دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

رساله دکتری مهندسی برق – کنترل

عنوان:

کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیر خطی غیرافاین با زیرسیستمهای از درجه نسبی کامل

نگارش:

بهرام کریمی

استاد :

دکتر محمدباقر منهاج

بهمن ۷۸

چکیده

در این رساله به روش تحلیلی، طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی برای سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز دارای زیرسیستمهای غیرخطی غیرافاین با درجه نسبی[۱] کامل انجام شده‌است. طراحی کنترل‌کننده به گونه ای است که پایداری زیرسیستمهای حلقه بسته، کل سیستم و همگرایی خطای بین هر زیرسیستم و مدل مرجع آن به سمت صفر، تضمین می‌شود. رویکرد این رساله به شبکه های عصبی، رویکرد جدیدی است که در چند سال اخیر به آن توجه زیادی شده-است. در این روش در حین طراحی کنترل‌کننده، شبکه‌های عصبی به عنوان تقریب زن عمومی تابع[۲] درنظر گرفته می‌شوند و روابط آن در کلیه مراحل تحلیل، طراحی کنترل‌کننده و همچنین اثبات پایداری سیستم حلقه بسته حضور خواهندداشت و در واقع در طی این مراحل است که وزنهای نامعلوم آنها نیز با قضایایی که بیان و اثبات خواهدشد بدست می‌آید. به عبارت دیگر در این رساله آموزش مرسوم شبکه های عصبی که در آن تضمین پایداری وجود ندارد، مورد نظر نیست بلکه روش تحلیلی موردنظر است. شبکه‌های عصبی که در این رساله استفاده می‌شوند و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه می شود شامل شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی و شبکه‌های عصبی با یک لایه میانی مخفی می‌باشد. جهت اثبات پایداری به روش تطبیقی ابتدا تابع لیاپانف مناسبی تعریف می‌شود و به کمک قضایای لیاپانف علاوه بر اثبات پایداری، کلیه وزنهای شبکه‌های عصبی (استفاده شده در قانون کنترل) توسط روابط بازگشتی، به صورت روخط[۳] طراحی می‌شود. در حین انجام پروژه، مسئله مهم و اساسی که به آن توجه شده‌است، تداخلات بین زیرسیستمها می‌باشد. تداخلات وارد شده به هر زیرسیستم غیرخطی، ناشناخته و کراندار فرض می‌شود و کنترل‌کننده تطبیقی بر مبنای ساختار شبکه

۱- Relative Degree

۲- Universal Function Approximator

۳- On-Line

های عصبی به گونه ای طراحی شده‌است که اثر این تداخلات را بر رفتار کلی سیستم حذف نماید. ذکر این نکته ضروری است که علیرغم اینکه تداخلات وارد شده به هر زیرسیستم نشات گرفته از سایر زیرسیستمها می‌باشد، ورودی هر کنترل‌کننده محلی، فقط از همان زیرسیستم اطلاعات لازم را دریافت می‌کند ولی در هر زیرسیستم مشخص است که تداخلات به کدام متغیر حالت وارد می‌شود. همچنین در این رساله فرض می‌شود هر زیرسیستم تک ورودی-تک خروجی و متغیرهای حالت آن قابل اندازه گیری و تعداد آنها معلوم می‌باشد.

در ادامه حالت کلی‌تری از زیرسیستمهای غیرخطی غیرافاین نسبت به صورت مسئله تعریف شده در پیشنهاد رساله، معرفی شده‌است. در این قسمت با قضایایی که ارائه خواهد شد، نشان خواهیم داد که برای این حالت جامعتر نیاز به طراحی کنترل‌کننده جداگانه نمی‌باشد، بلکه به کمک نگاشتهایی که معرفی خواهد شد ابتدا اینگونه از زیرسیستمها به زیرسیستمهای معرفی شده در صورت مسئله تعریف شده در پیشنهاد رساله تبدیل خواهد شد و سپس از کنترل‌کننده های طراحی شده برای آن می‌توان استفاده نمود. مزیت این کار این است که با یافتن یک نگاشت و با استفاده از کنترل‌کننده‌های موجود می‌توان این سیستمهای پیچیده‌تر را کنترل نمود و دیگر نیازی به طراحی کنترل‌کننده جدید نیست.

کلید واژه: سیستمهای ابعاد وسیع (large – scale Systems)، کنترل تطبیقی (adaptive control)، سیستمهای غیر خطی (nonlinear systems)، شبکه‌های عصبی (neural networks)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- هدف رساله ۳

فصل دوم: مرور و بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه کنترل سیستهای غیرخطی و ابعاد وسیع و پیشنهاد جهت بهبود روشها ۵

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- طراحی کنترل تطبیقی برای سیستمهای غیرافاین ۶

۲-۳- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز خطی ۱۰

۲-۴- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی ۱۳

۲-۵- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی به کمک شبکه‌های عصبی ۱۶

۲-۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد جهت بهبود روشها ۲۰

۲-۶-۱- بیان صورت مسئله ۲۰

۲-۶-۲- تحلیل و طراحی کنترل‌کننده تطبیقی ۲۱

فصل سوم: ارائه روشهایی نو جهت طراحی کنترل‌کننده تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- مبانی ریاضی واثبات وجود جواب ۲۸

۳-۳- کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی برای حالت خاصی از تداخلات ۳۲

