

# کنترل ترکیبی منطق فازی نوع دوم- شبکه عصبی و مود لغزشی مرتبه بالا برای یک بازوی رباتیکی با نامعینی پارامتری و اختلال

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه نوشیروانی صنعتی بابل، بابل، ایران، sina.mrm@aut.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه نوشیروانی صنعتی بابل، بابل، ایران، mhghasemi@nit.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه نوشیروانی صنعتی بابل، بابل، ایران، mohammadi@nit.ac.ir

سینا محمدرضایی نوده

محمدحسن قاسمی\*

حمیدرضا محمدی دانیالی

## چکیده

بازوهای صنعتی باید قادر به انجام وظایف خود در محیط‌هایی باشند که اختلال‌های پیش‌بینی نشده در محیط کاری آن‌ها دیده شود. در این مقاله کنترل یک بازوی رباتیکی تحت اختلال خارجی قابل توجه و نامعینی پارامتری مدنظر قرار دارد. منطق فازی نوع-دوم به دلیل استفاده از توابع عضویت فازی و وجود اثر نامعینی در الگوریتم، انتخابی مناسب در مواجهه با نامعینی محیطی محسوب می‌شود. شبکه عصبی می‌تواند به افزایش مقاومت کنترل‌کننده در برابر نامعینی منجر شود. با وجود آنکه ذاتاً شبکه عصبی نیاز به ساخت قوانین فازی مرتبه دوم خود ندارد، قوانین اولیه‌ای که بر مبنای سطح لغزش روش مود لغزشی تعیین شود می‌تواند به بهبود رفتار سیستم کمک کند. از ویژگی‌های کنترل‌کننده ارائه شده می‌توان به افزایش مقاومت بودن این روش نسبت به روش مود لغزشی کلاسیک در حضور نامعینی پارامتری و اختلال خارجی قابل توجه اشاره کرد. ویژگی خود تنظیمی کنترل‌کننده که بر مبنای وجود شبکه عصبی در بلوک مرکزی کنترل‌کننده فازی نوع دوم است به افزایش مقاوم بودن روش کمک می‌کند. عملکرد مثبت کنترل‌کننده پیشنهادی تحت نامعین‌های مختلف در شبیه‌سازی یک بازوی رباتیکی بررسی شده است. **واژه‌های کلیدی:** منطق فازی نوع دوم، مود لغزشی مرتبه بالا، نامعینی پارامتری، اختلال خارجی.

## Hybrid Control of Fuzzy Type 2-Neural Network and Higher Order Sliding Mode for Robotic Manipulator with Parametric Uncertainties and Perturbations

S. Mohammadrezaei Nodeh

M. H. Ghasemi

H. R. Mohammadi Daniali

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

## Abstract

Industrial arms must be able to perform their tasks in environments with serious unplanned conditions and perturbations. In this paper, the aim is to control a robotic manipulator which is under parametric uncertainty and significant external perturbations. Fuzzy type 2 logic is considered as an appropriate choice in the face of uncertain conditions due to various reasons such as the use of fuzzy membership functions and footprint of uncertainty existence in the algorithm. The use of neural network can increase the robustness of controller in the face of uncertainties. Although the neural network does not necessarily need to build its fuzzy type 2 rules, the initial rules based on sliding surface of sliding mode scheme can improve system's performance. More robustness of the novel algorithm in comparison with classic sliding mode controller is the main feature made in the presence of parametric uncertainty and external perturbations. In addition, the controller self-regulation feature, based on the existence of neural network in the central block of fuzzy type 2 controller, helps to increase the robustness of the method. Positive performance of novel scheme has been shown in simulation of two-link robotic arm with different significant perturbations.

**Keywords** Fuzzy Type 2 Logic, Higher Order Sliding Mode, Parametric Uncertainty, Perturbation.

## ۱-مقدمه

عضویت T1FLS برای هر ورودی یک عدد قطعی<sup>۴</sup> است، محدودیت پیاپی‌سازی در مواجهه با نامعینی قابل توجه در آن وجود دارد.

منطق فازی نوع دوم که مشخصه اصلی آن استفاده از مجموعه فازی بجای عدد مطلق است، به منظور غلبه بر محدودیت‌های نوع اول آن ارائه گردید [۲]. این روش در دو گروه کلی<sup>۵</sup> (GT2FS) و بازه‌ای<sup>۶</sup> (IT2FS) دسته‌بندی می‌شود. پژوهش‌های متعددی وجود دارد که حکایت از دقت بالاتر نوع بازه‌ای و عملکرد بهتر در مواجهه با نامعینی قابل توجه دارد [۴-۷]. به علاوه به دلیل مفهوم اثر نامعینی<sup>۷</sup> (FOU) که سیستم را قادر به پوشش نامعینی و دامنه ورودی/خروجی با مجموعه‌های فازی کمتر می‌کند، IT2FS

بسیاری از مسایلی که در جهان واقعی مطرح می‌شوند دارای نامعینی قابل توجه در ماهیت خود هستند. علاوه بر وجود نقص در اطلاعات، که مشخصه ذاتی آن است، نامعینی می‌تواند ناشی از خطای مدلسازی ریاضی و دریافت غیرکامل و بعضاً متناقض داده‌های پسخورد<sup>۱</sup> و حسگر باشد. سیستم‌های منطق فازی<sup>۲</sup> (FLS) به علت وابستگی کمتر به مدلسازی و بکارگیری آسان دانش فرد خبره در ساخت قوانین زبانی، به افزایش توانایی یک سیستم در مواجهه با نامعینی منجر می‌شوند [۱] و [۲]. عموماً انواع ۱ و ۲ منطق فازی<sup>۳</sup> (به ترتیب T1FLS و T2FLS) در زمینه مواجهه با نامعینی کاربرد قابل توجهی بین پژوهشگران دارد [۳]. با این وجود، از آنجا که درجه

<sup>۴</sup> Crisp Number

<sup>۵</sup> General Type 2 Fuzzy Sets

<sup>۶</sup> Interval Type 2 Fuzzy Sets

<sup>۷</sup> Footprint of Uncertainty

<sup>۱</sup> Feedback

<sup>۲</sup> Fuzzy Logic System

<sup>۳</sup> Type 1 Fuzzy Logic System and Type 2 Fuzzy Logic System

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mhghasemi@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۶

به تعداد قوانین کمتری نیاز دارد. سیگنال کنترلی هموارتر و افزایش پایداری به واسطه سهولت در ساخت پایگاه قواعد از ویژگی مهم این روش است. کنترلر مود لغزشی<sup>۱</sup> (SMC) روشی شناخته شده در تامین کنترلر مقاوم برای سیستم‌های غیرخطی در حضور نامعینی و اختلال‌های محیطی است [۸]. از مزایای استفاده از این روش می‌توان به پاسخ گذرای مناسب سیستم، پاسخ سریع و عدم حساسیت به اختلال خارجی و تغییر پارامتر سیستم اشاره کرد [۹]. ترکیب این روش و منطق فازی نوع دوم<sup>۲</sup> (T2FSMC) مزایایی را به همراه دارد؛ زیرا روش ترکیبی، ساختاری مقاوم را فراهم می‌آورد که مزایای هر دو روش حفظ شده و نقاط ضعف آن تا حد امکان کاهش یابد. برای مثال SMC می‌تواند با جداسازی سیستم‌های مرتبه بالا و تبدیل آن‌ها به زیرسیستم‌های مرتبه پایین‌تر، به کاهش ابعاد پایگاه قواعد منطق فازی کمک کند [۱۰]. از طرف دیگر منطق فازی، اثر نوسانات ناخواسته<sup>۳</sup> سیستم مود لغزشی را به واسطه تغییر تابع کلیدزنی<sup>۴</sup> با مکانیزم فازی کاهش می‌دهد [۱۱].

مود لغزشی مرتبه بالا<sup>۵</sup> (HOSM) راه حل مناسب دیگری برای غلبه بر نوسانات ناخواسته محسوب می‌شود. در این روش تابع علامت بر مشتقات زمانی مرتبه بالاتر عمل می‌کند که منجر به دقت بالاتر در نمونه‌برداری گسسته زمانی نسبت به مود لغزشی کلاسیک می‌شود. بر این اساس در این مقاله روشی توسعه داده شده است که با تکیه بر مود لغزشی مرتبه دوم و استفاده از آن در جهت تنظیم پارامترهای منطق فازی نوع دوم، با وجود نامعینی پارامتری بازو، عملکرد یک عملگر رباتیکی در مواجهه با اختلال خارجی ارتقا یابد.

