلقه بسته ۸۸
شکل ۵-۸ قانون کنترل $u(t)$ ۸۹
شکل ۵-۹: قانون کنترل $u(t)$ با وزوز کمتر ۸۹
شکل ۵-۱۰: بردار حالت $x_1(t)$ برای ده تحقق فرآیند تصادفی $r(t)$ ۸۹
شکل ۵-۱۱: بردار حالت $x_2(t)$ برای ده تحقق فرآیند تصادفی $r(t)$ ۹۰
شکل ۵-۱۲: تغییرات زمانی مود سیستم $r(t)$ ۹۱
شکل ۵-۱۳: بردار حالت $x_1(t)$ سیستم حلقه بسته ۹۲
شکل ۵-۱۴: بردار حالت $x_2(t)$ سیستم حلقه بسته ۹۲
شکل ۵-۱۵: قانون کنترل $u(t)$ ۹۲
شکل ۵-۱۶: بردار حالت $x_1(t)$ برای ده تحقق فرآیند تصادفی $r(t)$ ۹۳
شکل ۵-۱۷: بردار حالت $x_2(t)$ برای ده تحقق فرآیند تصادفی $r(t)$ ۹۳
شکل ۵-۱۸: تغییرات زمانی مود سیستم $r(t)$ ۹۴
شکل ۵-۱۹: مسیرهای حالت $x_1(t)$، $x_2(t)$ و $x_3(t)$ سیستم حلقه بسته ۹۵
شکل ۵-۲۰: تغییرات زمانی مود سیستم $r(t)$ ۹۶
شکل ۵-۲۱: غلظت گلوکز سیستم حلقه بسته ۹۷
شکل ۵-۲۲: غلظت انسولین سیستم حلقه بسته ۹۷
شکل ۵-۲۳: قانون کنترل $u(t)$ ۹۷

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

در مباحث کنترل سیستم‌ها، دقت مدل به کار برده شده تأثیر بسزایی بر کیفیت کنترل دارد. مدل سیستم می تواند از قوانین پایه فیزیکی و یا روش‌های شناسایی به دست آید. همچنین مدل بدست آمده می تواند خطی یا غیرخطی باشد. در حالت غیر خطی روش‌های محدودتری برای کنترل موجود است. اگر بتوانیم مدل را خطی سازی کنیم روش‌های فراوانی برای طراحی کنترل‌کننده و تأمین کارایی مورد نظر در پیش رو خواهیم داشت. روش‌هایی از قبیل کنترل PID، کنترل فیدبک حالت و ... همگی در حالت خطی قابل پیاده سازی می‌باشند. چون مدل خطی در محدوده مشخصی معتبر است و همچنین در مدلسازی بعضی دینامیک‌ها نادیده گرفته می‌شوند، معمولاً مقداری نامعینی همراه مدل در نظر گرفته می‌شود. از جمله مسائلی که بخوبی در مدل خطی قابل حل می‌باشد، مسأله پایداری، پایدارسازی، فیلترینگ و مقاوم‌سازی است.

در مسائل کاربردی، رفتار معادله حالت بعضی از سیستم‌های صنعتی تصادفی می‌باشد به همین دلیل نمی‌توان آن‌ها را به وسیله نمایش فضای حالت LTI مدل کرد. این طبقه از سیستم‌های دینامیکی به دلیل تغییرات ناگهانی در عناصر خود، در طبقه‌ای از سیستم های سوییچ شده اتفاقی به نام سیستم‌های تکه‌ای معین[1] یا سیستم‌های پرش قرار می‌گیرند. سیستم‌های سوییچ شده اتفاقی پرش مارکوف دارای دو جزء در بردار حالت خود هستند. جزء اول این بردار حالت، مقادیری در R^n می‌گیرد و دارای تغییرات پیوسته در زمان است. جزء دوم مقادیری در یک مجموعه گسسته از حالت‌ها مقدار می‌گیرد که این مجموعه در حالت کلی می‌تواند متناهی یا نامتناهی باشد. این جزء با یک فرآیند مارکوف زمان پیوسته نمایش داده می‌شود.

