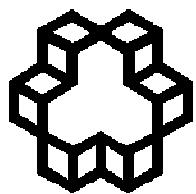


بسمه تعالی



دانشگاه آزاد اسلامی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه

برای دریافت درجه دکترا

در رشته مهندسی برق گرایش کنترل

عنوان:

طراحی کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو مدل مرجع جهت  
سیستمهای غیرخطی تک ورودی تک خروجی مبتنی بر تابع لیاپانوف

استاد راهنما:

دکتر محمد تشنه‌لب

نگارش:

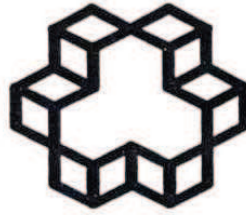
مجتبی احمدیه خانه‌سر

اسفند ۹۰

صلى الله عليه وسلم

تقدیم به

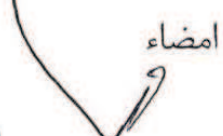
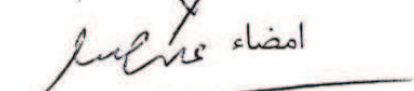
پدر و مادر مهربانم  
و همسر عزیز و دلسوزم



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

### تائیدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: طراحی کنترل کننده فازی بازه‌ای تاکاگی-سوگنو مدل مرجع جهت سیستم‌های غیرخطی تک-ورودی تک-خروجی مبتنی بر تابع لیاپانوف توسط آقای مجتبی احمدیه خانه‌سر صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته برق گرایش کنترل با رتبه عالی مورد تائید قرار می دهند.

- |  |   |                        |
|--|---|------------------------|
| <br>امضاء   | آقای دکتر محمد تشنلب (دانشیار)                | 1. استاد راهنما        |
| <br>امضاء  | آقای دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی<br>(استاد) | 2. استاد ارزیاب        |
| <br>امضاء | آقای دکتر علی خاکی صدیق (استاد)               | 3. استاد ارزیاب        |
| <br>امضاء | آقای دکتر وحید جوهری مجد (دانشیار)            | 4. استاد ارزیاب        |
| <br>امضاء  | آقای دکتر علیرضا فاتحی (دانشیار)              | 5. استاد ارزیاب        |
| <br>امضاء  | آقای دکتر محمد اردبیلی (دانشیار)              | 6. ناظر تحصیلات تکمیلی |

## اظهارنامه دانشجو

اینجانب مجتبی احمدیه خانه‌سر دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان نامه با عنوان طراحی کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو مدل مرجع جهت سیستم‌های غیرخطی تک ورودی تک خروجی مبتنی بر تابع لیاپانوف با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر محمد تشنه‌لب، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

### حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

## تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد ارجمندم دکتر محمد تشنه‌لب که مرا در پیمودن این راه راهنمایی کردند، تشکر نمایم. همچنین از حمایت‌های همه جانبه استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر اکیای کاینک تشکر می‌نمایم. بی‌گمان کمک‌های ایشان راهگشای من در انجام این پایان‌نامه بود. همچنین از دکتر اردال کایاجان که در قسمتی از انجام کار پایان‌نامه مرا همراهی کردند، تشکر می‌نمایم. به علاوه از داوران رساله که قبول زحمت نمودند، تشکر می‌نمایم. اصرار اساتید داور مخصوصاً جناب آقای دکتر مجد باعث شد که من آنالیزی کلی‌تر برای کاهش نویز ارائه نمایم. همچنین راهنمایی‌های آقای دکتر فاتحی و حضور فعال ایشان در سمینارهای پیشرفت پروژه اینجانب، باعث انسجام و غنای بیشتر پایان‌نامه و همگرایی کنترل‌کننده‌های ارائه شده در یک کنترل‌کننده گردید. همچنین از راهنمایی‌ها و نکات بسیار مهمی که اساتید دیگر داور جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق و جناب آقای دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی ابراز نمودند، تشکر می‌نمایم.

در ادامه از دوستان خود در آزمایشگاه میکاترونیک دانشگاه بغازیچی و آزمایشگاه سیستم‌های هوشمند دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر که محیطی علمی و دوستانه برای انجام این پایان‌نامه برای اینجانب مهیا نمودند، تشکر می‌نمایم.

از تلاش‌ها و همکاری پدر و مادرم که همواره دعای خیرشان بدرقه راهم بود، تشکر می‌نمایم. همچنین از تلاش‌های همسر گرامیم، خانم مهندس فاطمه محمدی که همواره در تمام فرازها و فرودها در کنار من بود، تشکر می‌نمایم. بی‌گمان تحمل سختی‌های این راه و فائق آمدن بر مشکلات بدون همراهی ایشان ممکن نبوده است.

## چکیده

در این رساله در ابتدا تحلیلی بر خاصیت کاهش نویز سیستمهای فازی نوع دوم ارائه می‌گردد. در تلاش برای نشان دادن خاصیت کاهش نویز سیستمهای فازی نوع دوم یک سیستم فازی نوع دوم با یک تابع عضویت جدید در نظر گرفته می‌شود. خاصیت جالب تابع عضویت ارائه شده نسبت به سایر توابع عضویت موجود این است که در تابع عضویت معرفی شده پارامترهای مربوط به تعیین عرض عدم قطعیت، از پارامترهای مربوط به مرکز و گسترش تابع عضویت جدا می‌باشند. بنابراین با استفاده از آن می‌توان به صورت عددی با تغییر در عرض عدم قطعیت تابع بدون دست زدن به مرکز دسته و گسترش آن یکسری تحلیلهای عددی انجام داد. دیگر خصوصیت این تابع تعلق این است که می‌توان پارامترهای آن را به گونه‌ای برگزید که اثر تغییرات نامطلوب سیگنال تصادفی در ورودی به صورت نویز در قوانین سیستم فازی را کاهش دهد. در ادامه این تابع عضویت با توابع عضویت فازی نوع دوم دیگر مقایسه و با روشهای آموزشی مختلف سیستمهای فازی برای کاربردهای شناسایی، پیش‌بینی و کنترل آزمایش می‌گردد. همچنین سیستم فازی بر اساس این تابع عضویت جدید روی سیستم ترمز ضد قفل پیاده‌سازی می‌شود.