هدف این مقاله، ارائه کنترل‌کننده جدیدی است که

- مقاوم بودن سیستم در برابر نامعینی پارامتری بازو و اختلال‌های خارجی نشان داده شود
- تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده به ناپایداری سیستم منجر نشود
- کارایی منطق فازی مرتبه دوم در زمان محدود تضمین شود
- محاسبات آفلاین پیچیده در عملکرد ربات وجود نداشته باشد

در عمل آنچه اتفاق می‌افتد نیاز به یک الگوریتم تعیین پارامتری بر خط در جهت دستیابی به اهداف ذکر شده بالا است؛ زیرا IT2FC با وجود رفتار مناسب در حضور نامعینی سیستم، همواره نمی‌تواند اختلال‌های خارجی با هر دامنه متناسبی را پوشش دهد. به منظور بهبود الگوریتم کنترلی، در این مقاله از مود لغزشی مرتبه دوم که خود دارای ابزاری مناسب در جهت مواجهه با نامعینی است، برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده فازی نوع دوم استفاده می‌شود.

آنچه این مقاله را از کارهای مرتبط پیشین متمایز می‌سازد، تأکید بر طراحی یک سیستم حلقه بسته و کنترل‌کننده‌ای است که بتواند در عین تحمل اختلال خارجی قابل توجه، ورودی هموار با دامنه منطقی را وارد سیستم بازوی رباتیکی کند. این مطلب همواره یک چالش در میان بسیاری از پژوهشگران بوده است که خنثی ساختن اختلال خروجی می‌تواند شکل ورودی (گشتاور) را برای یک بازوی رباتیکی از حالت قابل قبول آن خارج کند و در عمل نتوان از کنترل‌کننده در مصارف عملی استفاده کرد. این مقاله با در نظر گرفتن مقدار دامنه قابل توجه برای اختلال خارجی که البته بر یک

سیستم نامعین (پارامتری) وارد می‌شود، مقدار ورودی کنترلی منطقی را در هر بازه زمانی کنترلی، محاسبه و به سیستم اعمال کند.

مقاله حاضر به صورت زیر سازماندهی شده است. پس از بحث پیرامون کارهای مشابه در قسمت بعدی، سیستم و هدف کنترلی ارائه می‌شود. سپس به ارائه مختصری از کنترلر مود لغزشی مرتبه دوم و فازی نوع دوم پرداخته می‌شود. در ادامه طراحی کنترل‌کننده ترکیبی بر اساس تنظیم پارامترهای فازی نوع دوم توسط مود لغزشی مرتبه دوم مطرح شده و سپس مطالعه موردی برای یک بازوی رباتیکی صفحه‌ای ارائه شده که نتایج آن نشان‌دهنده مزایای الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

## ۲- کارهای مشابه

در زمینه ترکیب مود لغزشی و منطق فازی عموماً دو شیوه وجود دارد: منطق فازی در یک کنترل‌کننده مود لغزشی به کار رود (SMC کنترل‌کننده اصلی) و مود لغزشی در یک کنترل‌کننده فازی به کار رود (FLC کنترل‌کننده اصلی). هر کدام از این ترکیب‌ها دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های خود است. در شیوه اول، تابع کلیدزنی به کار رفته می‌تواند مانند مود لغزشی کلاسیک باشد و منطق فازی نوع دوم در آن الگوریتم‌های کنترلی متعددی را تحت سیستم یگانه مرتبط سازد. برای سیستم‌های دوبعدی، خط لغزش تابعی از خطا و مشتق خطا است که تابعی یک بعدی می‌باشد. لذا تعداد قواعد کمتری به منظور تقریب تابع یک بعدی مورد نیاز است که نشان می‌دهد چگونه این ترکیب می‌تواند اندازه پایگاه قواعد را کاهش دهد. در شیوه دوم، یک سطح لغزش غیرخطی تولید می‌شود که در مقایسه با مود لغزشی کلاسیک (که دارای سطح لغزش خطی است) یک مزیت است. هرچند برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده، عرض سطح لغزش پارامتر مهمتری است. محدودیت این روش در لزوم تعریف دقیق پارامترهای کنترلی مود لغزشی توسط انسان خبره است. آنچه در این مقاله مد نظر است استفاده از شیوه دوم به منظور کنترل یک عملگر رباتیکی در حضور نامعینی و اختلالات خارجی است که در آن بلوک IT2FS به عنوان کنترل‌کننده اصلی و بلوک HOSM به عنوان تنظیم‌کننده عمل می‌کند.

در این مقاله به بازخوانی مقالات مرتبطی پرداخته شده است که با ترکیب منطق فازی نوع اول و دوم با روش مود لغزشی به بهبود رفتار کنترل‌کننده منجر شده است. لین و چن [۱۲] به منظور کنترل دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی نامعین چند ورودی-چند خروجی<sup>۶</sup> (MIMO) از روش فازی-مود لغزشی استفاده کردند. آن‌ها با روش برخط، کنترل‌کننده فازی-مود لغزشی را به منظور تقریب کنترلر معادل در همسایگی منیقولد لغزش به کار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که سیستم قادر به پوشش مقادیر نامعینی پارامتری و جبران اختلال‌های خارجی است. روش مورد نظر بر روی بازوی دو لینکی پیاده‌سازی و پایداری آن به کمک روش لیاپانوف اثبات شد.

هوو و وو [۱۳] روشی را ارائه کردند که بر اساس ترکیب مود لغزشی و شبکه عصبی با وزن‌های مختلف بود و این وزن‌ها توسط کنترل‌کننده فازی تعیین می‌شدند. به دلیل شدت غیرخطی بودن، جفت بودن معادلات و متغیر با زمان بودن آن، بازوهای رباتیکی از نامعینی‌های مختلف تأثیر می‌پذیرند. کنترلر مود لغزشی با وجود غلبه بر نامعینی و پاسخ سریع گذرا، به علت ناپیوستگی سیگنال منجر به نوسانات ناخواسته می‌شود. به همین دلیل آن‌ها سه روش فازی-مقاوم-شبکه عصبی را به منظور غلبه بر چالش‌ها ترکیب

<sup>1</sup> Sliding Mode Control

<sup>2</sup> Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control

<sup>3</sup> Chattering

<sup>4</sup> Switch

<sup>5</sup> Higher Order Sliding Mode

<sup>6</sup> Multiple-Input and Multiple Output

کردند. آن‌ها همگرایی و پایداری سیستم را با روش مستقیم لیاپانوف ثابت کردند. شبیه‌سازی برای شرایط مختلف نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده بود.

مدهافر و همکاران [۱۴] یک کنترل‌کننده مود لغزشی-فازی غیر جفت شده برای بازوی رباتیکی ارائه دادند. این کنترل‌کننده به منظور مواجهه با گروهی از سیستم‌های MIMO با دینامیک غیرخطی ارائه شد. درواقع یک روش فازی به منظور تقریب توابع غیرخطی جملات سیستم استفاده شد. به علاوه آن‌ها از کنترل‌کننده‌های محلی نیز برای غیر جفت‌سازی معادلات استفاده کردند. در نهایت روش خود را بر روی بازوی رباتیکی دو درجه آزادی به منظور کنترل مسیر پیاده‌سازی نمودند.

اندر [۱۵] به ارائه کنترل‌کننده فازی-مود لغزشی برای یک بازوی دولینکی پرداخت. پارامترهای کنترل‌کننده به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که سیستم تحت کنترل دارای خطای تعقیب محدود باشد. در این روش از یک فرایند تطبیقی برای بهبود کنترل‌کننده برپایه انتگرال سیگنال پشخورد استفاده می‌شود.

هوانگ و همکاران [۱۶] در حضور نامعینی به کمک روش فازی-مود لغزشی به کنترل سیستم‌های غیرخطی پرداختند. یک روش تنظیم تطبیقی بدون کلیدزنی با فرکانس بالا به منظور مواجهه با نامعینی‌های محدود به کار گرفته شد. مقاومت و پایداری سیستم توسط نظریه لیاپانوف اثبات شد. با این وجود در طی فرایند کنترل مشاهده شد که حد بالای نامعینی نیاز به دانستن ندارد. آن‌ها با تست آزمایشگاهی به صحت‌سنجی کار خود پرداختند.

روپایی و همکاران [۱۷] یک کنترل‌کننده فازی-مود لغزشی را به منظور جبران نامعینی و اختلال ارائه دادند. آن‌ها از دو سیستم فازی به منظور تکمیل بلوک مود لغزشی استفاده کردند. به علاوه از منطق فازی جهت تقریب قسمت‌هایی از سیستم استفاده کردند. به منظور غلبه بر نوسانات ناخواسته از مدل فازی همانند تابع اشباع استفاده شد. مزیت کار آن‌ها عدم نیاز به دانستن بازه‌های اختلال و نامعینی پارامتری بود. آن‌ها به کمک نظریه پایداری لیاپانوف و لم باربالات، پایداری و همگرایی سیستم حلقه بسته را اثبات نمودند.

