

طراحی کنترل‌کننده‌های فازی

۴-۱ مقدمه

در سال ۱۹۷۵ ممدانی^۱ و اصیلیان^۲ برای اولین بار یک کوره سیمان را با منطق فازی کنترل کردند [۱]. در سال ۱۹۷۸ هولمبلاد^۳ و اوسترگارد^۴ اولین کنترل‌کننده فازی را برای کنترل یک فرآیند صنعتی کامل، یعنی کوره سیمان به کار بردند. از آن پس بود که کنترل‌کننده‌های فازی در بسیاری از دستگاهها از قبیل ماشین لباس‌شویی، دوربین فیلمبرداری، پلویز و ... و فرآیندهای صنعتی مانند مترو و روباتیک و ... به کار برده شد. کنترل فازی یک روش کنترل بر اساس منطق فازی است. در حقیقت اگر منطق فازی را به طور ساده "محاسبه با کلمات به جای اعداد" بنامیم، کنترل فازی را می‌توان "کنترل با جملات به جای معادلات" نامید. یک کنترل فازی شامل یک سری قواعد است. برای مثال برای یک کنترل‌کننده فازی نوعی داریم:

۱ - اگر خطا منفی بود و مشتق خطا منفی بود، آنگاه خروجی خیلی منفی می‌باشد.

۲ - اگر خطا منفی بود و مشتق خطا صفر بود، آنگاه خروجی کمی منفی باشد. و...

به مجموعه قواعد یک کنترل‌کننده فازی، "پایگاه قواعد" می‌گوییم. قواعد به شکل آشنای "اگر - آنگاه" می‌باشند.

با مجموعه قواعدی نظیر فوق، کامپیوتر قادر خواهد بود با در نظر گرفتن خطا و مشتق خطا برنامه مربوطه را اجرا کرده و سیگنال کنترلی (خروجی کنترل‌کننده) را محاسبه کند.

این نوع کنترل را می‌توان اجرای عمل کنترل توسط یک اپراتور دانست. یک اپراتور با زیر نظر گرفتن رفتار سیستم (ورودی به اپراتور) و طبق تجربیات و دانسته‌های خود (پایگاه قواعد) یک

¹ Mamdani

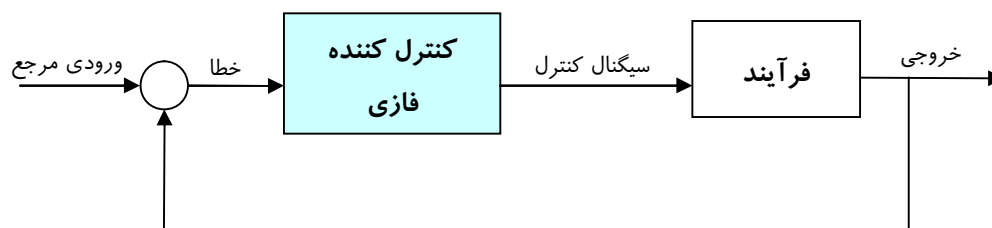
² Assilian

³ Holmblad

⁴ Ostergaard

فرمان کنترلی (خروجی) می‌دهد یا پارامترهای یک کنترل‌کننده را تنظیم می‌نماید. برای طراحی فازی روشهایی مانند مکان ریشه، طراحی بر اساس پاسخ فرکانسی، جابجایی قطبها و غیره وجود ندارد.

