

کنترل یک برج تقطیر با مدل خطی به روش فازی نوع-۲ بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

عباس عسگری^(۱) - غلامرضا عرب مارکده^(۲) - عباس چترایی^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(۲) دانشیار - دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(۳) استادیار - مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۱۱

خلاصه: فرآیند تقطیر از فرآیندهای مهم در صنایع شیمیایی به شمار می‌رود و کاربرد وسیعی در این صنایع دارد. برج تقطیر به عنوان یک ابزار محبوب نزد مهندسان شیمی به منظور جداسازی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد و متداول‌ترین روش در جداسازی مواد می‌باشد. ثابت نگه داشتن غلظت محصولات در برج تقطیر از دیدگاه کنترلی بسیار مهم است. کنترل این فرآیندهای پیچیده نیاز به روش‌های هوشمند دارد تا بتواند بر اساس رفتار سیستم، تصمیم مناسبی را برای کنترل آن اتخاذ کند. از میان روش‌های هوشمند، سیستم فازی به دلیل کارایی این روش در کنترل سیستم‌های پیچیده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی نوع ۱- برای مدل خطی برج تقطیر طراحی شده است. در طراحی این کنترل‌کننده فازی، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پاسخ، استفاده شده است. نشان داده شده است که کنترل‌کننده فازی عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های PI متداول دارد. سپس کنترل‌کننده فازی نوع ۲- جایگزین فازی نوع ۱- شده و نشان داده شده است که عملکرد فازی ۲- از لحاظ مختلف، بهتر از فازی ۱- می‌باشد. در این تحقیق برای مدل‌سازی و پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK استفاده شده است.

کلمات کلیدی: برج تقطیر، مدل خطی، کنترل غلظت، سیستم فازی، کنترل‌کننده فازی نوع-۲، الگوریتم ژنتیک

Control of a Linear Distillation Column Using Type-2 Fuzzy Method Optimized by Genetic Algorithm

Abbas Asgari⁽¹⁾ - Gholamreza Arab Markadeh⁽²⁾ - Abbas Chatraei⁽³⁾

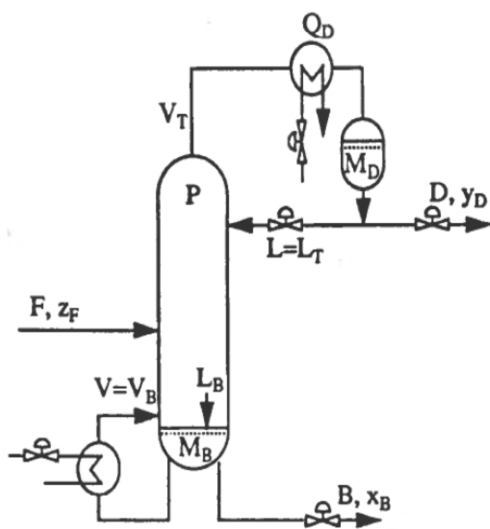
(1) MSc. - Tiny Smart Grid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
a.asgari@pogc.ir

(2) Associate Professor – Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
arab-gh@eng.sku.ac.ir

(3) Assistant Professor - Tiny Smart Grid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
chatraei@iaun.ac.ir

The distillation process is an important process in the chemical industry and has wide application in industry. Distillation tower is used by chemical engineers as a popular tool to separate materials and is the most common method for separating materials. Keeping constant the product composition in the distillation column is very important from control perspective. Control of these complicated processes need intelligent methods to adopt the appropriate decision for control based on the behavior of the system. Between intelligent methods, fuzzy technique has superior response in complex systems control and so is used in this study. In this article at first, a type-1 fuzzy controller is designed for linear model of distillation tower. In design of this Fuzzy controller, genetic algorithm is used for optimization of fuzzy rules base. It has been shown that the fuzzy controller is better than conventional PI one. Then the type-1 fuzzy controller has been replaced with type-2 fuzzy controller and has been shown that the performance of type-2 is better than type-1 in various points of view. In this study, the MATLAB/SIMULINK software has been used for modeling and implementing the proposed methods.

Index Terms: Distillation column, Liner model, Composition control, Fuzzy system, Type-2 fuzzy controller, Genetic algorithm.