۳-۳-۱- بیان صورت مسئله ۳۲

۳-۳-۲- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی ۳۴

۳-۳-۳- تحلیل و اثبات پایداری ۳۵

۳-۳-۴- شبیه سازی ۴۱

۳-۴- کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی ۴۶

۳-۴-۱- بیان صورت مسئله ۴۷

۳-۴-۲- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی ۴۷

۳-۴-۳- تحلیل و اثبات پایداری ۴۸

۳-۴-۴- شبیه سازی ۵۴

۳-۵- کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی در حالت کلی‌تری از تداخلات ۵۷

۳-۵-۱- تشریح مسئله ۵۷

۳-۵-۲- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی ۶۱

۳-۵-۳- اثبات پایداری ۶۲

۳-۵-۳- شبیه سازی ۶۷

فصل چهارم: کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی چندلایه پیشخور و یافتن نگاشتی برای تبدیل حالت کلی تری از سیستمهای ابعاد وسیع غیرافاین ۷۰

۴-۱- مقدمه ۷۱

۴-۲- کنترل تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک شبکه‌های عصبی چند لایه پیشخور ۷۱

۴-۲-۱- بیان صورت مسئله ۷۲

۴-۲-۲- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی با یک لایه میانی مخفی ۷۳

۴-۲-۳- تحلیل و اثبات پایداری ۷۷

۴-۲-۴- شبیه سازی ۸۹

۴-۳- بدست آوردن نگاشتی جهت تبدیل حالت کلی تری از سیستمهای غیرخطی ابعاد وسیع غیر افاین به فرم کانونی غیرخطی ابعاد وسیع غیر افاین ۹۲

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۵

۵-۱- نتیجه گیری ۱۰۶

۵-۲- پیشنهادات ۱۰۷

پیوستها ۱۰۸

پیوست ۱- کنترل سیستم‌های ابعاد وسیع و مسائل موجود در کنترل آنها ۱۰۸

پیوست ۲-تعاریف و قضایای تئوری پایداری لیاپانف ۱۱۶

پیوست ۳- سیستمهای غیرخطی ۱۱۸

پیوست ۴- سیستمهای تطبیقی ۱۲۴

پیوست ۵- معرفی شبکه عصبی پایه‌ای شعاعی ۱۲۷

پیوست ۶- معرفی شبکه عصبی چند لایه ۱۲۹

مراجع ۱۳۱

فصل اول

۱- مقدمه

۱-۱- مقدمه

در تکنولوژی پیشرفته و رو به رشد امروز، اغلب سیستم‌ها از ترکیب و ارتباط ماشین‌ها، واکنش‌ها و فرآیندهای متعدد تشکیل شده‌اند. این ارتباط از طریق منابع مشترک، شبکه اطلاعات، انتقال نیرو و انرژی، اتصالات مکانیکی و غیره ایجاد می‌شود. تحلیل، طراحی و اعمال سیستم کنترل به صورت یکپارچه برای چنین سیستم‌هایی که ابعاد وسیع[۱] خوانده می‌شوند، کاری پیچیده و گاهی غیر ممکن به نظر می‌رسد. استفاده از کامپیوترهای با سرعت و حافظه بالا به تنهایی راهگشای حل مشکلات این مسائل نمی‌باشد، بلکه توسعه روش‌هایی جهت تبدیل مسأله به زیرمسأله‌های مرتبط با هم و حل مرحله به مرحله، معقولانه تر به نظر می‌رسد و [۴۴].

تعریف واحدی برای سیستم‌های ابعاد وسیع وجود ندارد. ویژگی پیچیده بودن کلی سیستم و قابلیت تجزیه به زیرمسأله‌های مرتبط، در تعاریف مشترک است. این نام به سیستم‌هایی تعلق می‌گیرد که مسائل علمی کنترل آنها به راحتی بااستفاده از تکنیک‌های تئوری کنترل کلاسیک و یا روش‌های چندمتغیره قابل حل نیستند. دلیل این امر بزرگ بودن سیستم و در نتیجه پیچیده شدن مسائل کنترلی آنها می‌باشد. منظور از بزرگ بودن سیستم، ابعاد فیزیکی آن نیست. به عنوان مثال یک دستگاه بزرگ را شاید به توان با یک سیستم ساده چند ورودی چندخروجی مدل کرد، بنابراین آن دستگاه در زمره سیستم‌های ابعاد وسیع قرار نمی‌گیرد و یا یک تراشه الکترونیکی به ابعاد ۴×۱ سانتیمتر، از آنجایی که از تعداد زیادی عنصر مرتبط به هم تشکیل شده‌است رانمی‌توان یک سیستم کوچک ساده در نظر گرفت. به طور خلاصه و کلی سیستمی را که تعداد متغیرهای حالت، ورودی و خروجی آن به حدی زیاد باشد که نتوان به سادگی آن را با یک کنترل‌کننده واحد، کنترل کرد (به لحاظ مشکلات عملی ومحاسباتی) و نیاز به طراحی چندین کنترل‌کننده در واحدهای مختلف داشته باشد، سیستم ابعاد وسیع می‌نامند [۸].

