بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دوره‌ی دکتری مهندسی برق–کنترل

طرّاحی کنترلگر مقاوم برای سامانه‌های مقیاس‌وسیع تأخیری

مهدی سجودی

استاد راهنما:

دکتر وحید جوهری‌مجد

تابستان ۱۳۹۰

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای مهدی سجودی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان **طراحی کنترلگر مقاوم برای سیستم های مقیاس وسیع دارای تاخیرزمانی** در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۲۸ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری کنترل پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر سجاد ازگلی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حمید رضا تقی راد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حیدرعلی طالبی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تائید است

امضای استاد راهنما:

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

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 رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی برق –کنترل است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر وحید جوهری مجد 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 رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت 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 شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مهدی سجودی دانشجوی رشته مهندسی برق –کنترل مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: مهدی سجودی

تاریخ و امضا: ۱۳۹۰/۱۱/۱۵

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

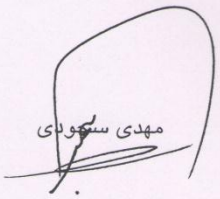
ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

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

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.



مهدی سجودی

تشکر و قدردانی

از تلاش‌های جناب آقای دکتر وحید جوهری‌مجد استاد راهنمای بزرگوار اینجانب در انجام رساله حاضر کمال قدردانی را دارم. برخود لازم می‌دانم به خاطر تمام آن‌چه از علم و ایمان در این سال‌های فراموش ناشدنی از محضرشان آموختم تشکّر خود را ابراز دارم.

هم‌چنین از جناب آقای دکتر حمیدرضا مؤمنی، دکتر محمّدتقی حمیدی‌بهشتی اساتید بزرگوارم در گروه کنترل دانشگاه تربیت مدرّس که از تجارب و راهنمایی‌های ارزشمندشان در مراحل مختلف بسیار بهره‌مند گردیدم، سپاسگزاری می‌نمایم.

دلسوزی، صبر، همراهی و دعای خیر پدر بزرگوار، مادر مهربان و برادر عزیزم همیشه مشوّق و راه‌گشای مشکلاتم بوده است. امیدوارم بتوانم ذرّه‌ای از دریای بی‌کران لطف‌شان را پاسخ گو باشم.

همراهی همسر عزیزم در این مسیر، پشتیبان و دلگرمی ادامه راه بود. از صبر، تحمل و همراهی‌شان سپاسگزارم.

مهدی سجودی
تابستان ۱۳۹۰

چکیده

در این رساله طرّاحی کنترلگر پایدارساز هم‌زمان با برآورده کردن شاخص کارآیی تضعیف اغتشاش و قید مربّعی عمومی در سامانه‌های مقیاس‌وسیع تأخیری دارای اندرکنش‌های تأخیردار مورد بررسی قرار گرفته است. برای پوشش عدم‌قطعیّت بالای مدل‌سازی سامانه‌های مقیاس‌وسیع، یک ساختار بسیار جامع که توانایی ارائه گستره‌ی وسیعی از عدم‌قطعیّت‌ها و جمله‌های غیرخطّی مدل نشده را داراست، استفاده شده است. هم‌چنین، تأخیر به‌صورت چندگانه و متفاوت برای هر یک از اتصالات شامل تأخیرهای ثابت و متغیّربازمان در نظر گرفته شده است. به‌منظور تحقق پیاده‌سازی مطمئن، طراحی بازخورد حالت و خروجی پویا به شکل غیرشکننده انجام گردیده است. برخلاف کارهای صورت گرفته در حوزه کنترل غیرمتمرکز سامانه‌های مقیاس‌وسیع، کنترلگر بازخورد خروجی طرّاحی شده دارای مرتبه دلخواه ثابت از پیش تعیین شده می‌باشد و هیچ‌گونه محدودیّتی روی درجه کنترلگر وجود ندارد. به‌منظور بهره‌گیری از مزایای بهینه‌سازی کوژ، مسئله مورد نظر در قالب یک مسئله بهینه‌سازی کوژ بیان گردیده است و پارامترهای کنترلگر طرّاحی شده از حلّ تعدادی نابرابری‌های ماتریسی خطّی به سهولت به‌دست می‌آیند. سادگی طرّاحی و شرایط به‌دست آمده به‌همراه محافظه‌کاری بسیار کمتر روش‌های ارائه شده نسبت به روش‌های موجود از اهمّیت به‌سزایی برخوردار است. به‌منظور نشان دادن عمومیّت کاربرد و قدرتِ روش‌های طرّاحی صورت گرفته، مثال‌هایی از حوزه‌های مختلف مهندسی مانند پایداری سامانه شبکه تنظیم ژنی، سامانه کنترل فرکانس-بار و سامانه کنترل ازدحام شبکه‌های رایانه‌ای از سه حوزه مختلف مهندسی بررسی شده است. روش‌های طرّاحی کنترلگر ارائه شده به این سه مورد اعمال گردید و نتایج حاصل، اثربخشی مناسب روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهد.