از سیستم فازی نوع دوم ساخته شده بر اساس تابع عضویت پیشنهادی برای طراحی کنترل‌کننده فازی مدل مرجع استفاده می‌شود. در ابتدا به کنترل‌کننده فازی نوع اول تطبیقی مدل مرجع غیرمستقیم قابلیت حذف اغتشاش اضافه می‌شود. سپس کنترل‌کننده فازی نوع اول تطبیقی مدل مرجع مستقیم براساس جبران‌سازی تک‌تک قوانین سیستم فازی تاکاگی-سوگنو طراحی و به آن قابلیت حذف اغتشاش اضافه می‌شود. از این مقدمات برای طراحی کنترل‌کننده فازی نوع دوم مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. کنترل‌کننده فازی مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم پیشنهادی روی سیستمهای متفاوتی آزمایش می‌گردد. همچنین کنترل‌کننده فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم روی سیستم موتور DC با بار غیرخطی پیاده‌سازی می‌گردد.

در نهایت برای سیستمهای کنترل فازی مدل مرجع براساس جبران‌سازی هر یک از قوانین سیستم فازی تاکاگی-سوگنو رویتگر طراحی می‌شود. رویتگر طراحی شده در حالت غیرمستقیم قابلیت حذف اغتشاش و ردیابی را دارا می‌باشد. همچنین رویتگر طراحی شده در حالت مستقیم نیازی به شناساگر نداشته، پارامترهای سیستم به صورت مستقیم بدست می‌آیند. در ادامه رویتگر غیرمستقیم با قانون آموزش براساس کمترین مربعات خطای بازگشتی نیز ارائه می‌گردد. رویتگر بهینه طراحی شده برای مواجهه با نویز به سیستم فازی نوع دوم مجهز می‌شود. نشان داده می‌شود که سیستم طراحی شده براساس سیستم فازی نوع دوم رفتار مناسب‌تری در حضور نویز از خود به نمایش می‌گذارد.



## فهرست

۱	مقدمه	۱
۵	نوآوری‌های این رساله	۱,۱
۷	مروری بر ادبیات موضوع	۲
۸	کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم بر اساس جبران تک-تک قوانین	۲,۱
۱۴	ساختار کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم برای سیستم غیرخطی مرتبه اول	۲,۲
۱۶	مروری بر ادبیات رویتهای فازی تاکاگی سوگنو موجود	۲,۳
۱۸	جمع بندی و نتیجه‌گیری	۲,۴
۲۳	منطق فازی و سیستمهای فازی نوع اول و نوع دوم	۳
۲۳	توابع عضویت نوع اول	۳,۱
۲۳	توابع عضویت نوع دوم	۳,۲
۲۵	بلوک دیاگرام سیستمهای فازی نوع اول و نوع دوم	۳,۳
۲۵	بلوک فازی‌ساز	۳,۳,۱
۲۵	بلوک پایگاه قواعد	۳,۳,۲
۲۵	بلوک موتور استنتاج	۳,۳,۳
۲۶	بلوک کاهنده نوع	۳,۳,۴
۲۶	بلوک غیرفازی ساز	۳,۳,۵
۲۷	سیستمهای فازی تاکاگی-سوگنو	۴
۲۷	ساختار سیستم فازی تاکاگی-سوگنو نوع اول (A1-C0)	۴,۱,۱
۲۸	ساختار سیستم فازی تاکاگی-سوگنو نوع دوم (A2-C0)	۴,۱,۲
۳۰	ساختار سیستم فازی تاکاگی-سوگنو نوع دوم (A2-C1)	۴,۱,۳

تحلیلی بر خاصیت کاهش نویز در سیستمهای فازی نوع دوم با استفاده از یک تابع تعلق نوع دوم	۵
جدید	۳۱
توابع تعلق نوع دوم موجود	۵,۱
معرفی تابع تعلق بیضی شکل جدید	۵,۲
تحلیلی بر خاصیت کاهش نویز در سیستمهای فازی نوع دوم با استفاده از یک تابع نوع دوم جدید	۵,۳
تحلیل آماری اعوجاج ایجاد شده توسط نویز در قوانین سیستم فازی	۵,۴
الگوریتمهای مختلف آموزشی	۵,۵
الگوریتم گرادیان نزولی	۵,۵,۱
الگوریتم مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته	۵,۵,۲
الگوریتم آموزشی برای سیستم فازی نوع دوم براساس ترکیب گرادیان نزولی و فیلتر کالمن	۵,۵,۳
الگوریتم آموزشی برای سیستم فازی نوع دوم براساس ترکیب بهینه‌سازی جمعیتی ذرات و فیلتر کالمن	۵,۵,۴
شبه‌سازی	۵,۶
مقایسه خاصیت کاهش اثر نویز برای تابع عضویت فازی نوع دوم پیشنهادی با توابع فازی نوع اول و سایر توابع فازی نوع دوم موجود	۵,۶,۱
مقایسه عملکرد روشهای مختلف آموزشی روی سیستم فازی با تابع عضویت فازی نوع دوم پیشنهادی	۵,۶,۲
	۶۲
جمع بندی و نتیجه‌گیری	۵,۷
طراحی کنترل‌کننده فازی مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم برای مواجهه با اغتشاش	۶
مقدمه	۶,۱
سیستم مدل مرجع غیرمستقیم برای سیستمهای فازی تاکاگی سوگنو نوع اول	۶,۲
افزودن مقاومت در مقابل اغتشاش محدود به سیستم کنترل فازی نوع اول مدل مرجع غیرمستقیم	۶,۲,۱
بررسی اثر خطای مدل سازی روی کنترل‌کننده فازی نوع اول مدل مرجع غیرمستقیم	۶,۲,۲