از آنجا که سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی دسته کثیری از سیستمهای عملی و موجود هستند و کنترل و پایداری آنها از پیچیدگی و اهمیت بسزائی برخوردار است، استفاده از کنترل کننده های تطبیقی در اینگونه از سیستم ها مورد استقبال عده ای از محققین و پژوهشگران قرار گرفته است و زمینه کارهای جدیدی را در این زمینه باز نموده است. در همین راستا تاکنون کارهایی صورت گرفته که هر یک به نوعی با این مسئله برخورد کرده اند. لازم به ذکر است روشهایی که تاکنون جهت کنترل تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی برای سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی ارائه شده است، منحصر به دسته خاصی از سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی افاین می باشد که هر یک از مزایا و

۱- Large-Scale Systems

معایب خاص خود برخوردار است. در فصل بعد به مرور و بررسی برخی از کارهای انجام شده پرداخته می شود تا آشنایی بیشتری با کارهای انجام گرفته، مزایا و معایب آنها و روند رو به تکامل مبحث مورد نظر صورت گیرد.

۱-۲- هدف رساله

در این رساله برای سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی غیرافاین ناشناخته[۱] دارای درجه نسبی[۲] کامل (شرایط مسئله در فصل سوم بیان خواهد شد)، کنترل‌کننده تطبیقی به کمک ساختار شبکه های عصبی طراحی شده‌است. همانگونه که در فصل سوم به تفصیل بیان خواهد شد آموزش شبکه‌های عصبی بیان شده در این رساله با روش معمول آموزش شبکه‌های عصبی که در آن تضمین پایداری وجود ندارد، متفاوت می‌باشد. در روش مورد استفاده در این رساله شبکه‌های عصبی به عنوان تقریب زن عمومی تابع[۳] در کلیه مراحل تحلیل، طراحی کنترل‌کننده و اثبات پایداری سیستم حلقه بسته حضور خواهد داشت و در طی همین مراحل است که وزنهای نامعلوم آن نیز توسط روابط بازگشتی[۴] بطور روخط طراحی می‌شود. در این رساله تداخلات وارد شده به زیرسیستمها نیز غیرخطی، کراندار و ناشناخته در نظرگرفته می‌شود. طراحی کنترل‌کننده‌های محلی به گونه‌ای است که پایداری سیستم حلقه بسته، پایداری کل سیستم و همگرایی خطای بین هر زیرسیستم و مدل مرجع آن به سمت صفر، تضمین شود. در تمامی قسمتهای این رساله، سیستم ابعاد وسیع مستقل از زمان و کلیه زیرسیستمها تک ورودی-تک خروجی درنظرگرفته خواهد شد. فصل بندی این رساله به قرار زیر است:

در فصل دوم مرور و بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی سیستمهای غیرافاین، سیستهای ابعاد وسیع نامتمرکز خطی و غیرخطی افاین صورت می گیرد. آنچه که در مورد کارهای انجام شده در مورد سیستمهای غیرخطی ابعاد وسیع نامتمرکز افاین می‌توان اذعان نمود این است که در همه آنها علامت بهره کنترل‌کننده وکران آن معلوم فرض شده‌است. در انتهای این فصل برای آنکه نشان دهیم بدون معلوم فرض نمودن بهره کنترل‌کننده نیز می‌توان کنترل‌کننده طراحی نمود، برای دسته‌ای از سیستمهای غیرخطی افاین، کنترل کننده تطبیقی طراحی شده است که در آن نیازی به معلوم بودن علامت بهره کنترل‌کننده وکران آن نمی باشد[۳].

در فصل سوم ابتدا بطور مشروح موضوع رساله تعریف و سپس اثبات وجود جواب می-شود. در ادامه طراحی کنترل‌کننده تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی غیرافاین به کمک

۱- Unknown
۲- Relative Degree
۳- Universal Function Approximator
۴- Recursive

شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی[1] برای حالتی از تداخلات بین زیرسیستمها انجام می‌شود [۲] ودر بخش چهارم این فصل، تداخلات بیان شده در بخش دوم به حالت کلی‌تری تبدیل می‌شود و سپس کنترل‌کننده تطبیقی به کمک شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی طراحی می‌شود [۱]. در بخش پنجم این فصل حالتی از تداخلات بین زیرسیستمها درنظرگرفته خواهد شد که در بسیاری از مقالات این حالت، مبنا فرض شده‌است و برای این حالت نیز کنترل‌کننده تطبیقی طراحی خواهد شد.

در فصل چهارم، نخست جهت مقایسه شبکه‌های عصبی چند لایه با شبکه‌های عصبی پایه-ای شعاعی استفاده‌شده در فصل سوم، به کمک شبکه‌های عصبی چند لایه پیشخور نیز کنترل‌کننده تطبیقی طراحی خواهد شد. در بخش دوم این فصل، اگرچه این قسمت جزو پیشنهاد رساله اینجانب نبود ولی حالت کلی‌تری از زیرسیستمهای غیرخطی غیرافاین معرفی شده‌است و با قضایایی که ارائه می‌شود نشان خواهیم داد که برای این حالت کلی‌تر نیاز به طراحی کنترل‌کننده جدید نمی‌باشد، بلکه به کمک نگاشتهایی که معرفی و شرایط وجود آنها اثبات خواهد شد ابتدا اینگونه از سیستمها به سیستمهای کانونی تبدیل خواهد شد و سپس از کنترل‌کننده های طراحی شده و موجود در این رساله استفاده خواهد شد. در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه خواهد شد. جهت جلوگیری از زیاد شدن حجم مطالب، بعضی از مطالب مرتبط با مباحث این رساله با نظر استاد راهنمای محترم، به قسمت پیوست انتقال داده شده‌است. در قسمت پیوستها مرور اجمالی بر مبانی سیستمهای ابعاد وسیع و روشهای کنترل آن، سیستمهای غیرخطی، کنترل تطبیقی و شبکه‌های عصبی انجام می‌شود.