کنترل‌کننده‌های فازی در شکلهای مختلف کنترل ظاهر شده‌اند که یکی از پرکاربردترین آنها کنترل مستقیم است که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

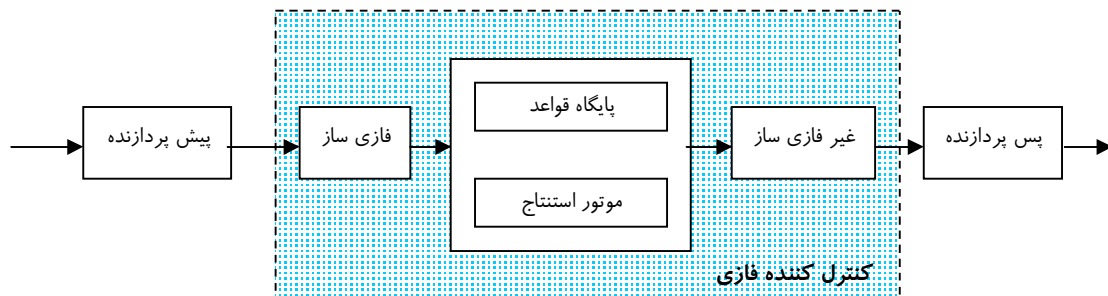


شکل ۱-۴ : نمایش بلوکی استفاده از کنترل‌کننده فازی به صورت مستقیم.

در این حالت کنترل‌کننده فازی در مسیر پیشروی یک سیستم کنترلی فیدبک دار قرار می‌گیرد. خروجی فرآیند با ورودی مرجع مقایسه شده و در صورت وجود خطا کنترل‌کننده یک سیگنال کنترلی مطابق استراتژی کنترلی خود تولید می‌کند. لازم به ذکر است که ورودی کنترل‌کننده می‌تواند مشخصه‌های دیگری از سیستم نظیر مشتق خطا، انتگرال خطا و یا ترکیبی از آنها نیز باشد.

۲-۴ ساختار یک کنترل‌کننده فازی

یک کنترل‌کننده فازی از چهار بخش اصلی تشکیل شده است. فازی‌کننده، پایگاه قواعد، بخش تصمیم‌گیری، غیر فازی‌کننده. شکل ۲-۴ نمایی از یک کنترل‌کننده فازی را نمایش می‌دهد. معمولاً قبل و بعد از کنترل‌کننده فازی همانند شکل (۲-۴) به ترتیب پیش پردازنده و پس پردازنده استفاده می‌شود. در بخشهای بعد، این قسمتها را توضیح خواهیم داد.



شکل ۴-۲: دیاگرام بلوکی ساختار کنترل کننده فازی

۳-۴ پیش پردازش (Preprocessing)

ورودی یک کنترل کننده فازی مقادیر قطعی است که توسط وسایل اندازه‌گیری و سنسورها به دست آمده است. معمولاً این مقادیر نیاز به تغییراتی قبل از ورود به کنترل کننده فازی دارند. این تغییرات توسط بخش پیش‌پردازنده فراهم آورده می‌شود.

مثالهایی از پیش‌پردازنده‌ها عبارتند از :

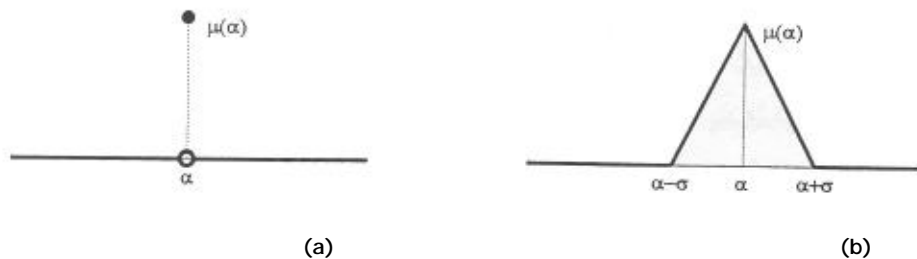
- کوانتیزه کردن همراه با نمونه‌برداری یا گرد کردن به مقادیر صحیح.
- نرمالیزه کردن یا مقیاس‌بندی به یک بازه خاص یا استاندارد.
- فیلتر کردن به منظور حذف نویز.
- مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری.

وقتی ورودی کنترل کننده فقط خطا باشد استراتژی کنترلی یک کنترل ایستا (static) می‌باشد. اما یک کنترل کننده دینامیک (dynamic) نیازمند ورودیهای دیگر نظیر مشتق، انتگرال یا مقادیر قبلی اندازه‌گیری شده می‌باشد.