۶,۳	کنترل فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم برای سیستمهای تاکاگی سوگنو	۸۸
۶,۳,۱	مدل سازی با استفاده از سیستمهای فازی نوع اول تاکاگی-سوگنو و ساختار کنترل کننده مدل مرجع فازی مستقیم	۸۹
۶,۳,۲	طراحی کنترل کننده فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم و تحلیل پایداری آن	۹۰
۶,۳,۳	اصلاح کنترل کننده فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم برای مواجهه با اغتشاش خارجی	۹۳
۶,۳,۴	بررسی اثر خطای مدل سازی روی کنترل کننده فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم	۹۶
۶,۴	طراحی کنترل کننده فازی نوع دوم مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم	۹۸
۶,۵	سیستم مدل مرجع غیرمستقیم برای سیستمهای فازی تاکاگی سوگنو نوع دوم	۹۹
۶,۶	کنترل فازی مدل مرجع مستقیم برای سیستمهای تاکاگی سوگنو نوع دوم	۱۰۱
۶,۷	شبیه سازی کنترل کننده های فازی نوع اول و نوع دوم مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم	۱۰۳
۶,۷,۱	شبیه سازی کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم روی سیستم آشوب نوسانگر دافینگ	۱۰۳
۶,۷,۲	شبیه سازی کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم روی سیستم آشوب جنسیو-تسی	۱۰۷
۶,۷,۳	شبیه سازی کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم روی مفصل انعطاف پذیر	۱۱۱
۶,۷,۴	مقایسه عملکرد سیستمهای کنترل فازی مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم روی سیستم بازوی انعطاف پذیر	۱۱۶
۶,۷,۵	شبیه سازی کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم روی سیستم مدار چوآ	۱۱۷
۶,۷,۶	پیاده سازی کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم روی موتور DC با بار غیرخطی متغیر	۱۲۱
۶,۷,۷	کنترل سیستم نوسانگر دافینگ با استفاده از سیستم فازی نوع دوم مدل مرجع غیرمستقیم	۱۲۵
۶,۷,۸	کنترل سیستم مفصل انعطاف پذیر با استفاده از سیستم فازی نوع دوم مدل مرجع مستقیم	۱۲۶
۶,۷,۹	آنالیز رفتار تابع تعلق نوع دوم پیشنهادی در حلقه کنترلی فازی نوع دوم مدل مرجع مستقیم	۱۲۸
۶,۸	جمع بندی و نتیجه گیری فصل	۱۳۰
۷	طراحی رویترگر برای کنترل کننده های فازی مدل مرجع طراحی شده	۱۳۱
۷,۱	مقدمه	۱۳۱

۷,۲	کنترل کننده فازى مدل مرجع غيرمستقيم براساس رويتگر.....	۱۳۱
۷,۲,۱	مدل فازى تاكاگى-سوگنو براى سيستم غيرخطى.....	۱۳۱
۷,۲,۲	طراحى رويتگر و تحليل پايدارى آن.....	۱۳۲
۷,۲,۳	ساختار رويتگر پيشنهادهى.....	۱۳۲
۷,۲,۴	طراحى کنترل کننده فازى مدل مرجع غيرمستقيم براساس رويتگر پيشنهادهى و تحليل پايدارى آن.....	۱۳۶
۷,۳	طراحى رويتگر براى سيستم کنترل کننده فازى مدل مرجع مستقيم.....	۱۴۰
۷,۳,۱	ساختار سيستم غيرخطى و سيستم فازى تاكاگى-سوگنو.....	۱۴۱
۷,۳,۲	ساختار سيستم مدل مرجع:.....	۱۴۱
۷,۳,۳	طراحى رويتگر و تحليل پايدارى آن.....	۱۴۱
۷,۳,۴	تحليل پايدارى رويتگر پيشنهادهى.....	۱۴۲
۷,۳,۵	طراحى کنترل کننده فازى مدل مرجع براساس رويتگر و تحليل پايدارى آن.....	۱۴۵
۷,۳,۶	سيگنال كنترلى فازى پيشنهادهى.....	۱۴۵
۷,۳,۷	تحليل پايدارى کنترل کننده پيشنهادهى.....	۱۴۶
۷,۴	کنترل مدل مرجعى فازى براى سيستم ديناميكى غيرخطى با استفاده از يك رويتگر بهينه.....	۱۴۹
۷,۴,۱	ساختار رويتگر بهينه و تحليل پايدارى آن.....	۱۵۰
۷,۴,۲	قانون تطابق بهينه براى رويتگر:.....	۱۵۱
۷,۴,۳	تحليل پايدارى رويتگر پيشنهادهى.....	۱۵۳
۷,۴,۴	طراحى کنترل کننده فازى غيرمستقيم براساس رويتگر پيشنهادهى و تحليل پايدارى آن.....	۱۵۴
۷,۵	کنترل مدل مرجعى فازى نوع دوم براى سيستم ديناميكى غيرخطى با استفاده از يك رويتگر بهينه.....	۱۵۷
۷,۶	نتايج شبیه سازی.....	۱۵۹
۷,۶,۱	نتايج شبیه سازی کنترل کننده فازى مدل مرجع غيرمستقيم.....	۱۵۹
۷,۶,۲	نتايج شبیه سازی کنترل کننده فازى مدل مرجع مستقيم براساس رويتگر.....	۱۶۴