نوروزی و همکاران [۱۸] برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی در حضور نامعینی و اختلال خارجی به ارائه کنترل‌کننده فازی-مود لغزشی پرداختند. نوآوری آن‌ها بر اساس شناخت بخشی از سیستم و عدم نیاز به مشخص بودن محدوده نامعینی و اختلال بود. به علاوه بدون آسیب زدن به مقاومت کنترل‌کننده، پدیده نوسانات ناخواسته حذف گردید.

حاجی اوغلو و همکاران [۱۹] به مطالعه کنترل بازوی دو درجه آزادی دوگانه در طی جابجایی اشیاء پرداختند. از آنجایی که این نوع ربات‌ها اغلب در کاربردهای خطرناکی مانند انتقال مواد رادیواکتیو و دفع مواد منفجره استفاده می‌شوند، آن‌ها یک کنترل‌کننده مود لغزشی فاقد نوسانات ناخواسته بهبود یافته توسط بلوک منطق فازی را به ربات اعمال کردند تا بتواند مسیر مطلوب را با دقت بالا و امنیت پییماید. به منظور سنجش عملکرد کنترل‌کننده در برابر تغییرات پارامتری و اختلال‌های خارجی، نتایج مربوط تغییر بار ناگهانی و نویز برای سیستم ارائه شد.

عامر و همکاران [۲۰] به منظور کنترل بازوی رباتیکی از روش فازی-مود لغزشی استفاده کردند. آن‌ها با ادغام سطح لغزش تنظیم شده توسط سیگنال PID از نوسانات ناخواسته جلوگیری کردند. به علاوه آن‌ها بهره خروجی کنترل‌کننده را توسط یک بلوک فازی مجزا و به صورت برخط تنظیم کردند. پایداری سیستم توسط روش لیاپانوف اثبات شد. آن‌ها روش

ارائه شده خود را روی بازوی رباتیکی صفحه‌ای ۳ درجه آزادی با وجود نامعینی پیاده کرده و تاثیر مثبت آن را در تعقیب مسیر نشان دادند.

نکوکار و عرفانیان [۲۱] با یک الگوریتم یادگیری تطبیقی و سیستم منطق فازی برای تخمین سیستم دینامیکی، به روش مود لغزشی یک عملگر رباتیکی را کنترل کردند. مزیت کار آنان عدم وابستگی به دانستن دینامیک اولیه ربات بود که موجب پایداری و همگرایی زمان-محدود الگوریتم پیشنهادی شد.

سرم‌ان و هوسک [۲۲] برای دسته‌ای از سیستم‌های پیوسته غیرخطی با دینامیک ناشناخته و اختلال‌های محدود، کنترل‌کننده فازی-مود لغزشی ارائه دادند. ایده اصلی آن‌ها شامل مکانیزم خود تنظیم شونده فازی برای تطبیق پارامترهای مود لغزشی و تغییر بهره‌ها بود. این اصلاح منجر به کاهش نوسانات ناخواسته و همگرایی سریع‌تر شد. آن‌ها کنترل‌کننده پیشنهادی را روی مکانیزم سرووی الکتروهیدرولیکی پیاده‌سازی کردند.

کایاکان و کایناک [۲۳] با ترکیب مود لغزشی و IT2FS و به کمک شبکه عصبی با توابع عضویت مثلثی به کنترل سرعت یک سروو موتور پرداختند. آن‌ها به جای حداقل‌سازی یک تابع خطا، وزن‌های شبکه عصبی را به گونه‌ای تنظیم کردند که که معادله تعادل برقرار باشد. با این وجود عملکرد زمان واقعی الگوریتم آن‌ها نیاز به اثبات عملی دارد.

نیکنام و همکاران [۲۴] یک کنترل‌کننده بهینه را بر مبنای ترکیب منطق فازی نوع دوم و مود لغزشی برای کنترل دسته‌ای خاص از سیستم‌های غیرخطی ارائه دادند. بدین منظور الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم پارامترهای توابع عضویت ورودی و خروجی به کار رفت. با وجود عملکرد مناسب الگوریتم، محدودیت سیستم دینامیکی تک ورودی-تک خروجی<sup>۱</sup> (SISO) و معادلات آن در این روش وجود دارد.

کیماسی و موسویان [۲۵] از دو کنترل‌کننده سینماتیکی و دینامیکی برای پایداری حرکت ربات متحرک چرخ‌دار به همراه یک تریلر حول مسیرهای زمانی استفاده کردند. آن‌ها کنترل سینماتیکی پشخورد خروجی و کنترل مود لغزشی فازی را به کار گرفتند. آن‌ها از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی جهت نشان دادن عملکرد الگوریتم خود استفاده کردند.

سلطانپور و همکاران [۲۶] به منظور غلبه بر اثر نوسانات ناخواسته روش مود لغزشی، از تقریب فازی لایه مرزی نامعینی‌های موجود در سیستم استفاده کردند. پیش از آن، با استفاده از روش پشخورد خطی‌ساز، نامعینی سیستم مورد نظر خود را کاهش مرتبه دادند. روش مورد نظر برای پاندول معکوس به کار گرفته شد. با این وجود، به کارگیری این روش محدود به نوع سیستم غیرخطی مسئله می‌باشد.

هندل و همکاران [۲۷] با استفاده از HOSM نوسانات ناخواسته سیستم نامعین خود را کاهش داده و سپس با به کارگیری منطق فازی نوع دوم تقریب بخش نامعین معادلات سیستم را انجام دادند. آن‌ها روش خود را روی یک سیستم با دو متغیر حالت شبیه‌سازی کردند.

نایک و همکاران [۲۸] برای یک بازوی دولینکی، به مقایسه کنترل-کننده فازی-PD و مود لغزشی پرداختند. به علاوه آن‌ها برای هر دو کنترل-کننده از روش‌های مدل‌مبنا و بدون مدل استفاده کردند. در نهایت کنترل-کننده فازی-مود لغزشی طراحی شده دارای مزایای هر دو تکنیک بود. شبیه-سازی‌های انجام شده نشان‌دهنده عملکرد مثبت کنترل‌کننده و خطای مناسب تعقیب مسیر بود.

<sup>۱</sup> Single Input-Single Output

فرهمند و همکاران [۲۹] از یک کنترل کننده غیرخطی ترکیبی فازی-مود لغزشی در ربات پرنده استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از منطق فازی به عنوان حلقه بیرونی کنترل کننده و مود لغزشی فرایپیش در حلقه داخلی موفق به کاهش نوسانات ناخواسته کنترل کننده نسبت به روش کلاسیک آن شدند و شبیه سازی فرآیند را در نرم افزار Simulink ارائه دادند.

کامسی و همکاران [۳۰] با بهره گیری از منطق فازی نوع دوم تجهیز شده با شبکه عصبی، به کنترل یک ربات پرنده پرداختند. مود لغزشی مرتبه اول بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات، در جهت تنظیم پارامترهای شبکه عصبی به کار گرفته شد.

لی و همکاران [۳۱] کنترل کننده‌ای را بر مبنای مود لغزشی بهینه برای بلوک اصلی IT2FS ارائه دادند. سطح لغزش انتگرالی به خنثی کردن اختلال و حداقل ساختن خطای کنترل کمک کرده است. با وجود عملکرد مناسب کنترل کننده در شبیه سازی پاندول معکوس، سیستم دارای نوسانات ناخواسته قابل توجه می باشد.

فریطوس و همکاران [۳۲] برای یک بازوی مکانیکی با پایه ثابت که دارای دینامیک ناشناخته و متغیر است به کمک منطق فازی و شبکه عصبی پویا وظیفه تعقیب مسیر را انجام دادند. آن‌ها بر اساس کاهش خطا و نرخ خطای زاویه مفاصل، وزن های شبکه عصبی را بروزرسانی کردند.