۱- Radial Basis Neural Networks

فصل دوم

۲- مرور و بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه کنترل سیستهای غیرخطی و ابعاد وسیع و پیشنهاد جهت بهبود روشها

۲-۱- مقدمه

از آنجا که سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز دسته وسیعی از سیستمهای عملی، موجود و کاربردی هستند و کنترل و پایداری آنها از پیچیدگی و اهمیت بسزائی برخوردار است، استفاده از کنترل‌کننده های تطبیقی در اینگونه از سیستم ها مورد استقبال عده ای از محققین و پژوهشگران قرار گرفته است و زمینه کارهای جدیدی در این زمینه را باز نموده است. در همین راستا علاوه بر کنترل تطبیقی نامتمرکز سیستمهای ابعاد وسیع خطی تاکنون کارهایی جهت طراحی کنترل‌کننده تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی صورت گرفته که هر یک به نوعی با این مسئله برخورد کرده اند. لازم به ذکر است روشهایی که تاکنون جهت کنترل سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی ارائه شده‌است، فقط منحصر به دسته خاصی از سیستمهای غیرخطی افاین می‌باشد که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. در این فصل به مرور و بررسی برخی از کارهای انجام شده پرداخته می‌شود تا آشنایی بیشتری با کارهای انجام گرفته، مزایا و معایب آنها و روند رو به تکامل مبحث مورد نظر صورت گیرد. برای کسب جزئیات بیشتر در مورد هریک می‌توان به مراجع اشاره شده مراجعه نمود. درانتهای این فصل روشی جهت بهبود طراحی کنترل‌کننده تطبیقی جهت دسته‌ای از سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی افاین ارائه می‌شود.

۲-۲- طراحی کنترل تطبیقی برای سیستمهای غیرافاین

در چند سال اخیر کارهای زیادی در زمینه کنترل تطبیقی سیستمهای غیرافاین معمولی انجام شده است که نشان از اهمیت این دسته از سیستمها دارد. در ذیل به بررسی مهمترین مقالاتی که اخیرا در این زمینه منتشر شده‌است، پرداخته می شود.

در مرجع [۴۵] طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم برای دسته‌ای از سیستمهای تک ورودی – تک خروجی غیرافاین دارای درجه نسبی کامل و دارای نامعینی ، به کمک قضیه مقدار میانی انجام شده است. در این مقاله سیستم به صورت زیر مدل شده‌است:

$$\begin{aligned}
&\dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t), \quad i = 1,...,n \\
&\dot{x}_n(t) = f\left(\mathbf{x}(t), u(t)\right) + d(t) \\
&y(t) = x_1(t),
\end{aligned} \tag{۱-۲}$$

که $\mathbf{x} \in \mathbb{R}$ متغیرهای حالت سیستم، $u, y \in \mathbb{R}$ ورودی و خروجی سیستم، $f\left(\mathbf{x},u\right): \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ تابع ناشناخته مشتق‌پذیر و $d(t)$ اختلال خارجی است که کراندار یکنواخت فرض می‌شود. در این مقاله تابع ناشناخته $f\left(\mathbf{x},u\right)$ توسط یک تابع تقریب‌زن عمومی تقریب زده می‌شود که این تابع تقریب‌زن به صورت $\overline{f}\left(\mathbf{x},u\right) = \mathbf{p}_1^T \varphi_1(\mathbf{x}) + \mathbf{p}_2^T \varphi_2(\mathbf{x},u)$ درنظرگرفته می‌شود. در تابع تقریب‌زن، بردارهای $\mathbf{p}$ ناشناخته و بردارهای توابع پایه φ معلوم فرض می‌شود و هدف طراحی کنترل کننده به گونه‌ای است که سیستم حلقه‌بسته پایدار و خطای بین این سیستم و سیستم مرجع به صورت مجانبی بسمت صفر میل نماید. در قانون کنترل از تخمین بردارهای $\mathbf{p}$ استفاده می‌شود. بردارهای توابع پایه-ای که در این مقاله درنظرگرفته شده‌است شبیه به توابع پایه‌ای است که در شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی درنظرگرفته می‌شود و با استفاده از این توابع تحریک بر روی یک سیستم غیرخطی، کارایی روش نشان داده شده‌است. البته به‌نظر اینجانب از آنجا که تابع درنظرگرفته شده در این مقاله پیچیده-تر از توابعی است که در شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی استفاده می‌شود، شبیه‌سازی باید مشکل‌تر از آن حالت باشد و بهتر می‌بود نتایج با یکی از مقالاتی که از شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی استفاده می‌شد [۴۶] نیز مقایسه می‌شد تا مشخص شود آیا این حجم کار بیشتر، ارزش دارد یا بهتر می‌بود از همان شبکه‌های عصبی پایه‌ای شعاعی استفاده شود.