۱۶۷	نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی نوع اول مدل مرجع غیرمستقیم براساس رویتگر بهینه	۷,۶,۳
۱۷۱	مقایسه ویژگی تنظیم سه رویتگر فوق	۷,۶,۴
۱۷۲	نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی نوع دوم مدل مرجع غیرمستقیم براساس رویتگر بهینه	۷,۶,۵
۱۷۳	نتیجه‌گیری و جمع بندی	۷,۷
۱۷۴	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۸
۱۷۸	پیشنهادات	۸,۱
۱۷۹	پیوست	۱۷۹
۱۷۹	الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی جمعیتی ذرات و فیلتر کالمن	۱۷۹
۱۸۳	مراجع	۱۸۳

## فهرست شکلها

- شکل ۲-۱. ساختار کنترل کننده مدل مرجع فازی نوع اول غیرمستقیم ..... ۱۳
- شکل ۳-۱ مثالی از توابع عضویت فازی نوع دوم [۱۲] ..... ۲۴
- شکل ۳-۲ ساختار سیستم فازی نوع دوم [۴۹] ..... ۲۵
- شکل ۵-۱ الف) تابع عضویت نوع دوم با مقدار میانگین نامعین. ب) تابع عضویت نوع دوم با مقدار واریانس نامعین ..... ۳۱
- شکل ۵-۲ الف) تابع عضویت مثلثی با مقدار میانگین نامعین ب) تابع عضویت مثلثی با مقدار عرض نامعین ..... ۳۲
- شکل ۵-۳ تابع عضویت فازی نوع دوم بیضی شکل با پارامترهای الف)  $a_1 = a_2 = 1$  ب)  $a_1 = 1.2, a_2 = 0.8$  پ)  $a_1 = 1.4, a_2 = 0.6$  ..... ۳۴
- شکل ۵-۴ نمودار سه بعدی اعوجاج ایجاد شده در قسمت قدرت آتش سیستمهای فازی نوع دوم بر حسب مقادیر متفاوت  $a_1$  و  $a_2$  زمانیکه  $(SNR=0dB)$  ..... ۳۶
- شکل ۵-۵ نمودار اعوجاج ایجاد شده در قسمت قدرت آتش سیستمهای فازی نوع دوم بر حسب مقادیر متفاوت  $a_1$  و  $a_2$  زمانیکه  $(SNR=0dB)$  ..... ۳۷
- شکل ۵-۶ نمودار اعوجاج ایجاد شده در قسمت قدرت آتش سیستمهای فازی نوع دوم بر حسب مقادیر متفاوت  $a_1$  و  $a_2$  در حالیکه  $(SNR=100dB)$  ..... ۳۷
- شکل ۵-۷ الف) نمودار سه بعدی و ب) نمودار نقشه برجسته اعوجاج ایجاد شده در قسمت قدرت آتش سیستمهای فازی نوع دوم بر حسب مقادیر متفاوت  $a_1$  و  $a_2$  زمانیکه  $(SNR=0dB)$  ..... ۳۹
- شکل ۵-۸ نمودار اعوجاج ایجاد شده در قسمت قدرت آتش سیستمهای فازی نوع دوم بر حسب مقادیر متفاوت  $a_1$  و  $a_2$  زمانیکه  $(SNR=100dB)$  ..... ۴۰
- شکل ۵-۹ نمودار انتگرال قدرمطلق امیدهای ریاضی و واریانس اعوجاج ایجاد شده در قوانین سیستم فازی اگر نويز دارای تابع چگالی احتمال گوسی و دارای توان بالا  $(SNR=0dB)$  باشد. ..... ۴۱
- شکل ۵-۱۰ نمودار انتگرال قدرمطلق امیدهای ریاضی و واریانس اعوجاج ایجاد شده در قوانین سیستم فازی اگر نويز دارای تابع چگالی احتمال گوسی و دارای توان پایین  $(SNR=100dB)$  باشد. ..... ۴۱
- شکل ۵-۱۱ نمودار انتگرال قدرمطلق امیدهای ریاضی و واریانس اعوجاج ایجاد شده در قوانین سیستم فازی اگر نويز دارای تابع چگالی احتمال یکنواخت و دارای توان بالا  $(SNR=0dB)$  باشد. ..... ۴۲
- شکل ۵-۱۲ نمودار انتگرال قدرمطلق امیدهای ریاضی و واریانس اعوجاج ایجاد شده در قوانین سیستم فازی اگر نويز دارای تابع چگالی احتمال یکنواخت و دارای توان پایین  $(SNR=100dB)$  باشد. ..... ۴۲
- شکل ۵-۱۳ نمودار نسبت مجموع قدرمطلق تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر قطعی در ورودی به مجموع قدرمطلقهای امید ریاضی تغییرات ایجاد شده توسط نويز و مجموع واریانس تغییرات ایجاد شده توسط نويز به ازای  $(SNR=0dB)$  ..... ۴۳
- شکل ۵-۱۴ نمودار نسبت مجموع قدرمطلق تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر قطعی در ورودی به مجموع قدرمطلقهای امید ریاضی تغییرات ایجاد شده توسط نويز و مجموع واریانس تغییرات ایجاد شده توسط نويز به ازای  $(SNR=40dB)$  ..... ۴۴
- شکل ۵-۱۵ داده‌های مکی گلاس بدون نويز و با نويز با  $(SNR=0dB)$  ..... ۵۲
- شکل ۵-۱۶ نمودار مربوط به توابع تعلق فازی قبل از آموزش (نقطه چین) و بعد از آموزش (خط) برای داده مکی گلاس با  $(SNR=0dB)$  ..... ۵۲