این مقادیر ابعاد کنترل‌کننده را زیادتر کرده و در نتیجه تعداد قواعد بیشتری نیاز است که طراحی آن را مشکل می‌کند.

۴-۴ فازی‌کننده (Fuzzifier)

اولین بلوک داخل کنترل‌کننده، فازی‌کننده می‌باشد، که در آن درجه تعلق مقادیر ورودی به تابع تعلقهای مختلف محاسبه می‌شود. برای این کار چندین روش موجود است. روش اول این است که متغیر را به صورت تک مقداری^۱، به صورت فازی در آوریم. در این حالت تابع تعلق عضویت متغیر در یک نقطه "1" و در بقیه نقاط "0" می‌باشد. شکل ۴-۳-۳ زیر نمونه‌ای از این گونه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: (a) تابع تعلق تک مقداری (b) تابع تعلق مثلثی با محدوده 2δ

در روش دیگری می‌توان آن را به صورت یک منحنی نمایش داد. مثلاً فرض کنید انحراف معیار در حالت غیر فازی به علت وجود نویز یا خطای اندازه‌گیری برابر δ باشد. در آن صورت تابع فازی متغیر به صورت مثلثی متساوی‌الساقین که میانه قاعده آن در مقدار اندازه گرفته شده بود، طول قاعده آن برابر 2δ بوده و بلندی برابر ۱ دارد، تعریف می‌شود. (شکل ۴-۳-۳ b)

۵-۴ پایگاه قواعد (Rule base)

پایگاه قواعد به مجموعه " اگر - آنگاه " فازی گفته می‌شود که قسمت هوشمند فازی را تشکیل می‌دهد. برای تنظیم قواعد چهار روش وجود دارد:

- دانش مهندسی کنترل و دانش خبره
- رفتار اپراتور در موقع کنترل
- بر پایه مدل فازی فرآیند (شناسایی فازی سیستم)
- بر پایه آموزش خود سازمانده

آنچه در این پروژه انجام شده است روش آخر می‌باشد که پایگاه قواعد با استفاده از الگوریتم ژنتیکی آموزش می‌بیند و بهینه می‌شود.

قواعد ممکن است دارای چند متغیر هم در قسمت شرط و هم در قسمت نتیجه‌شان باشند. در این حالت کنترل‌کننده می‌تواند به سیستمهای تک ورودی - تک خروجی (SISO) و هم چند ورودی - چند خروجی (MIMO) اعمال شود. یک کنترل‌کننده نوعی ممکن است از خطا، مشتق خطا و انتگرال خطا، با هم استفاده کند. اما به این حالت چند ورودی نمی‌گوییم چون هر سه سیگنال ورودی از اندازه‌گیری خطا به دست آمده‌اند.

۴-۶ قالبهای قواعد (Rule formats)

هر کنترل‌کننده فازی از تعدادی " اگر- آنگاه " به عنوان پایگاه قواعد استفاده می‌کند. این قواعد به شکلهای مختلف داده می‌شود. فرض کنید یک کنترل‌کننده فازی دارای دو ورودی خطا و یک سیگنال به عنوان خروجی تولید می‌کند. آنگاه قالب نمایش end-user به شکل زیر می‌باشد:

1 – if error is Neg error dot is Neg then OutPut is NB

:

:

9 -

نامهای **Pos** ، **Zero** ، **Neg** ، مربوط به مجموعه‌های فازی برای هر دو ورودی می‌باشند و **NB** ، **PS** ، **PB** ، **NS** (به ترتیب منفی بزرگ، منفی کوچک، مثبت بزرگ، مثبت کوچک) مجموعه‌های فازی خروجی می‌باشند.

همان قواعد بالا در قالب فشرده‌تری به نام " قالب نسبی " نیز نمایش داده می‌شود.

<u>Erorr</u>	<u>error dot</u>	<u>Output</u>
Neg	Pos	Zero
Neg	Zero	NS
:	:	:

این شکل برای کاربران با تجربه که می‌خواهند نگاهی سریع به مجموعه قواعد داشته باشند، مناسب می‌باشد. در این حالت پیش فرض این می‌باشد که بین ورودی اتصال دهنده "and" و بین قواعد از "or" استفاده شده است.

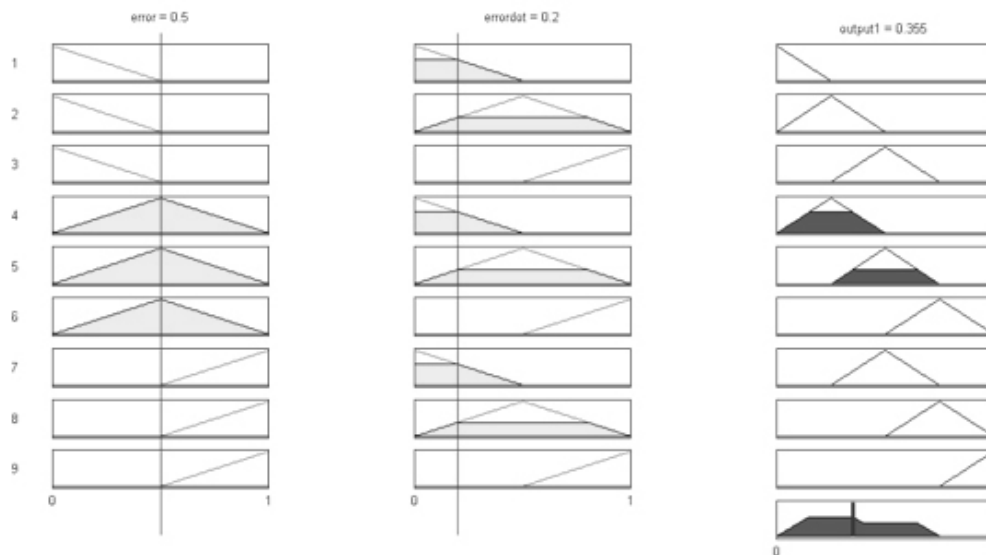
از قالب فشرده‌تری با نام "قالب جدولی" نیز استفاده می‌شود که در زیر آورده شده است:

error \ error dot	Neg	Zero	Pos
Neg	NB	NS	Zero
Zero	NS	Zero	PS
Pos	Zero	PS	PB

شکل ۴-۴: قالب جدولی پایگاه قواعد

در این حالت خالی بودن خانه جدول به معنی عدم وجود قاعده در حالت مربوط به آن خانه است. همچنین باید توجه داشت که وقتی تعداد ورودی‌ها بیشتر از ۲ می‌شود، ابعاد جدول هم بیشتر از ۲ خواهد شد و در نتیجه در نمایش آن دچار اشکال خواهیم شد.

وقتی کنترل‌کننده چند خروجی است می‌توان قواعد آن را به چند قاعده یک خروجی تبدیل کرد و در هر خانه جدول، چند خروجی را نشان داد. آخرین قالب نمایش، قالب گرافیکی می‌باشد. که در آن نمایش تابع تعلقها هم امکان‌پذیر می‌باشد. در این حالت نشان دادن نحوه استنتاج به راحتی صورت می‌پذیرد. این قالب در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: قالب گرافیکی نمایش پایگاه قواعد.

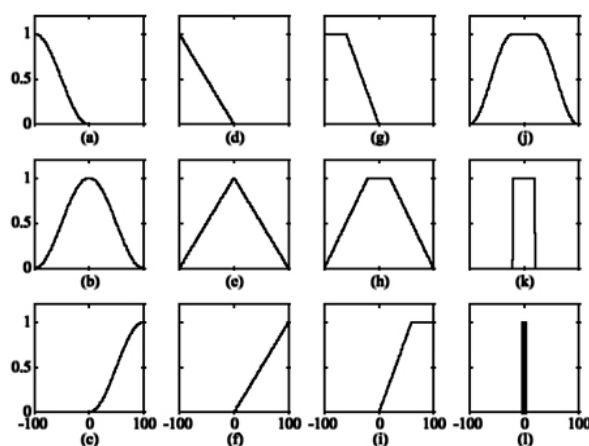
۷-۴ مجموعه جهانی (Universe)

عناصر مجموعه فازی از یک مجموعه مرجع به نام مجموعه جهانی گرفته می‌شوند. مجموعه جهانی شامل همه عناصری است که می‌توان برای سیستم متصور شد. قبل از طراحی تابع تعلق لازم است مجموعه جهانی برای ورودی و خروجی در نظر گرفته شوند. این کار در حقیقت پیدا کردن ماکزیمم و مینیمم ورودی‌ها و خروجی‌هاست. تا همه مقادیر ورودی اندازه‌گیری شده و خروجی اعمال به سیستم توسط کنترل‌کننده فازی قابل فهم باشند. نکته دیگر این است که توابع عضویت ورودی می‌توانند گسسته یا پیوسته باشند. توابع عضویت پیوسته روی مجموعه جهانی پیوسته و توابع عضویت گسسته روی مجموعه جهانی گسسته عمل می‌کنند. در حالت گسسته

مجموعه جهانی یک بردار است که ورودیها باید حتماً عضو آن باشند که همان طور که گفته شد پیش پردازش انجام این کار را بر عهده می‌گیرد.

۸-۴ طراحی توابع عضویت

هر عنصر مجموعه جهانی با یک درجه عضو توابع عضویت می‌باشند. اشکال مختلف تابع عضویت در شکل (۶-۴) نشان داده شده است.



شکل ۶-۴: مثالهایی از توابع عضویت: (a) تابع z ، (b) گوسین، (c) تابع s ، (d-f) حالت‌های مختلف مثلثی،

(g-i) حالت‌های مختلف دوزنقه ای، (j) گوسین تخت، (k) مستطیلی، (l) تک مقداری

یکی از مسائلی که در زمان طراحی باید حل شود نحوه ساختن توابع عضویت است. در حقیقت با دو سؤال اساسی روبرو هستیم:

(۱) چگونه می‌توان شکل مجموعه‌ها را به دست آورد؟

(۲) چند مجموعه باید تعریف شود؟

طبق قواعد سرانگشتی داریم:

- مجموعه‌ها باید آنقدر پهن باشند که نویز در اندازه‌گیری را شامل شوند.
- همپوشانی مجموعه‌ها باید به اندازه کافی باشد. در غیر این صورت ممکن است کنترل‌کننده

به حالت‌هایی برخورد کند که خروجی خوبی نمی‌دهد.

برای پاسخ به سؤالات مطرح شده می‌توان از تجربیات اپراتور استفاده کرد که بعضی اوقات این

نیز مشکل است. در این حالت پیشنهاد می‌شود:

- با مجموعه‌ای مثلثی شروع کنید: همه توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها باید مثلثی متقارن با پهنای مساوی باشند.

- همپوشانی حداقل ۵۰٪ باشد: در حالت اولیه پهنای هر مجموعه طوری انتخاب شود که هر عضو مجموعه جهانی حداقل عضو دو تابع عضویت (با درجه غیرصفر) باشد، بجز عناصر دو طرف محدوده مجموعه جهانی که ممکن است فقط عضو یک مجموعه باشند. در حقیقت فاصله بین دو تابع عضویت موجب می‌شود که به ازای عناصر آن فاصله هیچ قاعده‌ای فعال نشود.

۹-۴ موتور استنتاج (Inference Engine)

به دلیل اینکه هر پایگاه قواعد فازی در عمل شامل بیش از یک قاعده می‌شود، سؤال اساسی این است که چگونه می‌توان از روی یک مجموعه از قواعد نتیجه‌گیری کرد. دو روش برای نتیجه‌گیری وجود دارد. استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد و استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه.

○ استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد: در این نوع استنتاج، تمامی قواعد موجود در پایگاه فازی در یک رابطه فازی در $U \times V$ ترکیب شده و آنگاه بدیده یک قاعده "اگر - آنگاه" فازی تنها نگریسته

می‌شود. اگر $R^{(l)}$ یک رابطه فازی در $U \times V$ یعنی $R^{(l)} = A_1^l \times A_n^l \dots \rightarrow B^l$

و M قاعده داشته باشیم، از آنچه پیشتر دیدیم داریم:

$$\mu_{A_1^l \times \dots \times A_n^l}(x_1, \dots, x_n) = \mu_{A_1^l}(x_1) \times \dots \times \mu_{A_n^l}(x_n)$$

که \times یک عملگر t -نرم می‌باشد. اگر بین قواعد رابطه اجتماع را بپذیریم، آنگاه داریم:

$$Q = \bigcup_{i=1}^M R^{(i)}$$

$$\mu_Q(x, y) = \mu_{R^{u^1}}(x, y) + \dots + \mu_{R^{u^M}}(x, y) \quad \text{که + نشانه s - نرم است}$$

این ترکیب ممدانی نامیده می‌شود.

اگر بین قواعد رابطه اشتراک را بپذیریم، ترکیب گودل بدست می‌آید:

$$Q = \bigcup_{i=1}^M R^{(i)}$$

$$\mu_Q(x, y) = \mu_{R^{u^1}}(x, y) \times \dots \times \mu_{R^{u^M}}(x, y) \quad \text{که } \times \text{ نشانه t - نرم می‌باشد.}$$

○ استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه: در این حالت هر قاعده در پایگاه قواعد فازی یک خروجی فازی را معین کرده و خروجی نمایی ترکیب M خروجی جداگانه مجموعه‌ای فازی خواهد بود. عمل ترکیب را با اجتماع یا اشتراک می‌توان انجام داد. در این حالت تابع تعلق خروجی را برای هر قاعده به طور جداگانه و از طریق مودس پوننس تعمیم یافته به دست آورده، سپس بسته به استفاده از اجتماع یا اشتراک به ترتیب از ترکیب ممدانی یا گودل برای ترکیب M قاعده استفاده می‌کنیم.

با وجود دو نوع استنتاج گفته شده و استلزامهای مختلف و همچنین عملگرهای مختلف این سؤال در طراحی مطرح می‌شود که کدامیک از این گزینه‌ها را انتخاب کنیم. در حالت کلی سه معیار زیر را می‌بایست در نظر گرفت :

- معنای شهودی : به عنوان مثال اگر یک انسان خبره معتقد باشد که قواعد از هم مستقل هستند از اجتماع برای ترکیب قواعد استفاده می‌شود.
- راندمان محاسباتی : فرمولی در رابطه تابع عضویت خروجی به دست می‌آید که پیاده‌سازی محاسباتی آن ساده باشد.

• ویژگی‌هایی که به صورت تجربی بدست می‌آیند.

موتور استنتاج که معمولاً در سیستم فازی استفاده می‌شوند عبارتند از :

(۱) موتور استنتاج حاصل ضرب (۲) موتور استنتاج مینیمم

اگر از استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با اجتماع و استلزام ممدانی و ضرب جبری برای t - نرمها

و \max برای s - نرمها استفاده کنیم موتور حاصل ضرب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu_{B'}(y) = \max_1^M [\sup_{x \in U} (\mu_{A'}(x), \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \mu_{B_i}(y))]$$

اگر استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه با ترکیب اجتماع، استلزام مینیمم ممدانی، عملگر \min برای -

t - نرمها و \max برای s - نرمها استفاده کنیم موتور استنتاج مینیمم بدست می‌آید :

$$\mu_{B'}(y) = \max_1^n [\sup_{x \in U} (\min(\mu_{A'}(x), \mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n), \mu_{B_i}(y)))]$$

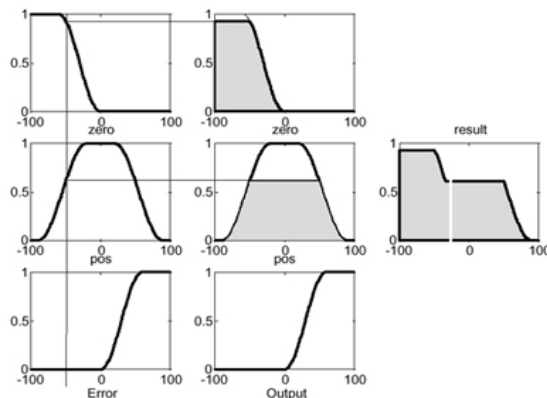
۴-۱۰ غیر فازی ساز (Defuzzifier)

مجموعه فازی نتیجه استنتاج باید تبدیل به یک عدد غیر فازی شود تا بتوان خروجی متناسب با آن

را به عنوان سیگنال کنترل به فرآیند اعمال کرد. این عمل را غیرفازی سازی می‌نامند. در شکل

۴-۷ مقدار روی محور x که با رنگ سفید علامت دار شده است، سیگنال کنترل بدست آمده از

غیرفازی کردن نتیجه استنتاج می‌باشد. در این حالت خروجی کنترل کننده به ازای خطای -۵۰ ،



شکل ۴-۷: استفاده از غیرفازی ساز مرکز جرم برای کنترل‌کننده تک ورودی تک خروجی

۲۵- به دست آمده است.

روشهای مختلفی برای غیرفازی کردن وجود دارد :

- مرکز جرم^۱: عدد غیرفازی خروجی، u ، تحت مرکز جرم مجموعه فازی به دست آمده محاسبه می‌شود :

$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i) x_i}{\sum_i \mu(x_i)}$$

که x_i نقاط درون مجموعه جهانی است.

در حقیقت در این روش میانگین وزنی عناصر نتیجه استنتاج محاسبه می‌شود. در حالت پیوسته انتگرال به جای جمع قرار می‌گیرد. به این روش مرکز سطح نیز گفته می‌شود.

- مرکز جرم برای حالت تک مقداری^۲: اگر تابع عضویت نتیجه تک مقداری باشد، مقدار خروجی برابر :

$$u = \frac{\sum_i \mu(s_i) s_i}{\sum_i \mu(s_i)}$$

می‌باشد که s_i موقعیت " تک مقدار " i ام در مجموعه جهانی می‌باشد.

- دو بخشی سطح^۳: این روش مقداری را برمی‌گرداند که مقدار سطح زیر منحنی تابع عضویت را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند. در حالت پیوسته :

$$u = \{x \mid \int_{\min}^x \mu(x) dx = \int_x^{\max} \mu(x) dx\}$$

¹ Centre Of Gravity

² Centre Of Gravity method for Singletons

³ Bisector of Area

min کوچکترین مقدار مجموعه جهانی و max بزرگترین مقدار آن می‌باشد. این روش

محاسبات پیچیده‌ای دارد و همچنین در حالت گسسته تعریف نمی‌شود.

• متوسط ماکزیمم¹: در این روش نقطه‌ای با بالاترین درجه عضویت در تابع تعلق خروجی

استنتاج انتخاب می‌شود. اگر چند نقطه با بالاترین درجه عضویت وجود داشت متوسط آنها را به

عنوان سیگنال خروجی انتخاب می‌کنیم. در این روش محاسبات نسبتاً مناسب است.

۴-۱۱ پس پردازنده (Postprocessing)

در مواقعی که نیاز داریم خروجی در یک محدوده استاندارد قرار گیرد یا می‌خواهیم تبدیل مقیاس

انجام دهیم از پس پردازش روی سیگنال خروجی کنترل‌کننده فازی استفاده می‌کنیم.

¹ Mean Of Maxima