دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

انتخاب ساختار کنترلی ناوابسته به مدل برای سیستم‌های چندمتغیره

توسط:

سید عادل احمدی طباطبایی

استاد راهنما:

دکتر علی خاکی صدیق

دکتر علیرضا فاتحی

تابستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تـأیـیـدیّـه هیـات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: سید عادل احمدی طباطبایی

را با عنوان: انتخاب ساختار کنترلی ناوابسته به مدل برای سیستم‌های چندمتغیره

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ - استاد راهنما	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
۲ - استاد راهنما	دکتر علیرضا فاتحی	استادیار	
۳ - استاد ممتحن خارجی	دکتر بیژن معاونی	استادیار	
٤ - استاد ممتحن	دکتر حمید خالوزاده	دانشیار	
٥ - نماینده تحصیلات تکمیلی			

تـقـدیـم

تقدیم به پدر و مادر و تنها برادرم که در این مدت همواره با صبر و شکیبایی پشتیبان من بوده‌اند. با تشکر از زحمات آن‌ها و به امید روزی که بتوانم جبران زحمات آن‌ها را نمایم. به امید سلامتی برای آن‌ها و موفقیت روزافزون برای برادر عزیزم.

تشکر و قدردانی

در این‌جا بر خود می‌دانم که از اساتید محترم، جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق و جناب آقای دکتر علیرضا فاتحی که در طول این پروژه با راهنمایی‌های خویش، پشتیبان من بوده‌اند و همواره با صبر و شکیبایی سعی در پیشبرد پروژه داشتند، تشکر و قدردانی نمایم. برای این دو عزیز آرزوی سلامتی و موفقیت روزافزون را از خداوند متعال دارم. همچنین از اساتید محترم ارزیاب، جناب آقای دکتر بیژن معاونی و جناب آقای دکتر حمید خالوزاده که با نکات ارزنده خویش، باعث بهبود این پایان نامه شدند، تشکر می‌کنم.

چکیده

در این پایان نامه به انتخاب ساختار کنترلی ناوابسته به مدل می‌پردازیم. ابتدا بر اساس داده‌های ورودی-خروجی زیرسیستم‌ها و مفهوم همبستگی داده‌ها در هر زیرسیستم، معیاری معرفی می‌شود که شامل اطلاعات استاتیکی و دینامیکی زیرسیستم‌ها می‌باشد. سپس از معیار فوق برای انتخاب ساختار جفت‌یابی برای سیستم‌های پایدار و مربعی استفاده می‌شود و با مثال‌هایی نشان داده می‌شود که معیار ارائه شده منجر به انتخاب جفت‌های مناسب برای کنترل غیرمتمرکز می‌شود در حالی‌که نیازی به مدل ریاضی سیستم چند متغیره نمی‌باشد.

در ادامه براساس ضرایب کواریانس و رابطه پارسوال به تخمین انرژی زیرسیستم‌ها می‌پردازیم که استفاده از ضرایب کواریانس باعث می‌شود به مدل سیستم چندمتغیره نیازی نباشد. با ارائه مثالی نشان می‌دهیم که معیار ارائه شده منجر به انتخاب صحیح جفت‌یابی با دیدگاه انرژی می‌شود. در ادامه با ارائه مثالی نشان می‌دهیم که رویکرد استفاده شده برای محاسبه انرژی در آرایه انرژی نسبی موثر ممکن است در مواردی مشکل‌ساز باشد و تقریب استفاده شده منجر به قضاوت نادرست در مورد انرژی زیرسیستم‌ها شود در حالی که معیار ارائه شده در این پایان نامه از تقریب بهتری از انرژی حلقه‌ها برای انتخاب جفت‌یابی استفاده می‌کند.

در انتها، انتخاب ساختار کنترلی ناوابسته به مدل که شامل انتخاب ورودی-خروجی و انتخاب جفت‌یابی می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا براساس معیار معرفی‌شده بر اساس ضرایب کواریانس، معیاری معرفی می‌شود که این معیار به صورت همزمان انتخاب ورودی-خروجی و انتخاب جفت‌یابی را انجام می‌دهد. نشان می‌دهیم که این معیار در مواقعی که ضرب schur منجر به نتایج نادرست می‌شود، ساختار مناسب جفت‌یابی را انتخاب می‌کند. سپس، معیاری برای تخمین نرم هانکل زیرسیستم‌ها بر اساس ضرایب کواریانس ارائه می‌شود. در انتها، به انتخاب ساختار کنترلی برای یک موتور جت توربوفن با استفاده از روش‌های ارائه شده می‌پردازیم. در تمامی گام‌ها از داده‌های ورودی-خروجی استفاده می‌شود و هیچ وابستگی به مدل سیستم وجود ندارد. نتیجه حاصله نشان از صحت روش‌های ارائه شده برای انتخاب ساختار کنترلی دارد.