- شکل ۵-۱۷ نمودار مربوط به  $\sum_{i=1}^8 |a_{1i} - a_{2i}|$  به عنوان معیاری از عرض عدم قطعیت توابع عضویت فازی بر حسب توان نویز در داده مکی گلاس ..... ۵۳
- شکل ۵-۱۸ اختلاف خطای بدست آمده توسط سیستم فازی نوع دوم از سیستم فازی نوع اول بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای داده مکی گلاس ..... ۵۳
- شکل ۵-۱۹ خروجی سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با داده نویزی با (SNR=0dB) و داده واقعی سیستم مکی گلاس ..... ۵۴
- شکل ۵-۲۰ نمودار داده‌های ورودی خروجی سیستم خشک کن مو الف) داده‌های ورودی ب) داده‌های خروجی ..... ۵۶
- شکل ۵-۲۱ خروجی سیستم فازی نوع دوم با تابع عضویت بیضوی پیشنهادی آموزش دیده با داده‌های نویزی با (SNR=10dB) و داده‌های واقعی سیستم ..... ۵۶
- شکل ۵-۲۲ نمودار اختلاف خطای شناسایی سیستم فازی نوع دوم از نوع اول بر حسب سیگنال به نویزهای مختلف ..... ۵۷
- شکل ۵-۲۳ مقدار میانگین  $\sum_{i=1}^8 |a_{1i} - a_{2i}|$  در ۱۰ بار آزمایش روی سیستم خشک کننده مو ..... ۵۸
- شکل ۵-۲۴ دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی ..... ۶۰
- شکل ۵-۲۵ پاسخ پله کنترل کننده فازی نوع دوم که از تابع عضویت بیضوی پیشنهادی بهره می‌برد ..... ۶۲
- شکل ۵-۲۶ پاسخ سینوسی کنترل کننده فازی نوع دوم که از تابع عضویت بیضوی پیشنهادی بهره می‌برد ..... ۶۲
- شکل ۵-۲۷ گراف همگرایی الگوریتم‌های مختلف برای پیشبینی سیستم مکی-گلاس در حضور نویز سفید (SNR=10dB) می‌باشد ..... ۶۵
- شکل ۵-۲۸ داده واقعی سیستم مکی-گلاس و خروجی سیستم فازی آموزش دیده با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته ..... ۶۶
- شکل ۵-۲۹ نمودار مربوط به تابع عضویت جدید قبل (شکل نقطه نقطه) و بعد از آموزش توسط فیلتر کالمن توسعه یافته (شکل خطی) ..... ۶۶
- شکل ۵-۳۰ اندازه‌های از عرض عدم قطعیت توابع عضویت فازی بعد از آموزش بر حسب توان نویز ..... ۶۷
- شکل ۵-۳۱ نمای سیستم آزمایشگاهی ترمز ضد قفل استفاده شده در این پژوهش ..... ۶۸
- شکل ۵-۳۲ داده‌های ورودی خروجی ترمز ضد قفل الف) داده‌های ورودی ب) داده‌های خروجی ..... ۶۹
- شکل ۵-۳۳ مقایسه داده‌های لغزش اندازه‌گیری شده و داده‌های بدست آمده از سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با فیلتر کالمن توسعه یافته ..... ۶۹
- شکل ۵-۳۴ بلوک دیاگرام کنترل کننده براساس آموزش خطای پسخور و فیلتر کالمن ..... ۷۱
- شکل ۵-۳۵ خروجی کنترل کننده‌های PID و فازی نوع دوم در حالت کارکرد موازی ..... ۷۳
- شکل ۵-۳۶ پاسخ شبیه‌سازی کنترل کننده‌های مختلف روی مدل ترمز ضد قفل در حالت بدون نویز و لغزش مرجع ثابت ..... ۷۳
- شکل ۵-۳۷ پاسخ شبیه‌سازی کنترل کننده‌های مختلف روی مدل ترمز ضد قفل در حالت نویزی و لغزش مرجع ثابت ..... ۷۴
- شکل ۵-۳۸ پاسخ شبیه‌سازی کنترل کننده‌های مختلف روی مدل ترمز ضد قفل در حالت بدون نویز و لغزش مرجع متغیر با سرعت ..... ۷۶
- شکل ۵-۳۹ پاسخ شبیه‌سازی کنترل کننده‌های مختلف روی مدل ترمز ضد قفل در حالت نویزی و لغزش مرجع متغیر با سرعت ..... ۷۷
- شکل ۵-۴۰ مقایسه عملکرد کنترل کننده PID و سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با فیلتر کالمن در شمای آموزش خطای پسخور روی سیستم ترمز ضد قفل آزمایشگاهی ..... ۷۸
- شکل ۵-۴۱ مقایسه عملکرد سیستم فازی نوع اول و سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با فیلتر کالمن در شمای آموزش خطای پسخور روی سیستم ترمز ضد قفل آزمایشگاهی ..... ۷۹