### ۳- سیستم و هدف کنترلی

در این مقاله یک بازوی رباتیکی صلب و  $n$  لینکی که معادله دینامیکی کلی آن به فرم (۱) است به عنوان سیستم مورد بحث انتخاب شده است. به کارگیری معادلات اوپلر-لاگرانژ به معادله زیر منتج می شود:

$$B(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \quad (1)$$

در معادله (۱) حالت (state) سیستم برابر با موقعیت زاویه ای مفصل است که  $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب زاویه ای مفصل می باشد. ماتریس  $B(q)$  ماتریس جرم و اینرسی مثبت معین و  $N(q, \dot{q})$  عبارات غیرخطی سیستم می باشد. با بازنویسی معادله (۱) خواهیم داشت:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_d\dot{q} + F_s(\dot{q}) + \tau_d(q, \dot{q}) + g(q) = \tau \quad (2)$$

در معادله (۲)  $C(q, \dot{q})$  بیانگر ماتریس شتاب های کوریولیس، اصطکاک استاتیکی است.  $F_s(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$  و  $F_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$  به ترتیب ماتریس ضرایب دینامیکی و بردار اصطکاک استاتیکی است.  $\tau_d(q, \dot{q})$  ماتریس اختلال های ناشناخته خارجی است که تنها محدودیت آن متناسب بودن مقدار آن با ابعاد و وزن ربات است به طور مثال از یک بازوی رباتیکی سبک نمی توان انتظار تحمل هر دامنه اختلالی را داشت.  $g(q)$  نیز بیانگر بردار گرانشی است.  $\tau$  نیز بردار گشتاور کنترلی است. در معادله (۲) فرض می شود که سیستم دارای نامعینی پارامتری است و مقادیر جرم و اینرسی لینک های ربات ناشناخته است. هدف کنترلی طراحی کنترل کننده به گونه ای است که مسیر مرجع دلخواه  $q_d \in \mathbb{R}^n$  را در حضور نامعینی پارامتری و اختلال ناشناخته طی کرده و خطای تعقیب مسیر آن در زمان محدود در بازه ای کوچک و منطقی قرار گیرد. به علاوه نیازی به محاسبات پیچیده آفلاین نباشد.

### ۴- طراحی کنترل کننده

در این قسمت ابتدا ریاضیات کنترل کننده فازی نوع دوم مبتنی بر شبکه عصبی به عنوان بلوک اصلی سیستم کنترلی ارائه و سپس معادلات مربوط به کنترل کننده مود لغزشی که حلقه بیرونی فرآیند را تشکیل می دهد، بیان

می شود. در ادامه سیستم نهایی کنترلی و نمودار بلوکی آن نشان داده می شود.

### ۴-۱- کنترل کننده فازی نوع دوم مبتنی بر شبکه عصبی

مجموعه فازی نوع-۲ A را به صورت رابطه (۳) یا (۴) نمایش می دهند [۳۳].

$$A = \int_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{x} = \int_{x \in X} \left[ \int_{u \in X} \frac{f_X(u)}{u} \right] / x \quad (3)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | \forall x \in X\} \quad (4)$$

در این روابط X مجموعه مرجع، x متغیر اولیه یا متغیر اصلی، مانند فشار یا دما می باشد.  $\mu_A(x)$  تابع عضویت ثانویه است.  $f_X \subseteq [0, 1]$  مجموعه ای از درجات عضویت اولیه می باشد. u متغیر ثانویه،  $f_X(u) \subseteq [0, 1]$  درجه عضویت ثانویه است. زاده [۲] در ابتدا مجموعه فازی نوع-۲ را به صورت رابطه های (۵) و (۶) بیان کرد.

$$A = \bigcup_{\forall x \in X} \mu_A(x) \quad (5)$$

$$\mu_A(x) = \int_{u \in J_X} \frac{\mu_A(x, u)}{u}; \mu_A(x, u) = W_{x_i} \quad (6)$$

$$0 \leq W_{x_i} \leq 1$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

که در آن  $\mu_A(x)$  تابع عضویت یا برش عمودی است. شواهد مختلفی وجود دارد که نشان دهنده عملکرد بهتر منطق فازی نوع دوم نسبت به اول است؛ به ویژه زمانی که سطح بالایی از نامعینی و دینامیک غیرخطی در مسئله وجود داشته باشد [۳۳]. با این وجود هزینه محاسباتی نوع دوم به دلیل وجود فرآیند کاهش نوع<sup>۱</sup> مانند الگوریتم های تکرار شونده کارنیک و مندل<sup>۲</sup> (KM) به مراتب بالاتر است.

شبکه عصبی<sup>۳</sup> (NN) راه حل مناسبی به منظور تخمین عبارات کنترلی بدون دانش قبلی درباره پارامترها و دینامیک سیستم و در نتیجه کاهش حجمی از محاسبات است [۳۴]. شکل ۱ ساختار یک شبکه عصبی فازی نوع دوم بازه ای<sup>۴</sup> را نشان می دهد (IT2FNN). پنج سطح مختلف IT2FNN شامل موارد زیر است [۳۳]:

- سطح ورودی (سطح ۱) که متغیرهای ورودی IT2FNN در این سطح تعریف می شوند

- سطح عضویت (سطح ۲) که هر گره در این سطح نشان دهنده یک تابع عضویت است. FOU توسط توابع عضویت

بالا  $(\bar{\mu}(x_i))$  و پایین  $(\underline{\mu}(x_i))$  تعریف می شود [۲۰]

$$\bar{\mu}(x_i) = \begin{cases} N(\underline{\xi}, \sigma_i^2, x_i), x_i < \underline{\xi} \\ 1, \underline{\xi} \leq x_i < \bar{\xi} \\ N(\bar{\xi}, \sigma_i^2, x_i), x_i > \bar{\xi} \end{cases} \quad (7)$$

$$\underline{\mu}(x_i) = \begin{cases} N(\underline{\xi}, \sigma_i^2, x_i), x_i \leq \frac{\underline{\xi} + \bar{\xi}}{2} \\ N(\bar{\xi}, \sigma_i^2, x_i), x_i > \frac{\underline{\xi} + \bar{\xi}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

<sup>1</sup> Type Reduction Process

<sup>2</sup> Karnik and Mendel

<sup>3</sup> Neural Network

<sup>4</sup> Interval Type 2 Fuzzy Neural Network

- سطح خروجی (سطح ۵) که در آن هر خروجی به عنوان یک غیرفازی سازا عمل می‌کند و متغیر خروجی نهایی به صورت (۱۴) خواهد بود [۱۹].

$$y = \frac{y_l + y_r}{2} = \frac{W_l^T g_l + W_r^T g_r}{2} \quad (14)$$

به طور کلی این ساختار نیاز از پیش تعیین شده ندارد و می‌تواند بر اساس ورودی و خروجی سیستم کنترلی به ساخت برخط<sup>۲</sup> یادگیری خود بپردازد. با این وجود با دانش فرد خبره در ایجاد قوانین اولیه می‌توان به عملکرد بهتری رسید. این ساختار قوانین می‌تواند بر مبنای خروجی یک کنترل‌کننده مود لغزشی مرتبه بالا باشد که در قسمت بعد به توضیح مختصر آن پرداخته شده است.

#### ۴-۲- کنترل مود لغزشی

به طور کلی، طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی شامل دو لایه است [۲۶]:  
 (۱) طراحی سطح لغزش که مرتبه سیستم حلقه بسته را کاهش داده و یک رفتار مقاوم را برای رساندن سیستم به نقطه تعادل انجام می‌دهد؛ (۲) انتخاب قانون کنترلی صحیح برای رساندن سیستم به سطح لغزش و تضمین باقی ماندن روی آن.  
 سیستم ساده (۱۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x) + b(x)u \quad (15)$$

که در آن  $x$  بردار حالات سیستم،  $u$  بردار ورودی کنترلی و  $f(x)$  تابعی غیرخطی است که علامت و محدوده آن توسط تابع پیوسته  $x$  تعیین می‌شود. مسئله کنترل، تعقیب بردار مطلوب (۱۶) توسط حالات سیستم است.

$$x_d = [x_d \quad \dot{x}_d \quad \dots \quad x_d^{(n-1)}]^T \quad (16)$$

علاوه بر وجود نامعینی،  $f(x)$  و  $b(x)$  از ورودی کنترلی محدود و شرایط اولیه به صورت (۱۷) استفاده می‌کند.

$$x_d(0) = x(0) \quad (17)$$

بردار (۱۸) خطای تعقیب نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = x - x_d = [e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)}]^T \quad (18)$$

فرض می‌شود که متغیر سطح  $s(t)$  در فضای حالات  $R^n$  به صورت معادله اسکالر (۱۹) برای مود لغزشی مرتبه اول تعریف می‌شود:

$$S(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (19)$$

$$n = 2 \rightarrow S = \dot{e} + \lambda e$$

که در آن  $\lambda$  ثابت مثبت است.