کلید واژه: انتخاب ساختار کنترلی، انتخاب ورودی-خروجی، انتخاب جفت‌یابی، ضرایب کواریانس، انرژی، نرم هانکل

فـهرست مطـالـب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ج

فهرست شکل‌ها ..... **Error! Bookmark not defined.**

فصل ۱- مقدمه ۱

فصل ۲- بررسی روش‌های انتخاب ساختار کنترلی ۵

۲-۱- مروری اجمالی بر روشهای انتخاب ورودی-خروجی ۵

۲-۱-۱- دسترسی ۵

۲-۱-۲- کنترل پذیری و مشاهده پذیری حالت ۶

۲-۱-۲-۱- کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری به صورت کیفی ۷

۲-۱-۲-۲- کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری به صورت کمی ۷

۲-۱-۳- صفرهای سمت راست صفحه ۸

۲-۱-۴- کنترل‌پذیری ورودی-خروجی ۹

۲-۱-۴-۱- کوچک‌ترین مقدار منفرد ۱۰

۲-۱-۴-۲- بزرگ‌ترین مقدار منفرد ۱۱

۲-۱-۵- عدد آرایه بهره نسبی ۱۲

۲-۲- مروری مختصر بر روش‌های انتخاب ساختار کنترل ۱۳

۲-۲-۱- آرایه بهره نسبی ۱۳

۲-۲-۲- آرایه بهره نسبی موثر ۱۵

۲-۲-۳- آرایه انرژی نسبی موثر ۱۶

۲-۲-۳-۱- اعمال پهنای باند سیستم حلقه بسته در آرایه انرژی نسبی موثر ۱۷

۲-۲-۴- آرایه بهره نرمالیزه شده نسبی ۱۸

۲-۳- نتیجه‌گیری ۲۰

فصل ۳- آرایه همبستگی نسبی ۲۱

۳-۱- فرآیندهای تصادفی ۲۱

۳-۲- آرایه همبستگی نسبی ۲۳

۳-۲-۱- اثر تاخیر در آرایه همبستگی نسبی ۲۷

۳-۳- مثال‌های مطالعاتی ۲۸

۳-۴- نتیجه‌گیری ۴۳

فصل ۴- آرایه انرژی تداخلی نسبی ۴۴
۴-۱- تئوری پارسوال ۴۴
۴-۲- محاسبه انرژی تداخلی با استفاده از ضرایب کواریانس و رابطه پارسوال ۴۴
۴-۳- کاستی آرایه انرژی نسبی موثر ۴۹
فصل ۵- انتخاب ساختار کنترل ۵۶
۵-۱- انتخاب ساختار جفتیابی با استفاده از همبستگی ۵۶
۵-۱-۱- بررسی ضرب schur ۵۶
۵-۱-۲- معیار شایستگی ۵۹
۵-۲- انتخاب ساختار کنترل ۷۵
۵-۲-۱- عدد آرایه شایستگی نرمالیزه شده ۷۵
۵-۲-۲- استفاده از نرم هانکل برای انتخاب ورودی-خروجی ۷۶
۵-۲-۳- شناسایی صفر ناپایدار در سیستم‌های چندمتغیره ۸۰
۵-۲-۴- انتخاب ساختار کنترلی برای موتور جت توربوفن ۸۲
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۱
۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۱
۶-۲- پیشنهادات ۱۰۲
فهرست مراجع ۱۰۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۱۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: بهره نرمالیزه شده برای زیرسیستمهای مرتبه اول و دوم با تاخیر ۲۰

جدول ۳-۱: ساختارهای پیشنهادی جفتیابی برای سیستم (۳-۴۱) ۳۸

جدول ۳-۲: ساختارهای پیشنهادی جفتیابی برای سیستم (۳-۴۷) ۴۱

جدول ۳-۳: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار قطری ۴۱

جدول ۳-۴: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار غیر قطری ۴۲

جدول ۳-۵: مقادیر ISE برای ساختارهای قطری و غیرقطری ۴۳

جدول ۴-۱: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار قطری ۵۳

جدول ۴-۲: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار غیرقطری ۵۳

جدول ۴-۳: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار قطری ۵۵

جدول ۴-۴: ضرایب کنترلرها برای زیرسیستمها در ساختار غیرقطری ۵۵

جدول ۵-۱: شش مجموعه کاندید برای متغیرهای کنترل شونده ۸۳

جدول ۵-۲: nea_num و ساختارهای جفت‌یابی برای مجموعه‌های کاندید ۹۵

جدول ۵-۳: مقادیر تخمینی و واقعی نرم هانکل ۹۶

جدول ۵-۴: $qp(0)$ برای مجموعه‌های (۵) و (۶) برای زمان نمونه‌برداری ۰/۰۷ ..... ۹۷

جدول ۵-۵: $qp(0)$ برای مجموعه‌های (۵) و (۶) برای زمان نمونه‌برداری $7 \times 10 - 5$ ۹۷

جدول ۵-۶: $qp(0)$ برای مجموعه‌های (۵) و (۶) برای زمان نمونه‌برداری $7 \times 10 - 10$ ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: سیستم کنترلی برای بررسی کنترل‌پذیری ورودی-خروجی ۹