- شکل ۵-۴۲ مقایسه عملکرد سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با فیلتر کالمن و گرادیان نزولی در ساختار آموزش خطای  
 ۷۹.....پسخور روی سیستم ترمز ضد قفل آزمایشگاهی.....
- شکل ۵-۴۳ بررسی عملکرد سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با فیلتر کالمن در شمای آموزش خطای پسخور روی سیستم ترمز  
 ۸۰.....ضد قفل آزمایشگاهی.....
- شکل ۶-۱. نمای کلی کنترل کننده فازی نوع اول مدل مرجع مستقیم..... ۹۳.....
- شکل ۶-۲. نمودار صفحه فاز سیستم نوسانگر دافینگ..... ۱۰۵.....
- شکل ۶-۳. توابع تعلق فازی در نظر گرفته شده برای کنترل فازی سیستم نوسانگر دافینگ..... ۱۰۵.....
- شکل ۶-۴. نمودارهای پاسخ سیستم نوسانگر دافینگ با اعمال کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم. الف) نمودار صفحه فاز  
 سیستم ب) نمودار سیگنال کنترلی پ و ت) نمودار زمانی متغیرهای حالت سیستم..... ۱۰۶.....
- شکل ۶-۵. نمودارهای پاسخ سیستم نوسانگر دافینگ با اعمال کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم در حضور عدم قطعیت در  
 پارامترها. الف) نمودار صفحه فاز سیستم ب) نمودار سیگنال کنترلی پ و ت) نمودار زمانی متغیرهای حالت سیستم..... ۱۰۷.....
- شکل ۶-۶. نمودارهای صفحه فاز سیستم جنسیو تسی بدون اعمال کنترل کننده..... ۱۰۹.....
- شکل ۶-۷. توابع تعلق فازی در نظر گرفته شده برای کنترل سیستم جنسیو تسی..... ۱۱۰.....
- شکل ۶-۸. پاسخ تنظیم سیستم جنسیو تسی با اعمال کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم به آن..... ۱۱۰.....
- شکل ۶-۹. پاسخ سینوسی سیستم جنسیو تسی با اعمال کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم به آن..... ۱۱۱.....
- شکل ۶-۱۰. شکل مفصل انعطاف پذیر..... ۱۱۲.....
- شکل ۶-۱۱. توابع تعلق فازی در نظر گرفته شده برای سیستم مفصل انعطاف پذیر..... ۱۱۳.....
- شکل ۶-۱۲. تنظیم سیستم مفصل انعطاف پذیر با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم..... ۱۱۵.....
- شکل ۶-۱۳. عملکرد ردیابی سینوسی کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم روی مفصل انعطاف پذیر..... ۱۱۵.....
- شکل ۶-۱۴. نمودار نرم فروبینیوس پارامترهای کنترل کننده زمانی که جمله مقاوم مخالف صفر باشد..... ۱۱۶.....
- شکل ۶-۱۵. نمودار نرم فروبینیوس پارامترهای کنترل کننده زمانی که جمله مقاوم مخالف صفر باشد..... ۱۱۶.....
- شکل ۶-۱۶. تنظیم سیستم مفصل انعطاف پذیر با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم..... ۱۱۷.....
- شکل ۶-۱۷. ردیابی موج سینوسی برای سیستم مفصل انعطاف پذیر با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم..... ۱۱۷.....
- شکل ۶-۱۸. تنظیم سیستم آشوب چوآ با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم..... ۱۱۹.....
- شکل ۶-۱۹. ردیابی سیگنال مربعی سیستم آشوب چوآ با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم..... ۱۱۹.....
- شکل ۶-۲۰. ردیابی سیگنال مربعی سیستم آشوب چوآ با استفاده از کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم..... ۱۲۰.....
- شکل ۶-۲۱. رفتار سیستم آشوب چوآ زمانی که اغتشاش مخالف صفر و جمله مربوط به رفع اغتشاش برابر صفر است..... ۱۲۰.....
- شکل ۶-۲۲. رفتار سیستم آشوب چوآ زمانی که اغتشاش مخالف صفر و جمله مربوط به رفع اغتشاش در حال کار کردن است..... ۱۲۱.....
- شکل ۶-۲۳. سیستم آزمایشگاهی موتور- ژنراتوری AMIRA-DR300..... ۱۲۱.....
- شکل ۶-۲۴. مدار معادل الکتریکی سیستم موتور DC به همراه بار متصل به شفت آن..... ۱۲۲.....
- شکل ۶-۲۵. توابع تعلق در نظر گرفته شده برای کنترل فازی موتور DC..... ۱۲۳.....
- شکل ۶-۲۶. نمودار ردیابی موج مربعی سیستم AMIRA-DR300 با استفاده از کنترل فازی مدل مرجع مستقیم..... ۱۲۳.....
- شکل ۶-۲۷. ردیابی موج مربعی سیستم AMIRA-DR300 با استفاده از کنترل فازی مدل مرجع مستقیم در حضور تغییر  
 ناگهانی پارامتر سیستم..... ۱۲۳.....
- شکل ۶-۲۸. نمودار مقایسه ای عملکرد سیستمهای فازی نوع اول و دوم براساس توانهای مختلف نویز اندازه گیری..... ۱۲۶.....
- شکل ۶-۲۹. نمودار بهبود عملکرد سیستم فازی نوع دوم نسبت به سیستم مرتبه اول بر حسب توانهای مختلف نویز..... ۱۲۸.....