کلید واژه: کنترل مقاوم، نابرابری‌های ماتریسی خطّی، سامانه‌های مقیاس‌وسیع، کنترل غیرمتمرکز، تأخیر زمانی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... أ
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدّمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۵
۱-۲-۱- سامانه‌های مقیاس‌وسیع ۵
۱-۲-۲- سامانه‌های مقیاس‌وسیع تأخیری ۹
۱-۳- نقد و بررسی شیوه‌های نوین ۱۳
۱-۴- هدف از انجام پژوهش ۱۶
۱-۵- ضرورت انجام پژوهش و کاربردهای آن ۱۶
۱-۶- نوآوری پژوهش ۱۷
۱-۷- ساختار رساله ۱۸

فصل ۲- پیش‌نیازهای تحقیق و بررسی پژوهش‌های جدید مرتبط ۱۹
۲-۱- مقدّمه ۱۹
۲-۲- تعاریف و قضایای مورد استفاده ۱۹
۲-۲-۱- معادلات دیفرانسیل تابعی ۱۹
۲-۲-۱-۱- پایداری سامانه‌های دارای تأخیر زمانی ۲۰
۲-۲-۲- قضایای مقدماتی ۲۳
۲-۳- بررسی جزئی پژوهش‌های جدید مرتبط ۲۵
۲-۳-۱- بررسی روش‌های کنترل غیرمتمرکز سامانه‌های مقیاس‌وسیع ۲۵
۲-۳-۱-۱- مفاهیم پایه ۲۵
۲-۳-۱-۲- زیرسامانه‌های مجزا ۲۹
۲-۳-۱-۳- زیرسامانه‌های هم‌پوشان ۳۱
۲-۳-۱-۴- سامانه‌های ترکیبی متقارن ۳۴
۲-۳-۲- روش‌های بررسی پایداری سامانه‌های دارای تأخیر ۳۶
۲-۳-۲-۱- شروط پایداری مستقلّ از تأخیر ۳۷
۲-۳-۲-۲- شروط پایداری وابسته به تأخیر ۳۸
۲-۴- نتیجه‌گیری ۴۴

فصل ۳- پیکره بندی مسئله و طرّاحی کنترلگر مقاوم ۴۵

۳-۱- مقدّمه ۴۵
۳-۲- تعریف مسئله ۴۵
۳-۲-۱- پیکره‌بندی کنترلگر بازخورد حالت مقاوم ۴۷
۳-۲-۲- پیکره‌بندی کنترلگر بازخورد خروجی پویای مقاوم ۴۹
۳-۳- طرّاحی کنترلگر برای سامانه‌های غیرخطّی مقیاس‌وسیع با تأخیر ثابت ۵۱
۳-۳-۱- بررسی پایداری ۵۱
۳-۳-۱-۱- نتایج مستقلّ از زمان تأخیر ۵۱
۳-۳-۱-۲- نتایج وابسته به زمان تأخیر ۵۲
۳-۳-۲- پایدارسازی و تضعیف اغتشاش ۵۹
۳-۳-۲-۱- طرّاحی کنترلگر بازخورد حالت مقاوم ۵۹
۳-۳-۲-۲- طرّاحی کنترلگر بازخورد خروجی ۷۱
۳-۴- طرّاحی کنترلگر برای سامانه‌های غیرخطّی مقیاس‌وسیع با تأخیر متغیّربازمان بازه‌ای ۷۹
۳-۴-۱- بررسی پایداری ۸۰
۳-۴-۲- پایدارسازی و تضعیف اغتشاش ۸۴
۳-۴-۲-۱- طرّاحی کنترلگر بازخورد حالت مقاوم ۸۴
۳-۵- طرّاحی کنترلگر برای سامانه‌های غیرخطّی مقیاس‌وسیع ۸۶
۳-۵-۱- طرّاحی کنترلگر بازخورد حالت مقاوم ۸۸
۳-۵-۲- طرّاحی کنترلگر خروجی پویای مقاوم ۹۰
۳-۶- نتیجه‌گیری ۹۵

فصل ۴- مطالعات موردی و شبیه‌سازی ۹۶

۴-۱- مقدّمه ۹۶
۴-۲- شبکه تنظیم ژنی ۹۶
۴-۲-۱- مدل شبکه تنظیم ژنی ۹۸
۴-۲-۲- بررسی پایداری در یک شبکه تنظیم ژنی نمونه ۱۰۰
۴-۳- کنترل فرکانس- بار در سامانه‌های مقیاس‌وسیع قدرت ۱۰۱
۴-۳-۱- پیکره‌بندی و بیان مسئله ۱۰۳
۴-۳-۲- طرّاحی کنترلگر بازخورد خروجی پویای مبتنی بر کنترل انتگرال مقاوم ۱۰۶
۴-۳-۳- کنترل فرکانس-بار در سامانه‌های مقیاس‌وسیع قدرت دو و سه ناحیه‌ای نمونه ۱۰۷
۴-۳-۳-۱- دو ناحیه‌ای ۱۰۷
۴-۳-۳-۲- سه ناحیه‌ای ۱۱۳
۴-۴- مدل‌سازی مقیاس‌وسیع سامانه‌های کنترل ازدحام در شبکه‌های رایانه‌ای ۱۱۷
۴-۴-۱- کنترل ازدحام ۱۱۷
۴-۴-۲- ارائه مدل مقیاس‌وسیع برای کنترل ازدحام شبکه ۱۱۹
۴-۴-۲-۱- مدل جریان سیّال ۱۲۰
۴-۴-۳- طرّاحی کنترلگر بازخورد خروجی مقاوم ازدحام شبکه ۱۲۲
۴-۴-۴- کنترل ازدحام در یک شبکه رایانه‌ای نمونه ۱۲۴