شکل ۲-۲: Aij برای زیرسیستم gij ۱۸

شکل ۳-۱: میانگین ضرایب کواریانس و پاسخ ضربه مربوط به زیرسیستم‌های (۳-۲۴) ۲۹

شکل ۳-۲: میانگین ضرایب همبستگی در ۵ مرحله ۳۰

شکل ۳-۳: میانگین ضرایب کواریانس مربوط به زیرسیستمهای (۱,۱)- (۱,۲)- (۱,۳) ۳۲

شکل ۳-۴: ضرایب کواریانس مربوط به زیرسیستمهای (۲,۱)- (۲,۲)- (۲,۳) ۳۳

شکل ۳-۵: ضرایب کواریانس مربوط به زیرسیستمهای (۳,۱)- (۳,۲)- (۳,۳) ۳۳

شکل ۳-۶: میانگین ضرایب همبستگی برای زیرسیستمهای (۱,۱)- (۱,۲)- (۱,۳) ۳۴

شکل ۳-۷: میانگین ضرایب همبستگی برای زیرسیستمهای (۲,۱)- (۲,۲)- (۲,۳) ۳۴

شکل ۳-۸: میانگین ضرایب کواریانس برای زیرسیستمهای (۳,۱)- (۳,۲)- (۳,۳) ۳۵

شکل ۳-۹: میانگین ضرایب کواریانس برای سیستم (۳-۴۱) ۳۷

شکل ۳-۱۰: میانگین ضرایب همبستگی برای سیستم (۳-۴۱) ۳۷

۳-۱۱: میانگین ضرایب کواریانس برای سیستم (۳-۴۷) ۳۹

شکل ۳-۱۲: میانگین ضرایب همبستگی برای سیستم (۳-۴۷) ۴۰

شکل ۳-۱۳: خروجیهای سیستم حلقه بسته با اعمال مرجع پله به $y1$ ۴۲

شکل ۳-۱۴: خروجیهای سیستم حلقه بسته با اعمال مرجع پله به $y2$ ۴۲

شکل ۴-۱: ضرایب کواریانس برای سیستم (۴-۱۴) ۴۷

شکل ۴-۲: ضرایب همبستگی برای سیستم (۴-۱۴) ۴۸

شکل ۴-۳: تقریب انرژی در EREA ۴۹

شکل ۴-۴: ناحیه در نظر گرفته نشده در محاسبه انرژی تداخلی ۴۹

شکل ۴-۵: انرژی زیرسیستمهای $G1(s)$ و $G2(s)$ ۵۰

شکل ۴-۶: میانگین ضرایب کواریانس برای سیستم (۴-۲۷) ۵۱

شکل ۴-۷: میانگین ضرایب همبستگی برای سیستم (۴-۲۷) ۵۲

۴-۸: خروجی های سیستم حلقه بسته در دو ساختار قطری و غیر قطری ۵۳

۴-۹: خروجی های سیستم حلقه بسته ۵۵

شکل ۵-۱: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم (۱,۱) ۶۵

شکل ۵-۲: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم (۱,۱) ۶۶

شکل ۵-۳: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) ۶۶
شکل ۵-۴: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) ۶۷
شکل ۵-۵: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) ۶۷
شکل ۵-۶: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) ۶۸
شکل ۵-۷: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) ۶۸
شکل ۵-۸: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) ۶۹
شکل ۵-۹: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲)، (۱,۳) و (۱,۴) ۷۱
شکل ۵-۱۰: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲)، (۲,۳) و (۲,۴) ۷۱
شکل ۵-۱۱: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲)، (۳,۳) و (۳,۴) ۷۲
شکل ۵-۱۲: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۴,۱)، (۴,۲)، (۴,۳) و (۴,۴) ۷۲
شکل ۵-۱۳: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲)، (۱,۳) و (۱,۴) ۷۳
شکل ۵-۱۴: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲)، (۲,۳) و (۲,۴) ۷۳
شکل ۵-۱۵: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲)، (۳,۳) و (۳,۴) ۷۴
شکل ۵-۱۶: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۴,۱)، (۴,۲)، (۴,۳) و (۴,۴) ۷۴
شکل ۵-۱۷: ضرایب کواریانس در سیستم (۵-۵۷) ۷۹
شکل ۵-۱۸: ضرایب همبستگی در سیستم (۵-۵۷) ۸۰
شکل ۵-۱۹: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۱) ۸۴
شکل ۵-۲۰: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) در مجموعه (۱) ۸۴
شکل ۵-۲۱: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) در مجموعه (۱) ۸۵
شکل ۵-۲۲: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۱) ۸۵
شکل ۵-۲۳: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) در مجموعه (۱) ۸۶
شکل ۵-۲۴: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) در مجموعه (۱) ۸۶
شکل ۵-۲۵: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۲) ۸۷
شکل ۵-۲۶: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۲) ۸۷
شکل ۵-۲۷: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۳) ۸۸
شکل ۵-۲۸: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۳) ۸۸
شکل ۵-۲۹: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۴) ۸۹
شکل ۵-۳۰: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) در مجموعه (۴) ۹۰
شکل ۵-۳۱: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) در مجموعه (۴) ۹۰
شکل ۵-۳۲: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۴) ۹۱
شکل ۵-۳۳: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۲,۱)، (۲,۲) و (۲,۳) در مجموعه (۴) ۹۱
شکل ۵-۳۴: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۳,۱)، (۳,۲) و (۳,۳) در مجموعه (۴) ۹۲