شکل (۱) مدل برج تقطیر [۱]
Fig. (1): Distillation column model

تعریف متغیرها و واحدهای مربوطه در جدول (۱) آمده است.

Table (1): Variables in distillation column
جدول (۱): متغیرهای برج تقطیر

متغیر	تعریف	واحد
F	نرخ تغذیه	Kmole/min
Z _F	ترکیب تغذیه	Mole fraction
D	فلو محصول تقطیر شده	Kmole/min
B	فلو محصول پایینی	Kmole/min
x _D	نسبت مولی ترکیب سبک در محصول تقطیر شده	Mole fraction
x _B	نسبت مولی محصول سبک در محصول پایینی	Mole fraction
R (L)	فلو پس ریز	Kmole/min
S (V)	فلو بویل آپ	Kmole/min
N	تعداد تئوری مراحل تقطیر	-
M _i	هولد آپ مایع در هر مرحله	Kmole

هدف از کنترل برج تقطیر معمولاً کنترل درصد خلوص ماده خروجی آن است. اولین مرحله برای طراحی کنترل کننده برج تقطیر، مدل سازی آن است. مدل های مختلفی برای برج تقطیر وجود دارد که در اینجا مدل خطی دو ورودی- دو خروجی برای یک برج تقطیر باینری نمونه با ماتریس تابع انتقال موسوم به وود و بری^۵، به صورت رابطه (۱) انتخاب شده است [۲].

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix} \quad (1)$$

۱- مقدمه

فرآیند تقطیر از فرآیندهای مهم در صنایع شیمیایی به شمار می رود و کاربرد وسیعی در این صنایع دارد. برج تقطیر به عنوان یک ابزار محبوب نزد مهندسان شیمی به منظور جداسازی مواد مورد استفاده قرار می گیرد و متداول ترین روش در جداسازی مواد می باشد. مصرف انرژی که در صنعت به فرآیند تقطیر اختصاص داده می شود حدود ۳۰٪ از کل مصرف انرژی در صنعت می باشد. برای بهره برداری مناسب از این فرآیند و استخراج محصولات خروجی مطلوب از آن، کنترل این فرآیند لازم و ضروری است. به دلایل متعددی مانند ایمنی، نیازهای محیط زیستی، بحث های مربوط به عرضه و تقاضا و قیمت محصولات و ... بهبود روش های کنترل در برج تقطیر بسیار حائز اهمیت شده است. تقطیر در واقع، جداسازی فیزیکی برش های نفتی است که اساس آن، اختلاف در نقطه جوش هیدروکربن های مختلف است. هر چه هیدروکربن سنگین تر باشد، نقطه جوش آن زیادتر است.

برج تقطیر شامل چهار قسمت اصلی است: برج، جوش آور، چگالنده و تجهیزات کمکی.

چند اصطلاح پر کاربرد در فرآیند تقطیر به شرح زیر می باشد:

خوراک: مخلوط ورودی به داخل برج که ممکن است مایع، گاز و یا مخلوطی از مایع و گاز باشد، خوراک نام دارد. معمولاً محل خوراک در نقطه مشخصی از برج است که از قبل تعیین می شود.

محصول بالاسری: آنچه از بالای برج به عنوان خروجی از آن دریافت می شود محصول بالاسری نامیده می شود که معمولاً غنی از جزئی است که از نقطه جوش کمتری برخوردار می باشد.

محصول ته مانده: ماده ای که از پایین برج خارج می شود ته مانده یا محصول انتهایی نام دارد و معمولاً غنی از جزء یا اجزاء سنگین تر (که از نقطه جوش بالاتری برخوردار می باشند) خواهد بود.

نسبت برگشت (پس ریز): نسبت مقدار مایع برگشتی به برج بر حسب مول یا وزن به مایع یا بخاری که به عنوان محصول از سیستم خارج می شود را نسبت برگشتی می گویند [۱].

۲- مدل سازی سیستم

مدل کلی در نظر گرفته شده برای برج تقطیر در شکل (۱) نشان داده شده است.

این برج دو محصولی می باشد که محصول تقطیر شده از بالای برج و محصول باقیمانده از پایین برج خارج می گردد. هدف، کنترل غلظت محصول بالایی و پایینی می باشد.