مرجع [۴۷] برای دسته‌ای از سیستمهای غیرخطی غیرافاین تک ورودی – تک خروجی کنترل‌کننده تطبیقی – عصبی به کمک قضیه مقدار میانی طراحی نموده‌است. ساختار سیستم به صورت نرمال زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\dot{\xi}_i = \xi_{i+1}, \quad i = 1,...,r-1 \\
&\dot{\xi}_i = h\left(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}, u\right) \\
&\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{f}_0\left(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}, u\right) \\
&y = \xi_1,
\end{aligned} \tag{۲-۲}$$

که $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1,...,\xi_r]^T \subset \mathbb{R}^n$، $\boldsymbol{\eta} \subset \mathbb{R}^{n-r}$ متغیرهای حالت سیستم، $u, y \in \mathbb{R}$ ورودی و خروجی سیستم، $h\left(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}, u\right)$ تابع نیمه‌ناشناخته هموار و $\mathbf{f}_0\left(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}, u\right)$ بردار نیمه‌ناشناخته هموار است . لازم بذکر است در این کار نیز مانند سایر کارهای انجام شده برای سیستمهای غیرافاین، علامت بهره

کنترلی یعنی علامت $\partial h(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi},u)/\partial u$ معلوم در نظرگرفته می‌شود ولی محدودیتی بر روی مشتق آن اعمال نمی‌شود که این نکته در نوع خود این کار را از بقیه کارها متمایز می‌نماید. نکته‌ای که باید بیان نمود این است که چون $h(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi},u)$ تابع نیمه‌ناشناخته فرض می‌شود، بنابراین حذف اعمال محدودیت برروی مشتق زمانی $\partial h(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi},u)/\partial u$ ویژگی برجسته‌ای محسوب نمی‌شود. در این مقاله درجه نسبی r ، معلوم فرض می‌شود. همچنین در این مقاله دینامیک صفر (دینامیک داخلی به ازای $\xi = 0$) پایدار نمایی فرض شده است. در ادامه به کمک قضایای مقدار میانی و تابع ضمنی، کنترل-کننده تطبیقی – عصبی به گونه‌ای طراحی می‌شود که سیستم بطور یکنواخت کراندار نهایی باشد و خطای بین سیستم و مدل مرجع به همسایگی صفر همگرا شود. شبکه عصبی استفاده شده در این مقاله از نوع پایه‌ای شعاعی می‌باشد. اگر بدنبال مقایسه این مقاله با مرجع [۴۸] باشیم باید گفت در [۴۸] معلوم بودن علامت مشتق زمانی $\partial h(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\xi},u)/\partial u$ فرض می‌شود ولی متغیرهای حالت، غیرقابل اندازه‌گیری درنظرگرفته می‌شود و برای همین طراحی رویت‌گر انجام می‌شود. بجز این تفاوت و استفاده از شبکه عصبی پیشخور سه لایه، تفاوت خاصی بین این دو مقاله مشاهده نمی‌شود و از بسیاری جهات از جمله استفاده از قضایای مقدارمیانی و تابع ضمنی شبیه به یکدیگر می‌باشند.

در مرجع [۴۹] برای دسته بسیار خاصی از سیستمهای افاین و غیرافاین کنترل‌کننده تطبیقی به کمک مدلغزشی طراحی نموده‌است که جزئیات روش در ادامه بیان می‌شود. سیستم درنظرگرفته شده، به صورت زیر می‌باشد

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u}) + \mathbf{v}, \qquad (۳-۲)$$

که $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$، بردار متغیرهای حالت، $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m\ (m \le n)$، بردار ورودیهای سیستم و $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$، بردار ثابت ناشناخته‌ای است که مدل نامعینیهای سیستم را بیان می‌نماید. به عبارت دیگر در این مقاله بردار $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ معلوم درنظرگرفته می‌شود که این حالت، حالت خاصی از کنترل تطبیقی سیستمهای غیرخطی می‌باشد. در این مقاله چهار حالت درنظرگرفته شده است و برای هرکدام کنترل‌کننده تطبیقی طراحی شده است.

۱- سیستم $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ معلوم، افاین و $m=n$ (مربعی).

۲- سیستم $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ معلوم، افاین و $m \le n$ (غیرمربعی).

۳- سیستم $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ معلوم، غیرافاین و $m=n$ (مربعی).

۴- سیستم $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ معلوم، غیرافاین و $m \le n$ (غیرمربعی).

مرجع [۵۰] طراحی کنترل کننده تطبیقی فازی برای سیستمهای غیرافاین به شکل زیر را مورد بررسی قرار داده‌است.

$$y^{(n)} = F(y,\dot{y},\ldots y^{(n-1)},u) + d(t), \qquad (۴-۲)$$

تابع F نامعلوم، $d(t)$ اغتشاش خارجی است و در رابطه ذیل صدق می کند.

$$|d(t)| \le d \qquad (۵-۲)$$

حال فرض می شود که سیستم فوق را می توان به صورت زیر تبدل کرد.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= F(x,u) + d(t), \end{aligned} \qquad (۶-۲)$$