شکل ۵-۳۵: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۵) ۹۳
شکل ۵-۳۶: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۵) ۹۳
شکل ۵-۳۷: ضرایب کواریانس برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۶) ۹۴
شکل ۵-۳۸: ضرایب همبستگی برای زیرسیستم‌های (۱,۱)، (۱,۲) و (۱,۳) در مجموعه (۶) ۹۴
شکل ۵-۳۹: ضرایب همبستگی برای حلقه‌های $y4, u1$، $y5, u1$ و $y6, u1$ ۹۶
شکل ۵-۴۰: $q7(t)$ و $q5(t)$ برای مجموعه‌های (۵) و (۶) ۹۹
شکل ۵-۴۱: $q(t)$ برای مجموعه‌های (۵) و (۶) ۹۹

فصل ۱– مقدمه

انتخاب ساختار کنترلی یکی از گام‌های مورد نیاز برای طراحی سیستم کنترل می‌باشد که به دو قسمت انتخاب ورودی-خروجی و انتخاب جفت‌یابی تقسیم‌بندی می‌شود. انتخاب ورودی-خروجی برای عملکرد سیستم چندمتغیره از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد چرا که پیچیدگی و عملکرد سیستم به مجموعه ورودی-خروجی انتخاب شده بستگی دارد. انتخاب ورودی-خروجی عبارت است از انتخاب متغیرهای تولید شونده (ورودی به سیستم) و متغیرهای کنترل شونده (ورودی به کنترلر) و با توجه به افزایش تعداد مجموعه ورودی-خروجی‌های کاندید با افزایش تعداد ورودی-خروجی‌ها، استفاده از روشی برای انتخاب مجموعه مناسب ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های بسیاری با در نظرگرفتن معیارهای متفاوت برای انتخاب ورودی-خروجی ارائه شده‌اند که [۱] مرور به نسبت جامعی بر این روش‌ها انجام داده است. در کل، روش‌های ارائه شده براساس معیارهای دسترسی، کنترل پذیری-رویت پذیری حالت یا کنترل پذیری ورودی-خروجی می‌باشند. البته معیارهایی هم براساس هزینه اقتصادی، پایداری مقاوم، عملکرد نامی و عملکرد مقاوم نیز می‌باشند که در این پروژه بررسی نمی‌شوند.

معیار دسترسی[1] که براساس گراف علت و معلولی[2] توسط [۲] برای سیستم‌های خطی و غیرخطی ارائه شده است ولی انتخاب تعداد زیادی از مجموعه‌های ورودی-خروجی ایراد این روش می‌باشد. استفاده از درجه نسبی و محاسبه این کمیت با استفاده از گراف علت و معلولی توسط [۳] برای انتخاب ورودی انجام گرفته است. لازم به ذکر است که استفاده از گراف علت و معلولی نیازی به مدل دقیق ریاضی سیستم ندارد. معیارهای مبتنی بر کنترل پذیری-رویت پذیری حالت به دو دسته معیارهای کیفی و کمی تقسیم می‌شوند. معیارهای کیفی برای سیستم‌های خطی توسط [۴] و برای سیستم‌های غیرخطی توسط [۵] مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی تعداد مجموعه‌های مورد قبول در این روش‌ها زیاد می‌باشند. به همین علت معیارهای کمی مبتنی بر کنترل پذیری-رویت پذیری حالت ارائه شده‌اند. گرامیان‌های کنترل پذیری[3] و رویت پذیری[4] توسط [۶] که قابل تعمیم به سیستم‌های خطی و غیرخطی می‌باشند، برای انتخاب ورودی-خروجی به کار می‌روند. در ضمن، استفاده از مقادیر منفرد هانکل (HSVs[5]) در تحقق بالانس سیستم که به طور همزمان به کنترل پذیری و رویت پذیری سیستم توجه دارند، نیز قابل استفاده می‌باشند [۸-۷]. با توجه به محدودیتی که صفرهای ناپایدار نیز در کنترل سیستم چندمتغیره اعمال

[1] Accessibility
[2] Cause and effect
[3] Controllability gramians
[4] Observability gramians
[5] Hankel Singular Values

می‌کنند [۹]، اجتناب از مجموعه‌های ورودی-خروجی که منجر به صفر ناپایدار در محدوده فرکانسی مطلوب می‌شوند، به عنوان رویکردی در [۷] و [۱۱-۱۰] برای انتخاب ورودی-خروجی مورد استفاده قرار گرفته‌است. تعداد بسیاری از روش‌های انتخاب ورودی-خروجی نیز مبتنی بر کنترل پذیری ورودی-خروجی می‌باشند که استفاده از تجزیه مقدار منفرد (SVD[1]) اساس بسیاری از این روش‌ها می‌باشد [۱۲-۱۵-۱۴-۱۳]. در این روش‌ها سعی می‌شود که ورودی‌ها-خروجی‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که ورودی‌ها اثر قابل توجهی روی خروجی‌ها داشته‌باشند. آرایه بهره نسبی (RGA[2]) یکی از معیارهای اندازه‌گیری تداخل می‌باشد که توسط [۱۶] برای انتخاب جفت‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. عدد آرایه بهره نسبی یکی از معیارهای مبتنی بر کنترل پذیری ورودی-خروجی می‌باشد که در انتخاب ساختار کنترلی برای یک موتور جت توربوفن مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. این معیار به طور همزمان انتخاب ورودی-خروجی و جفت‌یابی را انجام می‌دهد. در ضمن، [۱۷] با استفاده از تعریف آرایه بهره نسبی برای سیستم‌های غیرمربعی، اقدام به مربع‌سازی سیستم و حذف تعدادی ورودی یا خروجی کرده است.