دسته سیستم‌های سوییچ‌شده اتفاقی با پرش مارکوف، می‌تواند سیستم‌های عملی از قبیل سیستم‌های تولید، سیستم‌های مخابراتی، سیستم‌های قدرت، سیستم‌های هوافضا و سیستم‌های اقتصادی را به خوبی مدل کند. وجه اشتراک این سیستم‌ها در این است که در همه آن‌ها تغییرات ناگهانی در شرایط و درنتیجه در دینامیک مدل رخ می‌دهد که این تغییرات می‌تواند به صورت زنجیره مارکوف مدل شود. برای مثال تغییرات ناگهانی بار شبکه توزیع نیرو می‌تواند یک زنجیره مارکوف متناهی در نظر گرفته شود. در سیستم‌های تولید، کار کردن و یا از کار افتادن ماشین‌های تولیدی در خط تولید می‌تواند دینامیک سیستم را به صورت ناگهانی تغییر دهد و این تغییرات به صورت اتفاقی و زنجیره مارکوف مدل شود. همچنین در سیستم‌های مخابراتی وضعیت سوییچ‌ها، در سیستم‌های هوافضا شرایط آب و هوا و ارتفاع

[1] Piecewise deterministic systems

مؤثر بر جسم پرنده و در سیستم‌های اقتصادی، پارامترهای اقتصادی می‌توانند به عنوان جزء گسسته با تغییرات تصادفی و الگوی مارکوف درنظر گرفته شوند.

از طرف دیگر امروزه مسأله وجود تأخیر یکی از مهم‌ترین مسائل در علم کنترل می‌باشد. بدیهی است که وجود تأخیر یک دلیل مهم برای ناپایداری در عملکرد سیستم‌هاست و پایداری سیستم‌های دارای تأخیر به یکی از مهمترین چالش‌ها تبدیل شده است. همچنین کنترل چنین سیستم‌هایی از مسائل دشوار کنترل می‌باشد. بنابراین چگونگی اثر تأخیر بر روی پایداری سیستم‌های تأخیردار، چه در مورد تأخیر در حالت‌ها و چه در مورد تأخیر در ورودی ها، در طول سالیان، علاقه و توجه وسیعی را در میان دانشمندان و محققین برانگیخته است. دلیل این توجه، خصوصیات و رفتارهای پیچیده و منحصربه فرد این سیستم‌هاست.

امروزه کنترل مود لغزشی یک روش کنترلی مقاوم مؤثر برای سیستم‌های غیرخطی و نامعین می‌باشد. در این روش بر اساس قضیه کنترل مود لغزشی تمامی حالت‌های سیستم حلقه بسته به سوی یک سطح لغزشی معین در فضا هدایت می‌شوند. این کار با اعمال یک نیروی کنترلی ناپیوسته به سیستم دینامیکی حلقه‌بسته صورت می گیرد. پس از برخورد با سطح لغزشی، رفتار سیستم توسط معادله سطح مذکور تعیین می شود. بدین معنی که بر روی سطح لغزشی مورد نظر، مشخصه‌های مطلوب مانند پایداری، قابلیت رد اغتشاش، ردیابی و غیره تضمین می‌شود.

۱-۲- تاریخچه

سیستم‌های سوییچ شده زمان پیوسته اولین بار توسط کراسوفسکی[۱] و لیدسکی[۲] [۱] در سال ۱۹۶۱ معرفی شدند. آن‌ها علاوه بر مطرح کردن این سیستم‌ها به مطالعه کنترل بهینه آن پرداختند. در سال ۱۹۶۹ سوردر[۳] [۲] تنظیم‌کننده‌های خطی پرش مارکوف را مورد مطالعه قرار داد. در ۱۹۷۱ ونهام[۴] [۳] سیستم‌های سوییچ‌شده تصادفی را با اضافه کردن نویز گوسی در معادلات حالت تعمیم داد و مسأله پایداری و بهینه‌سازی LQ را در سیستم‌های پرش تصادفی بررسی کرد. در ۱۹۹۰ ماریتون[۵] نتایج تحقیقات محققین را در کتاب خود خلاصه کرد[۴]. همچنین در ۱۹۹۰ جی و چیزک[۶] [۵] مسائل کنترل پذیری، رویت‌پذیری، پایداری و پایدارسازی سیستم‌های پرش مارکوف را مورد بررسی قرار دادند. این دو محقق همچنین تنظیم‌کننده خطی پرش را به کمک معادلات ریکاتی مورد مطالعه قرار دادند. در ۱۹۹۳ دسوزا و فراگوسو[۷] [۶] مسأله کنترل بهینه H_∞ را مطالعه کردند. در ۱۹۹۵ بوکاس[۸] [۷] پایداری مقاوم