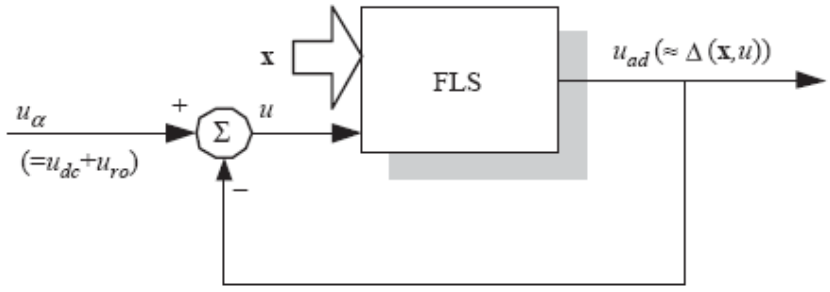
که در ناحیه کنترل پذیری تعریف شده $\frac{\partial F(x,u)}{\partial u} > 0$ جهت طراحی خطی سازی فیدبک خروجی به صورت زیر عمل می کنیم.

$$\begin{aligned} y^{(n)} &= F(x,u) + d(t) \\ &= cu + \underbrace{\{F(x,u) - cu\}}_{\Delta(x,u)} + d(t). \end{aligned} \qquad (۷-۲)$$

طراحی کنترل کننده به کمک قضیه مقدار میانی به شکل زیر می باشد.

$$u = \frac{1}{c}(u_{dc} - \hat{u}_{ad} + u_{ro}). \qquad (۸-۲)$$

u_{dc}کنترلی است که قسمت خطی سیستم را پایدار می کند. $\hat{u}_{ad}$ به گونه‌ای طراحی می شود که به‌صورت تطبیقی، قسمت $\Delta(x,u)$ را حذف کند. که طراحی بر کنترل مربوط به $\hat{u}_{ad}$ به صورت زیر می باشد.



شکل۲-۱: متد طراحی $\hat{u}_{ad}$

برای مقاوم سازی سیستم حلقه بسته در مقابل نامعینیها از u_{ro} استفاده می شود. برای طراحی کنترل‌کننده $\hat{u}_{ad}$ و u_{ro} بدین صورت عمل می‌شود: ابتدا خطای ردیابی سیستم را بدست آورده و فرض می‌شود که به توان قسمت $\Delta(x,u)$ که نامعلوم است را با یک سیستم فازی تقریب زد. حال با توجه به پارامترهای مجهول سیستم فازی (توابع عضویت قسمت *then*) وخطای ردیابی سیستم اصلی می

توان تابع لیاپانفی تعریف نمود و با توجه قضایای پایداری می توان کنترل کننده u_{ro} و u_{dc}را به گونه ای طراحی نمود که سیستم حلقه بسته پایدار ومقاوم در مقابل نامعینیها باشد. درضمن روابط دینامیکی برای محاسبه پارامترهای مجهول سیستم فازی نیز بدست می‌آید.

مرجع [۵۱] طراحی کنترل کننده تطبیقی فازی برای سیستمی به شکل زیر را مورد بحث قرار داده است.

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_i + 1 & i = 1,...,n-1 \\ \dot{x}_n = f(x,u), & y = x_1 \end{cases} \quad (۹-۲)$$

فرض می شود که تابع $f(x,u)$ نامعلوم است و $f_u = \frac{\partial f}{\partial u} \geq c > 0$ جهت طراحی کنترل کننده ابتدا خطای ردیابی خروجی سیستم به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$e = y_d - y, \quad (۱۰-۲)$$

که y_d مقدار مطلوب سیستم می باشد. حال با توجه به اینکه تابع نامعلوم $f(x,u)$را می توان براساس یک سیستم فازی تقریب زد، بر اساس خطای ردیابی خروجی سیستم، می توان تابع هزینه ای تعریف نمود که با حداقل‌سازی تابع هزینه و با متد گرادیان نزولی، پارامترهای سیستم فازی و کنترل کننده تعیین می‌شود. با تعریف یک تابع لیاپانف، برمبنای خطای ردیابی و پارامترهای مجهول سیستم فازی و به کمک قضیه مقدار میانی می توان کنترل‌کننده اضافه‌ای برای سیستم طراحی نمود که سیستم حلقه بسته پایدار و خطای ردیابی به سمت صفر همگرا شود. در این مقاله طراحی بر اساس کنترل بهینه‌ای است که با روشهای عددی مسئله بهینه سازی حل شده و تنها پارامترهای مجهول بر اساس یک تابع لیاپانف بدست می آید.

۲-۳- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز خطی

طراحی کنترل‌کننده برای سیستمهای ابعاد وسیع با سیستمهای ابعاد وسیع خطی شروع شده‌است که در این قسمت مرور و تحلیلی بر چند کار مهم در این زمینه صورت می گیرد.

Ioannou از اولین کسانی است که اقدام به طراحی کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز برای سیستمهای ابعاد وسیع خطی نموده است [۵۲]. در این مقاله سیستم ابعاد وسیع به صورت (۲-۱) مدل شده‌است:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = A_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i u_i + D_i + \sum_{j=1}^{N} \mathbf{f}_{ij}(t, x_i)$$
$$y_i = h_i^T \mathbf{x}_i \qquad , i = 1,...,N \quad (۱۱-۲)$$

که در(۲-۱۱) $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^{n_i}$، بردار حالت، $u_i \in \mathbb{R}^1, y_i \in \mathbb{R}^1$ ورودی و خروجی، $D_i \in \mathbb{R}^{n_i}$ بردار اختلال محدود هر زیرسیستم و $\mathbf{f}_{ij}(t, x_i) \in \mathbb{R}^{n_i}$، تداخلات بین زیرسیستمها می‌باشد که باند این تداخلات توسط چند جمله ای مرتبه اول به صورت (۲-۱۲) مشخص می‌شود.