گام دوم در انتخاب ساختار کنترلی، انتخاب جفت‌یابی می‌باشد که این گام منحصر به کنترل غیرمتمرکز می‌باشد. کنترل غیرمتمرکز یکی از ساختارهای کنترل سیستم چندمتغیره می‌باشد که سادگی و مقاوت بالا از عوامل استقبال از این نوع روش می‌باشند. در این رویکرد کنترلرهای تک ورودی-تک خروجی (SISO[3]) برای حلقه‌هایی مشخص طراحی می‌شوند بنابراین اولین گام انتخاب حلقه‌های SISO در سیستم چندمتغیره می‌باشد به‌گونه‌ای که تداخل میان این حلقه‌ها حداقل باشد و بهترین عملکرد برای هر حلقه قابل دسترسی باشد. RGA یکی از روش‌های متداول برای انتخاب جفت‌های ورودی-خروجی می‌باشد که از بهره حالت ماندگار سیستم استفاده می‌کند. سادگی محاسباتی RGA و اطلاعات کمی که برای محاسبه آرایه بهره نسبی مورد نیاز می‌باشد، باعث استفاده گسترده از این روش می‌باشند ولی در نظر گرفتن تداخل فقط در فرکانس صفر و در نظر نگرفتن دینامیک زیرسیستم‌ها از عیوب RGA به شمار می‌روند. به همین دلیل روش‌های بسیار دیگری برای انتخاب جفت‌یابی ارائه شده‌اند. بعضی از روش‌های ارائه شده برای رفع ایراد RGA می‌باشند. در این روش‌های معمولا دینامیک زیرسیستم‌ها را نیز در نظر می‌گیرند و تداخل را در دیگر فرکانس‌ها برای انتخاب حلقه‌های SISO مدنظر قرار می‌دهند. آرایه بهره نسبی پویا (DRGA[4]) یکی از این روش‌ها می‌باشد که از تابع تبدیل سیستم به جای بهره حالت ماندگار استفاده می‌کند [۱۸]. از ضرایب کنترل‌کننده فیدبک خروجی در [۱۹] برای انتخاب جفت‌های ورودی-خروجی استفاده شده است ولی وابستگی به کنترلر، باعث کاهش سادگی این روش نسبت به RGA شده

[1] Singular Value Decomposition
[2] Relative Gain Array
[3] Single Input-Single Output
[4] Dynamic Relative Gain Array

است. برای در نظرگرفتن دینامیک زیرسیستم‌ها همراه با حفظ سادگی، آرایه بهره نسبی موثر (ERGA[1]) توسط [۲۰] ارائه شده است که از بهره حالت ماندگار زیرسیستم‌ها همراه با پهنای باند برای انتخاب جفت‌های ورودی-خروجی استفاده می‌کند. سادگی محاسباتی همراه با توجه یکسان به اطلاعات استاتیکی و دینامیکی زیرسیستم‌ها، ERGA را معیاری مطلوب برای انتخاب جفت‌ها ساخته است. تعبیر صحیحی از انرژی زیرسیستم‌ها توسط نرم ۲ در [۲۱] منجر به تعریف آرایه انرژی نسبی موثر (EREA[2]) انتخاب حلقه‌هایی با حداکثر انرژی انتقالی شده است. استفاده از مفهوم انرژی باعث می‌شود که وزن بیشتری به بهره حالت ماندگار در اندازه‌گیری تداخل داده شود و همین امر موجب می‌شود که آرایه انرژی نسبی موثر منجر به انتخاب ساختار مناسب‌تری نسبت به آرایه بهره نسبی موثر شود. در [۲۲] استفاده از متوسط زمان سکون[3] زیرسیستم‌ها که شامل اطلاعات استاتیکی و دینامیکی زیرسیستم‌ها می‌باشد، منجر به تعریف آرایه بهره نرمالیزه شده نسبی (RNGA[4]) می‌شود. بر اساس RNGA حلقه‌هایی با بهره حالت ماندگار و سرعت قابل توجه برای کنترل غیرمتمرکز انتخاب می‌شوند. دسته دیگری از روش‌ها می‌باشند که از مفاهیم کنترل پذیری، رویت پذیری و نرم هانکل برای جفت‌یابی استفاده می‌کنند [۲۴-۲۳]. در ضمن، روش‌هایی برای انتخاب جفت‌های ورودی-خروجی در سیستم‌های غیرخطی [۲۶-۲۵] و برای سیستم‌ها در حضور نامعینی در [۲۸-۲۷] ارائه شده‌اند.