ورودی‌های کنترل‌کننده‌های فازی به کار گرفته شده‌اند. در نهایت، نتایج به دست آمده با نتایج کنترل‌کننده‌های PID و MPC مقایسه گشته‌اند. در [۱۱] یک کنترل‌کننده فازی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)^{۱۸} برای کنترل درصد خلوص محصول بالای برج تقطیر دوجزئی طراحی شده است و از PSO برای انتخاب بهینه پارامترهای توابع عضویت گوسین فازی استفاده شده است. در [۱۲] یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل دمای سینی برج با استفاده از کنترل غیرمستقیم تغذیه طراحی شده و نشان داده شده است که نسبت به کنترل‌کننده PID در برابر تغییرات فلو و ترکیب تغذیه مقاوم‌تر است.

همچنین در [۱۳] از یک کنترل‌کننده PI فازی با ورودی فلو بخار و یک کنترل‌کننده کمکی P فازی با ورودی فلو پس‌ریز برای کنترل غلظت محصول برج استفاده شده است و نشان داده شده است که عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده از نظر سرعت پاسخ، کاهش بالادگی و مواجهه با اغتشاش از کنترل‌کننده حلقه بسته معمولی یا فازی بهتر است. در [۱۴] یک ساختار کنترلی PID فازی نوع-۱ و نوع-۲ برای کنترل یک مدل خاص از برج تقطیر باینری طراحی شده و نتایج مقایسه، کنترل موثرتر و مقاوم‌تر فازی نوع-۲ را نسبت به نوع-۱ نشان داده است.

در مقاله حاضر، ابتدا یک کنترل‌کننده PI پایه با ضرایب بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک برای یک مدل خطی برج تقطیر طراحی گردیده است. سپس یک کنترل‌کننده فازی نوع-۱ طراحی و در تعیین قواعد بهینه برای این کنترل‌کننده فازی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و در نهایت کنترل‌کننده فازی نوع-۲ جایگزین فازی نوع-۱ گردیده است. نشان داده شده است که عملکرد فازی-۲ از جنبه‌های مختلف بهتر از فازی-۱ می‌باشد.

لازم به ذکر است تفاوت این تحقیق با مقالاتی با عنوان مشابه همچون [۱۴] صرفنظر از تفاوت در مدل‌های متفاوت برج تقطیر (و در نتیجه تفاوت در ساختار کنترلی)، استفاده همزمان از روش فازی نوع-۲ و الگوریتم ژنتیک در طراحی کنترل‌کننده است که هم وابستگی به اطلاعات خبره در طراحی را حذف و هم عدم قطعیت را در ساختار کنترلی منظور می‌کند. همچنین تفاوت دیگر، در ساختار به کار گرفته شده برای کاهش مرتبه است که در صورت لزوم می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند GA به‌منظور انتخاب مقادیر بهینه بهره‌های خروجی در مسیر هر کدام از کنترل‌کننده‌های چهارگانه کاهش رتبه یافته، از این روش در پیاده‌سازی کنترل‌کننده برای مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر نیز بهره برد.

۴- سیستم‌های فازی نوع-۱

یک سیستم فازی معمولی که از این پس آن را سیستم فازی نوع-۱^{۱۹} می‌نامیم، در حالت کلی با استفاده از یک پایگاه قواعد و با دانستن ورودی‌ها، خروجی مناسب را تعیین می‌کند. در واقع یک سیستم فازی نگاشتی غیرخطی و مبتنی بر دانش خبره است که یک بردار در فضای

که در آن X_B ، X_D به ترتیب درصد ماده خروجی در بالا و پایین برج بوده و R و S ، ورودی‌های کنترلی سیستم هستند که به ترتیب نرخ جریان پس‌ریز^۷ و نرخ جریان بخار^۷ می‌باشند.