$$\left\| \mathbf{f}_{ij}(t, x_i) \right\| \le a_{ij} \left\| \mathbf{x}_j \right\|. \qquad (۲-۱۲)$$

همچنین در (۲-۱۲)، A_i ماتریس و $\mathbf{b}_i$ بردار ثابت ناشناخته می‌باشند. در این مقاله ابتدا برای زیرسیستمها، بدون درنظر گرفتن اثر تداخلات بین زیرسیستمها کنترل‌کننده مقاوم نامتمرکز طراحی می‌شود و سپس با فرض محدود بودن اثر تداخلات با استفاده از تعریف *M-matrix*، پایداری کلی سیستم همراه با درنظرگرفتن اثر تداخلات بررسی می‌شود. در این روش از آنجا که طراحی کنترل‌کننده بدون در نظر گرفتن اثر تداخلات انجام می‌شود دارای محدودیتهای زیر است:

الف) در این مقاله فقط تداخلات ضعیف بین زیرسیستمها بررسی شده‌است.

ب) اگرچه باندهای تداخلات بین زیرسیستمها توسط چندجمله ایهای مرتبه اول محدود می‌باشند (که در حالت‌کلی مسئله بسیار ساده می‌شود)، ولی پیشگوئی و یا تخمین باند تداخلات غیرخطی با این روش مشکل و یا غیر ممکن می‌باشد و پایداری تضمین نمی‌شود.

ج)حتی اگر باند تداخلات بین زیرسیستمها مشخص فرض شود، انتخاب مدل مرجع برای آنکه سیستم کلی شرایط *M-matrix* (مثبت معین بودن آن) را برآورده کند مشکل می‌باشد زیرا این ماتریس دارای مقادیر ناشناخته می‌باشد.

مرجع [۵۴] نیزکنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز برای دسته ای از سیستمهای ابعاد وسیع خطی طراحی نموده است. در این مقاله مدل زیر سیستم S_i به صورت (۲-۱۳) در نظر گرفته شده‌است:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= A_i \mathbf{x}_i + \mathbf{b}_i u_i + P_i \mathbf{v}_i \\ y_i &= c_i^T \mathbf{x}_i \qquad ,i = 1,...,N \end{aligned} \qquad (۲-۱۳)$$

که در (۲-۱۳) $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^{n_i}$، بردار حالت، $u_i \in \mathbb{R}^1, y_i \in \mathbb{R}^1$ ورودی و خروجی زیرسیستم می‌باشد. بردار $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ و به صورت $\mathbf{v}_i = \mathbf{f}_i(t, \boldsymbol{\omega})$ که $\boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega}_1^T, ..., \boldsymbol{\omega}_N^T)^T, \boldsymbol{\omega}_i \in \mathbb{R}^{l_i}, \boldsymbol{\omega}_i = Q_i \mathbf{x}_i$ در نظرگرفته می‌شود و فرض می‌شود کران تداخلات بین زیرسیستمها توسط چند جمله ایهای خطی به شکل نامساوی (۲-۱۴) محدود میباشد:

$$\left\| \mathbf{v}_i \right\| = \left\| \mathbf{f}_i(t, \boldsymbol{\omega}) \right\| \le \sum_{j=1}^{N} \zeta_{ij} \left\| \boldsymbol{\omega}_j \right\|. \qquad (۲-۱۴)$$

همچنین در این مقاله فرض می‌شود ماتریس $P_i \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$ و به صورت $P_i = \mathbf{b}_i \mathbf{p}_i^T$ درنظرگرفته می‌شود. در واقع با این فرضها کران تداخلات بین زیرسیستمها در حد کران وزنهای کنترل‌کننده هر زیرسیستم و حتی کمتر از آنها فرض می‌شود تا کنترل‌کننده طراحی شده برای هر زیرسیستم، توانایی فائق شدن بر تداخلات را داشته باشد و سیستم کلی پایدار بماند. در این مقاله با فرض معلوم بودن

توابع زیرسیستمها و ناشناخته بودن تداخلات بین آنها، از روش فیدبک حالت، کنترل‌کننده های نامتمرکز طراحی می‌شود. در ادامه در این مقاله کنترل‌کننده تطبیقی برای زیرسیستمهای خطی چندورودی- چندخروجی طراحی می‌شود. همچنین در این مقاله به جز روش فیدبک حالت، به روش فیدبک خروجی طراحی کنترل‌کننده نامتمرکز انجام شده‌است. اگرچه این مقاله با پیشنهاد یک روش تناوبی تطبیقی با بهره بالا یکی از اشکالات مقاله [۵۲] (شرط *M-matrix*) را برطرف نموده است ولی با فرضهایی که در نظرگرفته شده‌است و بدانها اشاره شد، حالت خاصی از سیستمهای خطی ابعاد وسیع را تحلیل نموده است.

