شناسایی سیستم‌های غیرخطی بر اساس منطق فازی توسعه یافته

فرناز صباحی[۱]، دانشجوی دکترای مهندسی کنترل، محمدرضا اکبرزاده توتونچی[۲]، استاد

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - مشهد – ایران - farnazsabahi@ymail.com

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد – مشهد - ایران - akbarzadeh@ieee.org

قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات.

چکیده: سیستم‌های فازی یکی از تثبیت شده‌ترین بخش ادبیات نظریه منطق فازی است. تحقیقات گسترده‌ای در این حوزه شده است که سودمند بودن این سیستم‌ها را نشان می‌دهند. با این حال، سیستم‌های فازی عیوبی نیز دارند به خصوص وقتی که بخش دامنه صفر در تابع عضویت مقدم در قانون اگر- آنگاه تهی نباشد. این مقاله، با نگاهی به رویکرد منطق فازی توسعه یافته که جدیداً توسط زاده معرفی شده است، به بسط سیستم‌های فازی با نگرش متفاوت ف-انتقالی استنتاج فازی می‌پردازد و سیستمی جدید به نام سیستم‌های فازی توسعه یافته را معرفی می‌کند. سیستم پیشنهادی شامل عملیات پردازش ورودی که حاوی فازی ساز و اعتبار ساز، پردازش خروجی شامل مبدل مجموعه و غیر فازی‌ساز علاوه بر بخش پردازش دانش و استنتاج است. نوآوری مشخص این مقاله معرفی ف-مودس پوننس در قالب فرموله کردن استنتاج تقریبی بر اساس منطق فازی توسعه یافته است. سپس، ساختار سیستم فازی توسعه یافته به عنوان تقریب‌گر عمومی پیشنهاد می‌شود و از آن برای شناسایی سیستم‌های غیرخطی که ملاحظات بیش‌تری نسبت بـه سیستم‌های خطی در شناسایی نیاز دارنـد استفاده می‌شود. تحلیل نتایج حـاصـل از شبیه‌سازی مبین برتری سیستم فازی توسعه یافته در مقایسه با سیستم‌های فازی است.

واژه‌های کلیدی: اعتبار، استدلال تقریبی، سیستم فازی، سیستم فازی توسعه یافته ، عدم قطعیت.

Nonlinear System Identification based on Extended Fuzzy Logic

F. Sabahi[1], . M.-R Akbarzadeh-T[2].
1,2 -Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Center of Excellence on Soft Computing and Intelligent Information Processing.

Abstract: One of the main parts of fuzzy logic theory is fuzzy systems. The extensive research in this area shows the applicability of the systems. However, fuzzy systems carry some shortcomings; especially, when the insignificant parts of the membership functions in the if-section of rules are not empty. This paper based on extended fuzzy logic, which recently introduce by Zadeh, extends fuzzy systems by *f*-transforming fuzzy inference and introduces an extended fuzzy system. The proposed extended fuzzy system involves the operations of input processing containing fuzzification and validification, output processing containing set-conversion and defuzzification, as well as knowledge processing and making inference. The main novelty of the paper is formulating approximate reasoning within extended fuzzy logic framework. Then the extended fuzzy system as universal approximator is proposed and applied to the identification of nonlinear systems that need more consideration than linear systems. The simulation results show priority of the proposed system when compared to the fuzzy system.

Keywords: Validity, Approximate Reasoning, Fuzzy System, Extended Fuzzy System, Uncertainty.

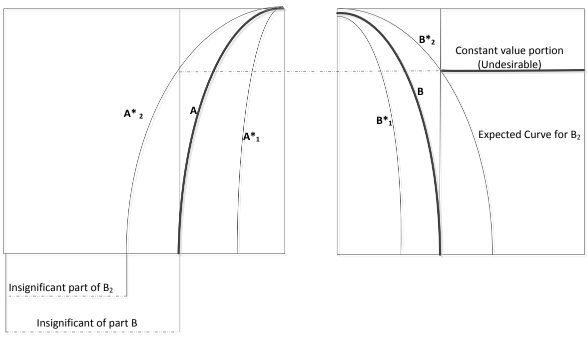
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۵/۱۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۶

نام نویسنده مسئول: فرناز صباحی
نشانی نویسنده مسئول: ایران– مشهد– دانشگاه فردوسی مشهد–دانشکده مهندسی.

۱- مقدمه

در سال ۱۹۶۵، زمانی که زاده در اندیشه نادقیقی بود، تفکر منطق فازی شکل گرفت. منطق فازی، ارائه دهنده چارچوبی جهت کنترل سیستم‌هایی می‌باشد که در آن به اطلاعات عددی دقیق از سیستم نیاز نیست و مکانیزم شناسایی دقیق فرآیند هم الزامی نیست. منطق فازی می‌تواند پدیده‌هایی که قابل تکرار نیستند و یا ادراک آن‌ها به عنوان یک تجربه امکان‌پذیر نیست و تحت شرایط مختلف حالت‌های متفاوتی دارند را تحلیل کند.

سیستم فازی از جمله بخش‌های پر کاربرد نظریه منطق فازی به ویژه در سیستم‌های کنترلی است. با این حال، سیستم‌های فازی با اشکالاتی نیز روبرو هستند. برای مثال، وقتی بخش بی اهمیت (دامنه صفر) در تابع عضویت A در قانون '$A \rightarrow B$' در '$x\ is\ A'$' تهی نباشد، بخش نتیجه '$y\ is\ B'$' یک انحراف جدی از نتیجه '$y\ is\ B$' در بعضی حالت‌ها پیدا می‌کند. برای توضیح مشخص‌تر، فرض کنید مجموعه‌های فازی A و B دو منحنی در شکل (۱) باشند. حالا اگر B^* به صورت B_1^* یا B_2^* داده شود، آن وقت با استفاده از قانون ترکیب روابط فازی مقادیر B^* به ترتیب منجر به B_1^* یا می‌شود که بر خلاف B_2^* رضایت بخش است. حالا اگر بخش بی اهمیت (دامنه صفر عضویت) شامل بخش بی‌اهمیت باشد؛ یک عدم سازگاری بین توابع عضویت و A_2^* ایجاد می‌شود که منجر به یک خط افقی در منحنی می‌شود، که یک بخش نامعین[1] است. به عنوان یک راهکار برای رفع نسبی این مشکل، نویسندگان در [۱] پیشنهاد تغییر دامنه صفر به دامنه نزدیک به صفر را داده‌اند. با این حال، این سوال مطرح می‌شود که چگونه تاثیر این تغییر دامنه می‌تواند در استدلال و نتایج منظور شود. این مساله در منطق فازی توسعه یافته از طریق مفهوم اعتبار قابل آدرس‌دهی است. در این مقاله، سیستم فازی توسعه یافته که توسعه طبیعی سیستم فازی با منظور کردن درجه اعتبار علاوه بر درجه امکان است معرفی و فرموله می‌شود.



شکل (۱): منطقه غیرقابل تعیین در نتیجه وجود دامنه صفر در مقدم قوانین [۱].