۴-۵- مثال عددی ۱۲۹
۴-۵-۱- مثال اوّل ۱۲۹
۴-۵-۲- مثال دوّم ۱۳۰
۴-۶- کنترل دو پاندول معکوس متّصل ۱۳۱
۴-۷- نتیجه‌گیری ۱۴۱
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۴۲
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۴۲
۵-۲- پیشنهادها ۱۴۴
۵-۲-۱- تغییر تعریف مسئله ۱۴۴
۵-۲-۲- کاهش محافظه‌کاری ۱۴۴
۵-۲-۳- کاهش تعداد متغیّرهای طرّاحی ۱۴۴
۵-۲-۴- وارد کردن کارآیی‌های مختلف ۱۴۵
فهرست مراجع ۱۴۶
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۱۵۶
واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۱۵۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱: مقادیر نامی پارامترهای سامانه دو ناحیه‌ای ۱۰۷
جدول ۴-۲: پارامترهای دارای عدم‌قطعیّت سامانه قدرت دو ناحیه‌ای ۱۱۰
جدول ۴-۳: پارامترهای نامی سامانه قدرت سه ناحیه‌ای ۱۱۳
جدول ۴-۴: مشخّصات لینک‌ها ۱۲۵
جدول ۴-۵: پارامترهای سامانه و مقادیر مطلوب ۱۲۶
جدول ۴-۶: تأخیر میانگین برای راه‌بردهای مختلف مدیریّت فعّال صف ۱۲۸
جدول ۴-۷: پارامترهای کنترلگر بازخورد خروجی مرتبه صفر، یک، دو، سه و بازخورد حالت بدست آمده از قضیّه ۳-۱۲ ..... ۱۲۹
جدول ۴-۸: مقایسه نتایج حاصل از کارهای مختلف برای سطح تضعیف اغتشاش با تأخیر یکسان ۱۳۰
جدول ۴-۹: مقایسه نتایج حاصل از کارهای مختلف برای سطح تضعیف اغتشاش و بیشینه زمان تأخیر مجاز برای پایداری ۱۳۱
جدول ۴-۱۰: نتایج حاصل از [۳۴] و [۹۱] ۱۳۲
جدول ۴-۱۱: پارامترهای کنترلگر و قطب‌های حلقه بسته حاصل از اعمال قضیّه ۱ به سامانه نمونه ۱۳۴
جدول ۴-۱۲: پارامترهای کنترلگر و قطب‌های حلقه بسته حاصل از اعمال قضیّه ۲ به سامانه نمونه ۱۳۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: ساختار اطّلاعات سنّتی متناظر با کنترل متمرکز [۱۱۲] ۲۶
شکل ۲-۲: ساختار اطّلاعات سنّتی متناظر با کنترل غیرمتمرکز [۱۱۲] ۲۶
شکل ۲-۳: ساختار سامانه‌های متمرکز [۱۱۲] ۲۷
شکل ۲-۴: ساختار سامانه‌های چندکاناله [۱۱۲] ۲۷
شکل ۲-۵: ساختار سامانه‌های به‌هم‌پیوسته [۱۱۲] ۲۷
شکل ۲-۶: غیرمتمرکز سازی طرّاحی برای زیرسامانه ۱ با اندرکنش‌های ضعیف [۱۱۳] ۲۸
شکل ۲-۷: غیرمتمرکز سازی طرّاحی برای زیرسامانه ۱ با اندرکنش‌های قوی [۱۱۳] ۲۸
شکل ۲-۸: شمای کلّی طرّاحی کنترلگر همپوشان[۱۱۵] ۳۴
شکل ۴-۱: مدل یک شبکه ژنی نمونه ۱۰۰
شکل ۴-۲: سامانه قدرت N ناحیه‌ای ۱۰۴
شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام غیرخطّی یک ناحیه ساختار به‌هم‌پیوسته ۱۰۴
شکل ۴-۴: محدودیّت غیرخطّی وضعیت شیر گاورنر ۱۰۵
شکل ۴-۵: طرح کنترلگر طرّاحی شده ۱۰۶
شکل ۴-۶: انحراف فرکانس در ناحیه یک با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۰۸
شکل ۴-۷: انحراف فرکانس در ناحیه دو با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۰۹
شکل ۴-۸: تغییر توان در خطوط ارتباطی با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۰۹
شکل ۴-۹: انحراف فرکانس در ناحیه یک با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۷ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین) ۱۱۱
شکل ۴-۱۰: انحراف فرکانس در ناحیه دو با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۷ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین) ۱۱۱
شکل ۴-۱۱: تغییر توان در خطوط ارتباطی با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۷ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین) ۱۱۲
شکل ۴-۱۲: انحراف فرکانس با کنترلگر حاصل کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] ۱۱۲
شکل ۴-۱۳: انحراف فرکانس در ناحیه یک با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۱۴
شکل ۴-۱۴: انحراف فرکانس در ناحیه دو با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۱۴