- شکل ۶-۳۰ الف) نمودار سه بعدی میانگین اختلاف انتگرال توان دوم خطا در حالت نویزی و بدون نویز به ازای مقادیر مختلف  $a_1$  و  $a_2$  (ب) همان نمودار به صورت نقشه برجسته ..... ۱۲۹
- شکل ۶-۳۰ الف) نمودار سه بعدی میانگین اختلاف انتگرال توان دوم خطا در حالت نویزی و بدون نویز به ازای مقادیر مختلف  $a_1$  و  $a_2$  به صورت نرمالیزه (ب) همان نمودار به صورت نقشه برجسته ..... ۱۲۹
- شکل ۷-۱ بلوک دیاگرام کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم براساس رویتگر ..... ۱۴۰
- شکل ۷-۲ بلوک دیاگرام کنترل کننده فازی مدل مرجع مستقیم براساس رویتگر ..... ۱۴۹
- شکل ۷-۳ رفتار تنظیم کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم الف) خروجی سیستم در مقابل خروجی مدل مرجع (ب) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_1$  (پ) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_2$  (ت) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_3$  ..... ۱۶۲
- شکل ۷-۴ رفتار ردیابی کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم الف) خروجی سیستم در مقابل خروجی مدل مرجع (ب) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_1$  (پ) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_2$  (ت) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_3$  ..... ۱۶۳
- شکل ۷-۵ رفتار ردیابی کنترل کننده فازی مدل مرجع غیرمستقیم در حضور اغتشاش الف) خروجی سیستم در مقابل خروجی مدل مرجع (ب) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_1$  (پ) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_2$  (ت) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_3$  ..... ۱۶۴
- شکل ۷-۸ عملکرد تنظیم سیستم کنترل فازی مدل مرجع غیرمستقیم براساس رویتگر بهینه الف) خروجی سیستم در مقابل خروجی مدل مرجع (ب) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_1$  (پ) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_2$  (ت) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_3$  ..... ۱۷۰
- شکل ۷-۹ عملکرد ردیابی سیستم کنترل فازی مدل مرجع غیرمستقیم براساس رویتگر بهینه الف) خروجی سیستم در مقابل خروجی مدل مرجع (ب) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_1$  (پ) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_2$  (ت) رفتار رویتگر برای تخمین  $x_3$  ..... ۱۷۱
- شکل ۷-۱۰ نمودار بهبود عملکرد سیستم فازی نوع دوم نسبت به سیستم فازی نوع اول در حضور نویز اندازه گیری ..... ۱۷۳
- شکل پیوست-۱ فلوجارت مربوط به استفاده ترکیبی از الگوریتم بهینه سازی جمعیتی ذرات در کنار فیلتر کالمن ..... ۱۸۱

## فهرست جداول

جدول ۱-۵ مقایسه دقت پیش بینی تابع عضویت بیضوی پیشنهادی با برخی توابع عضویت نوع دوم و اول موجود برای پیش بینی سیستم مکی گلاس.....	۵۵
جدول ۲-۵ مقایسه دقت پیش بینی تابع عضویت بیضوی پیشنهادی با برخی توابع عضویت نوع دوم و اول موجود برای شناسایی داده‌های خشک کننده مو.....	۵۹
جدول ۳-۵ مجموع مربعات خطا برای کنترل‌کننده‌های فازی مختلف.....	۶۱
جدول ۴-۵ مقایسه دقت پیش بینی سیستم فازی نوع دوم ساخته شده از تابع تعلق نوع دوم معرفی شده و سیستم فازی نوع اول که با استفاده از فیلتر کالمن آموزش دیده اند.....	۶۴
جدول ۵-۵ مقایسه دقت پیش بینی سیستم مکی-گلاس با استفاده از سیستم فازی نوع دوم آموزش دیده با الگوریتمهای مختلف.....	۶۴
جدول ۶-۵ جدول مقایسه‌ای زمان همگرایی هریک از الگوریتمهای فیلتر کالمن توسعه یافته و ترکیب بهینه‌سازی جمعیتی ذرات و فیلتر کالمن با تعداد قوانین متفاوت برای سیستم فازی برای داده مکی گلاس با توان نویز (SNR=10dB).....	۶۸
جدول ۷-۵ جدول مقایسه‌ای زمان همگرایی هریک از الگوریتمهای فیلتر کالمن توسعه یافته و الگوریتم گرادیان نزولی با تعداد قوانین متفاوت برای سیستم فازی برای داده مکی گلاس با توان نویز (SNR=10dB).....	۶۸
جدول ۸-۵ مقایسه عددی الگوریتمها و ساختارهای مختلف سیستم فازی برای شناسایی داده‌های ترمز ضد قفل (ABS).....	۷۱
جدول ۹-۵ مقایسه کنترل‌کننده‌های مختلف برای کنترل ترمز ضد قفل.....	۷۵
جدول ۱-۶ مقایسه انتگرال توان دوم خطا برای سیستمهای کنترل فازی مدل مرجع مستقیم و غیرمستقیم روی سیستم بازوی انعطاف پذیر.....	۱۱۷
جدول ۲-۶. پارامترهای موتور و توضیح مربوطه.....	۱۲۴
جدول ۳-۶ مقادیر عددی نامی پارامترهای موتور.....	۱۲۴
جدول ۱-۷ مقایسه عملکرد تنظیم سیستمهای کنترل رویتگر پایه پیشنهادی.....	۱۷۲

## ۱ مقدمه

منطق فازی برای اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی گردید. منطق فازی حالت توسعه یافته‌ای از منطق بولی<sup>۱</sup> می‌باشد که داده‌ها را با استفاده از مجموعه‌های فازی پردازش می‌کند. در این منطق خروجی‌ها مانند منطق بولی به اعداد صفر و یک منحصر نبوده و مقادیر میانی را نیز می‌تواند به خود اختصاص دهند. به عبارت دیگر در این منطق خروجی‌ها تنها درست مطلق و نادرست مطلق نبوده و عبارات تا حدی درست و اینکه عبارتی از عبارت دیگر درست‌تر باشد، معنا پیدا می‌کند [۱]. با استفاده از این منطق می‌توان مفاهیم زبانی مختلفی که در زندگی روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرند را پردازش نموده و براساس آنها تصمیم‌گیری نمود. زاده در مصاحبه‌ای با بلر منطق فازی را "یک روش دقیق فکر کردن در مورد مسائل مبهم و نامفهوم" برشمرده است [۲].