در مورد منطق فازی توسعه یافته چون زمان زیادی از معرفی آن نمی‌گذرد، کار تحقیقاتی چندانی صورت نگرفته است. در مطالعات انجام شده، مرجع [۲] یک توصیف کیفی در مورد منطق فازی توسعه یافته فراهم کرده است. مرجع [۳] بر انعطاف‌پذیری هندسه اقلیدسی در قبال نادقیقی توسط معیار تابع نمایی بحث کرده است. بدین صورت که هر المان در هندسه فازی را می‌توان بر اساس تابع نمایی به متناظرش در هندسه اقلیدسی نسبت داد. مرجع [۴] از فلسفه منطق فازی توسعه یافته و اصل ناممکن بودن زاده [۵] بر کاربرد توضیح علمی تقریبی از منظر فلسفه علم تکیه دارد. نویسنده در مرجع [۶]، این دیدگاه را با بررسی موضوع درستی گزینه‌ها در حیطه مودس تولنس[2] بسط داده است. نویسنده مقاله بعد از معرفی روش‌های توجیهی علمی تاکید دارد که با منطق فازی توسعه یافته می‌توان راجع به اعتبار توجیهات علمی با استفاده از استنتاج تقریبی اظهار نظر کرد. هم‌چنین در مراجع [۷-۹]، منطق فازی توسعه یافته از دیدگاه فلسفی و تاریخی در شرایط متغیر و نادقیقی به طور نظری بررسی شده است. ایده‌ی ابری از نقاط برای بیان نظرات افراد غیرمتخصص در یک پیمایش برای طراحی یک وب گجت[3] در مرجع [۱۰] بر اساس منطق فازی توسعه یافته معرفی شده است که ابر را با یک تابع عضویت ذوزنقه‌ای تقریب زده‌اند. هم‌چنین، یک سیستم تصمیم‌گیری برگرفته از هندسه فازی بر پایه منطق فازی توسعه یافته در [۱۱] پیشنهاد شده است. نویسندگان در آن از نقاط و خطوط بسط یافته جهت بیان اطلاعات استفاده کرده‌اند. در روش پیشنهادی، از قوانینی که دارای توصیفاتی احتمالاتی از داده در مقدمه و مطلوبیت نهایی در تالی می‌باشد در مسیر استنتاج استفاده شده است. از منطق فازی توسعه یافته در کارهای کاربردی از جمله ارزیابی خطر ابتلا به بیماری کرونر قلبی نیز استفاده شده است[۱۲]. هم‌چنین، نوع مشابهی از ف-هندسه منطق فازی توسعه یافته با نگرش ساخت خط فازی توسط نقاط فازی با قاعده ترکیبی Sup-min نیز در [۱۳] معرفی شده است.

تعریف اصول پایه‌ای استنتاج تقریبی در منطق فازی توسعه یافته و استفاده از اعتبار درجه‌ای که در این مقاله در قالب سیستم‌های فازی توسعه یافته مورد بررسی قرار می‌گیرد، هنوز انجام نشده است. به طور خاص، در این مقاله، برای اولین بار به ساختار سیستم فازی توسعه یافته پرداخته می‌شود. ذکر این نکته لازم است که هنگامی که دست کم یکی از مقدم‌ها و یا تالی‌ها علاوه بر درجه‌ای بودن مقدار امکان دارای درجه‌ای از اعتبار در تعریف مجموعه‌شان باشند، سیستم حاصل را سیستم فازی توسعه یافته نامیده می‌باشد. در سیستم‌های فازی، مقدم‌های متعدد در قوانین اغلب توسط نرم-t که مربوط به اشتراک توسیع‌های استوانه‌ای هستند با هم ترکیب می‌شوند و قوانین متعدد هم از طریق نرم-S که مربوط به اتحاد مجموعه‌ها هستند با هم ترکیب می‌شوند. در سیستم فازی توسعه یافته روش شبیه به سیستم‌های فازی است؛ اما، نیاز به در نظر گرفتن درجه اعتبار نیز می‌باشد.

در واقع، نوآوری اصلی مقاله حاضر عبارت از فرموله کردن استنتاج تقریبی در قالب منطق فازی توسعه یافته با معرفی ف-مودس پوننس است. هم‌چنین، شناسایی تابع نامعلوم غیرخطی با تنظیم

پارامترهای مربوطه با استفاده از سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی از جمله نوآوری‌های دیگر در این مقاله می‌باشد. در واقع، در این مقاله، تئوری تقریب سیستم‌های غیرخطی توسط سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی معرفی می‌شود و یک مثال کاربردی در این مورد نیز بررسی می‌گردد. هدف طراحی یک سیستم فازی توسعه یافته است که رفتار ورودی –خروجی دینامیک سیستم غیرخطی را پیش بینی می‌کند.

این مقاله در پنج بخش سازمان‌بندی شده است. بعد از این بخش مقدمه، در بخش دوم، یک مرور کلی از مفاهیم پایه‌ای منطق فازی توسعه یافته انجام می‌شود. در بخش سوم، ساختار سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم، سیستم پیشنهادی جهت شناسایی سیستم غیرخطی فرموله می‌شود و برای ارزیابی سیستم پیشنهادی به شناسایی یک سیستم غیرخطی اعمال می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی نیز آورده می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم، جمع‌بندی می‌آید.

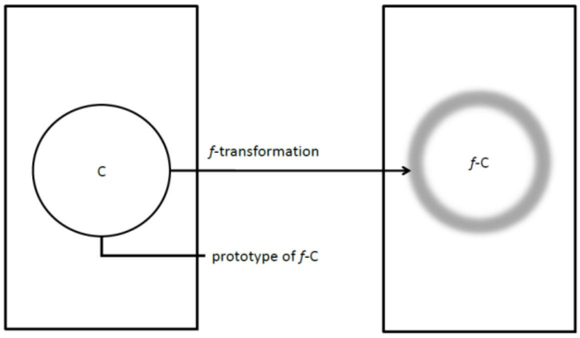
۲- مروری بر مفاهیم اولیه منطق فازی توسعه یافته

در بررسی مقالاتی که به ارتقاء منطق فازی برای مدل کردن موثرتر عدم قطعیت به خصوص در کارهای اخیر پرداخته‌اند به وضوح دیده می‌شود که منطق فازی توسعه یافته یک توسیع جامع‌تر و کامل‌تر می‌باشد. در منطق فازی توسعه یافته یک راه حل ف- اعتبار وجود دارد که درجه‌ای از اعتبار را به صورت فازی نشان می‌دهد [۱۴]. در این بخش به مرور اجمالی مفاهیم پایه‌ای منطق فازی توسعه یافته پرداخته می‌شود.

۲-۱- ف-انتقالی

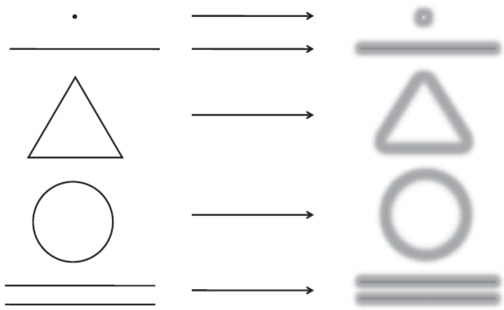
منطق فازی توسعه یافته قدرتش را مرهون توانایی‌اش در پر کردن شکاف بین دانش انسان متخصص و دنیای استدلال دقیق به وسیله تبدیل توصیفات کیفی به توابع غیر خطی ریاضی و توابع درکی می‌باشد. این توانایی بر اساس معرفی مفهوم جدیدی به نام ف-انتقالی به دست آمده است.