شکل ۴-۱۵: انحراف فرکانس در ناحیه سه با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۱۵
شکل ۴-۱۶: تغییر توان در خطوط ارتباطی با کنترلگر حاصل از قضیّه ۳-۲۶ (خط پر)، کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] (خط‌چین)، کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] (نقطه‌چین) ۱۱۵
شکل ۴-۱۷: انحراف فرکانس در هر سه ناحیه با کنترلگر طرّاحی شده در قضیّه ۳-۲۶ ..... ۱۱۶
شکل ۴-۱۸: انحراف فرکانس در هر سه ناحیه با کنترلگر مدل پیش‌بین [۱۹۰] ۱۱۶
شکل ۴-۱۹: انحراف فرکانس در هر سه ناحیه با کنترلگر انتگرالی سنّتی [۱۹۰] ۱۱۷
شکل ۴-۲۰: ساختار کنترل ازدحام در شبکه ۱۱۸
شکل ۴-۲۱: توپولوژی شبکه نمونه ۱۲۵
شکل ۴-۲۲: تغییرات طول صف برای راه‌بردهای AQM (a) Drop-Tail (b) REM (c) RED (d) PI (e) کنترلگر حاصل از قضیّه ۴-۱ ..... ۱۲۶
شکل ۴-۲۳: زمان رفت و برگشت (RTT) برای راه‌بردهای AQM (a) Drop-Tail (b) REM (c) RED (d) PI (e) کنترلگر حاصل از قضیّه ۴-۱ ..... ۱۲۸
شکل ۴-۲۴: سیگنال نویز گوسی با میانگین ۰/۵ و واریانس ۰/۵ ..... ۱۳۳
شکل ۴-۲۵: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه کامل ارائه شده در [۹۱] ۱۳۳
شکل ۴-۲۶: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه کامل ارائه شده در [۹۱] ۱۳۳
شکل ۴-۲۷: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه یک برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۴
شکل ۴-۲۸: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه یک برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۵
شکل ۴-۲۹: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه دو برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۵
شکل ۴-۳۰: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه دو برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۵
شکل ۴-۳۱: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد حالت حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۶
شکل ۴-۳۲: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد حالت حاصل از قضیّه ۳-۲۴ ..... ۱۳۶
شکل ۴-۳۳: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه کامل ارائه شده در [۹۱] در حضور عدم‌قطعیّت ۱۳۷
شکل ۴-۳۴: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه کامل ارائه شده در [۹۱] در حضور عدم‌قطعیّت ۱۳۸
شکل ۴-۳۵: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه یک برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۳۸

شکل ۴-۳۶: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه یک برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۷: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه دو برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۸: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد خروجی پویای مرتبه دو برای هر زیرسامانه حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۹: حالت‌های سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد حالت حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۴۰
شکل ۴-۴۰: خروجی سامانه حلقه بسته با کنترلگر بازخورد حالت حاصل از قضیّه ۳-۲۵ ..... ۱۴۰

فصل ۱– مقدّمه

۱–۱– پیشگفتار

بسیاری از مسائل واقعی، عموماً دارای ماهیتی بسیار پیچیده و مقیاس‌وسیع هستند، مدل‌سازی این سامانه‌ها اغلب با عدم‌قطعیّت[1] همراه است و این مسئله به انتخاب و سلیقه طرّاح بستگی ندارد. اغلب سامانه‌هایی که در عمل و واقعیّت با آن‌ها مواجه هستیم، مانند سامانه‌های تجاری، مدیریتی، اقتصادی، اکولوژیکی، شبکه‌های قدرت، ترافیک شهری، مخابرات دیجیتال و سامانه‌های زیستی از این گروه هستند. این سامانه‌ها از لحاظ جغرافیایی متشکّل از واحدهای متفاوتی هستند و در کارآیی مطلوب آن‌ها نه تنها هزینه‌های اقتصادی، بلکه مسائل مهم دیگری مثل قابلیّت اطمینان خطوط ارتباطی و حجم اطّلاعات مبادله شده نیز مطرح هستند. با این حال، وجود برداشتهای متفاوت از مفهوم سامانه‌های مقیاس وسیع منجر به عدم وجود تعریفی واحد برای این دسته از سامانه ها گردیده است [۱].

عنوان مقیاس‌وسیع امروزه به صورت گسترده‌ای در صنعت، اقتصاد و سایر علوم به کار برده می‌شود. تعابیر زیر در مورد یک سامانه مقیاس‌وسیع وجود دارند:

۱- یک سامانه، مقیاس‌وسیع گفته می‌شود اگر بتوان آن سامانه را به زیرسامانه‌هایی مرتبط با یک‌دیگر افراز نمود به طوری‌که زیرسامانه‌ها از نظر محاسباتی دارای ابعاد کوچکتری باشند.

۲- سامانه‌ای مقیاس‌وسیع است که بزرگ بودن ابعاد آن سبب شود، بکارگیری روش‌های معمول مدل‌سازی و کنترل در مورد آن، معمولاً امکان‌پذیر نباشد.

۳- سامانه‌ای مقیاس‌وسیع است که برای کنترل آن به بیش از یک کنترلگر نیاز باشد.

لازم به ذکر است که منظور از مقیاس‌وسیع، بزرگی و گستردگی ابعاد فیزیکی نیست بلکه تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها و پیچیدگی محاسباتی و پیچیدگی در ارتباط زیرسامانه‌های تشکیل دهنده یک سامانه مورد نظر است. چه بسا، یک کارخانه بزرگ با ابعاد فیزیکی وسیعی که دارد یک سامانه مقیاس کوچک محسوب گردد ولی یک تراشه الکترونیکی با ابعاد فیزیکی بسیار کوچک در دسته سامانه‌های مقیاس‌وسیع قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات فراوانی در زمینه سامانه‌های مقیاس‌وسیع انجام گرفته که موارد زیر از محورهای اساسی این تحقیقات می‌باشند [1]:

الف) روش‌های مدل‌سازی با معادلات دیفرانسیل، توابع تبدیل و تحقّق فضای حالت.

ب) توصیف کیفی سامانه از قبیل کنترل پذیری، رؤیت پذیری و پایداری.

[1] Uncertainty

ج) روش‌های کنترل مانند جای‌گذاری قطب، کنترل مقاوم، کنترل تطبیقی، کنترل بهینه و کنترل هوشمند.

در کلیه موارد ذکر شده، وجود یک واحد کنترل مرکزی یک فرض اساسی است. به این معنی که همه محاسبات و هم‌چنین صدور فرمان‌های کنترلی در یک واحد مشخّص به نام واحد مرکزی انجام می‌گیرد، که به این فرض، تمرکز گویند.

فرض تمرکز در مورد سامانه‌هایی با مقیاس بسیار وسیع که از نظر جغرافیایی نیز در فواصل دور از یک‌دیگر قرار دارند با شکست مواجه شده است. زیرا در این سامانه‌ها امکان انجام محاسبات به صورت متمرکز و انتقال اطّلاعات به واحد مرکزی وجود ندارد. بنابراین ضرورت تحقیقات مختص این‌گونه سامانه‌ها موجب ابداع روش‌های جامع‌تری گردید. این موضوع سبب گسترش تئوری کنترل سامانه‌های مقیاس‌وسیع شده است [1].

علیرغم اختلاف نظر در تعریف سامانه‌های مقیاس‌وسیع، پاره‌ای از مشخّصات این‌گونه سامانه‌ها عبارتند از [1]:

۱- برای کنترل سامانه‌های مقیاس‌وسیع، بیش از یک کنترلگر که مستلزم محاسبات غیرمتمرکز[1] است، نیاز می‌باشد.
۲- نحوه دسترسی و مبادله اطّلاعات[2] در کنترلگرهای محلّی[3] متفاوت است.
۳- سامانه‌های مقیاس‌وسیع می‌توانند با بکارگیری کنترلگرهای محلّی در هر سطح کنترل شوند. فرمان کنترل این‌گونه کنترلگرها توسّط سطوح بالاتر به طور سلسله مراتبی صادر می‌شود. سامانه‌های مقیاس‌وسیع را می‌توان با مدل‌های متراکم[4] نمایش داد.
۴- سامانه‌های مقیاس‌وسیع با توجّه به ماهیت آن‌ها معمولاً با روش‌های زیر بهینه[5] و یا بهینه محلّی[6] به جای بهینه سراسری[7] قابل کنترل هستند.

معمولاً برای تعیین ساختار سامانه کنترلی، کار تحلیل و طرّاحی در ابتدا با شناسایی و مدل‌سازی سامانه مورد نظر برای کنترل آغاز می‌شود. بدین ترتیب که، پس از مشخّص نمودن اهداف طرّاحی، طرّاح به تدوین یک مدل ریاضی از سامانه می‌پردازد و بدین منظور از روش‌های مختلف شناسایی و مدل‌سازی بهره می‌گیرد. همانند آن‌چه در طرّاحی کنترل اکثر سامانه‌ها متداول است، در مورد سامانه‌های مقیاس‌وسیع نیز طراحان به کارگیری مدلی ساده با دقّت کمتر را به کارکردن با مدلی پیچیده اما دقیق سامانه ترجیح می دهند. دو دلیل عمده برای این تمایل، کم کردن بار محاسباتی شبیه‌سازی، تحلیل و

[1] Decentralized
[2] Data Transmission
[3] Local Controller
[4] Compact Model
[5] Suboptimal
[6] Local Optimal
[7] Global Optimal

طرّاحی سامانه کنترل و دیگری امکان طرّاحی یک کنترلگر ساده‌تر است. دو دسته اصلی از روش‌های ساده سازی مدل، روش افزونگی و روش آشفتگی هستند. در روش افزونگی، فرض بر این است که می‌توان مدلی ریاضی از سامانه با تعریف یک فضای حالت کوچک‌تر به‌دست آورد به طوری که بعضی از مشخّصات کلیدی سامانه را در بر داشته باشد [1]. در روش آشفتگی[1]، تعامل‌ها و دینامیک‌های خاصّی نادیده گرفته می‌شوند. در مدل‌سازی و شناسایی سامانه‌های مقیاس‌وسیع هم می‌توان مانند سایر سامانه‌ها از روش‌های سنّتی یا هوشمند استفاده کرد. با افزایش بعد سامانه، پیچیدگی آن نیز بالا می‌رود و در نتیجه مدل‌سازی و محاسبات و هم‌چنین پایداری، کنترل‌پذیری و رویت پذیری سامانه با مشکل مواجه می‌شود. درتمامی این روش‌ها برای بررسی پایداری، غلبه یا عدم غلبه بهره اندرکنش‌ها به حاشیه پایداری سامانه در نظر گرفته می شود. معمولاً ویژگی‌های کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری سامانه‌های مقیاس‌وسیع با توجّه به ساختار آن‌ها بررسی می‌شود. در ابتدا، کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری زیرسامانه‌ها تحقیق شده و سپس تأثیر زیرسامانه‌ها بر هم در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب که خواص کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری سامانه‌های متصل به هم هم‌چنان برقرار باشند. در رویکردی دیگر، با در نظر گرفتن ماتریس زیرسامانه‌ها و به کمک محاسبات ریاضی، کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری سامانه تعیین می‌گردد.