ضریب ورودی کنترلی  $b$  در (۱۵) نامعین است اما محدوده آن به صورت (۲۰) مشخص است.

$$0 < b_{\min} \leq b \leq b_{\max} \quad (20)$$

تخمین  $\hat{b}$  توسط میانگین هندسی (۲۱) قابل محاسبه است.

$$\hat{b} = (b_{\min} b_{\max})^{1/2} \quad (21)$$

که می‌تواند به صورت (۲۲) بازنویسی شود:

$$\beta^{-1} \leq \frac{b}{\hat{b}} \leq \beta \quad (22)$$

که در آن  $\beta = (b_{\max}/b_{\min})^{1/2}$ .

که در آن  $\sigma_l^j$  و  $\xi$  به ترتیب انحراف استاندارد و میانگین گوسی متغیر ورودی  $z$  می‌باشند.

- سطح قوانین (سطح ۳) که در آن هر گره متناظر با یک قانون فازی است و با عملگر فازی به منظور یافتن متغیر (۹) بکار می‌رود [۱۹]

$$F^i = \left[ \prod_{j=1}^n \bar{\mu}_{ji} \prod_{j=1}^n \mu_{ji} \right] = [\underline{f}^i, \bar{f}^i] \quad (9)$$

- سطح کاهش مرتبه (سطح ۴) که با فرض  $[\omega_l^j, \omega_r^j]$  به عنوان مرکز هندسی مجموعه فازی نوع دوم به محاسبه خروجی آن می‌پردازد. روابط (۱۰) و (۱۱) الگوریتم KM را نمایش می‌دهد [۲۲]

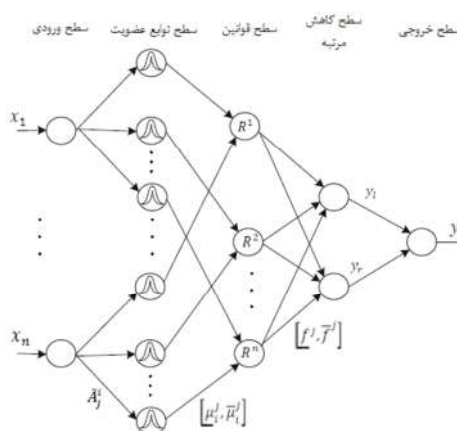
$$y_l = \frac{\sum_{j=1}^L \underline{f}^j w_l^j + \sum_{j=L+1}^M \bar{f}^j w_l^j}{\sum_{j=1}^L \underline{f}^j + \sum_{j=L+1}^M \bar{f}^j} = W_l^T g_l \quad (10)$$

$$y_r = \frac{\sum_{j=1}^R \underline{f}^j w_r^j + \sum_{j=R+1}^M \bar{f}^j w_r^j}{\sum_{j=1}^R \underline{f}^j + \sum_{j=R+1}^M \bar{f}^j} = W_r^T g_r \quad (11)$$

که در آن  $g_l = [\omega_l^1, \dots, \omega_l^M]^T$  و  $W_r = [\omega_r^1, \dots, \omega_r^M]^T$  و  $g_r$  و  $W_l$  به ترتیب در روابط ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌اند: [۱۹]

$$g_l = \left[ \frac{f_l^1}{\sum_{i=1}^M f_l^i}, \dots, \frac{f_l^M}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \right]^T \quad (12)$$

$$g_r = \left[ \frac{f_r^1}{\sum_{i=1}^M f_r^i}, \dots, \frac{f_r^M}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \right]^T \quad (13)$$



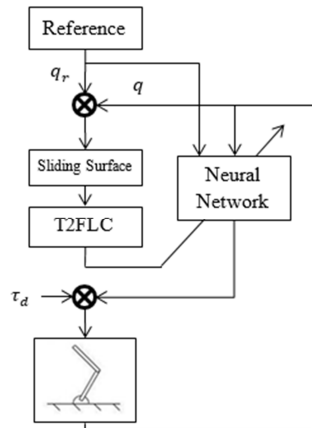
شکل ۱- ساختار یک شبکه عصبی فازی نوع دوم بازه‌ای IT2FNN

<sup>1</sup> Defuzzifier

<sup>2</sup> Online

و کنترل کننده فازي نوع دوم مبتنی بر خروجی سطح لغزش مرتبه بالا عمل می کند. اختلال خارجی با  $\tau_d$  نشان داده شده است.

ورودی کنترل کننده فازي نوع دوم،  $s$  و مشتق آن است. هر کدام از سیگنال های ورودی و خروجی کنترل کننده دارای ۵ مجموعه فازي مرتبه دوم NB، NS، ZE، PS و PB است که به ترتیب منفی بزرگ، منفی کوچک، صفر، مثبت کوچک و مثبت بزرگ نامیده می شود. بازه ورودی با پیش بینی  $s$  در حضور اختلال انجام شده است که این مقدار در شبیه سازی از ۳- تا ۳ در نظر گرفته می شود.



شکل ۲- سیستم نهایی کنترلی عملگر رباتیکی

توابع عضویت به فرم گوسی در نظر گرفته شده است. قوانین فازي با تحلیل حرکت رسیدن به سطح لغزش نوشته شده است. به طور مثال اگر حالات سیستم از سطح لغزش دور باشد و سرعت حرکت کوچک باشد، به ورودی بزرگی نیاز است تا فاصله از سطح لغزش کاهش یابد. پایگاه قوانین در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- پایگاه قوانین فازي کنترل کننده

| $s \backslash \dot{s}$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|------------------------|----|----|----|----|----|
| PB                     | ZE | NM | NB | NB | NB |
| PS                     | PM | ZE | NM | NB | NB |
| ZE                     | PB | PM | ZE | NM | NB |
| NS                     | PB | PB | PM | ZE | NM |
| NB                     | PB | PB | PB | PM | ZE |

شکل ۳ نگاشت خطا و مشتق خطای حالات سیستم را به سطح لغزش نشان می دهد. سپس با کنترل کننده فازي نوع دوم و اعمال قوانین فازي با توابع عضویت تعریف شده، خروجی کنترل کننده براساس پایگاه قوانین جدول ۱ محاسبه می شود.

کنترل کننده لغزشی به منظور دنبال کردن منحنی مطلوب  $x_d$  طراحی شده است. سیگنال کنترلی  $u(t)$  به گونه ای محاسبه شده است که سیستم حلقه بسته به سطح لغزش  $s(t)$  رسیده و روی آن باقی بماند. سیگنال کنترلی  $u(t)$  برای باقی ماندن روی این سطح را  $\hat{u}(t)$  می نامیم. با قرار دادن  $\dot{s}(t) = 0$  سیگنال کنترلی مورد نظر مطابق رابطه ی (۲۳) به دست می آید.

$$\dot{u} = \frac{1}{b}(-\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda\dot{e} - \lambda^2 e) = \frac{1}{b}\ddot{u} \quad (23)$$

برای عملگر رباتیکی رابطه (۲)، معادله دینامیکی را می توان به صورت (۲۴) بازنویسی کرد:

$$\ddot{q} = B^{-1}[\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)] \quad (24)$$

که در آن،

$$\hat{f} = B^{-1}[-C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)] \quad (25)$$

$$b = B^{-1} \quad (26)$$

با انتخاب سطح لغزش به صورت (۲۷) خواهیم داشت [۲۷]:

$$s = K_I \int e + K_P e + K_D \dot{e} \quad (27)$$

$$\dot{u}_{eq} = (K_D \hat{b})^{-1} [K_P \dot{e} + K_I e + K_D (\hat{f} \cdot \dot{q} + \hat{b}g(q) + \ddot{q}_d)] \quad (28)$$

برای تضمین رسیدن به رفتار مطلوب یک سیستم حلقه بسته، کنترل کننده مود لغزشی به یک مکانیزم کلیدزنی با سرعت بالا نیازمند است. در حالی که به علت محدودیت فیزیکی در سیستم های واقعی، اعمال مستقیم الگوریتم کنترلی بالا همواره منجر به نوسانات در مجاورت سطح لغزش می شود که به آن پدیده ی نوسانات ناخواسته می گویند.

دو مکانیزم وجود دارد که موجب ایجاد پدیده ی نوسانات ناخواسته می شوند [۲۸]. اولی مربوط به کلیدزنی غیر ایده آل می باشد مانند تأخیر زمانی یا ثابت زمانی که در تمامی دستگاه های پیاده سازی کلیدزنی وجود دارد. در دومین مکانیزم اگر دستگاه کلیدزنی ایده آل باشد و توانایی کلیدزنی در فرکانس بسیار بالا را داشته باشد، دینامیک اغتشاش موجود، مانند دینامیک مدل نشده نیز می تواند در همسایگی سطح لغزش موجب پدیده ی نوسانات ناخواسته شود. به عبارت دیگر از آنجایی که پیاده سازی کنترل کننده مود لغزشی به صورت ایده آل صورت نمی گیرد و محرک ها نیز قادر به کلیدزنی لحظه ای نمی باشند و با تأخیر این کار را انجام می دهند. همچنین چون مقدار متغیر لغزش که مجموع وزن دار خطا می باشد با دقت بینهایت معلوم نمی باشد، پدیده نوسانات ناخواسته اتفاق می افتد.