به طور کلی، ف-انتقالی[۴] نگاشتی از «یک» به «زیاد» است [۱۴] که در طی آن اصالت «یک» باید حفظ شده باشد، یعنی، «زیاد» ویژگی‌های «یک» را باید حفظ کند [۲]. در واقع، ف-انتقالی مفهوم قطعی C یک مفهوم فازی است که توسط f-C نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر، معادل یک مفهوم قطعی، C، یک مفهوم فازی، f-C تعریف می‌شود که به f-C ، ف-انتقالی C گفته می‌شود که قیاسی از رسم C با دست توسط اسپری است (شکل (۲) را ببینید).



شکل (۲): ف-انتقالی [۱۴].

زاده [۱۴] با استفاده از اشکال هندسی مانند مثلث، خط و دایره مفهوم ف-انتقالی را شرح داده است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، ف-انتقالی یک نقطه یک ف- نقطه است، ف-انتقالی یک خط یک ف- خط است، ف-انتقالی یک مثلث یک ف- مثلث است، ف-انتقالی یک دایره یک ف- دایره است و ف-انتقالی خطوط موازی، خطوط ف- موازی هستند. هم‌چنین، در هندسه فازی مفاهیمی مثل ف- موازی، ف- مشابه، ... وجود دارد. توجه کنید که ف-انتقالی فقط مربوط به هندسه نیست.



شکل(۳): مثال‌هایی از ف-انتقالی [۱۴].

در واقع، تعریف واحدی برای ف-انتقالی وجود ندارد چرا که می‌تواند به هر حوزه‌ای اعمال گردد. بنابراین، مفاهیم ف-محدب، ف-اثبات، ف-قضیه، ف-پاسخ و غیره را می‌توان تعریف کرد.

۲-۲- فرض دقت‌پذیری[۵]

در منطق فازی توسعه یافته ف-انتقال‌ها دقت‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۴]. در حقیقت، *f*-Cها باید قابلیت انطباق زیاد با Cها داشته باشند. همیشه فرض می‌شود این قابلیت وجود دارد، مگر این که خلافش گفته شود. به این فرض، به عنوان فرض دقت‌پذیری اطلاق می‌شود. *f*-C، دقت‌پذیری بالا دارد اگر میزان تطبیق و شباهت آن با C زیاد باشد. به طور واضح‌تر، میزان تطبیق *f*-C، یک معیار کیفی از شباهت *f*-C به C می‌باشد. فرض دقت‌پذیری را می‌توان نشانه‌ی اطمینان از حفظ میزان درستی پاسخ تفسیر کرد.

۲-۳- اصل P/I[۶]

در حالی که منطق فازی توسعه یافته انعطاف پذیری بالایی را فراهم می‌کند، آنچه که باید به آن توجه شود موضوع محاسبه تابع ف-انتقالی است. با وجود تمام مزایایی مطرح شده از ف-انتقالی، هنوز محاسبه ف-انتقالی مشکل‌ساز است [۱۴]. فرض کنید G یک تابع یا یک عملگر باشد که f-C که ف-انتقالی C است، متغیر آن باشد؛ آن وقت دیده می‌شود که محاسبه G(f-C) کار ساده‌ای نیست. با این حال، می‌توان G(f-C) را با استفاده از ف-اصل P/I بدست آورد [۱۵]. اصل P/I می‌گوید که G(f-C) تقریباً برابر G(C) است. این اصل به این صورت بیان می‌شود:

$$G(f\text{-}C)\ \ f\text{-}=\ \ f\text{-}G(C) \tag{۱}$$

که f-= به معنی تقریباً برابر است. به عبارت زبانی رابطه بالا می‌شود: G(f-C) تقریباً برابر با ف-انتقالی G(C) است.

۲-۴- ف-مجموعه[۷] [۱۶]

فرض کنید X یک مجموعه جهانی، x یک عنصر عمومی از X و A یک مجموعه باشد، ف-مجموعه $f-A=A(x,\mu_{f-A})\subset X$ به عنوان یک گزاره مدرج به شکل یک جفت متشکل از یک گزاره فازی و یک عنصر اعتبار تعریف می‌شود که در آن با توابع عضویت امکان و اعتبار به ترتیب به صورت $\mu_A=X\rightarrow[0,1]$ و $v_A=X\rightarrow[0,1]$ تعریف می‌شود[۱۶] .

توجه کنید که می‌توانند به صورت $A(x,\mu_A,v_A)$ بازنویسی شود. این فرمول‌بندی ف-مجموعه، مبین دو حوزه موازی است که در فضاهای جداگانه‌ای کار می‌کنند. اولین حوزه نشان دهنده تابع عضویت امکان/احتمال است که به صورت پویا بر حوزه دوم که نشان دهنده تابع عضویت اعتبار است تاثیر می‌گذارد. تفاوت بین ف-مجموعه و مجموعه فازی مربوط به طبیعت تابع عضویت اعتبار است. در واقع، با توجه به ویژگی‌های ف-انتقالی[۲]، هنگامی که عدم قطعیت مربوط به اعتبار از بین می‌رود، *ف-مجموعه* به مجموعه فازی تبدیل می‌شود.

۳- ساختار سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی

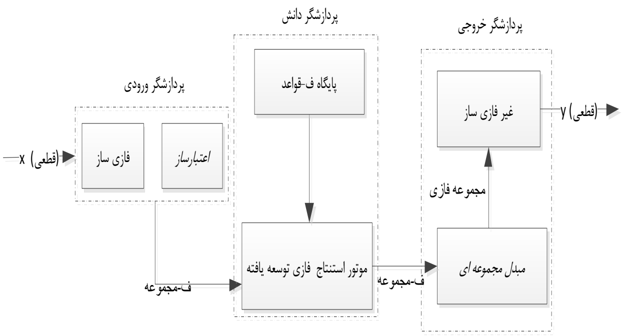
سیستمی که در این جا بررسی می‌شود، دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد: دارای n ورودی $x_1\in X_1,x_2\in X_2,...,x_n\in X_n$ و یک خروجی است و توسط M قانون که در آن توابع عضویت مقدم و / یا تالی ف – مجموعه هستند که جزء اول آن نشان دهنده تابع عضویت امکان و جزء دوم آن نشان دهنده تابع عضویت اعتبار می‌باشد.

ساختار سیستم فازی توسعه یافته در شکل (۴) نشان داده شده است. سیستم فازی توسعه یافته شبیه به یک سیستم فازی است؛ اما، بلوک غیرفازی‌ساز توسط یک بلوک پردازش خروجی که شامل مجموعه‌ای جدید به نام مبدل مجموعه علاوه بر غیرفازی‌ساز جایگزین شده است و پردازشگر ورودی با بخش اعتبارساز علاوه بر فازی‌ساز مجهز است. پردازش دانش نیز شامل ف-استنتاج است. باید اشاره شود که ف-استنتاج می‌تواند تابعی به شکل $f-I:[0,1]\times[0,1]\rightarrow[0,1]$ باشد که برای هر مقدار درستی a,b گزاره‌های داده شده مقدار درستی $f-I(a,b)$ را تعریف می‌کند. اینجا ایده این است که منطق فازی توسعه یافته استنتاج فازی را با اضافه کردن اعتبار v بسط می‌دهد، یعنی می‌توان نوشت: $f-I(a,b)=(I(a,b),v)$.