ویژگی مشترک روش‌های مذکور در انتخاب ساختار کنترلی وابستگی به مدل سیستم چندمتغیره می‌باشد. در روش‌های انتخاب ورودی-خروجی، فقط روش ارائه شده در [۳] می‌باشد که به مدل دقیق سیستم نیازی ندارد. مابقی روش‌ها از جمله روش‌های مبتنی بر کنترل پذیری ورودی-خروجی به مدل سیستم نیاز دارند. عدد آرایه بهره نسبی نیز وابسته به تابع تبدیل سیستم می‌باشد. روش‌های ارائه شده برای انتخاب جفت‌یابی نیز به اطلاعاتی از سیستم نیاز دارند که این اطلاعات از مدل ریاضی سیستم قابل دست‌یابی می‌باشند. البته روش‌هایی وجود دارند که جفت‌های ورودی-خروجی را با فرض در دسترس نبودن مدل سیستم انتخاب می‌کنند. در این روش‌ها از شبکه‌های عصبی [۲۹] و یا سیستم‌های فازی [۳۰] برای انتخاب پیکربندی کنترل استفاده می‌شود. البته بایستی توجه داشت که این روش‌ها در حقیقت به تخمین بهره حالت ماندگار سیستم می‌پردازند و در نهایت با استفاده از مدل تخمین زده شده به محاسبه RGA می‌پردازند. مشخص است که این روش‌ها نیز از مدل سیستم تخمین زده شده استفاده می‌کنند. با توجه به توضیحات ارائه شده لزوم وجود روشی که نیازی به مدل سیستم نداشته باشد و به طور مستقیم با استفاده از داده‌های سیستم، ساختار کنترلی را انتخاب کند، ضروری به نظر می‌رسد.

---

[1] Effective Relative Gain Array
[2] Effective Relative Energy Array
[3] Average Residence Time
[4] Relative Normalized Gain Array

هدف این پایان نامه ارائه معیارهایی براساس داده‌های ورودی-خروجی و مفهوم همبستگی برای انتخاب ساختار کنترلی می‌باشد.

ساختار این پایان نامه بدین شرح است: در فصل دوم، به بررسی اجمالی روش‌های موجود برای انتخاب ورودی-خروجی و جفت‌یابی می‌پردازیم. در فصل سوم با استفاده از داده‌های سیستم و مفهوم همبستگی بین داده‌های ورودی-خروجی، به معرفی آرایه همبستگی نسبی می‌پردازیم و با ارائه مثال‌هایی نشان می‌دهیم که این معیار بدون نیاز به مدل سیستم چند متغیره به انتخاب جفت‌های مناسب ورودی-خروجی می‌انجامد. در فصل چهارم، با استفاده از ضرایب کواریانس مربوط به زیرسیستم‌ها به تخمین انرژی می‌پردازیم و نشان می‌دهیم که معیار ارائه شده تقریب بهتری از انرژی زیرسیستم‌ها نسبت به رویکرد استفاده شده در آرایه انرژی نسبی موثر برای تقریب انرژی در اختیار طراح قرار می‌دهد. این مسئله در قالب مثالی نشان داده می‌شود. در فصل پنجم، ابتدا به بررسی ضرب schur که در اکثر روش‌های جفت‌یابی مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌پردازیم و معیار شایستگی براساس آرایه همبستگی معرفی شده در فصل دوم ارائه می‌شود. نشان می‌دهیم که آرایه شایستگی منجر به انتخاب جفت‌یابی مناسب برای سیستم‌های چندمتغیره می‌شود. سپس براساس آرایه شایستگی، معیاری برای انتخاب ورودی-خروجی معرفی می‌شود. به وسیله این معیار، مجموعه‌های ورودی-خروجی انتخاب می‌شوند که برای کنترل غیر متمرکز مناسب‌تر باشند. سپس، معیاری براساس نرم هانکل زیرسیستم‌ها برای انتخاب ورودی-خروجی ارائه می‌شود البته در محاسبه این معیار از ضرایب کواریانس ورودی-خروجی استفاده می‌شود که این به معنای مستقل بودن از مدل سیستم می‌باشد. در انتها، برای بررسی صحت روش‌های ارائه شده، به بررسی انتخاب ساختار کنترلی برای یک موتور جت توربوفن می‌پردازیم و با مقایسه نتیجه حاصله با نتایج قبلی، صحت روش‌های ارائه شده نشان داده می‌شود ولی با این تفاوت که در تمامی مراحل به مدل سیستم چندمتغیره نیازی نمی‌باشد و تنها از داده‌های ورودی-خروجی استفاده می‌کنیم. نهایتاً، فصل ششم شامل نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی می‌باشد.

فصل ۲– بررسی روش‌های انتخاب ساختار کنترلی

انتخاب ساختار کنترلی شامل انتخاب ورودی-خروجی و ساختار جفت‌یابی (محدود به کنترل غیرمتمرکز) می‌باشد. در این فصل ابتدا به بررسی اجمالی روش‌های انتخاب ورودی-خروجی می‌پردازیم. سپس، روش‌های ارائه شده برای انتخاب ساختار جفت‌یابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به ابعاد وسیع روش‌های ارائه شده برای انتخاب ساختار کنترلی ، تنها روش‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرند که در طول این پایان نامه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲–۱– مروری اجمالی بر روش‌های انتخاب ورودی–خروجی

یکی از گام‌های مورد نیاز در طراحی سیستم کنترل، انتخاب ورودی-خروجی می‌باشد که این امر به معنای تصمیم‌گیری در مورد تعداد، مکان و نوع محرک‌ها و سنسورها می‌باشد که این تصمیم‌گیری روی پیچیدگی و عملکرد سیستم کنترل تاثیر قابل توجهی دارد. با توجه به افزایش نمایی مجموعه‌های کاندید در اثر افزایش ورودی‌ها و خروجی‌ها، لزوم وجود روشی برای انتخاب مجموعه ورودی-خروجی مناسب از میان مجموعه‌های کاندید ضروری به نظر می‌رسد.

۲–۱–۱– دسترسی

مرجع [۲] روشی کیفی برای انتخاب ورودی-خروجی براساس گراف‌های علت و معلولی ارائه کرده است که این روش برای سیستم‌های خطی و غیرخطی قابل استفاده می‌باشد. مجموعه‌ی ورودی-خروجی‌ای از دید این روش مناسب می‌باشد که یک مسیر علی میان متغیرهای تولید شونده و کنترل - شونده از یک سو و از سویی دیگر میان متغیرهای اندازه‌گیری شونده و کنترل شونده وجود داشته باشد. این امر به این معنا است که توسط متغیرهای تولیدشونده می‌توان روی متغیرهای کنترل‌شونده اثر داشت و از طریق متغیرهای اندازه‌گیری شونده، مقادیر متغیرهای کنترل شونده را به دست آورد. به عنوان مثال برای سیستم‌های خطی و با استفاده از مدل سیستم، استفاده از معیارهای کمی دسترس‌پذیری مانند بهره حالت ماندگار، ثابت‌های زمانی و تاخیر می‌توانند به عنوان معیارهای کمی دسترس‌پذیری مورد استفاده قرار گیرند. ایراد این روش این است که تعداد زیادی مجموعه ورودی-خروجی مناسب شناخته می‌شوند اگر تنها دسترس‌پذیری مدنظر باشد.

مرجع [۳] با استفاده از تعریف r_{ij} به صورت درجه نسبی متغیر کنترل شونده z_i نسبت به متغیر تولید شونده u_j و با فرض $y = z$، روشی برای انتخاب ورودی برای سیستم‌های غیرخطی ارائه کرده

است. در این روش r_{ij} در حقیقت میزان اثرگذاری ورودی jام روی خروجی iام می‌باشد و به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تداخل بین متغیرهای کنترل شونده و تولید شونده معرفی شده است. پس، معیار r_{ij} می‌تواند برای انتخاب ساختار جفت‌یابی مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر، r_{ij} میزان "نزدیکی فیزیکی[1]" متغیرهای تولید شونده و کنترل شونده و یا "اثر مستقیم[2]" متغیرهای تولید شونده روی متغیرهای کنترل شونده می‌باشد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که r_{ij} برای انتخاب مجموعه ورودی-خروجی مناسب می‌باشد. درجه نسبی می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تعریف معیار کمی از دسترس پذیری باشد که برای انتخاب ورودی مورد استفاده قرار گیرد. در گراف علت و معلول، $r_{ij}+1$ حداقل طول مسیر بین u_j و z_i می‌باشد و هرچه مقدار r_{ij} کمتر باشد، آنگاه دسترس‌پذیری بهتری از u_j به z_i وجود دارد. برای انتخاب مجموعه ورودی، برای هر مجموعه معیار زیر را محاسبه می‌کنیم:

$$r_{zu}=\sum_{i=1}^{n_z} min\,(r_{i1},\dots,r_{in_u}) \qquad (۱-۲)$$

سپس برای رسیدن به حداکثر دسترس‌پذیری، مجموعه‌ای انتخاب می‌شود که معیار فوق برای آن مجموعه حداقل شود.

۲-۱-۲- کنترل پذیری و مشاهده پذیری حالت

سیستم خطی با معادلات حالت زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x}=Ax+Bu \qquad (۲-۲)$$

$$y=Cx+Du \qquad (۳-۲)$$

کنترل پذیری حالت: سیستم نشان داده شده با معادلات (۲-۲) و (۲-۳) کنترل پذیر حالت می‌باشد اگر برای هر حالت اولیه $x(0)$، هر زمان محدود $t_e>0$ و هر حالت نهایی x_e، ورودی $u(t)$ وجود داشته باشد که $x(t_e)=x_e$.

رویت پذیری حالت: سیستم نشان داده شده با معادلات (۲-۲) و (۲-۳) رویت پذیر حالت است اگر بتوان برای هر زمان محدود $t_e>0$، با توجه به گذشته $u(t)$ و $y(t)$ حالت اولیه $x(0)$ را تخمین زد.

بایستی توجه شود که کنترل پذیری و رویت پذیری مفاهیمی کیفی می‌باشند. بدین معنی که سیستم می‌تواند این ویژگی‌ها را داشته باشد یا نداشته باشد. معیارهای کمی کنترل پذیری و رویت پذیری برای

[1] Physical Closeness
[2] Direct Effect

انتخاب مطلوب ورودی-خروجی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه هر دو راهکار کیفی و کمی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱-۲-۱- کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری به صورت کیفی

یک راهکار معلوم برای انتخاب ورودی-خروجی، حذف مجموعه‌هایی است که زوج (A,B) کنترل‌ناپذیر حالت و یا زوج (A,C) رویت ناپذیر حالت باشد. استفاده از مفهوم میزان پایدارپذیری[1] (کنترل پذیری مودهای ناپایدار) و میزان آشکارپذیری[2] (رویت پذیری مودهای ناپایدار) در [۴] به ترتیب برای انتخاب ورودی-خروجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۵] با استفاده از کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری حالت ساختاری[3]، معیارهایی برای انتخاب ورودی-خروجی ارائه کرده است. شرایط لازم برای کنترل پذیری و مشاهده پذیری حالت ساختاری عبارت‌اند از:

۱. شروط دسترس‌پذیری (حالت‌ها بایستی توسط ورودی‌ها در دسترس باشند و خروجی‌ها نیز توسط حالت‌ها در دسترس باشند)

۲. شرایط رتبه برای جفت‌های (A,B) و (C,A).