به منظور دستیابی به کنترل کننده مقاوم تر و داشتن سیگنال های هموارتر، مود لغزشی مرتبه بالاتر به صورت روابط (۲۹) تا (۳۱) نوشته می شود [۲۷]

$$S(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (29)$$

$$n = 3 \rightarrow S = K_D \ddot{e} + K_P \dot{e} + K_F \ddot{e} \quad (30)$$

$$\dot{u}_{eq} = (K_D \hat{b})^{-1} [K_P \dot{e} + K_F \ddot{e} + K_D (\hat{f} \cdot \dot{q} + \hat{b}g(q) + \ddot{q}_d)] \quad (30)$$

$$u = \hat{b} \left[ \dot{u}_{eq} - K_{sat} \left( \frac{S}{\phi} \right) \right] \quad (31)$$

### ۴-۳- سیستم نهایی کنترلی

شکل ۲ دیاگرام کلی سیستم حلقه بسته را نشان می دهد. بلوک سطح لغزش از معادله (۲۹) پیروی می کند. ورودی کنترلی سیستم شامل مقدار محاسبه شده توسط شبکه عصبی است که بر اساس سیگنال خروجی سیستم و مرجع

که در آن  $\alpha$  یک عدد مثبت با مقدار کافی زیاد و بزرگتر از عدد مثبت  $\gamma$  است. واضح است که با جایگذاری (۳۸) در (۳۷) و اعمال دو عملگر جمع در رابطه (۳۷)، صورت و مخرج این رابطه ساده شده و رابطه (۳۹) بدست می‌آید. از آنجایی که با نشان دادن منفی معین بودن مشتق لیاپانوف (در عین مثبت معین بودن تابع لیاپانوف (رابطه (۳۲)) و بر اساس قضیه لیاپانوف، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته و میل نمودن خطای ردیابی به سمت صفر اثبات می‌گردد، لذا با اعمال حد بالای تابع علامت، منفی معین بودن مشتق تابع لیاپانوف ثابت می‌گردد:

$$\dot{V} = \tau_f(-\alpha \operatorname{sgn}(\tau_f) + \dot{\tau}) < (-\alpha|\tau_f| + |\tau_f|\gamma) < 0 \quad (39)$$

## ۶- مطالعه موردی

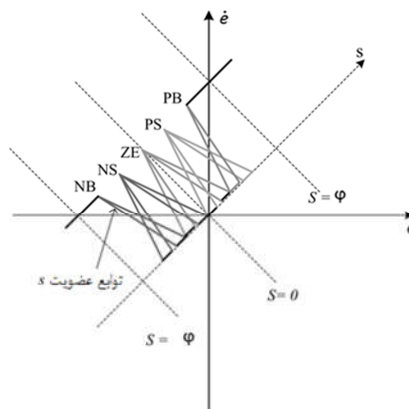
الگوریتم ارائه شده در این مقاله در شبیه‌سازی یک عملگر صفحه‌ای دو لینکی صلب به کار گرفته شده است. پارامترهای دینامیکی بازو (که نامعینی پارامتری سیستم نیز هستند) شامل جرم لینک‌ها ( $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$ ) و طول لینک‌ها ( $l_1 = l_2 = 0.5 \text{ m}$ ) است [۲۰]. نامعینی‌های دیگر شامل اثرات دینامیکی مانند اصطکاک استاتیکی، لزجت غیرخطی و لقی توسط عبارات (۴۰) و (۴۱) تعیین شده‌اند [۲۰].

$$F_d \dot{q} = \begin{bmatrix} f_{d1} \dot{q}_1 \\ f_{d2} \dot{q}_2 \\ f_{d3} \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \dot{q}_1 \\ 5 \dot{q}_2 \\ 5 \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$F_s(\dot{q}) = \begin{bmatrix} f_{s1} \operatorname{sign}(\dot{q}_1) \\ f_{s2} \operatorname{sign}(\dot{q}_2) \\ f_{s3} \operatorname{sign}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \operatorname{sign}(\dot{q}_1) \\ 5 \operatorname{sign}(\dot{q}_2) \\ 5 \operatorname{sign}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (41)$$

به منظور بررسی عملکرد روش ارائه شده، دو شبیه‌سازی بر اساس اختلال خارجی وارد شده به سیستم انجام شده است. اختلال اول شامل یک موج سینوسی با دامنه مشخص و اختلال دوم یک سیگنال تصادفی است. مسیر مطلوب ربات ( $q_d(t) = 1 - \cos(\pi(t-1))$ ) است که یک سیگنال متناوب برای زاویه مفاصل بوده و از آنجا که مقدار شروع آن برابر ۲ رادیان است می‌تواند برای کنترل‌کننده ایجاد چالش کند. پارامترهای کنترلی سطح لغزش (۲۹) برابر  $K_p = \operatorname{diag}\{300, 300, 300\}$  و  $K_D = \operatorname{diag}\{20, 20, 20\}$  در نظر گرفته شده است.

شکل‌های ۴ تا ۹، نتایج شبیه‌سازی را برای اختلال سینوسی با دامنه قابل توجه با مقایسه روش پیشنهادی و مود لغزشی کلاسیک نشان می‌دهد. فرکانس اختلال به اندازه‌ای کوچک است که بتواند عملکرد ربات را با چالش روبرو کند (معادله (۴۲)). شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب عملکرد دو روش را در تعقیب مسیر لینک‌های اول و دوم نشان می‌دهند. با وجود آنکه هر دو الگوریتم در نهایت موفق به تعقیب مسیر شده‌اند، روش پیشنهادی مقاله به شکل مؤثر و در زمان قابل قبول (کمتر از ۱ ثانیه) به همگرایی رسیده است. به عبارت دیگر، SMC در تعقیب مسیر مورد نظر تا حدی دچار مشکل شده است که نامعینی پارامتری و اندازه دامنه اختلال خارجی عوامل ایجاد آن هستند. همچنین شکل‌های ۶ و ۷، گشتاور کنترلی لازم در دو روش را نشان می‌دهد. آنچه واضح است SMC به محض آغاز همگرایی خود روی مسیر، دچار نوسانات ناخواسته قابل توجهی می‌گردد. اگرچه هر دو کنترل‌کننده باید مقدار گشتاور تولیدی خود را در بازه ۲۰- تا ۲۰ نیوتون متر حفظ کنند (که این خود یکی از علت‌های بروز نوسانات ناخواسته است)، اما کنترل‌کننده IT2FC-HOSMC با وجود گشتاور هموارتر از این مشکل جلوگیری کرده است. شکل‌های ۸ و ۹ نیز خطای دو زاویه مفصل را برای هر دو روش نشان



شکل ۳- نگاشت خطا و مشتق خطای حالات سیستم به سطح لغزش و نگاشت سطح لغزش به توابع عضویت فازی نوع دوم

## ۵- پایداری سیستم حلقه بسته

با فرض خروجی کنترل‌کننده فازی  $\tau_f$  و خروجی شبکه عصبی  $\tau_n$ ، تابع لیاپانوف مثبت معین (۳۲) در نظر گرفته می‌شود [۱۲]

$$V = \frac{1}{2} \tau_f^2(t) \quad (32)$$

$$\dot{V} = \tau_f \cdot \dot{\tau}_f = \tau_f (\dot{\tau}_n + \dot{\tau}) \quad (33)$$

که در آن  $\tau$  مجموع گشتاور فازی و شبکه عصبی وارد بر سیستم است. از آنجایی که خروجی شبکه عصبی به فرم (۳۴) تعریف می‌شود

$$\tau_n = \frac{q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \bar{W}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}} + \frac{(1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \bar{W}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}} \quad (34)$$

$$\dot{\tau}_n = q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + (1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} \quad (35)$$

لذا

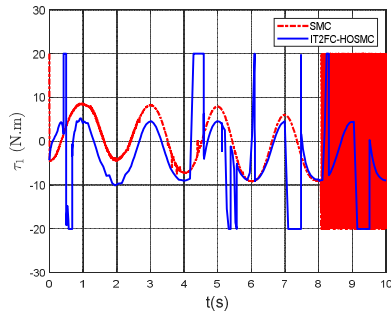
$$\dot{V} = \tau_f (q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + (1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} \bar{W}_{ij}) + \dot{\tau} \quad (36)$$

از آنجایی که مشتقات وزن‌های  $\bar{W}_{ij}$  و  $\bar{W}_{ij}$  برابر صفر است، مشتق تابع لیاپانوف به فرم (۳۷) بازنویسی می‌شود:

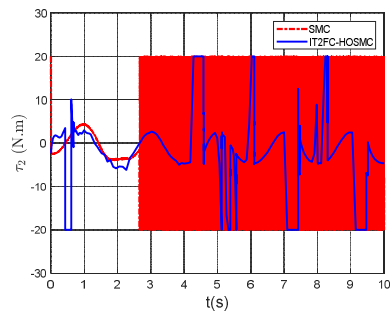
$$\dot{V} = \tau_f (\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \dot{f}_{ij} (q \bar{W}_{ij} + (1-q) \bar{W}_{ij}) + \dot{\tau}) \quad (37)$$

با تعریف  $f_{ij}$  به صورت (۳۸) خواهیم داشت:

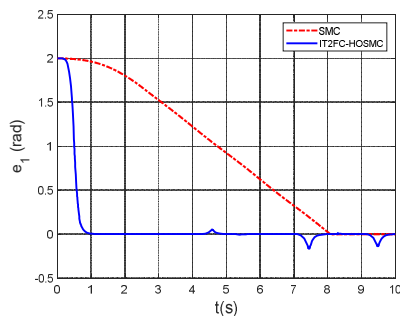
$$\dot{f}_{ij} = - \frac{q \bar{W}_{ij} + (1-q) \bar{W}_{ij}}{(q \bar{W}_{ij} + (1-q) \bar{W}_{ij})^T (q \bar{W}_{ij} + (1-q) \bar{W}_{ij})} \alpha \operatorname{sgn}(\tau_f) \quad (38)$$



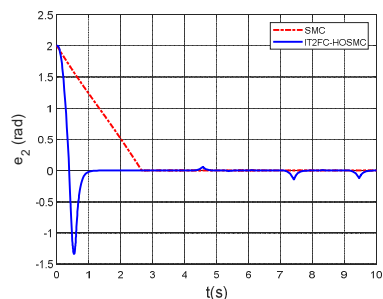
شکل ۶- SMC و IT2FC-HOSMC در گشتاور کنترلی مفصل اول و اختلال سینوسی



شکل ۷- SMC و IT2FC-HOSMC در گشتاور کنترلی مفصل دوم و اختلال سینوسی



شکل ۸- SMC و IT2FC-HOSMC در خطای کنترلی مفصل اول و اختلال سینوسی

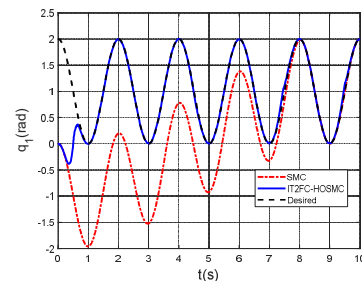


شکل ۹- SMC و IT2FC-HOSMC در خطای کنترلی مفصل دوم و اختلال سینوسی

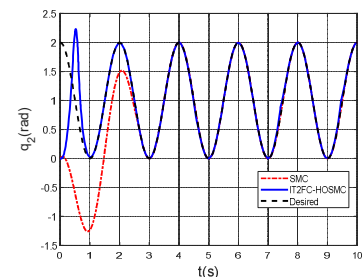
می‌دهد که شروع خطا از ۲ رادیان (به علت قرار دادن شرایط اولیه در مقدار صفر) بدیهی است. بطور کلی روش پیشنهادی که بر اساس منطق فازی مبتنی بر شبکه عصبی عمل می‌کند، می‌تواند در برابر نامعینی پارامتری و اختلال خارجی قابل تو عملکرد مثبتی داشته و سیگنال‌های کنترلی هموارتری را ارائه دهد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به مقایسه دو کنترل‌کننده SMC و IT2FC-HOSMC در حضور اختلال تصادفی پرداخته است. تأخیر در همگرایی و نوسانات ناخواسته بسیار زیاد SMC در کنترل‌کننده IT2FC-HOSMC بهبود یافته است. بگونه‌ای که همگرایی ۸ ثانیه‌ای SMC برای مفصل اول در روش پیشنهادی به ۱ ثانیه رسیده است. همانطور که از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز مشخص است، نوسانات ناخواسته موجود در گشتاور کنترلی SMC با آغاز همگرایی به شدت افزایش یافته است در حالی که روش پیشنهادی در اختلال تصادفی نیز دارای گشتاور کنترلی همواری می‌باشد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نیز خطای تعقیب مسیر دو روش را در حضور اختلال تصادفی نشان می‌دهند. ذکر این نکته مهم است که در اختلال‌های شدیدتر، SMC کاملاً پروفایل اختلال را در عملکرد خود و تعقیب مسیر وارد می‌کند. بطور کلی هر الگوریتم کنترلی بر اساس قدرت اختلال خارجی به تقلید پروفایل اختلال در تعقیب مسیر مرجع می‌پردازد که آن را آستانه مقاومت اختلالی (PRT) نامیده‌ایم. بر طبق شبیه‌سازی‌هایی که انجام شد، الگوریتم پیشنهادی کنترلی مقاله PRT بیشتری را نسبت به SMC نشان داد.

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 20 + 20\sin(20(t-1)) + 30\sin(10(t-0.5)) + 20u(t-0.5) + 20u(t-1) \\ 20 + 20\sin(20(t-1)) + 30\sin(10(t-0.5)) + 20u(t-0.5) + 20u(t-1) \\ 20 + 20\sin(20(t-1)) + 30\sin(10(t-0.5)) + 20u(t-0.5) + 20u(t-1) \end{bmatrix} \quad (42)$$

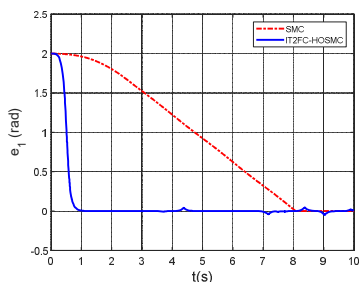


شکل ۴- SMC و IT2FC-HOSMC در تعقیب مسیر مفصل اول و اختلال سینوسی

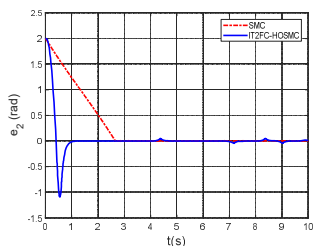


شکل ۵- SMC و IT2FC-HOSMC در تعقیب مسیر مفصل اول و اختلال سینوسی





شکل ۱۴ SMC و IT2FC-HOSMC در خطای کنترلی مفصل اول و اختلال تصادفی



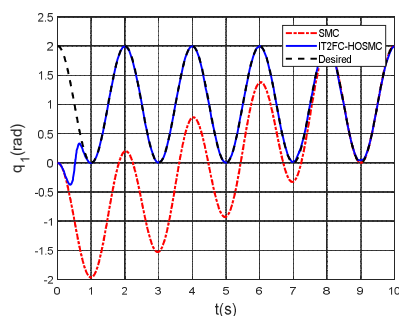
شکل ۱۵ SMC و IT2FC-HOSMC در خطای کنترلی مفصل دوم و اختلال تصادفی

## ۷- بحث و نتیجه گیری

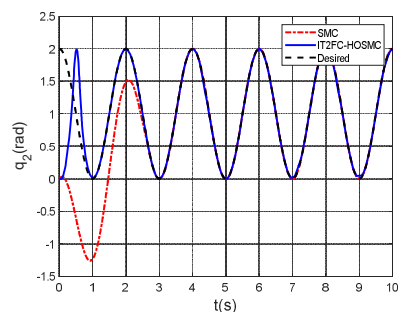
در این مقاله به ارائه کنترل کننده جدید به منظور مواجهه یک عملگر رباتیکی با اختلال های خارجی قابل توجه ترکیب شده با نامعینی پارامتری پرداخته شد. در این راستا الگوریتم استفاده شده بر اساس شبکه عصبی، منطق فازی نوع دوم و سطح لغزش مرتبه بالا به بهبود مقاومت کنترل کننده در برابر دو نوع سیگنال اختلال سینوسی و تصادفی منجر شد. همانطور که در نتایج کنترل کننده SMC مشخص بود، با محدود نمودن گشتاور تولیدی در بازه ۲۰- و ۲۰ نیوتن متر و در حضور اختلال و نامعینی پارامتری، بروز نوسانات ناخواسته به ویژه در خروجی کنترلی قابل پیش بینی است. با این حال الگوریتم کنترلی IT2FC-SMC با در نظر گرفتن این محدودیت در تولید گشتاور، مقاوم بودن خود را حفظ کرده است. آنچه در کار آتی و در ادامه این موضوع مد نظر است، بهبود زمان اجرای الگوریتم حاضر به عنوان یک کنترل کننده غیرخطی با قابلیت اجرای زمان واقعی می باشد. استفاده از شبکه عصبی و تنظیم پارامترهای آن می تواند یک ایده برای شروع باشد.