هم‌چنین باید ذکر شود که برای به دست آوردن یک خروجی قطعی از سیستم فازی توسعه یافته، خروجی مبدل مجموعه را که یک ف-مجموعه را به یک مجموعه فازی *مناسب* تبدیل ، باید غیرفازی شود. منظور از کلمه مناسب، نوع مجموعه‌های فازی در مساله داده شده است. برای سادگی، در این جا فقط مجموعه‌های فازی نوع یک در نظر گرفته می‌شود، اما همان‌طور که انواع بالاتر مجموعه‌های فازی به کار برده می‌شوند، ساختار هنوز حفظ می‌شود اما پیچیدگی سیستم افزایش می‌یابد و محاسبات پیچیده‌تر می‌شوند. برای مثال، اگر از مجموعه فازی نوع دو استفاده شود، باید نوع-کاهنده[۸] قبل از غیرفازی‌ساز هم استفاده شود. به این ترتیب، خروجی مبدل مجموعه، یک مجموعه فازی نوع دو است.

۳-۱- فازی‌ساز و اعتبارساز

پودمان‌های فازی‌ساز و اعتبارساز ورودی قطعی را به یک ف-مجموعه می‌نگارند. در این بخش، تنها فازی‌ساز منفرد و اعتبارساز منفرد در نظر گرفته می‌شود؛ که در آن ورودی ف-مجموعه تنها در یک نقطه ورودی خاص دارای درجه امکان یک و درجه اعتبار یک است و برای تمام ورودی‌های دیگر درجه امکان و اعتبار آن صفر است.



شکل (۴): ساختار سیستم فازی توسعه یافته

۳-۲- ف-قانون

در منطق فازی توسعه یافته قوانین دو لایه دارند یک لایه معرف میزان امکان و لایه بیرونی معرف میزان اعتبار است[۲]. با توجه به نوع قوانین در منطق فازی توسعه یافته که به صورت شکل (۵) تعریف می‌شوند و با توجه به این که قانون مبین یک رابطه بین فضای ورودی $X_1\times X_2\times...\times X_n$ و فضای خروجی Y است؛ قانون "l"ام در

نظر گرفته در سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R^l: \textit{the more 'if } x_1 \textit{ is } \text{f-}A_1^1,\ldots,x_n \textit{ is } \text{f-}A_n^1 \textit{ then } y \textit{ is } \text{f-}B^1 \textit{ 'is' } x_1 \textit{ is } A_1^1,\ldots,x_n \textit{ is } A_n^1 \text{ then y is } B^{l'} \textit{ the higher is the } \text{validity} \quad (۲)$$

شکل (۵): قوانین در منطق فازی توسعه یافته [۲]

۳-۳- موتور استنتاج

موتور استنتاج ترکیبی از ف-قانون‌ها را فراهم می‌کند و یک نگاشت از ورودی ف-مجموعه به خروجی ف-مجموعه ایجاد می‌کند. در واقع، فرایند استدلال تقریبی می‌تواند همچون ترکیبی از قواعد استنباط، که مودس پوننس[۹] تعمیم یافته یک شکل بنیادی آن است به کار رود. بر طبق اصطلاح مودس پوننس، زمانی که A درست است و یک قانون به صورت '$if\ \ A\ then\ B$'وجود دارد، منجر به این نتیجه می‌شود که B درست است. فازی مودس پوننس مبین ابهام به صورت غیر منحصر به فرد بودن فرض‌های فازی به شکل زیر است:

$$\begin{array}{l} \text{x is A'} \\ \underline{\text{if x is A then y is B}} \\ \qquad \text{y is B'} \end{array} \qquad (۳)$$

که در آن x و y متغیرهای زبانی و A، A′ وB، B′ مجموعه‌های فازی هستند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن ارزش درستی متغیرهای فازی، نسخه مودس پوننس تعمیم یافته برای مقادیر درستی هم ارائه شده است [۱۷].

با توجه به معادله (۳) و با توجه به فرض دقت‌پذیری، ف-مودس پوننس به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{array}{l} \text{x is f-A'} \\ \text{the more 'if x is f-A then y is f-B' is} \\ \underline{\text{'if x is A then y is B'the higher is the validity}} \\ \qquad\qquad \text{y is f-B'} \end{array} \qquad (۴)$$

اگر مرکز ثقل معادله (۴) در نظر گرفته شود و با فرض این که x و y حداقل تا یک درجه خاصی غیر تعاملی[۱۰] هستند، رابطه (۴) به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$\begin{array}{l} (\text{x is A}', \text{v}_1(x)) \\ \underline{(\text{if x is A then y is B}, \text{v}_2(x,y))} \\ \quad (\text{y is B}', \text{h}(\text{v}_1(x),\text{v}_2(x,y))) \end{array} \qquad (۵)$$

عملگر h بسیار مهم است، مخصوصاً وقتی که نیاز به تعیین بهترین کران بالا برای اعتبار نتایج باشد.

قضیه ۱: در ف-مودس پوننس، عملگر h یک نرم-t است.

اثبات: برای شروع اثبات باید ابتدا اشاره کرد که یک عملگر باید چند خاصیت را داشته باشد تا به عنوان نرم-t واجد شرایط شود. به طور کلی، یک نرم-t دارای ویژگی‌های زیر است:

۱) جا بجایی، $t(a,b)=t(b,a)$.

۲) شرایط مرزی، $0\le t(a,b)\le 1$، $t(1,1)=1$، $t(0,0)=0$، $t(a,1)=t(1,a)=a$، $t(a,0)=t(0,a)=0$.

۳) متعدی $t[t(a,b),c]=t[a,t(b,a)]$.

۴) یکنواختی، . $if\ \ a\le a'\ and\ \ b\le b'\ then\ t(a,b)\le t(a',b')$

واضح است که خاصیت جابجایی برای h وجود دارد، از آن جهت که ترتیب اعمال اعتبارها در یک ترکیب برای تعیین اعتبار ترکیبی آن‌ها مهم نیست، پس $h(a,b)=h(b,a)$. با توجه به درجات اعتبار تعریف شده که بین صفر و یک می‌باشند، در نتیجه داریم. علاوه بر این، با توجه به ویژگی‌های ف-انتقالی [۲]، هنگامی که عدم قطعیت در مورد اعتبار حذف شود، ف-مجموعه‌ها باید به مجموعه‌های فازی تبدیل شوند، بنابراین، . حالا، اگر دو حالت در نظر گرفته شود که در آن یک حالت دارای اعتبار صفراست، در اینجا، صفر باقی ماندن اعتبار، در هر مجموعه‌ای که از آن به دست می‌آید محتمل‌تر است، بنابراین، . همین استدلال را در مورد می‌توان کرد. علاوه بر این، برآورده شدن یک نیاز طبیعی برای اعتبار یک رابطه است. در واقع، واضح است که از لحاظ مفهومی مقدار اعتبار یک رابطه توسط این خاصیت به وسیله مقداری که کم‌تر از همه است محدود می‌شود تا کل سیستم در هر موقعیتی معتبر بماند. خاصیت تعدی اجازه می‌دهد تا محاسبه با ف-مجموعه‌ها به بیش از دو تا قابل گسترش باشد. خاصیت یکنواختی نشان می‌دهد که افزایش در درجه اعتبار دو ف-مجموعه باید منجر به یک افزایش اعتبار در ترکیب آن‌ها شود که یک نیاز طبیعی است. بنابراین، عملگر h تمام خواص نرم-t را دارا می‌باشد. بنابراین، h یک نرم-t است.

لازم به ذکر است که انتشار اعتبار را می‌توان به عنوان یک مساله جستجو به دنبال کران بالای اعتبار نتیجه با دانستن اعتبارهای و در نظر گرفت. با در نظر گرفتن فرض دقت‌پذیری، تابع عضویت قانون (۲) با $\mu_{f\text{-}A_1^l\times\ldots\times f\text{-}A_n^l\to f\text{-}B^l}(x,y)$ که با بهره‌گیری از اصل P/I به صورت $\mu_{f\text{-}(A_1^l\times\ldots\times A_n^l)\to f\text{-}B^l}(x,y)$ تبدیل می‌شود که مبین ضرب دکارتی $f\text{-}(A_1^l\times\ldots\times A_n^l)$ می‌باشد. وقتی یک ورودی $x'\in X'$ به سیستم اعمال شود، ترکیب ف-مجموعه X' با قانون (۲) با استفاده از ف-مودس پوننس و با اصل P/I به شرح زیر به دست می‌آید:

$$f\text{-}\mu_{X'\circ A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(y)=(\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(y), v_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(y)) \qquad (۶)$$

بنابراین،

$$f\text{-}\mu_{X'\circ A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(y)=$$
$$(\sup_{x\in X'}(\mu_{X'}(x')*\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x,y)),$$
$$t_{x\in X'}(v_{X'}(x')*v_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x,y)) \qquad (۷)$$

که × معرف نرم- t است. با در نظر گرفتن فازی‌ساز منفرد و اعتبارساز منفرد معادله (۷) به صورت زیر می‌شود:

$$f\text{-}\mu_{X'\circ A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(y)=(\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x',y),$$
$$v_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x',y)) \qquad (۸)$$

اگر خروجی استنتاج شده مربوط به قانون lام با B'^l نمایش داده شود؛ آن وقت،

$$f\text{-}\mu_{B'^l}(y)=(\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x',y),$$
$$v_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}(x',y)) \qquad (۹)$$

حالا، با بازگشت به موضوع استنتاج ، بیان شرطی می‌تواند هم چون تابع استنتاج I به صورت عبارت $\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l\to B^l}=I(\mu_{A_1^l\times\ldots\times A_n^l},\mu_{B^l})$ تفسیر شود. بنابراین سمت راست معادله (۹)، می‌تواند با استفاده از توابع استنتاج به دست بیاید. از آن جا که اغلب از استنتاج کمینه یا ضرب برای بیشتر کاربردها استفاده می‌شود، معادله (۹) می‌تواند با استنتاج کمینه به صورت زیر نوشته شود:

$$f\text{-}\mu_{B'^l}(y)=(\mu_{A_1^l}(x_1)\cap\ldots\cap\mu_{A_n^l}(x_2)\cap\mu_{B^l}(y)$$
$$v_{A_1^l}(x_1)\cap\ldots\cap v_{A_n^l}(x_n)\cap v_{B^l}(y)) \qquad (۱۰)$$

با در نظر گرفتن به صورت، قوانین آتش شده به وسیله اعمال اتحاد روی اولین درایه و اشتراک روی درایه دوم مجموعه خروجی نهایی را تولید می‌کنند که تابع عضویتش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f\text{-}\mu_{B'}(y)=(\bigcup_{l=1}^{M}\mu_{B'^l}(y),t_{l=1}^{M}v_{B'^l}(y)) \quad \forall y\in Y \qquad (۱۱)$$

توجه کنید که بهترین آستانه بالا روی درجات اعتبار را فراهم می‌کند. نکته مهم این است که در حالت چند ورودی-چند خروجی روال بالا برای هر مجموعه خروجی به طور جداگانه باید تکرار شود.

۳-۴- مبدل مجموعه

در روند مبدل مجموعه، همه مقدم‌ها و تالی‌ها ف-مجموعه‌اند. به منظور به دست آوردن مجموعه خروجی قطعی از سیستم فازی توسعه یافته، خروجی کلی (معادله

(۱۱)) در دو مرحله پردازش می‌شود. اول، ف-مجموعه به یک مجموعه فازی تبدیل شده و سپس با استفاده از غیر فازی ساز به خروجی قطعی تبدیل می‌شود.

برای تبدیل ف-مجموعه به مجموعه فازی از مفهوم امید فازی[۱۱] استفاده می‌گردد. باید اشاره شود که مفهوم امید فازی بیان می‌کند [۱۸] که میزان اطلاعات یک مجموعه فازی با گسترش افقی آن به اندازه مقدار حقیقی مثبت تغییر نمی‌کند. به طور مشخص‌تر، امید فازی مجموعه فازی (D,μ_D) به صورت $ED=\int_x x\mu_D(x)dx$ تعریف می‌شود. با تعریف D' همچون گسترش افقی داده شده‌ی مجموعه فازی به اندازه که یک عدد حقیقی مثبت است که تابع عضویت آن به صورت $(D,\mu_D(\sqrt{\upsilon}x))$ می‌باشد. آن وقت و $(D,\sqrt{\upsilon}\mu_D)$ نسبت به مفهوم امید فازی برابرند. که مبین تاثیر اعتبار روی مقادیر درجه فازی است.

بنابراین، برای تبدیل ف-مجموعه به مجموعه فازی، با استفاده از معادله (۱۲)، اعتبار تابع عضویت به عدد قطعی نگاشته می‌شود که $\sqrt{\upsilon}$ معرف اعتبار و y_υ نقطه متناظر با این درجه اعتبار است [۱۶]:

$$y_\upsilon=\frac{\sum_{l=1}^{M}y v_{B'}(y)}{\sum_{l=1}^{M}v_{B'}(y)} \qquad (۱۲)$$

بنابراین، با توجه به مفهوم امید فازی، می‌توان ف-مجموعه را به مجموعه‌ای فازی با گسترش افقی به اندازه‌ی $\sqrt{\upsilon}$ تبدیل کرد. به عبارت دیگر:

$$\mu'_{B'}(y)=\mu_{B'}(\sqrt{\upsilon}y) \qquad (۱۳)$$

که در آن یک مجموعه فازی است. اما ذکر این نکته مهم است اگر چه مبدل مجموعه منجر به یک مجموعه فازی می‌شود، این مجموعه فازی جدید چون عدم قطعیت بیش‌تری را با در نظر گرفتن درجه اعتبار مدل می‌کند، غنی‌تر است و حاوی اطلاعات بیش‌تری در مورد ابهامات است.

۳-۵- غیرفازی‌سازی

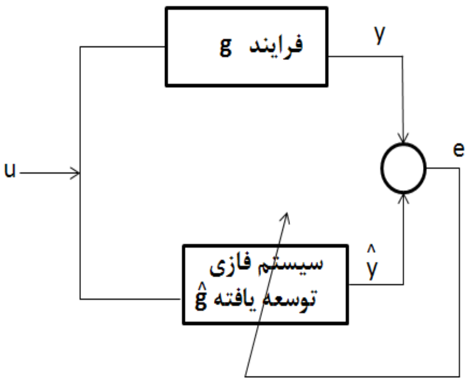
برنامه‌های کاربردی دنیای واقعی، اغلب نیاز به یک خروجی عددی قطعی برای متغیرهای دنیای واقعی است. غیر فازی سازی این خروجی‌ها را که مربوط به قوانین آتش شده‌اند را به منظور به دست آوردن یک خروجی ترکیب می‌کند تا یک عدد قطعی که نمایش مجموعه خروجی ترکیبی است بیابد. بعد از مبدل مجموعه، یک ف-مجموعه تبدیل به مجموعه فازی می‌شود. بنابراین می‌توان از روش‌های مرسوم غیرفازی‌ساز مانند مرکز ثقل، حداکثر یا میانگین مراکز برای تبدیل به عدد قطعی استفاده کرد.

۴- کاربرد برای شناسایی سیستم‌ها

از آن جا که در مهندسی اکثر روش‌ها وابسته به مدل است، فرآیند ایجاد و انتخاب معادل‌های ریاضی مناسب بر اساس داده‌های در دسترس که موضوع شناسایی سیستم‌ها می‌باشد، بسیار با اهمیت می‌باشد. این مدل‌ها برای توضیح و تبیین رفتار پدیده‌ها، پیش‌بینی و کنترل آن‌ها به کار می‌روند.

به طور کلی دو روش در برای تقریب مدل و شناسایی سیستم‌ها وجود دارند: روش‌های مبتنی بر مدل و روش‌های آزاد از مدل. در سال‌های اخیر دسته دوم روش‌ها مانند سیستم‌های فازی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند که عدم قطعیت را در سیستم قبول می‌کنند. اساساً سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرخطی را به راحتی توصیف می‌کنند. اما موضوع بسیار مهم این است که اکثر پدیده‌های غیرخطی شرط اثبات‌پذیری اعتبار را که شرط لازم برای استفاده از سیستم‌های فازی است نقض می‌کنند، یعنی دقت‌پذیر نیستند؛ بنابراین قابل بیان و مدل‌سازی به وسیله سیستم‌های فازی نخواهند بود. در این مطالعه، سیستم پیشنهادی سعی در حل این موضوع با اضافه کردن مفهوم اعتبار در سیستم‌های فازی در قالب سیستم‌های فازی توسعه یافته می‌باشد.

استفاده از سیستم‌های فازی توسعه یافته برای یافتن مدل مناسب‌تر موضوع این بخش می‌باشد. نمای مدل شناسایی بر اساس سیستم فازی توسعه یافته در شکل (۶) نشان داده شده است. مساله ساخت یک مدل در سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی می‌تواند به صورت تعریف ساختار مناسبی از توابع عضویت امکان و میزان اعتبار با ساخت یک پایگاه دانش از مجموعه داده‌ها بیان می‌شود.



شکل (۶): شمای اجمالی شناسایی سیستم توسط روش پیشنهادی

۴-۱- سیستم فازی توسعه یافته به عنوان نگاشت غیرخطی

سیستم‌های فازی می‌توانند توابع غیر خطی را تقریب بزنند. سیستم‌های فازی در واقع به عنوان تقریب‌گر عمومی[12] شناخته می‌شوند. روال در منطق فازی تغییر گسترده‌ای در منطق فازی توسعه یافته نمی‌کند جز این که یک درجه اعتبار جداگانه اضافه می‌شود و در محاسبات وارد می‌گردد.

فرض کنید M قانون به صورت رابطه (۲) وجود دارد، خروجی ف- مجموعه B^l طبیعی است با مرکز $\bar{y}^l$ و x_i ورودی داده شده است و مرکز lام ف-مجموعه در مرکز است که است. با در نظر گرفتن، فازی‌ساز منفرد و اعتبار ساز منفرد و با استفاده از استنتاج ضرب و عملگر کمینه برای نرم- t، معادله

(۱۱) به صورت زیر می‌شود:

$$\mu_{f-B'}(y) = (\max_{l=1}^{M}(\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(x_i)\mu_{B^l}(y)),$$

$$\min_{l=1}^{M}(\prod_{i=1}^{n}v_{A_i^l}(x_i)v_{B^l}(y)). \quad (۱۴)$$

ارتفاع اولین درایه با در نظر گرفتن فازی ساز منفرد و اینکه نرمال فرض شده است، عبارت می‌شود:

$$\mu_{B'}(y) = \prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(x_i) \quad (۱۵)$$

معادله(۱۴) می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$f\text{-}\mu_{B'}(y) = (\mu_{B'}(y), v_{B'}(y)) \quad (۱۶)$$

با استفاده از مبدل مجموعه، پاسخ مربوط به به صورت $\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(\sqrt{\upsilon}x_i)$ می‌شود که υ اعتبار کلی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y_{\upsilon} = \frac{\sum_{l=1}^{M} y v_{B'^l}(y)}{\sum_{l=1}^{M} v_{B'^l}(y)} \quad (۱۷)$$

که B''^l خروجی استنتاج شده مربوط به قانون lام است. سپس با اعمال غیرفازی‌ساز میانگین مراکز، سیستم فازی توسعه یافته به صورت زیر در یک فرم غیرخطی بسته خلاصه می‌گردد:

$$g(x) = \frac{\sum_{l=1}^{M}\bar{y}^l\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(\sqrt{\upsilon}x_i)}{\sum_{l=1}^{M}\prod_{i=1}^{n}\mu_{A_i^l}(\sqrt{\upsilon}x_i)} \quad (۱۸)$$

توجه کنید که می‌توان انواع متفاوتی تابع عضویت از جمله تابع عضویت گوسی را انتخاب کرد.

قضیه ۲: برای $\varepsilon > 0$، $l = 1,2,\dots,M$، υ_i میزان اعتبار، مجموعه‌های فازی A_i سازگار و کامل با $\mu_{A_i^l}$ که تابع عضویت گوسی، $\mu_{A_i^l}(x_i) = \exp(-(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma})^2$، هستند. آن وقت داریم:

$$\sup\left|g(\bar{x}^l)-\bar{y}^l\right|<\varepsilon \tag{۱۹}$$

اثبات: با در نظر گرفتن رابطه (۱۸) داریم:

$$g(\bar{x}^l)=\frac{\sum_{l=1}^{M}\bar{y}^l\prod_{i=1}^{n}\exp(-(\frac{\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l}{\sigma})^2)}{\sum_{l=1}^{M}\prod_{i=1}^{n}\exp\sqrt{\upsilon}(-(\frac{\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l}{\sigma})^2)} \tag{۲۰}$$

بنابراین،

$$\left|g(\bar{x}^l)-\bar{y}^l\right|=\left|\frac{\sum_{l=1}^{M}\bar{y}^l\prod_{i=1}^{n}\exp(-(\frac{\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l}{\sigma})^2)}{\sum_{l=1}^{M}\prod_{i=1}^{n}\exp(-(\frac{\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l}{\sigma})^2)}-\bar{y}^l\right| \tag{۲۱}$$

اگر $\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l=0$ که قضیه به راحتی اثبات می‌شود، ولی اگر $\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l\neq 0$ آنگاه با انتخاب به اندازه کوچک σ طوری که $\sigma\to 0$ می‌توان رابطه (۱۹) را داشت.

قضیه ۲ مبین این نکته است که میزان σ و υ در این همگرایی مهم است. در واقع، واضح است که میزان اعتبار می‌تواند در ایجاد رابطه $\sqrt{\upsilon}\bar{x}^l-\sqrt{\upsilon_i}\bar{x}_i^l=0$ موثر باشد.

۴-۲- یک مثال کاربردی

در این بخش، به منظور ارزیابی عملکرد تقریب‌گر عمومی سیستم‌های فازی توسعه یافته، به بررسی شناسایی یک سیستم غیرخطی که پیش از این در [۱۹] آورده شده است، پرداخته می‌شود. فرایندی که باید شناسایی شود به صورت معادلات تفاضلی زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$y(m+1)=0.3y(m)+0.6y(m-1)+g[u(m)] \tag{۲۲}$$

تابعی که باید شناسایی شود به شکل زیر می‌باشد:

$$g(w)=0.6\sin(\pi w)+0.3\sin(3\pi w)+0.1\sin(5\pi w) \tag{۲۳}$$

قوانین بر اساس زوج داده‌های ورودی–خروجی ایجاد می‌شوند [۱۹]. برای ساخت قوانین از الگوریتم خوشه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه استفاده شده است. مدل شناسایی به صورت زیر است:

$$\hat{y}(m+1)=0.3y(m)+0.6y(m-1)+\hat{g}[u(m)] \tag{۲۴}$$

که به شکل معادله (۱۸) است، جایی که $\mu_{A_i^l}(x_i)$ یک تابع گوسی به شکل زیر است:

$$\mu_{A_i^l}(x_i)=a_i^l\exp(-(\frac{x_i-\bar{x}_i^l}{\sigma_i^l})^2) \tag{۲۵}$$

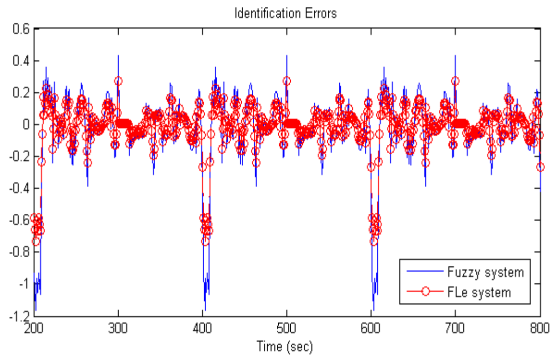
که در آن و ثابت هستند و $\sigma_i^l\in(0,\infty), a_i^l\in(0,1]$ و $\bar{x}_i^l,\bar{y}^l\in R$ پارامترهای حقیقی هستند. ورودی به صورت $\bar{x}_i^l$ می‌باشد. خطای ریشه میانگین مربع تابع خطا در این جا به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}[y_d(m)-\hat{y}(m)]^2} \tag{۲۶}$$

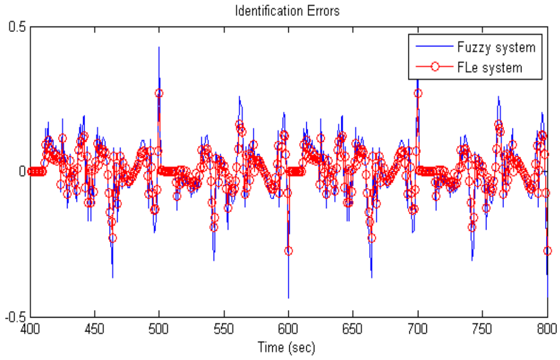
که $y_d(k)$ خروجی واقعی سیستم، $\hat{y}(k)$ خروجی مدلی که باید شناسایی شود و N تعداد داده‌ها و m معرف زمان است. از داده‌ها برای ساخت جفت‌های ورودی-خروجی برای مرحله آموزش استفاده می‌شود و سپس سیستم فازی توسعه یافته به شناسایی نقاط باقی‌مانده می‌پردازد. شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت انجام می‌شود. حالت اول تعداد کم‌تری داده برای آموزش در نظر گرفته می‌شود و برای حالت دوم تعداد داده‌های آموزش افزایش می‌یابد. هر دو حالت به سیستم‌های فازی و فازی توسعه یافته اعمال می‌گردد و نتایج مقایسه می‌گردند. در سیستم فازی توسعه یافته، مجموعه اعتبار معادل کلمه احتمالاً در نظر گرفته شده است که بر اساس معادله (۱۶) به دست می‌آید.

در حالت اول، ۲۰۰ و ۶۰۰ داده برای آموزش و آزمون انتخاب شده‌اند. خروجی در هر دو سیستم‌های فازی توسعه یافته و فازی تقریباً بلافاصله ورودی را دنبال می‌کند و این دنباله‌روی پس از اتمام مرحله آموزش هنوز ادامه می‌یابد. با این حال، خطا وجود دارد. شکل (۷) خطای شناسایی را برای هر دو سیستم نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سیستم فازی توسعه یافته عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم فازی دارد.

در حالت دوم، ۴۰۰ و ۴۰۰ داده برای آموزش و آزمون انتخاب شده است. خطای شناسایی مربوط به هر دو سیستم در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش تعداد داده‌های آموزش، هر دو سیستم عملکرد بهتری را نشان می‌دهند؛ با این حال، سیستم فازی توسعه یافته هم چنان عملکرد بهتری دارد.



شکل (۷): خطای شناسایی برای داده‌های آزمون در حالت اول



شکل (۸): خطای شناسایی برای داده‌های آزمون در حالت دوم

جدول (۱) خطای ریشه مربع میانگین را در هر دو حالت، در آموزش و آزمون نشان می‌دهد. با توجه به میزان خطا در هر دو سیستم‌های فازی توسعه یافته و فازی، دیده می‌شود که خروجی تقریباً به طور همزمان ورودی را دنبال می‌کند. اما دیده می‌شود در هر دو حالت، سیستم فازی توسعه یافته هم چنان عملکرد بهتری دارد. در واقع، در هر دو حالت، سیستم فازی توسعه یافته کاهش خطای تقریباً ۵۰٪ را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که تفاوت خطا (ستون آخر در جدول ۱) و میزان خطای کم و قابل قبول برای اکثر کاربردها در دو حالت یادگیری برای حالت آزمون در مورد سیستم فازی توسعه یافته به نسبت سیستم فازی تایی دی بر این نکته است که با در نظر گرفتن میزان اعتبار، سیستم رو به رو با خطای کم‌تری در حضور اطلاعات ناکافی می‌شود، اگرچه هر چه اطلاعات کامل‌تر باشد، خطا کم‌تر خواهد بود. تفاوت خطای آموزش و آزمون در حالت ۴۰۰ داده آموزش برای سیستم پیشنهادی بسیار کم است (به سطر آخر جدول ۱ توجه نمایید) که مبین اهمیت در نظر گرفتن درجه اعتبار می‌باشد.

جدول (۱): خطای نتایج شناسایی توسط سیستم‌های فازی و فازی توسعه یافته

حالت		مرحله آموزش (RMSE)	مرحله آزمون (RMSE)	تفاوت دو مرحله (RMSE)
۲۰۰ داده آموزش	سیستم فازی FL	۰/۱۰۷۱۳	۰/۲۴۵۸۹	$FL_{200} - FL_{400}=$ ۰/۱۳۸۷۴
	سیستم فازی توسعه یافته FLe	۰/۰۶۷۴۹	۰/۱۵۴۹۲	$FLe_{200} - FLe_{400}=$ ۰/۰۸۷۴۲۰
۴۰۰ داده آموزش	سیستم فازی FL	۰/۱۰۴۶۹	۰/۱۰۷۱۵	$FLe_{200} - FL_{400}=$ ۰/۰۴۹۷۷
	سیستم فازی توسعه یافته FLe	۰/۰۶۵۹۵	۰/۰۶۷۵۰	$FL_{400} - FLe_{400}=$ ۰/۰۳۸۷۴

بنابراین، با توجه به جدول (۱) و شکل‌های (۷) و (۸) دیده می‌شود که سیستم‌های فازی توسعه یافته برای کاربردهای مهندسی از سیستم‌های فازی بهتر هستند، زیرا سیستم‌های فازی توسعه یافته عدم قطعیت بیش‌تری را مدل می‌کند. در واقع، سیستم فازی توسعه یافته با در نظر گرفتن درجه اعتبار علاوه بر درجه امکان چارچوبی موثر برای بهبود روش‌های دیگر فراهم می‌کند، به ویژه آن‌هایی که مربوط به کنترل و تصمیم‌گیری هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای اولین بار سیستم فازی توسعه یافته به عنوان یک توسعه طبیعی از سیستم فازی هنگامی که ملاک اعتبار نیز علاوه بر ملاک امکان به استدلال اضافه شود، پیشنهاد شد که در آن تمرکز اصلی بر عملیات استنتاج در پردازش دانش، اعتبارساز در پردازش ورودی و مبدل مجموعه‌ای در پردازش خروجی بود. مبدل مجموعه‌ای یک عملگر جدید است که ف-مجموعه را تبدیل به یک مجموعه فازی می‌کند. در این مقاله برای اولین بار، استنتاج تقریبی در منطق فازی توسعه یافته به طور تحلیلی بررسی گردید. هم‌چنین، با اثبات قضیه‌ای به مورد تقریب‌گر عمومی بودن سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی پرداخته شد. علاوه بر این، کل سیستم پیشنهادی در دو حالت، آموزش کم‌تر و آموزش بیش‌تر در فرآیند شناسایی دینامیک غیرخطی استفاده شد. به عبارت دیگر، در این مقاله، از سیستم فازی توسعه یافته پیشنهادی به همراه روش خوشه‌بندی به منظور تقریب اجزای غیرخطی نامعلوم یک سیستم دینامیک استفاده شد. تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان از عملکرد بهتر سیستم فازی توسعه یافته در مقایسه با سیستم‌های فازی وقتی هر دو به سیستم واحدی اعمال می‌شود دارد. میزان اعتبار عاملی است که در بالا بردن دقت مدل و پایین آوردن خطا نقش کلیدی دارد . در این مقاله، نشان داده شد که تقریب‌گرهای فازی توسعه یافته نسبت به تقریب‌گرهای فازی در توانایی شناسایی دینامیک غیرخطی از توان عملیاتی بالاتری برخوردارند. طبق یافته‌های این مقاله، ریشه میانگین خطای آموزش و آزمون در سیستم پیشنهادی کم‌تر و دقت مدل بالاتر از سیستم‌های فازی می‌باشد.

مراجع

[1] T. C. Chang, K. Hasegawa and C. W. Ibbs, “The effects of membership function on fuzzy reasoning,” Fuzzy Sets and Systems, Vol. 44, pp. 169-186, 1991.

[2] F. Sabahi and M.-R. Akbarzadeh-T, “A qualified description of extended fuzzy logic,” Information Science, Vol. 244, pp. 60-74, 2013.

[3] B. M. Imran and M. M. S. Beg, “Elements of sketching with words,” IEEE International Conference on Granular Computing (GrC), 2010, 2010, pp. 241-246.

[4] V. A. Niskanen, “Application of Zadeh's impossibility principle to approximate explanation,” Presented at the IFSA-EUSFLAT 2009, Lisbon, Portugal, 2009.

[5] L. A. Zadeh, "Computation with imprecise probabilities-plenary lecture," in International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty for Knowledge-Based Systems (IPMU), Malaga, Spain, 2008.

[6] V. A. Niskanen, "Application of approximate reasoning to hypothesis verification," Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol. 21, pp. 331-339, 2010.

[7] V. A. Niskanen, "Fuzzy systems and scientific method meta-level reflections and prospects," In Seising, R. (Ed.): Fuzzy Set Theory - Philosophy, Logics, and Criticism Springer, 2009.

[8] V. A. Niskanen, "Meta-level prospects for scientific theory formation by adopting the information granulation approach," Presented at the Proceedings of the IMS '08 Conference Sakarya University, 2008.

[9] V. A. Niskanen, "Soft computing methods in human sciences," Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer Verlag, Berlin, Vol. 134, 2004.

[10] J. B. Tolosa and S. Guadarrama, "Collecting fuzzy perceptions from non-expert users," IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ), 2010, 2010, pp. 1-8.

[11] R. A. Aliev, A. V. Alizadeh and B. Guirimov, "Unprecisiated information-based approach to decision making with imperfect information," in Proceedings of the Ninth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2010), 2010, pp. 387-397.

[12] F. Sabahi and M.-R. Akbarzadeh-T, "Comparative evaluation of risk factors in coronary heart disease based on fuzzy probability-validity modeling," Sci. J. ZANJAN Univ. Medical Sci., p. Accepted for Publication, 2013.

[13] D. Chakraborty and D. Ghosh, "Analytical fuzzy plane geometry ii," In Press, Fuzzy Sets and Systems, (2013).

[14] L. A. Zadeh, "Toward extended fuzzy logic—a first step, " Fuzzy Sets Syst, Vol. 160, pp. 3175–3181, 2009.

[15] L. A. Zadeh, "Toward a generalized theory of uncertainty—an outline, " Information Sciences, Vol. 172, pp. 1-40, 2005.

[16] F. Sabahi and A.-T. M.-R., "Extended fuzzy logic: Sets and systems," Submitted for publication, 2013.

[17] R. L. de Mantaras and L. Godo, "From fuzzy logic to fuzzy truth-valued logic for expert systems: A survey," Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 750-755, 1993.

[18] B. Kang, D. Wei, Y. Li, and Y. Deng, "A method of converting z-number to classical fuzzy number," J. Inform. Comput. Sci., Vol. 9, pp. 703-709, 2012.

[19] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Printice-Hall, United States of America, 1997.

زیرنویس‌ها

[1] Indeterminate
[2] Modus Tollens
[3] Web Gadget
[4] *f*-Transformation
[5] Cointensive Assumption
[6] Precisiated/Imprecisiated
[7] *f*-Sets
[8] Type-Reducer
[9] Modus Ponens
[10] Non-Interaction
[11] Fuzzy Expectation Concept
[12] Universal Approximator