این منطق در ابتدا با استقبال خوبی روبه رو نشد. اما از سالهای ۷۰ به بعد این تئوری مورد استفاده وسیع در کاربردهای مختلف قرار گرفت. با وجود اینکه سازندگان آمریکایی خیلی دیر به فکر استفاده از سیستمهای فازی افتادند اما ژاپنیها و اروپاییان خیلی سریع اقدام به ساخت کنترل‌کننده‌های تجاری براساس سیستمهای فازی نمودند. ممدانی در سال ۱۹۷۴ برای اولین بار با استفاده از سیستمهای فازی اقدام به کنترل یک ماشین بخار ساده نمود. شش سال بعد اولین کاربرد صنعتی منطق فازی در یک کارخانه سیمان توسط اسمیت<sup>۲</sup> در دانمارک انجام گرفت. شرکت فوجی الکترونیک با استفاده از منطق فازی یک سیستم تصفیه آب را در سالهای ۱۹۸۰ تولید نمود. شرکت هیتاچی بعدها اقدام به ساخت یک ترن اتوماتیک به روش فازی نمود. در سالهای آغازین ۱۹۹۰ در ژاپن محصولات الکترونیکی خانگی زیادی با استفاده از منطق فازی ساخته شد و از آن پس این منطق کاربردهای زیادی در سیستمهای تصمیم‌ساز، تشخیص خطا، تشخیص بیماری، برنامه‌ریزی سیستمهای حمل و نقل، استراتژیهای مدیریتی و سیستمهای اجتماعی پیدا کرد [۳] [۴].

یک سیستم فازی یک سیستم خبره است که یک مجموعه از توابع عضویت فازی و قوانین را استفاده می‌کند تا در مورد ورودی نتیجه‌گیری نماید. قوانین اگر و آنگاه فازی معمولاً به صورت زیر می‌باشند.

*If  $x_1$  is  $Q_1$  and  $x_2$  is  $Q_2$  Then  $y$  is  $O$*

که در آن  $x_1$  و  $x_2$  متغیرهای زبانی ورودی و  $y$  متغیر زبانی خروجی می‌باشند.  $Q_1$  و  $Q_2$  متغیرهای زبانی

<sup>1</sup> Boolean

<sup>2</sup> F. H. Smidth

هستند که با استفاده از مجموعه‌های فازی در دنیای محاوره<sup>۳</sup>  $X_1$  و  $X_2$  تعریف می‌شوند. بخش اگر قوانین فازی به عنوان مقدم و بخش آنگاه آن با نام تالی شناخته می‌شود.

بخش مقدم بیان می‌کند که هر قانون چقدر برآورده شده است و بخش تالی یک تابع عضویت و یا یک تابع ریاضی را به هر یک از این قوانین مربوط می‌سازد. مجموعه قوانین سیستم فازی پایگاه قواعد آن را می‌سازد. یک قانون می‌تواند تک ورودی-تک خروجی، چند ورودی-تک خروجی و یا چند ورودی-چند خروجی باشد. دو کلاس مهم از سیستم‌های فازی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند سیستم‌های فازی ممدانی و تاکاگی-سوگنو می‌باشند. هر دو این سیستم‌ها با استفاده از قوانین اگر و آنگاه تعریف می‌شوند و دارای بخش مقدم یکسان هستند اما قسمت تالی آنها متفاوت می‌باشد. سیستم فازی ممدانی از توابع عضویت فازی در بخش تالی استفاده می‌کند در حالیکه سیستم فازی تاکاگی-سوگنو از توابع ریاضی قطعی<sup>۴</sup> در بخش تالی خود بهره می‌برد. به این صورت بخش تالی سیستم فازی تاکاگی-سوگنو قابلیت تفسیرپذیری خود را از دست می‌دهد. در عین حال محاسبه خروجی سیستم فازی تاکاگی-سوگنو ساده‌تر بوده باعث می‌شود که بتوان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تطبیقی به خصوص الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان نزولی، پارامترهای آن را تنظیم نمود. به همین دلیل استفاده از سیستم‌های فازی تاکاگی-سوگنو در کاربردهای مختلف کنترلی به خصوص برای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی کاربرد بیشتری دارد.

زمانی که تعداد کافی متخصص در یک زمینه کاری وجود داشته باشد که بتوانند قوانین کنترلی را برای سیستم با استفاده از یک سری قوانین کیفی به زبان بیاورند از سیستم‌های فازی می‌توان برای انجام کار کنترلی استفاده نمود. اما سیستم‌های فازی در بسیاری از کاربردهای صنعتی کاربرد دارد که در آن دانش کافی برای کنترل سیستم وجود ندارد. در این شرایط باید سیستم فازی بتواند با استفاده از یک سری زوج داده‌های ورودی خروجی از سیستم اقدام به بروز رسانی خود نماید. در این زمینه سیستم‌های فازی تاکاگی-سوگنو بسیار کاربرد دارد، چرا که به راحتی با استفاده از زوج داده‌های ورودی خروجی می‌توان پارامترهای مناسب را برای آن تعیین نمود.

دو رویکرد در کنترل‌کننده‌های منطقی فازی وجود دارد. استفاده از مجموعه‌های فازی نوع اول که در آن تابع عضویت کاملاً دقیق است و توابع عضویت نوع دوم که در آن توابع عضویت خود فازی می‌باشند. استفاده از مجموعه‌های فازی نوع دوم باعث می‌گردند که بخش‌های مقدم و تالی سیستم فازی نامعین گردند. سیستم‌های فازی نوع دوم گسترش یافته‌ای از سیستم‌های فازی نوع اول هستند که وظیفه آنها اضافه کردن درجه آزادی به سیستم فازی برای مدل نمودن مستقیم عدم قطعیت‌های موجود در سیستم واقعی می‌باشد. برخی از منابع عدم قطعیت در سیستم‌های فازی به شرح زیر می‌باشند:

عدم قطعیت در ورودی سیستم فازی. با توجه به اینکه ورودی سیستم‌های فازی معمولاً اندازه‌گیری انجام شده از سنسور می‌باشد و این اندازه‌گیرها آغشته به نویز اندازه‌گیری می‌باشند، این عدم قطعیت ظاهر می‌شود. همچنین

<sup>3</sup> Universe of discourse

<sup>4</sup> Crisp