## ۸- مراجع

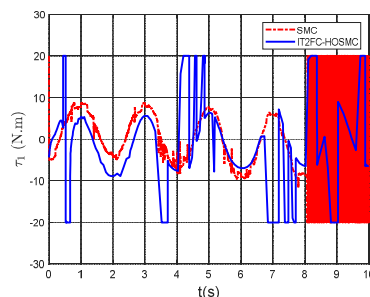
- [1] Zadeh L. A., Fuzzy sets. *Information and control*, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, 1965.
- [2] Zadeh L. A., The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, Vol. 8, No. 3, pp. 199-249, 1975.
- [3] Mendel J. M., John R. I. and Liu F, Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*, Vol. 14, No. 6, pp. 808-821, 2006.
- [4] Laguech S., Aloui S., Pagès O., El Hajjaji A. and Chaari A., Adaptive type-2 fuzzy sliding mode control for MIMO nonlinear systems: application to a turbocharged diesel engine, *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, IEEE, pp. 203-210, 2015.
- [5] Zirkohi M. M. and Lin T. C., Interval type-2 fuzzy-neural network indirect adaptive sliding mode control for an active suspension system. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 79, No. 1, pp. 513-526, 2015.



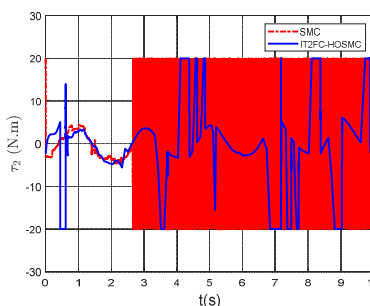
شکل ۱۰ SMC و IT2FC-HOSMC در تعقیب مسیر مفصل اول و اختلال تصادفی



شکل ۱۱ SMC و IT2FC-HOSMC در تعقیب مسیر مفصل دوم و اختلال تصادفی



شکل ۱۲ SMC و IT2FC-HOSMC در گشتاور کنترلی مفصل اول و اختلال تصادفی



شکل ۱۳ SMC و IT2FC-HOSMC در گشتاور کنترلی مفصل دوم و اختلال تصادفی

- [26] Soltanpour M. R., Khooban M. H. and Khalghani M. R., An optimal and intelligent control strategy for a class of nonlinear systems: adaptive fuzzy sliding mode. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 22, No. 1, pp. 159-175, 2016.
- [27] Hendel R., Khaber F. and Essounbouli N., Adaptive type-2 fuzzy second order sliding mode control for nonlinear uncertain chaotic system. *arXiv preprint arXiv:1601.04245*, 2015.
- [28] Naik P. R., Samantaray J., Roy B. K. and Pattanayak S. K., 2-DOF robot manipulator control using fuzzy PD control with SimMechanics and sliding mode control: A comparative study. *2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, IEEE, pp. 1-6.
- [29] Farahmand M., Ghasemi R. and Salari M., Fuzzy Hybrid Super-Twisting Sliding Mode Controller Design for a Class of Nonlinear Dynamics of a Quadrotor. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 307-316, 2018.
- [30] Camci E., Kripalani D. R., Ma L., Kayacan E. and Khanesar M. A., An aerial robot for rice farm quality inspection with type-2 fuzzy neural networks tuned by particle swarm optimization-sliding mode control hybrid algorithm. *Swarm and evolutionary computation*, Vol. 41, pp. 1-8, 2018.
- [31] Li H., Wang J., Wu L., Lam H. K. and Gao Y., Optimal guaranteed cost sliding-mode control of interval type-2 fuzzy time-delay systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 26, No. 1, pp. 246-257, 2018.
- [۳۲] فریطوس س. م.، ه. همایی، و هادیان جزی ش.، هوشمند سازی در کنترل فازی بازوهای مکانیکی ماهر صلب-انعطاف پذیر با کمک شبکه عصبی بازگشتی پویا، مهندسی مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۴، ص ۲۱۹-۲۲۸، ۱۳۹۶.
- [33] Hamza M. F., Yap H. J. and Choudhury I. A., Applications, Recent advances on the use of meta-heuristic optimization algorithms to optimize the type-2 fuzzy logic systems in intelligent control. *Neural Computing and Applications*, Vol. 28, No. 5, pp. 979-999, 2017.
- [34] Zeghlache S., Saigaa D. and Kara K., Fault tolerant control based on neural network interval type-2 fuzzy sliding mode controller for octorotor UAV. *Frontiers of Computer Science*, Vol. 10, No. 4, pp. 657-672, 2016.
- [6] Shabaninia F., Etedali N. and Ghadamyari A., Type-2 fuzzy sliding mode control for deployment of a robotic team. *Nonlinear Studies*, Vol. 21, No. 4, 2014.
- [7] Ramesh T., Panda A. K. and Kumar S. S., Type-1 and Type-2 fuzzy logic and sliding-mode based speed control of direct torque and flux control induction motor drives-A comparative study. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 385-400, 2013.
- [8] Hung J. Y., Gao W. and Hung J. C., Variable structure control: A survey. *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 40, No. 1, pp. 2-22, 1993.
- [9] Drakunov S. V. and Utkin V. I., Sliding mode control in dynamic systems. *International Journal of Control*, Vol. 55, No. 4, pp. 1029-1037, 1992.
- [10] Utkin V. I., Sliding modes in control and optimization: Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] Song F. and Smith S. M., Combine sliding mode control and fuzzy logic control for autonomous underwater vehicles. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, Eds., pp. 191-205: Springer, 2006.
- [12] Lin W. S. and Chen C. S., Applications, Robust adaptive sliding mode control using fuzzy modelling for a class of uncertain MIMO nonlinear systems. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, Vol. 149, No. 3, pp. 193-202, 2002.
- [13] Hu H. and Woo P. Y., Fuzzy supervisory sliding-mode and neural-network control for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 3, pp. 929-940, 2006.
- [14] Medhaffar H., Derbel N. and Damak T., A decoupled fuzzy indirect adaptive sliding mode controller with application to robot manipulator. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-29, 2006.
- [15] Efe M. Ö., Fractional fuzzy adaptive sliding-mode control of a 2-DOF direct-drive robot arm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 38, No. 6, pp. 1561-1570, 2008.
- [16] Huang Y. J., Kuo T. C. and Chang S. H., Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 38, No. 2, pp. 534, 2008.
- [17] Roopaei M., Zolghadri M. and Meshksar S., Enhanced adaptive fuzzy sliding mode control for uncertain nonlinear systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, No. 9-10, pp. 3670-3681, 2009.
- [18] Noroozi N., Roopaei, M. and Jahromi M. Z., Adaptive fuzzy sliding mode control scheme for uncertain systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, No. 11, pp. 3978-3992, 2009.
- [19] Hacioglu Y., Arslan Y. Z. and Yagiz N., MIMO fuzzy sliding mode controlled dual arm robot in load transportation. *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 348, No. 8, pp. 1886-1902, 2011.
- [20] Amer A. F., Sallam E. A. and Elawady W. M., Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators. *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 8, pp. 4943-4953, 2011.
- [21] Nekoukar V. and Erfanian A., Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 179, No. 1, pp. 34-49, 2011.
- [22] Cerman O. and Hušek P., Adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo mechanism. *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 11, pp. 10269-10277, 2012.
- [23] Kayacan E. and Kaynak O., Sliding mode control theory-based algorithm for online learning in type-2 fuzzy neural networks: application to velocity control of an electro hydraulic servo system. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 26, No. 7, pp. 645-659, 2012.
- [24] Niknam T., Khooban M. H., Kavousifard A. and Soltanpour M. R., An optimal type II fuzzy sliding mode control design for a class of nonlinear systems. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 75, No. 1-2, pp. 73-83, 2014.
- [25] Khalaji A. K. and Moosavian S. A. A., Design and Implementation of a Fuzzy Sliding Mode Control Law for a Wheeled Robot Towing a Trailer. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 81-88, 2014.