پس کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری حالت ساختاری، دسترسی را تضمین می‌کنند. مدل‌های ساختاری در قالب روابط (۲-۲) و (۲-۳) برای توصیف سیستم‌های غیرخطی نیز می‌توانند به کار روند.

۲-۱-۲-۲- کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری به صورت کمی

با توجه به ماهیت روش‌های مبتنی بر کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری کیفی، تعداد مجموعه‌های پذیرفته‌شده زیاد می‌باشد که این امر به علت کم بودن محافظه‌کاری این روش‌ها می‌باشد. به همین علت معیارهای کمی کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری حالت ارائه شده‌اند که در این قسمت به طور مختصر بررسی می‌شوند.

در معیارهای کمی براساس کنترل‌پذیری و رویت‌پذیری حالت، گرامیان‌های کنترل‌پذیری $W_c(t)$ و رویت‌پذیری $W_o(t)$ نقش ویژه‌ای دارند. اگر ماتریس A در رابطه (۲-۲) پایدار باشد، آنگاه $L_c =$

[1] Stabilizability
[2] detectability
[3] Structured

$\lim_{t\to\infty} W_c(t)$ و $\lim_{t\to\infty} W_o(t)$ که L_o و L_c یکتا می‌باشند و پاسخ‌های مثبت نیمه معین معادلات لیاپانوف زیر می‌باشند:

$$AL_c + L_cA^T + BB^T = 0 \qquad (۴-۲)$$

$$A^TL_o + L_oA + C^TC = 0 \qquad (۵-۲)$$

در [۶] مکان مطلوب برای محرک‌ها و سنسورها به‌ترتیب براساس بیشینه کردن و کمینه کردن مقادیر ویژه $W_o(T)$ و $W_c(T)$ که T مقدار نامحدودی می‌باشد، انتخاب شده‌اند. هم‌چنین [۶] این ایده را به سیستم‌های غیرخطی به فرم $\begin{cases}\dot{x} = f(x) + Bu \\ \mathrm{y} = \mathrm{Cx}\end{cases}$ تعمیم داده است.

اگر سیستم مورد نظر پایدار، کنترل پذیر و رویت‌پذیر باشد، آنگاه در تحقق بالانس سیستم با روابط (۲-۲) و (۲-۳)، گرامیان‌های کنترل‌پذیری و رویت پذیری ماتریس‌هایی قطری و برابر می‌باشند، [۸]. عناصر روی قطر اصلی گرامیان‌ها، مقادیر منفرد هانکل (HSVs) نامیده می‌شوند که به طور توامان میزان کنترل‌پذیری و رویت پذیری حالت‌ها را نشان می‌دهند. مجموعه‌های ورودی-خروجی با HSVs بالا نسبت به مجموعه‌هایی با HSVs کوچک در [۷] ترجیح داده می‌شوند.

۲-۱-۳- صفرهای سمت راست صفحه

تعداد و مکان صفرهای انتقال سیستم چندمتغیره با تغییر مجموعه‌های ورودی-خروجی تغییر می‌کنند. صفرهای انتقال سیستم (۲-۲) و (۲-۳) به عنوان مقادیری تعبیر می‌شوند که در تابع تبدیل $p(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ که از u به y می‌باشد، نقص رتبه ایجاد می‌کنند. وجود صفر در نیمه صفحه راست باعث ایجاد محدودیت در عملکرد سیستم حلقه بسته می‌شود. به عنوان مثال، در سیستم‌های SISO تابع حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S(s) = \big(I + P(s)K(s)\big)^{-1} \qquad (۶-۲)$$

برای ردیابی سیگنال مرجع و یا حذف اغتشاش، $|S(jw)|$ بایستی در فرکانس‌های پایین کوچک باشد که لزوم برقراری این ویژگی، بزرگ‌بودن پهنای باند می‌باشد اما صفرهای ناپایدار یک حد روی پهنای باند ایجاد می‌کنند. در ضمن، برای سیستم‌های پایدار با یک صفر ناپایدار، هراندازه این صفر به مبدا نزدیک‌تر باشد، آنگاه حد ایجاد شده کوچک‌تر می‌باشد. در سیستم‌های MIMO نیز محدودیت‌های اعمالی توسط صفر ناپایدار شبیه به سیستم‌های SISO می‌باشد. محدودیت‌های ایجاد شده توسط صفرهای ناپایدار به طور مفصل در [۳۱] برای سیستم‌های SISO، فصل‌های پنجم و ششم [۹] به ترتیب برای سیستم‌های SISO و MIMO و فصل ششم [۱۴] برای سیستم‌های MIMO مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اگرچه