مرجع [۵۵] بهبود عملکرد طراحی کنترل‌کننده، در سیستمهای ابعاد وسیع را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله مدل خطی زیرسیستم S_i به صورت (۲-۱۵) بیان شده‌است:

$$y_i = G_i(s)[u_i] + \mu\sum_{j=1}^{N}\Delta_{ij}(s)y_j \quad ,\mu > 0 \quad ,i = 1,...,N \qquad (۲\text{-}۱۵)$$

که $u_i, y_i \in R^1$ ورودی و خروجی زیرسیستم iام، $G_i(s)$ تابع انتقال و $\Delta_{ij}(s)$ تداخلات وارد شده به زیرسیستم i ام می‌باشد. همانگونه که از صورت رابطه فوق مشخص است در این مقاله تداخلات بین زیرسیستمها خطی است و فرض می شود $\Delta_{ij}(s)$ مناسب قطعی و تحلیلی ($\mathrm{Re}[s] \geq -\delta_i^*/2,\ \delta_i^* > 0$) است. δ_i^* معلوم و ضرائب تابع انتقال $G_i(s)$ ناشناخته فرض می‌شود. در این مرجع به این نکته اشاره شده است که دلیل عمده استفاده از کنترل تطبیقی نامتمرکز در سیستمهای ابعاد وسیع، ناشناخته بودن پارامترهای متعلق به زیرسیستمها می‌باشد و این ناشناخته بودن پارامترها باعث می‌شود مقادیر اولیه ای که توسط بعضی از کنترل‌کننده های تطبیقی برای این پارامترها تخمین زده می‌شود از مقادیر واقعی دور بوده و به همین دلیل پاسخ گذرای سیستم در حالت‌کلی مطلوب نباشد. این مسئله ممکن است برای بعضی از سیستمهای واقعی و صنعتی مشکل ساز باشد زیرا در اینگونه سیستمها علاوه بر مباحث پایداری، پاسخ گذرای سیستم نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین هدف این مقاله این است که علیرغم وجود نامعینی پارامتری در زیرسیستمها، کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز به گونه ای طراحی شود که علاوه بر تضمین پایداری سیستم کلی، پاسخ گذرا نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. کنترل‌کننده ارائه شده در این مقاله پایداری سیستم حلقه بسته و عملکرد مطلوب پاسخ گذرا را با وجود دو فرض زیر تضمین می کند که وجود این فرضیات از کلیت مساله می کاهد و باعث می‌شود روش ارائه شده را برای دسته خاصی به توان استفاده نمود:

الف) بهره فرکانس بالا در زیرسیستمهای مجزا معلوم باشد.

ب) تداخلات مدل نشده بین زیرسیستمها از نظر اندازه کوچک باشد.

آنچه که در انتهای این قسمت می‌توان به عنوان نتیجه گیری بیان نمود این است که روشهای ارائه شده در فوق، فقط برای سیستمهای ابعاد وسیع خطی کاربرد دارند و حتی این سیستمها باید شرائط خاصی داشته باشند که با این وجود روشهای بیان شده فقط دسته خاصی از سیستمهای خطی را در بر می گیرد حال آنکه عملاً سیستمهای ابعاد وسیع واقعی دارای زیرسیستمهای غیرخطی می‌باشند بنابراین در بخش بعد کارهای ارائه شده در این زمینه بررسی می‌شود.

۲-۴- طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی

طبیعت اکثر سیستمهای واقعی غیر خطی می‌باشند که بسته به شرایط موجود، این فرآیندها مستقل از زمان، وابسته به زمان، دارای پارامترهای معلوم و یا پارامترهای همراه با نامعینی هستند. از آنجا که سیستمهای ابعاد وسیع نیز از این امر مستثنا نمی‌باشند، از اوائل دهه ۹۰ تحقیق و پژوهش در این زمینه شکل جدی تری بخود گرفت. در این بخش سعی شده‌است مهمترین کارهای انجام شده در زمینه طراحی کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز برای سیستمهای ابعاد وسیع غیرخطی، بررسی و نکات قوت و ضعف آنها بیان شود.

مرجع [۵۶] را می‌توان به عنوان یکی از مقاله های اولیه ارائه شده برای حالتی که زیرسیستمها غیرخطی می‌باشند، معرفی نمود. در این مقاله طراحی کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز جهت کنترل حرکت طولی N تعداد اتومبیل در یک بزرگراه ارائه می شود. در این تحقیق دینامیک هر اتومبیل دارای سه متغیر حالت زیر می‌باشد:

سرعت اتومبیل

نیروی اعمال شده توسط موتور اتومبیل

فاصله هر اتومبیل تا اتومبیل جلویی

از آنجا که این متغیرها به صورت غیرخطی خاص (حالت ساده شده‌ای از صورت $\dot{x} = f(x) + g(x)u$) با یکدیگر در ارتباط هستند، دینامیک هر اتومبیل به صورت غیرخطی و معلوم در نظر گرفته شده‌است. همچنین در این مقاله بدلیل اینکه تعداد اتومبیلها در بزرگراه N تعداد فرض شده‌است (که این N تعداد بر یکدیگر تداخلات وارد می کنند)، کل سیستم را یک سیستم ابعاد وسیع معرفی نموده است و روشی بر مبنای کنترل تطبیقی نامتمرکز، جهت کنترل این سیستم ارائه نموده است. در این مقاله کنترل‌کننده نامتمرکز برای حالتهای زیر طراحی شده‌است:

تداخلات بین زیرسیستمها خطی و شناخته شده‌باشد.

تداخلات بین زیرسیستمها خطی و ناشناخته شده باشد.

تداخلات بین زیرسیستمها غیرخطی و شناخته شده باشد.

در این مقاله مدل دینامیکی کل سیستم به صورت (۲-۱۶) بیان شده باشد: