

رهیافتی جدید در کنترل فازی چندمتغیره راکتورهای پلیمر شدن: تعریف و تعقیب مسیرهای فازی

A New Approach in Multivariable Fuzzy Control of Polymerization Reactors: Fuzzy Trajectory Definition and Tracking

مهدی رفیع زاده^{۱*}، رضا سلگی^۱، رسول وثوق^۲

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

۲- تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۶۷۶۵/۳۳۸۱

دریافت: ۸۲/۴/۷، پذیرش: ۸۲/۸/۳

چکیده

کنترل شرایط فرایند پلیمر شدن برای دستیابی به محصولی با خواص معین ضروری است. در این پژوهش، برای کنترل دمای یک کنترل کننده فازی بکار گرفته شده است که علاوه بر خطای دمای راکتور از خطای دمای ژاکت نیز به عنوان ورودی استفاده می‌کند. اما، میزان دمای مطلوب ژاکت متاثر از وجود نوفه و اغتشاش در سیستم است. از این رو، در میزان مطلوب این متغیر عدم قطعیت وجود دارد. برای مدلسازی این عدم قطعیت از اعداد فازی استفاده شده است و در نهایت مسیری فازی برای دمای مطلوب ژاکت بدست آمده است. در ادامه برای تعقیب این مسیر نوع خاصی از کنترل کننده فازی، که کنترل کننده فازی شبه سوگنو نامیده می‌شود، طراحی شده است. نتایج تجربی نشان دهنده عملکرد مطلوب این کنترل کننده در کنترل پلیمر شدن در محلول متیل متاکریلات است.

واژه‌های کلیدی

کنترل راکتور، پلیمر شدن،
کنترل فازی، مسیر فازی،
کنترل کننده فازی شبه سوگنو

مقدمه

اندازه گیری نیستند و برای کنترل حلقه بسته آنها باید پارامترهای دیگری که در حین فرایند قابل اندازه گیری هستند و سایر خواص را کنترل کرد که بر اساس آنها برآورد می‌شوند [۱]. دما، چگالی، فشار، سرعت جریان از جمله این متغیرها هستند. پلیمر شدن ناپیوسته معمولاً در یک ظرف

برای دستیابی به پلیمری با خواص نهایی مطلوب باید شرایط فرایند طی پلیمر شدن به شکل مناسبی کنترل شود. از سوی دیگر، اغلب خواص نهایی پلیمر از قبیل جرم مولکولی و توزیع آن، میزان تبدیل مونومر، درجه شاخه‌ای شدن و توزیع ترکیب درصد کوپلیمر در حین فرایند قابل

Key Words

reactor control, polymerization,
fuzzy control, fuzzy trajectory,
pseudo-Sugeno fuzzy controller

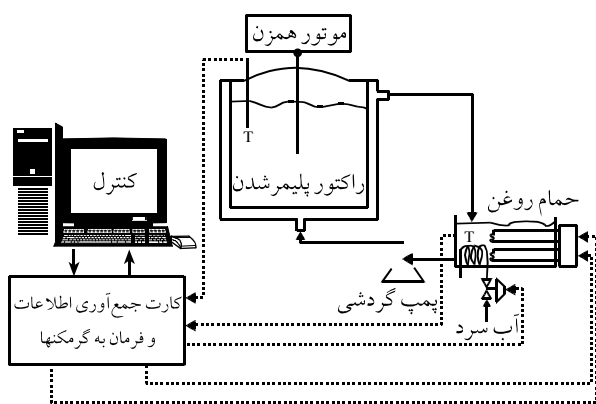
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: mehdi@aut.ac.ir

در این پژوهش، روشی جدید با عنوان مسیرهای فازی و تعقیب آنها مطرح شده است. سپس، برای تعقیب این مسیر کنترل کننده های فازی سوگونو به کنترل کننده فازی شبه سوگونو تعمیم یافته و اساس نظری آنها پایه ریزی شده است. در پایان نیز کارایی این کنترل کننده جدید در تعقیب مسیر از پیش تعیین شده برای دمای راکتور آزمایشگاهی پلیمر شدن در محلول متیل متاکریلات نشان داده شده است.

تجربی

دستگاهها

نمای کلی راکتور، سیستم کنترل و متعلقات آن در شکل ۱ نشان داده شده است. راکتور مورد استفاده در آزمایش راکتور بوچی یک لیتری دوجداره است و از جدار بیرونی به عنوان ژاکت گرمایی استفاده می شود. راکتور مجهز به یک همزن سه پره ای است که به کمک یک موتور سه فاز می تواند سرعت متغیر rpm ۰-۳۳۰۰ داشته باشد. ژاکت گرمایی به یک حمام روغن مرتبط است. جنس حمام از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ و حجم آن برابر ۱۰ L است. سیال جاری در حمام و ژاکت، روغن گرمایی شرکت بهران است که دمای کاری آن تا ۱۵۰°C است. گرمایش روغن به وسیله دو گرمکن، که هر یک توان حداکثر ۱۵۰۰ w را دارند و در موقعیتی مناسب در حمام نصب شده اند، انجام می پذیرد. سرمایش روغن نیز به وسیله یک لوله فولادی ضد زنگ به طول ۹۵ cm که به شکل مارپیچ درآمده و در داخل حمام تعبیه شده است صورت می گیرد. در داخل این مارپیچ آب سرد لوله کشی شهری جریان دارد و جریان آب به کمک یک شیر برقی قطع و وصل می شود. برای چرخش روغن در داخل ژاکت گرمایی از یک پمپ دنده ای



شکل ۱- تجهیزات آزمایشگاهی.

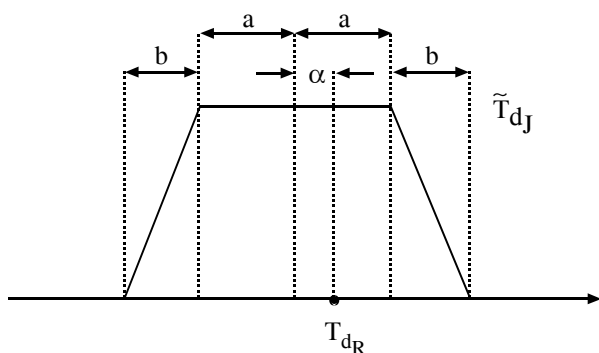
(بر اساس الگویی از پیش طراحی شده) انجام می شود. کنترل پلیمر شدن ناپیوسته معمولاً شامل نحوه اختلاط ابتدایی واکنش دهنده ها و نحوه اختتام فرایند نیز می شود. گرمایش و سرمایش مخلوط واکنش کننده از راه انتقال گرما با مایع داخل ژاکت انجام می گیرد.

کنترل دمای مخلوط واکنش کننده یکی از معمولترین راهبردهای کنترل در پلیمر شدن است، زیرا دمای واکنش پلیمر شدن اثر غیر قابل انکاری بر خواص محصول نهایی دارد [۱،۲].

کنترل راکتور پلیمر شدن مورد مطالعه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. Tzouanas و Shah [۳] از روش کنترل جایابی قطب تطبیقی برای کنترل راکتور پلیمر شدن ناپیوسته در محلول متیل متاکریلات استفاده کرده اند. آنها تابع تبدیل تجربی را با استفاده از مدل ARMA بکار گرفته اند که نتایج قابلیت کنترل میزان تبدیل مونومر را نشان داده است. Soroush و Kravaris [۴] و Muta و همکارانش [۵] کنترل کننده ای پیش بین مبتنی بر مدل غیرخطی را پیشنهاد داده اند. آنها آزمایشهای خود را روی یک واحد کوچک پلیمر شدن در محلول متیل متاکریلات انجام داده اند و یک تخمین زن جدید بکار برده و با استفاده از فیلتر کالمن راکتور را کنترل کرده اند.

Berber و همکارانش [۶] یک کنترل کننده غیرخطی ساده برای کنترل دمای راکتور پلیمر شدن استیرین طراحی کرده اند. روش آنها شامل راهبرد یک مرحله ای نیوتون به همراه برآورد متغیرهای حالت بود. Rho و همکارانش [۷] ضمن مروری بر مدلسازی پلیمر شدن ناپیوسته متیل متاکریلات، پارامترهای مدل را با استفاده از نتایج موجود در مراجع بدست آوردند. سپس، در بخش کنترل از یک مدل تجربی به عنوان مدل فرایند استفاده کردند. پارامترهای این مدل بطور پیوسته به صورت مدل ARMAX برآورد شده است.

پس از ابداع منطق و نظریه مجموعه های فازی توسط Zadeh [۸] و پدیدار شدن کاربرد موفق آن در کنترل توسط Mamdani [۹]، کنترل فازی به رهیافتی قابل توجه در کنترل تبدیل شده است. کنترل کننده های فازی را می توان به دو خانواده کنترل کننده های بر پایه مدل فازی و کنترل کننده های بر پایه قوانین فازی دسته بندی کرد. در دهه اخیر، کاربردهای فراوانی از بکارگیری نظریه فازی در کنترل فرایندهای شیمیایی و پلیمری گزارش شده است [۱۰]. Abony و همکارانش [۱۱] یک کنترل کننده فازی سوگونوی تطبیقی را با استفاده از مکانیسم تطبیقی COEM [۱۲] برای کنترل فرایند پلیمر شدن طراحی کرده و نشان داده اند این کنترل کننده در مقابل کنترل کننده های PID سنتی از کارایی بهتری برخوردار است. Asua [۱۳] از یک سیستم فازی برای تعیین شرایط بهینه فرایند و یک کنترل کننده مبتنی بر مدل برای کنترل راکتور پلیمر شدن اولسونی در شبیه سازی استفاده کرده است.



شکل ۲- مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در دمای مطلوب ژاکت \tilde{T}_{dJ} به شکل یک عدد فازی.

اصل استوار است که دمای مطلوب ژاکت را در هر لحظه می‌توان به شکل یک عدد فازی مانند شکل ۲ مدل کرد.

پارامترهای a و b تنظیم کننده میزان عدم قطعیت موجود در دمای مطلوب ژاکت اند و با توجه به اطلاعات آماری ما از نوفه و اغتشاشات معین می‌شوند و α پارامتری است که باید با توجه به درک طراح از میزان گرمادهی واکنش تنظیم گردد.

بدین ترتیب می‌توان دمای مطلوب ژاکت را در هر لحظه به شکل عدد فازی \tilde{T}_{dJ} تعریف کرد. از سوی دیگر، میزان دمای ژاکت در هر لحظه عددی غیر فازی است و برای محاسبه تفاضل این دو، ابتدا باید دمای ژاکت را فازی سازی و سپس تفاضل آنها را محاسبه کرد. در این پژوهش، از فازی ساز منفرد (singleton) برای فازی سازی دمای ژاکت استفاده شده است:

$$\mu_{\tilde{T}_J}(T) = \begin{cases} 1 & T = T_J \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن μ تابع عضویت مجموعه فازی \tilde{T}_J است. و برای محاسبه تفاضل دمای مطلوب ژاکت و دمای آن به عنوان خطای دمای ژاکت باید از یک تفاضل فازی استفاده کرد:

$$\tilde{E}_J = \tilde{T}_{dJ} - \tilde{T}_J \quad (3)$$

در ادبیات فازی برای محاسبه تفاضل دو عدد فازی دو روش عمده وجود دارد [۱۴]: استفاده از اصل توسیع (extension principle) و استفاده از برشهای α و حساب بازه‌ها. با استفاده از اصل توسیع عدد فازی $\tilde{A} - \tilde{B}$ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\tilde{A} - \tilde{B}}(z) = \sup \{ T(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) \mid z = x - y \} \quad (4)$$

با سرعت ۱۵۰۰ rpm و حداکثر سرعت جریان ۱۵ L/min استفاده شده است. برای اندازه گیری دما نیز از دو حسگر مقاومتی PT۱۰۰ با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ استفاده شده است.

برای کنترل خودکار راکتور یک سیستم جمع آوری اطلاعات و کنترل کامپیوتری طراحی و ساخته شده است. سیستم کامپیوتری بکار رفته، یک کامپیوتر Pentium III 800 با ۱۲۸ مگابایت حافظه موقت است. با استفاده از یک کارت واسطه Advantech PCL-818L که روی کامپیوتر نصب شده است می‌توان اطلاعات لازم برای کنترل کننده را از طریق مدارهای واسط حسگرها جمع آوری کرده، به حافظه کامپیوتر منتقل و برای محاسبات و مطالعات بعدی ذخیره سازی کرد. گرمکنها و شیر برقی نیز به کمک مدارهای راه انداز الکترونیکی از کنترل کننده و از طریق کارت واسط فرمان می‌گیرند.

رهیافت تعریف مسیرهای فازی و تعقیب آنها

در این پژوهش، برای کنترل دمای راکتور پلیمر شدن از یک کنترل کننده چند متغیره فازی استفاده شده است. برای جلوگیری از ایجاد ناپایداری و نوسان شدید دمای راکتور (T_R)، کنترل کننده فازی علاوه بر استفاده از میزان خطای دمای راکتور (E_R)، باید از میزان خطای دمای ژاکت نیز استفاده کند. از آنجا که دمای مطلوب راکتور (T_{dR})، از پیش معین شده است خطای دمای راکتور بسادگی و با عبارت زیر تعریف می‌شود:

$$E_R = T_{dR} - T_R \quad (1)$$

بدین ترتیب میزان خطای دمای راکتور به شکل یک عدد قطعی (غیر فازی یا crisp) در اختیار خواهد بود و در صورت لزوم برای ورود آنها به یک کنترل کننده فازی می‌توان آن را فازی سازی (fuzzification) کرد. اما، برای محاسبه میزان خطای دمای ژاکت باید از میزان دمای مطلوب آن در هر زمان اطلاع داشت. در عمل میزان مطلوب دمای ژاکت از یک سو تابعی از دینامیک فرایند است (که در مدل‌سازی آن عدم قطعیتی در میزان پارامترهای فیزیکی وجود دارد) و از سوی دیگر تابعی از نوفه و اغتشاشات موجود در محیط است (که حداکثر اطلاعات ما از آن برآوردی از پارامترهای آماری تابع توزیع آن است). به همین دلیل، در دمای مطلوب ژاکت نوعی عدم قطعیت وجود دارد. از سوی دیگر، اطلاعاتی از آن در دست است. در زمانهایی که میزان گرمادهی و گرماگیری واکنش ناچیز است، می‌توان مقدار آن را در حدود دمای مطلوب راکتور دانست. همچنین، در زمان گرمادهی واکنش، این مقدار باید کوچکتر و در زمان گرماگیری واکنش بزرگتر از دمای مطلوب راکتور باشد. فکر اصلی در تعریف مسیر فازی برای دمای ژاکت بر این

نتیجه گیری طی مراحل زیر انجام می شود:

- به ازای ورودی $(x_1, \dots, x_n) = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ خروجی هر یک از m قانون با استفاده از معادله $u^{(i)} = f^{(i)}(x_1^*, \dots, x_n^*)$ محاسبه می شود.
- ضریب $w^{(i)}$ که بیانگر میزان برقراری مقدم قانون i ام به ازای ورودیهای (x_1^*, \dots, x_n^*) است، به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$w^{(i)} = \prod_{j=1}^n \mu_{\tilde{A}_j^{(i)}}(x_j^*) \quad (8)$$

بطوری که $\mu_{\tilde{A}_j^{(i)}}$ نشان دهنده تابع عضویت مجموعه فازی $\tilde{A}_j^{(i)}$ است. ضریب فوق نشان دهنده اثر هر قانون بر خروجی کنترل کننده است. خروجی کنترل کننده به شکل مجموع وزنی تالی قوانین به شکل زیر بدست می آید:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m w^{(i)} u^{(i)}}{\sum_{i=1}^m w^{(i)}} \quad (9)$$

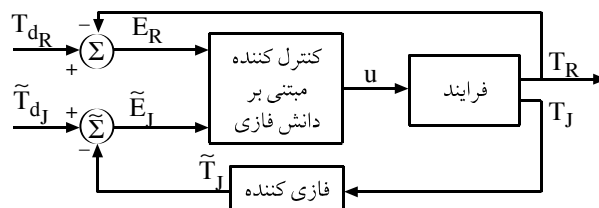
در این پژوهش، برای کنترل دمای راکتور از خطای راکتور (E_R) و خطای ژاکت (\tilde{E}_J) به عنوان ورودیهای کنترل کننده استفاده می شود. بنابراین، نیاز به معیاری وجود دارد که به وسیله آن بتوان میزان ارزش درستی عباراتی نظیر E_R is \tilde{A} و \tilde{E}_J is \tilde{A} (و بطور کلی عبارت \tilde{X} is \tilde{A} که در قوانین کنترل کننده مورد استفاده قرار می گیرد) را معین کرد.

خطای راکتور E_R یک عدد قطعی است. بنابراین، میزان درستی عبارت E_R is \tilde{A} برابر $\mu_{\tilde{A}}(E_R)$ است. اما، خطای ژاکت \tilde{E}_J یک عدد فازی است و روش سنتی موجود را نمی توان برای تعیین میزان درستی \tilde{E}_J is \tilde{A} بکار برد. کنترل کننده پیشنهاد شده در این پژوهش از قوانینی نظیر

$$\text{IF } E_R \text{ is } A^{(i)} \text{ AND } \tilde{E}_J \text{ is } B^{(i)} \text{ THEN } u = c^{(i)} \quad (10)$$

استفاده می کند و بدلیل شباهت آن به کنترل کننده های سوگنوی سنتی می توان آن را کنترل کننده شبه سوگنو نامید (بر خلاف کنترل کننده های سوگنو یکی از ورودیهای این کنترل کننده یک عدد فازی است). تنها تفاوت بین کنترل کننده های سوگنو و این کنترل کننده در مرحله دوم نتیجه گیری یعنی تعیین ضریب $w^{(i)}$ برای هر قانون است. این ضریب برای یک کنترل کننده شبه سوگنو و برای قانونی نظیر قانون یاد شده به شکل زیر بدست می آید:

$$w^{(i)} = \text{tv} [E_R \text{ is } \tilde{A}^{(i)} \text{ AND } (\tilde{E}_J \text{ is } \tilde{B}^{(i)})] \quad (11)$$



شکل ۳- نمودار جعبه ای حلقه بسته کنترلی کنترل کننده فازی پیشنهاد شده.

که در آن T یک t - نرم است. در ره یافت دوم برش α عدد فازی $\tilde{A} - \tilde{B}$ به شکل زیر تعریف می گردد:

$$\alpha(\tilde{A} - \tilde{B}) = \alpha \tilde{A} - \alpha \tilde{B} \quad (5)$$

که در آن تفاضل دو بازه $[x, y]$ و $[x', y']$ چنین محاسبه می شود:

$$[x, y] - [x', y'] = [x - x', y - y'] \quad (6)$$

بسادگی می توان ثابت کرد که در صورت فازی سازی منفرد دمای ژاکت، استفاده از هر کدام از دو روش بالا به نتیجه ای یکسان منجر خواهد شد. نمودار جعبه ای حلقه بسته کنترلی در شکل ۳ مشاهده می شود.

کنترل کننده شبه سوگنو

Takagi و Sugeno [15] در سال ۱۹۸۵ روش جدیدی برای مدلسازی و کنترل سیستمهای غیر خطی ارائه کردند. امروزه کنترل کننده سوگنو، مرسومترین کنترل کننده فازی است. مهمترین مشخصه این کنترل کننده شکل خاص قوانین فازی آن است. قانون i ام در پایگاه قوانین فازی این کنترل کننده به شکل زیر است:

$$\text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{A}_1^{(i)} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ is } \tilde{A}_n^{(i)} \text{ THEN } u = u^{(i)} = f^{(i)}(x_1, \dots, x_n) \quad (7)$$

بطوری که (x_1, \dots, x_n) ورودیهای کنترل کننده (متغیرهای حالت) و $f^{(i)}$ یک تابع خطی از متغیرهای حالت است. در ضمن، x_1, \dots, x_n و u اعداد قطعی و $\tilde{A}_1^{(i)}, \dots, \tilde{A}_n^{(i)}$ مجموعه های فازی اند. در بسیاری از کاربردها که از کنترل کننده سوگنو استفاده شده است تالی قوانین به شکل اعداد ثابت فرض شده اند.

اگر پایگاه قوانین کنترل کننده دارای m قانون به شکل بالا باشد،

قضیه ۱- اگر \tilde{X} یک عدد فازی تعمیم یافته و \tilde{A} یک شبه عدد فازی باشد، میزان ارزش درستی عبارت کلامی \tilde{X} is \tilde{A} با استفاده از معادله ۱۴ برابر ارتفاع مجموعه فازی $\tilde{X} \cap \tilde{A}$ است (که در آن \cap با استفاده از همان t -نرمی بدست آمده که در معادله ۱۴ بکار رفته است). به عبارت دیگر:

$$tv(\tilde{X} \text{ is } \tilde{A}) = \text{hgt}(\tilde{X} \cap \tilde{A}) \quad (15)$$

قضیه ۲- اگر \tilde{X} یک عدد فازی منفرد،

$$\mu_{\tilde{X}}(x) = \begin{cases} 1 & x = x^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

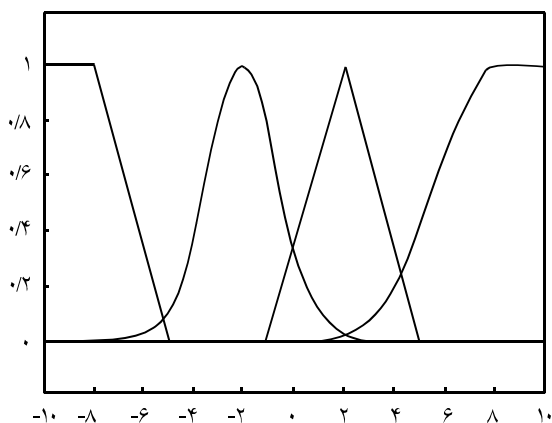
و \tilde{A} یک شبه عدد فازی باشد، خواهیم داشت:

$$tv(\tilde{X} \text{ is } \tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}(x^*) \quad (17)$$

قضیه ۲ نشان می دهد که اگر ورودیهای کنترل کننده فازی شبه سوگنو مجموعه های فازی منفرد باشند، کنترل کننده فازی شبه سوگنو به یک کنترل کننده سوگنو تقلیل می یابد.

حال با استفاده از تعاریف و قضایای گفته شده می توان میزان برقراری مقدم هر یک از قوانین کنترل کننده شبه سوگنو را که پیش از این در معادله ۱۱ شرح داده شد بدست آورد:

$$w^{(i)} = tv[(E_R \text{ is } \tilde{A}^{(i)}) \text{ AND } (\tilde{E}_J \text{ is } \tilde{B}^{(i)})] \\ = T(\mu_{\tilde{A}^{(i)}}(E_R), \text{hgt}(\tilde{E}_J \cap \tilde{B}^{(i)})) \quad (18)$$



شکل ۴- نمونه هایی از شبه عددهای فازی که در پایگاه قوانین فازی برای نمایش متغیرهای کلامی بکار می روند.

که در آن tv نمایش دهنده عملگر فازی ارزش درستی است.

تعریف - مجموعه فازی \tilde{X} را که روی مجموعه اعداد حقیقی تعریف شده است، یک عدد فازی تعمیم یافته می نامیم، اگر:

۱- $\text{Core}(\tilde{X})$ ناتهی باشد و

۲- به ازای هر $0 < \alpha \leq 1$ ، \tilde{X}^α بازه ای بسته باشد.

مزیت این تعریف نسبت به تعریف کلاسیک عدد فازی [۱۶] (که در آن علاوه بر شرایط ذکر شده باید پشتیبان مجموعه فازی \tilde{X} نیز بازه ای بسته باشد) در این است که فازی سازی گوسین متغیرها نیز به مجموعه های فازی منجر می شود که در تعریف یاد شده می گنجد.

تعریف - مجموعه فازی \tilde{A} را که روی مجموعه اعداد حقیقی تعریف شده است، یک شبه عدد فازی می نامیم، اگر:

۱- $\text{Core}(\tilde{A})$ ناتهی باشد و

۲- به ازای هر $0 < \alpha \leq 1$ ، \tilde{A}^α بازه ای بسته یا به ازای هر $0 < \alpha \leq 1$ ،

\tilde{A}^α بازه ای نیم باز باشد.

بدین ترتیب مجموعه های فازی نظیر مجموعه های شکل ۴ را که به طرز گسترده ای در پایگاه قوانین مجموعه های فازی برای تعریف متغیرهای کلامی بکار می روند، می توان شبه عددهای فازی نامید.

چنانکه پیش از این نیز گفته شد برای انجام فرایند نتیجه گیری در یک کنترل کننده شبه سوگنو باید میزان ارزش درستی عبارت کلامی \tilde{X} is \tilde{A} را بدست آورد. بدین منظور این عبارت کلامی را به عبارت \tilde{X} مساوی \tilde{A} است تعبیر و ارزش درستی آن به شکل زیر تعریف می شود:

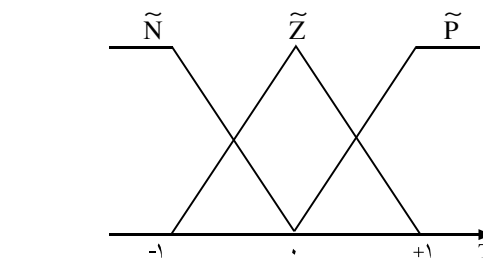
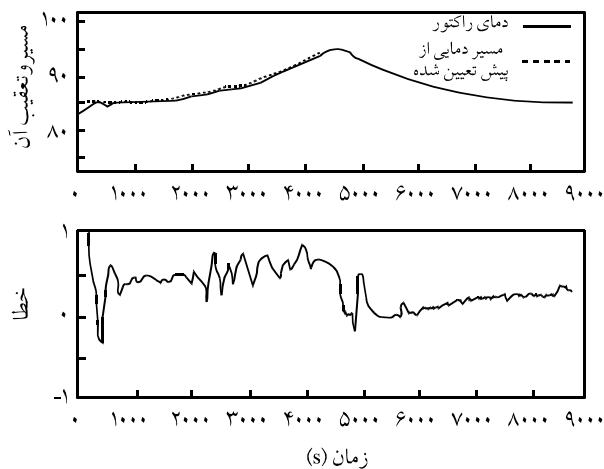
$$tv(\tilde{X} \text{ is } \tilde{A}) = tv(\tilde{X} \approx \tilde{A}) \\ = T(tv(\tilde{X} \leq \tilde{A}), tv(\tilde{X} \geq \tilde{A})) \quad (12)$$

برای محاسبه ارزش درستی عبارت $\tilde{X} \leq \tilde{A}$ و $\tilde{X} \geq \tilde{A}$ نیز تعریف زیر بکار می رود [۱۷]:

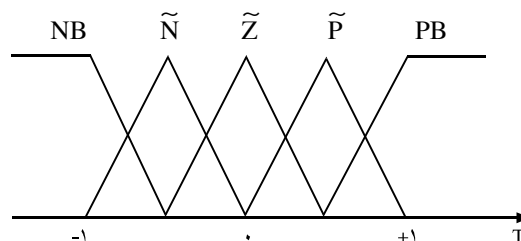
$$tv(\tilde{X} \leq \tilde{A}) = \sup \left\{ T(\mu_{\tilde{X}}(x), \mu_{\tilde{A}}(a)) \mid x \leq a \right\} \\ tv(\tilde{X} \geq \tilde{A}) = \sup \left\{ T(\mu_{\tilde{X}}(x), \mu_{\tilde{A}}(a)) \mid x \geq a \right\} \quad (13)$$

بدین ترتیب با جایگذاری معادله ۱۳ در ۱۲ به عبارت زیر می رسم:

$$tv(\tilde{X} \text{ is } \tilde{A}) = \\ T(\sup \left\{ T(\mu_{\tilde{X}}(x), \mu_{\tilde{A}}(a)) \mid x \leq a \right\}, \\ \sup \left\{ T(\mu_{\tilde{X}}(x), \mu_{\tilde{A}}(a)) \mid x \geq a \right\}) \quad (14)$$



شکل ۵- مجموعه های فازی تعریف شده روی خطای دمای ژاکت.



شکل ۶- مجموعه های فازی تعریف شده روی خطای دمای راکتور.

شکل ۷- توانایی کنترل کننده شبه سوگنو در تعقیب مسیر دمای راکتور.

چنانکه از شکل پیداست حداکثر قدر مطلق خطا کمتر از 0.87°C است. همچنین، میانگین قدر مطلق خطا نیز از 0.38°C کمتر است، که با توجه به دقت حسگرهای دما که در حدود 0.3°C است، نتیجه ای بسیار مطلوب است.

این کنترل کننده در مقایسه با کنترل کننده PI تطبیقی که میانگین قدر مطلق خطای آن در حدود 0.8°C است [۲]، عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. این در حالی است که پارامترهای α ، a و b کنترل کننده کاملاً بصورت تجربی معین گردیده است و بهینه نشده اند. در نتیجه، تنظیم ساده پارامترهای این کنترل کننده مزیت دیگر آن نسبت به کنترل کننده های PID است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، رهیافتی جدید به نام مسیرهای فازی برای متغیرهایی همچون دمای ژاکت که در میزان مطلوب آنها عدم قطعیت وجود دارد پایه ریزی شد. سپس، کنترل کننده موسوم به کنترل کننده شبه سوگنو برای تعقیب این مسیر طراحی و نظریه آن توسعه یافت و توانایی آن در تعقیب یک مسیر از پیش تعیین شده، در آزمایش روی فرایند پلیمر شدن در محلول متیل متاکریلات در یک راکتور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی بدست آمده نشان دهنده آن است که کنترل کننده طراحی شده می تواند با میزان خطایی قابل قبول مسیر دمای از پیش تعیین شده را به راکتور اعمال کند.

نتایج و بحث

پارامترهای α ، a و b در شکل ۲ از پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده بوده و در این تحقیق به شکل تجربی انتخاب شده اند:

$$a = 0.5^\circ\text{C}, \quad b = 0.5^\circ\text{C}, \quad \alpha = 0.3^\circ\text{C}$$

و روی مجموعه اعداد حقیقی، ۵ و ۳ مجموعه فازی مثالی، به عنوان مقادیر کلامی متغیرهای کلامی خطای دمای راکتور و ژاکت (مطابق شکل های ۵ و ۶) تعریف شدند. بدین ترتیب، پایگاه قوانینی متشکل از ۱۵ قانون فازی بدست می آید.

سپس، کنترل کننده شبه سوگنو طراحی شده، که بر اساس قضیه ۱ فرایند استنتاج را انجام می دهد، در آزمایش بر فرایند پلیمر شدن در محلول متیل متاکریلات اعمال شد. همچنین، در نتیجه گیری نیز از حاصلضرب جبری به عنوان t - نرم استفاده شد، به عبارت دیگر:

$$w^{(i)} = \mu_{\tilde{A}(i)}(E_R) \text{hgt}(\tilde{E}_J \cap \tilde{B}^{(i)}) \quad (19)$$

توانایی کنترل کننده در تعقیب مسیر از پیش تعیین شده دمای راکتور و میزان خطای آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

مراجع

- Schork F.J., Deshpande P.B. and Leffew K.W., *Control of Polymerization Reactors*, Marcel Dekker, 67-98, 1993.
- Rafizadeh M., Sequential Linearization Adaptive Control of Solution Polymerization of Methyl Methacrylate in a Batch Reactor, *Polym. React. Eng.*, **10**, 121-133, 2002.
- Tzounanas V.K. and Shah S.L., Adaptive Pole-Assignment Control of a Batch Polymerization Reactor, *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1183-1193, 1989.
- Soroush M. and Kravaris C., Nonlinear Control of a Batch Polymerization Reactor: An Experimental Study, *AICHE J.*, **40**, 1429-1448, 1992.
- Mutha R.K., Cluett W.R. and Penlidis A., On-Line Nonlinear Model-Based Estimation and Control of a Polymer Reactor, *AICHE J.*, **43**, 3042-3058, 1997.
- Berber R., Yetik K. and Cahmh A., Nonlinear Model Predictive Control with State Estimation in Batch Polymerization, *American Control Conference*, 3778-3783, 1998.
- Rho H.R., Huh Y. and Rhee H., Application of Adaptive Model-Predictive Control to a Batch MMA Polymerization Reactor, *Chem. Eng. Sci.*, **53**, 3728-3739, 1998.
- Zadeh L.A., Fuzzy Sets, *Inform. Control*, **8**, 338-353, 1965.
- Mamdani E., Application of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant, *Proc. IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)*, **121**, 1585-1888, 1974.
- King P.J. and Mamdani E.H., The Application of Fuzzy Control System to Industrial Processes, *Automatica*, **13**, 235-242, 1997.
- Abonyi J., Nagy L. and Szeifert F., Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Batch Polymerization Reactors, *IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, 251-255, 1997.
- Anderson H.C., Lotfi A. and Tsoi A.C., A New Approach to Adaptive Fuzzy Control: The Controller Output Error Method, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, **B27**, 686-691, 1997.
- Asua J.M., Control of Emulsion Polymerization Reactor Using a Hierarchical Fuzzy Logic/Model-Based Controller, *Polym. React. Eng.*, **9**, 37-67, 2001.
- Wang L.X., *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall PTR, NJ, USA, 221-234, 1997.
- Takagi T. and Sugeno M., Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modelling and Control, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, **SMC-15(1)**, 116-132, 1985.
- Lin C.T. and Lee C.S.G., *Neural Fuzzy Systems: A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems*, Prentice Hall PTR, NJ, USA, 89-111, 1996.
- Buckley, James J. and Eslami E., *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*, Springer-Verlag, 84-88, 2002.