[1] Krasovskii
[2] Lidskii
[3] Sworder
[4] Wonham
[5] Mariton
[6] Ji and Chizeck
[7] De Souza and Fragoso
[8] Boukas

سیستم‌های پرش مارکوف را مورد مطالعه قرار داد. در تمام کارهای فوق نتایج به‌وسیله معادلات ریکاتی در حوزه مسائل بهینه سازی و بر حسب معادلات لیاپانوف در حوزه پایداری فرموله شده اند. در دهه اخیر با ورود ناتساوی‌های ماتریسی خطی به تئوری کنترل، تکنیک‌های مبتنی بر LMI در حل مسائل سیستم‌های پرش مارکوف به کار رفته است. مسائلی چون پایداری، پایدارسازی، کنترل H_∞ و فیلترینگ از مواردی هستند که استفاده از ناتساوی‌های ماتریسی خطی در آن‌ها در دهه اخیر چشمگیر می‌باشد.

مقالات در زمینه مسأله پایداری و پایداری مقاوم سیستم‌های پرش مارکوف اغلب توسط ونهام [۳]، جی و چیزک [۵]، فنگ[۱] [۸] ، بوکاس، دراگان و موروزان[۲] [۹]، شی[۳] [۱۰]، بوکاس و یانگ[۱۱ و ۱۲]، کوستا[۴] و بوکاس [۱۳]، کوستا و فراگوسو [۱۴ و ۱۵] و کیت[۵] و مارتینیوک[۶] [۱۶] ارائه شده است. برای جزئیات بیشتر در مورد موضوعات فوق مقالات بوکاس و لیو[۷] [۱۷]، کیت و مارتینوک [۱۶] و محمود و شی [۱۸] موجود می‌باشند. نتایج حاصل از این قسمت به صورت معادلات لیاپانوف و یا ناتساوی‌های ماتریسی خطی است.

در دهه اخیر علاوه بر مسأله پایداری، پایدارسازی نیز موضوع تحقیقات فراوانی بوده و نتایج جالبی در این زمینه بدست آمده است. مقالات در زمینه پایدارسازی اغلب توسط جی و چیزک، بنجلون[۸]، بوکاس و لیو، بوکاس، کائو و لام[۹]، شی و بوکاس، دسوزا و فراگوسو، رامی و گاویی[۱۰]، باو[۱۱]، دراگان و موروزان، ازین و کارواگلو[۱۲]، کوستا ارائه شده است.

روش‌های مختلفی در زمینه پایدارسازی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور نمونه می‌توان به پایدارسازی فیدبک حالت، پایدارسازی فیدبک خروجی، پایدارسازی فیدبک حالت H_∞ و پایدارسازی فیدبک خروجی H_∞ اشاره کرد. برخی از مقالات در زمینه فیدبک حالت توسط جی و چیزک [۵] ، بنجلون[۱۳] [۱۹]، بوکاس و لیو [۲۰ و ۲۱]، باو [۲۲]، دراگان و موروزان [۹] و بوکاس و کوستا[۱۳] ارائه شده است. در زمینه کنترل H_∞ از کارهای آلیو[۱۴] و بوکاس[۲۳ و ۲۴]، بوکاس و لیو [۲۱]، کائو و لام[۱۵] [۲۵] و دراگان [۲۶] می توان نام برد. مسأله فیلترینگ در مقالاتی توسط کوستا و گوئرا[۱۶] [۲۷]،

[1] Feng
[2] Dragan and Morozan
[3] Shi
[4] Costa
[5] Kate
[6] Martynyuk
[7] Liu
[8] Benjelloun
[9] Cao and Lam
[10] Rami and El-Ghaoui
[11] Bao
[12] Ezzine and Karvaoglu
[13] Benjelloun
[14] Aliyu
[15] Cao and Lam
[16] Guerra

شی [۲۸]، وانگ[1] [۲۹] و بوکاس و لیو [۳۰] ارائه شده است. برای جزئیات بیشتر در مورد موضوع پایدارسازی مقالات بوکاس و لیو [۱۷] و محمود و شی [۱۸] موجود می‌باشد.

همانطورکه گفته شد سیستم‌های تولید، سیستم‌های قدرت، سیستم‌های مخابراتی [۳۱] و سیستم‌های هوافضا [۳۲] از جمله کاربردهای سیستم‌های پرش مارکوف می‌باشند. به عنوان مثال سیستم‌های تکه‌ای معین در سیستم‌های تولید، برای مدل کردن برنامه‌های تولید و نگهداری استفاده می‌شود. در این زمینه در ۱۹۸۰ اولسدر و سوری[2] [۳۳] اولین بار از مدل تکه‌ای معین در سیستم‌های تولیدی استفاده کردند و برنامه‌های تولید و نگهداری ماشین‌های مستعد از کارافتادگی را مورد مطالعه قرار دادند. پس از ۱۹۸۰ این مدل به وسیله محققین دیگر بسط داده شده و مسائل بهینه‌سازی آن مورد مطالعه قرار گرفت. کتاب‌های گرشوین[3] [۳۴] و ستی و ژانگ[4] [۳۵] از مهم‌ترین مراجع در این زمینه به شمار می‌روند. در این حوزه از مطالعات، روش مرسوم برای ارائه راهکارهای تولید و نگهداری استفاده از برنامه ریزی پویا و برخی ابزارهای محاسباتی دیگر است.

مسأله وجود تأخیر در سیستم های دینامیکی یک فرض درست و واقع بینانه است. گرچه کارهای در حیطه مسأله پایداری، تخمین و پایدارسازی سیستم‌های پرش مارکوف از اوایل دهه ۹۰ رو به فزونی گذاشتند، اما مسأله تأخیر در این سیستم ها تا سال های اول دهه بعد مورد بررسی قرار نگرفت. از اولین کارها در این زمینه مقالات [۱۹، ۳۶، ۳۷ و۳۸] بودند.

بوکاس و بنجلون در [۱۹] برای اولین بار مسأله پایدارپذیری سیستم‌های پرش مارکوف دارای تأخیر حالت ثابت را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در کار آن‌ها نامعینی‌های پارامتری محدود نیز در نظر گرفته شده و یک قانون پایدارسازی ارائه شده است. در [۳۶] مائو[5] مسأله پایداری تصادفی در معادلات دیفرانسیل تصادفی دارای تأخیر را مطرح کرد. در این کار تأخیرها از نوع خنثی[6] در نظر گرفته شده‌اند. در [۳۷] مسأله پایدارسازی در حضور اغتشاش دارای انرژی محدود توسط کائو[7] و لم[8] مطرح گردید. در این کار تأخیرها به صورت تأخیر حالت و ثابت در نظر گرفته شده‌اند و از پایدارسازی فیدبک حالت برای پایدارسازی استفاده شده است. این کار، سرآغاز کارهای فراوان بعدی بود که در زمینه پایدارسازی و رفع اثر اغتشاش در سیستم‌های پرش مارکوف تأخیردار طی سال‌های بعد انجام شد.

بوکاس و لیو در [۳۸] به پایدارسازی فیدبک خروجی برای سیستم پرش مارکوف دارای تأخیر ثابت پرداخته‌اند. تابع لیاپانوف کراسوفسکی به کار رفته در آن بسیار ساده است و در شرایط ناتساوی ماتریسی

---

[1] Wang
[2] Olsder and Suri
[3] Gershwin
[4] Sethi and Zhang
[5] Mao
[6] Neutral
[7] Cao
[8] Lam

خطی که به دست می‌آید، اثری از تأخیر سیستم دیده نمی‌شود. این شرایط هیچ حدودی از تأخیر را به ما نمی دهند و در نتیجه بسیار محافظه‌کارانه هستند.

پس از مقالات اولیه که پیشگام در بحث تأخیر در سیستم‌های پرش مارکوف بوده‌اند، طی سال‌های ۲۰۰۲ به بعد، کارهای فراوانی در این زمینه انجام شده است. از آن جمله می‌توان از [۳۹] نام برد که در آن برای اولین بار مسأله نویز یا مشتق حرکت براونی در دینامیک سیستم‌های پرش مارکوف تأخیردار وارد شده است. مسأله فیلترینگ برای سیستم‌های پرش مارکوف با تأخیرهای وابسته به مود برای اولین بار در [۴۰] مطرح گردید. گرچه شرایط به دست آمده برای پایداری تنها به حد بالای همه تأخیرها وابسته بود و حد پایینی برای تأخیرها در نظر گرفته نشده بود، این کار در زمان ارائه از ارزش و کیفیت بالایی برخوردار بود. شرایط پایداری و کنترل H_∞ به صورت وابسته به تأخیر برای سیستم‌های پرش مارکوف گسسته زمان در [۴۱] ارائه شده است. مسأله پایدارسازی در حضور تأخیر در ورودی، برای سیستم‌های پرش مارکوف گسسته در [۴۲] و برای نوع پیوسته دارای تأخیر وابسته به مود در [۴۳] بررسی شده است. بحث پایدارسازی فیدبک خروجی در [۴۴] دنبال شده است. در این کار، تأخیرها وابسته به مود و متغیر با زمان در نظر گرفته شده و بحث رفع اثر اغتشاش نیز مطرح گردیده است.

یکی از روش‌های کنترلی مقاوم مناسب برای کنترل سیستم در حضور عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات داخلی و خارجی و همچنین سیستم های غیرخطی، روش کنترل مود لغزشی می‌باشد. اخیراً موضوع طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی برای سیستم‌های پرش مارکوف توجه محققین را به خود جلب کرده است. مسأله کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف اولین بار توسط شی [۴۵] در سال ۲۰۰۶ مطرح شد و همچنان یکی از زمینه‌های تحقیقاتی باز می باشد. بعد از آن از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می توان کنترل مود لغزشی سیستم‌های سینگولار پرش مارکوف به همراه مسأله تخمین حالت [۴۶] را نام برد. در این مقاله ابتدا یک رؤیتگر برای تخمین حالت‌های نامعلوم طراحی شده و سپس کنترل مود لغزشی بر پایه رؤیتگر برای تضمین رسیدن به سطح لغزشی معین انجام شده است. همچنین برای کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف با فرم معادلات سیستم Ito می‌توان به [۴۷ و ۴۸] اشاره کرد.

۱–۳– ضرورت انجام کار و نوآوری تحقیق

همانطور که گفته شد، سیستم‌های پرش مارکوف دارای دو جزء در بردار حالت هستند. یکی مولفه‌ای که در فضای R^n مقداردهی می‌شود و دارای تغییرات پیوسته در زمان است و دیگری که در یک مجموعه گسسته از حالت‌ها مقدار می‌گیرد. ماتریس نرخ احتمال انتقال به صورت آماری رفتار پرش سیستم از یک مود به مود دیگر را مشخص می‌کند. دسترسی کامل به ماتریس نرخ احتمال انتقال، تجزیه و تحلیل و کنترل سیستم‌های پرش مارکوف را به مقدار زیادی ساده و راحت می کند. شایان ذکر است که در بیشتر مطالعات انجام شده، دسترسی کامل به اطلاعات ماتریس نرخ احتمال انتقال یک فرض عمومی برای تجزیه و کنترل سیستم‌های پرش مارکوف بوده است. در حالی‌که در بیشتر کاربردهای عملی احتمال بدست آوردن کامل احتمال‌های انتقال مورد بحث می‌باشد یا اینکه تخمین تمامی عناصر ماتریس

نرخ احتمال پیچیده، زمان‌بر و گران می باشد. بنابراین مطالعه و بررسی حالت کلی‌تر این سیستم‌ها یعنی سیستم‌های پرش مارکوف با ماتریس احتمال انتقال نیمه‌معلوم نسبت به تخمین آن‌ها امری مقرون‌به صرفه و بهتری می باشد. در سال‌های اخیر توجه محققان به این سیستم‌ها جلب شده است و نتایجی در زمینه پایداری و پایدارسازی، کنترل H_∞ و مسئله فیلترینگ با ماتریس احتمال انتقال نیمه معلوم بدست آمده است.

از طرف دیگر، همانطور که گفته شد کنترل مود لغزشی یک روش کنترلی مقاوم مؤثر برای سیستم‌های غیرخطی و نامعین می‌باشد. اگرچه تا به امروز مسئله کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف با ماتریس احتمال انتقال نیمه‌معلوم مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است. در فصل سوم به کنترل مود لغزشی تصادفی این سیستم‌ها پرداخته شده است. روش ارائه شده کاملاً کلی می‌باشد و سیستم‌هایی با ماتریس احتمال انتقال کاملاً نامعلوم یا کاملاً معلوم را در بر می‌گیرد. در فصل سوم با ارائه تابع لیاپانوف مناسب و استفاده از ماتریس‌های وزنی آزاد، شرایط کافی برای وجود سطح لغزشی خطی و پایداری تصادفی دینامیک مود لغزشی بر پایه ناتساوی‌های ماتریسی خطی ارائه شده است. سپس یک کنترل‌کننده مود لغزشی به صورتی طراحی شده است که مسیرهای حالت سیستم حلقه‌بسته در زمان محدود به سطح لغزشی مورد نظر برسند و در همان‌جا باقی بمانند. لازم به ذکر است تمام شرایط بدست آمده بر پایه ناتساوی‌های ماتریسی خطی می باشد و به وسیله نرم‌افزار روش‌های عددی به آسانی قابل حل هستند که این یکی از مزایای روش ارائه شده می‌باشد. همچنین با استفاده از ماتریس‌های وزنی آزاد به جای ماتریس‌های ثابت، معیار پایداری با محافظه‌کاری کمتر برای سیستم‌های پرش مارکوف با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه‌معلوم بدست می‌آید.

بدیهی است که وجود تأخیر و چگونگی تأثیر آن بر روی پایداری سیستم یکی از مهمترین مباحث کنترل است و توجه بسیاری از دانشمندان علم کنترل را به خود جلب کرده است. لازم به ذکر است که تا به امروز مسئله کنترل مود لغزشی سیستم‌های پرش مارکوف تأخیردار با ماتریس نرخ احتمال انتقال نیمه معلوم مورد مطالعه قرار نگرفته است. به همین دلیل در فصل سوم، کنترل مود لغزشی این سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. تأخیر در سیستم مورد مطالعه به دو صورت متغیر با زمان و متغیر با زمان وابسته به مود در نظر گرفته شده است و همچنین شرایط پایدار تصادفی دینامیک مود لغزشی به دو صورت مستقل از تأخیر و وابسته به تأخیر بدست آمده است. در حالت اول سیستم مورد مطالعه سیستم پرش مارکوف با تأخیر زمانی است که در آن تأخیر متغیر با زمان کران‌دار است. همچنین در حالت اول شرایط بدست آمده برای پایداری تصادفی دینامیک مود لغزشی مستقل از تأخیر و فقط وابسته به کران بالای مشتق تأخیر هستند. در حالت دوم سیستم مورد مطالعه سیستم پرش مارکوف با تأخیر زمانی وابسته به مود است که با توجه به کران تأخیر و کران مشتق تأخیر دو طراحی متفاوت برای پایداری تصادفی دینامیک مود لغزشی وابسته به تأخیر صورت گرفته است. در طراحی اول تأخیر متغیر با زمان وابسته به مود دارای کران بالا بوده و مشتق تأخیر نیز دارای کران بالای کوچکتر از یک است. در طراحی دوم تأخیر متغیر با زمان وابسته به مود دارای کران بالا و پایین بوده و مشتق تأخیر دارای کران بالا، نه لزوماً کوچکتر از یک، است. شایان ذکر است که بدست آوردن شرایط پایداری تصادفی برای سیستم پرش