تا کنون روش‌های متعددی برای پایدارسازی سامانه‌های مقیاس‌وسیع اعمّ از متمرکز[2] و غیرمتمرکز به کار گرفته شده است. در روش‌های غیرمتمرکز، عموماً ایده اصلی تجزیه سامانه به سامانه‌های کوچک‌تر بوده تا بار محاسباتی کاهش و طرّاحی ساده‌تری گردد. این روش‌های کنترلی عموماً در دسته‌های روش‌های کنترل سلسله مراتبی، تصادفی و یا هوشمند قرار می‌گیرند [۲-۳].

در رویکرد سلسله مراتبی، راه‌برد کنترلی بدین صورت است که علاوه بر برآورده ساختن محدود اهداف متفاوت هر یک از زیرسامانه‌ها در حوزه عمل‌کرد، هدف کلّی سامانه نیز برآورده شود. این هدف کلّی می‌تواند هم‌جهت یا غیرهم‌جهت با اهداف تمامی یا بعضی از زیرسامانه‌ها باشد.

در رویکرد نیمه‌متمرکز و غیرمتمرکز، ساختاری برای کنترل طرّاحی می‌شود که در آن هر یک از ورودی‌های سامانه به یک مجموعه مشخّص کنترلگرهای محلّی تخصیص می‌یابد و هرکدام از این کنترلگرها فقط خروجی‌های محلّی را تحت نظارت خود دارند. به بیان دیگر، این رویکرد سعی دارد از مواجهه با مشکلات موجود در جمع‌آوری داده، ذخیره ملزومات، یافتن اشتباهات در یک برنامه طولانی کامپیوتری و فاصله جغرافیایی سامانه کنترل شونده توسّط یک کنترلگر مرکزی تا حدّ امکان جلوگیری نماید. بدین ترتیب با حرکت روش به سمت غیرمتمرکز، فلسفه کنترل بیشتر به سمت برآورده شدن اهداف انحصاری زیرسامانه‌ها پیش می‌رود. در زمینه عمل‌کرد کلّی سامانه در روش غیرمتمرکز، تاکنون فقط به پایداری کلّی سامانه توجّه شده است و در این جهت روش‌های مختلفی بر اساس تئوری‌های تحلیل

[1] Perturbation
[2] Centralized

پایداری بیان شده‌اند. موارد عنوان شده از جمله روش‌هایی هستند که به کمک نُرم-∞ یا مقادیر ویژه، پایداری کلّی سامانه مقیاس‌وسیع را با رویکرد ورودی - خروجی بررسی کرده‌اند.

در طرّاحی و بهره‌برداری از سامانه‌های مقیاس‌وسیع، بهینه‌سازی حتی اگر به شکل تقریبی انجام شود، از منظر بهبود کارآیی و بازدهی اقتصادی امری ضروری می‌باشد. هدف از طرّاحی، به دست آوردن شرایط ماندگار مطلوب برای زیرسامانه‌ها است که از کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی یک تابع هدف مناسب با قیود مساوی یا نابرابری حاصل می‌شود. هر چند بهینه‌سازی پویای سامانه‌های مقیاس‌وسیع به طور متمرکز قابل بررسی است و روش‌های ریاضی مختلفی برای حلّ این مسائل وجود دارد، امّا در عمل، افزایش تعداد متغیّرها، منجرّ به مشکلات عدیده‌ای می‌شود. هر چند به نظر می‌رسید که با بهبود قابلیّت و افزایش ظرفیّت‌های محاسباتی، توجّه به تمرکز افزایش یابد. ولی، با توسعه امکانات پردازش موازی و ارزان شدن پردازنده‌ها، گرایش به روش‌های متمرکز کاهش یافته و اغلب روش‌های حلّ مسائل مقیاس‌وسیع به صورت نیمه متمرکز، غیرمتمرکز و سلسله مراتبی مورد استفاده قرار می‌گیرند[1-2و۴-۵]. مهمترین مشکل در این میان مربوط به حالت پویا و عملیاتی مسئله می‌شود، زیرا بهینه‌سازی پویای سامانه، مستلزم اعمال سیگنال‌های کنترلی مناسب می‌باشد. این مشکل با حضور عواملی مانند اغتشاش‌ها و نویزهای ناخواسته و تغییر پارامترها بیشتر خود را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، بررسی سامانه‌های دارای تأخیر زمانی یکی از زمینه‌های مورد علاقه پژوهش‌گران در رشته‌های ریاضی، فیزیک، مهندسی و اقتصاد است. اکنون بعد از سال‌ها تحقیق و پژوهش، نتایج تحقیقاتی بسیاری در این زمینه موجود است. نتایج این تحقیقات در جنبه‌های تئوری، مفهومی و کاربردی ارائه شده است. این نوشتار در ادامه به بررسی مهم‌ترین تحقیقات و پژوهش‌های گزارش شده در حوزه سامانه‌های با تأخیر زمانی می پردازد.

ماهیت سامانه‌های با تأخیر زمانی به‌گونه‌ای است که تغییر و تحولات آینده در یک سامانه با تأخیر زمانی علاوه بر حالت فعلی سامانه به وضعیت پیشین آن نیز وابسته است. این ویژگی خاص را می‌توان با معادلات دیفرانسیلی-دیفرانس و یا در حالت عمومی‌تر با معادلات دیفرانسیلی تابعی (FDE)[1] مدل‌سازی نمود. در صورت قابل چشم‌پوشی بودن اثر تأخیر در سامانه‌ها می‌توان آنها را با معادلات دیفرانسیلی معمولی بیان نمود، زیرا در این دسته از سامانه‌ها تغییرات حالت آینده سامانه تنها وابسته به به حالت فعلی سامانه است. امّا در بسیاری از سامانه‌های واقعی، وجود تأخیر زمانی اجتناب‌ناپذیر است. وجود تأخیر در بسیاری از زمینه‌های کاربردی، این شاخه را به یک محیط و فضای پژوهشی-علمی فعّال تبدیل شده است. این سامانه‌ها معمولاً به‌صورت سامانه‌های وراثتی[2]، سامانه‌های با اثر آتی[3]، یا سامانه‌های با تأخیر زمانی بوده و در حالت عمومی به زیردسته‌ای از معادلات دیفرانسیلی تابعی و سامانه‌های با بعد نامحدود تعلّق دارند. با توجّه به وجود تأخیرهای متفاوت در سامانه‌های مقیاس‌وسیع و پیچیدگی ذاتی این

[1] Functional Differential Equation (FDE)
[2] Hereditary
[3] After-effect

سامانه‌ها، پایدارسازی سامانه‌های مقیاس‌وسیع دارای تأخیر یکی از مباحث مطرح در پژوهش‌های علم کنترل به‌حساب می‌آید. با در نظر گرفتن عدم‌قطعیّت در مدل و جمله‌های غیرخطّی، پیچیدگی طرّاحی و حصول جواب دوچندان می‌گردد.

پژوهش‌گران کنترل اغلب به دنبال طرّاحی ساده‌ترین نوع از کنترلگر و ترجیحاً با کمترین هزینه طرّاحی و پیاده‌سازی هستند. با توجّه به مسائل و مشکلات بسیار زیادی که در عمل با آن مواجه هستیم اغلب به‌دنبال کم کردن تعداد حسگرهای موجود در یک سامانه تحت کنترل هستیم. در بسیاری از موارد نیز این امکان وجود ندارد که برخی از پارامترهای سامانه اندازه‌گیری شود و امکان بهره‌گیری از کنترلگر بازخورد حالت وجود ندارد. با توجّه به این موضوع، استفاده از کنترلگر بازخورد خروجی دارای مزیت‌های فراوانی است. با توجّه به این‌که بسیاری از مسائل مطرح در کنترل را می‌توان به مسائل بهینه‌سازی کوژ[1] بر حسب نابرابری‌های ماتریسی خطّی[2] تبدیل کرد. در این رساله نیز از قابلیت‌های بهینه‌سازی کوژ و نابرابری‌های ماتریسی خطّی برای طرّاحی کنترلگر و بررسی پایداری سامانه، بهره گرفته شده است.

۱-۲- تاریخچه

۱-۲-۱- سامانه‌های مقیاس‌وسیع

در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در زمینه پایدارسازی غیرمتمرکز سامانه‌های مقیاس‌وسیع انجام شده است. یک روش، طرّاحی کنترلگر پایدارساز با ساختار بازخورد خروجی مبتنی بر حلّ دو معادله ریکاتی است [2و4-5]. در این روش، تنها مسئله پایدارسازی در نظر گرفته شده و توجّه چندانی به کارآیی نشده است. کارآیی مطلوب برای یک سامانه خطّی می‌تواند به صورت یک جواب برای تابع بهینه مربّعی برای مسئله در نظر گرفته شود [۶-۷]. در روش‌های پیشنهادی در مراجع مذکور، یک کنترلگر مبتنی بر بازخورد حالت چنان طرّاحی شده که علاوه بر پایدار نمودن سامانه حلقه بسته در حضور کلیه عدم‌قطعیّت‌های ممکن، کران بالای روی یک تابع هزینه مربّعی را نیز کمینه می‌نماید. حلّ این مسئله به حلّ مسائل ریکاتی منجرّ شده که در برخی مواقع به سختی قابل حلّ هستند و یا اصلاً در سامانه‌های مقیاس‌وسیع بدون عدم‌قطعیّت به‌صورت غیرمتمرکز حلّ شدنی نیستند. در [۸] از روش کنترل آشفتگی تکین[3] استفاده شده است. در صورت برقراری برخی شرایط خاص بر روی برهم‌کنش[4] میان زیرسامانه‌ها، کنترلگر غیرمتمرکز حاصل از کنار هم قرارگرفتن کنترلگرهای محلّی، یک کنترلگر زیربهینه برای کل سامانه خواهد بود. افزایش بیش از حد برهم‌کنش میان زیرسامانه‌ها می تواند موجب ناپایداری کلّی سامانه حلقه بسته نهایی حاصل از اعمال کنترلگر غیرمتمرکز شود. کنترلگر کلّی با فرض سامانه بدون برهم‌کنش طرّاحی شده است ولی به سامانه‌ای اعمال می‌شود که شامل برهم‌کنش در زیرسامانه‌ها نیز هست .در [۹]

[1] Convex optimization
[2] Linear Matrix Inequalities
[3] Singular Perturbation
[4] Interaction

یک گروه خاص از سامانه‌های مقیاس‌وسیع با عدم‌قطعیّت‌های پارامتری، هم در زیرسامانه‌ها و هم در تعامل میان آن‌ها در نظر گرفته شده است. کنترلگر غیرمتمرکز مبتنی بر بازخورد خروجی و بازخورد حالت به گونه‌ای طرّاحی شده است که سامانه حلقه بسته پایدار بوده و هم‌چنین کران بالایی بر روی یک تابع هزینه مربّعی کمینه گردد. شرایط کارآیی مقاوم به صورت نابرابری‌های ماتریسی خطّی بیان شده و روش کمینه سازی تابع هزینه H_∞ مربّعی نیز بر اساس نابرابری‌های ماتریسی خطّی است.

برای یک سامانه مقیاس‌وسیع در [5]، مسئله طرّاحی کنترلگر غیرمتمرکز H_∞ برای تعدادی از زیرسامانه‌ها ارائه شده است. مشخّصات مطلوب به صورت یک تابع هدف تعریف و اساس تابع تبدیل از ورودی اغتشاش به خروجی سامانه در نظر گرفته شده است. مسئله کنترل H_∞ نُرم-∞ مبتنی بر بازخورد خروجی به یک مسئله نابرابری ماتریسی دوخطّی تبدیل شده است. از آن‌جایی که روش جامعی برای حلّ این‌گونه مسائل وجود ندارد، برای حلّ آن از روش هموتوپی[1] استفاده شده است. در ابتدا با صرف‌نظر کردن از برهم‌کنش میان زیرسامانه‌ها، مسئله نابرابری ماتریسی دوخطّی[2] به یک مسئله نابرابری ماتریسی خطّی تبدیل شده و سپس جواب آن به عنوان یک شرط از یک جواب اوّلیه برای مراحل بعدی استفاده شده است.

در طی سال‌ها جاذبه، گسترش و فراگیری سامانه‌های مقیاس‌وسیع همواره رو به افزایش بوده و در طی ۱۵-۲۰ سال اخیر گسترش چشمگیری در روش‌ها رخ داده که موجب ارائه نتایج قابل توجّهی در این حوزه شده است. پیشرفت‌ها در روش‌های عددی و تئوری کنترل، بویژه تئوری کنترل و پایداری مقاوم، تأثیر اساسی در این حوزه داشته است. با ظهور ابزار قدرتمند بهینه‌سازی کوژ با استفاده از نابرابری‌های ماتریسی خطّی [۱۰]، حلّ مسائل طرّاحی کنترلگر در قالب نابرابری‌های ماتریسی خطّی جذّابیّت زیادی پیدا کرده است. با توجّه به این‌که به‌دست آوردن شرط لازم و کافی در طرّاحی بازخورد خروجی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کوژ به مسئله‌ای غیرکوژ منجرّ می‌شود [۱۱-۱۲]، پژوهش‌گران به‌دنبال ارائه روش‌های ابتکاری برای امکان ساده‌سازی این مسائل برای حلّ توسّط ابزار نابرابری‌های ماتریسی خطّی هستند. به علاوه، بکارگیری قیود ساختاری اطّلاعات غیرمتمرکز در طرّاحی کنترلگر، مشکل غیرکوژ بودن مسائل را دوچندان می کند [۱۳-۱۴]. نتایج اوّلیه در استفاده از نابرابری‌های ماتریسی خطّی برای کنترل غیرمتمرکز سامانه‌های با پارامترهای توزیع‌شده[3] در [۱۵]گزارش شده است. این دسته از سامانه‌ها را می‌توان به‌صورت سامانه‌های چندوجهی بیان کرد. در [15] نشان داده شده است که می‌توان از نابرابری‌های ماتریسی خطّی برای محاسبه پاسخ استفاده کرد. شرایط ارائه شده در [15]، در حالت کلّی محافظه‌کارانه است، امّا از لحاظ محاسبات قابل توجّه بوده و قابلیت اعمال به کنترلگرهای غیرمتمرکز را دارا می‌باشد.

دسته‌ای از سامانه‌های مقیاس‌وسیع، متشکل از چندین زیرسامانه مشابه که با سامانه اصلی به‌صورت یکسان در ارتباط هستند، در [۱۶] مطرح شده است. یک روش برای تعیین مجموعه مودهای ثابت سامانه

[1] Homotopy
[2] Bilinear
[3] Distributed Parameters