۳- مروری بر کنترل‌کننده‌های طراحی شده پیشین

تاکنون روش‌های زیادی برای کنترل برج تقطیر ارائه شده است. در [۳] از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۸ با الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی سیستم برج تقطیر استفاده شده و سپس کنترل مدل پیش‌بین (MPC)^۹ تقریبی به آن اعمال شده است. جورج و فرانسس [۴] یک کنترل تطبیقی مدل مرجع (MRAC)^{۱۰} مبتنی بر قاعده MIT برای برج تقطیر باینری طراحی کرده‌اند. در این روش یک مدل خطی مرتبه کاهش یافته استخراج می‌شود به طوری که دینامیک‌های فرآیند تقطیر را بهتر منعکس کند و به‌عنوان مدل مرجع استفاده می‌شود. در [۵] سه استراتژی کنترل مختلف شامل کنترل PID^{۱۱} مرسوم، کنترل MPC و کنترل پیش‌بین شبکه عصبی (NNPC)^{۱۲} برای یک برج تقطیر واکنشی TAME^{۱۳} پیاده‌سازی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های MPC و NNPC عملکرد کنترلی بهتر و نرم‌تری را از خود نشان می‌دهند.

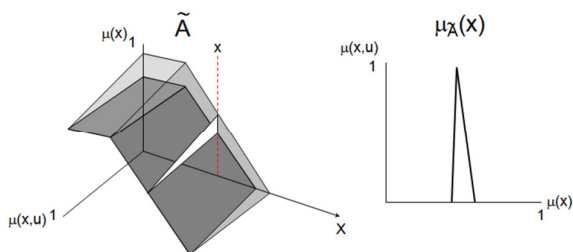
همچنین استراتژی کنترل فازی از دیگر روش‌هایی است که در منابع مختلفی گزارش شده است. میسرا و همکارانش [۶] از یک کنترل‌کننده PID فازی مرتبه کسری برای کنترل برج تقطیر استفاده کرده‌اند. این کنترل‌کننده از مدل تاکاگی-سوگنو (TS)^{۱۴} برای بخش فازی آن استفاده می‌کند. عملکرد این کنترل‌کننده با PID فازی مقایسه شده و نشان می‌دهد که کنترل‌کننده ارائه شده در مقاله بهتر عمل می‌کند. همچنین استراتژی کنترل فازی از دیگر روش‌هایی است که در منابع مختلفی گزارش شده است. کاپور و همکارانش [۷] از کنترل‌کننده‌های PID و کنترل‌کننده‌های فازی به طور جداگانه برای کنترل دمای یک برج تقطیر واکنشی استفاده کرده و نتایج آن‌ها را مورد مقایسه قرار داده‌اند. در [۸] ساختار طراحی یک کنترل فازی مبتنی بر FPGA^{۱۵} و کاربرد آن برای کنترل دمای یک برج تقطیر استخراجی معرفی شده است. نتایج پیاده‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد کنترل فازی از کنترل PID از دیدگاه پایداری و سرعت همگرایی بهتر است. محمد و همکارانش [۹] یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل دمای بخار در ستون تقطیر بخار برای نفت استخراج شده ارائه کرده‌اند. در این روش از ساختار مدل ARMAX^{۱۶} و اعمال ورودی PRBS^{۱۷} برای مدل‌سازی خروجی دمای بخار استفاده شده است. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی حاکی از عملکرد بهتر آن در ردیابی سیگنال مرجع در کنترل دما در مقایسه با کنترل‌کننده PID است. سینگ و همکارانش [۱۰] از کنترل فازی برای دستیابی به درصد خلوص مطلوب محصولات در یک برج تقطیر باینری استفاده کرده‌اند. دو کنترل‌کننده فازی مجزا برای کنترل خلوص محصول بالا و پایین برج طراحی شده است. سیگنال خطا و تفاضل اول آن به‌عنوان

بعضی از پارامترهای تابع عضویت دارای نامعینی باشند، مثلاً یک تابع گاوسی با میانگین یا واریانس نامطمئن دارای شکل مشخص و پارامتر نامعین می‌باشد [۱۶].

در واقع سیستم‌های فازی نوع-۲ به طراح این امکان را می‌دهند تا تأثیرات عدم قطعیت در سیستم‌های فازی مبتنی بر قاعده راه، مدل‌سازی نماید و این تأثیرات عدم قطعیت را به حداقل رساند. ولی متأسفانه به خاطر اینکه مجموعه‌های فازی نوع-۲ در فهم و استفاده نسبت به مجموعه‌های فازی نوع-۱ پیچیده‌تر هستند، تاکنون استفاده از آنها نسبت به مجموعه‌های فازی نوع-۱، کمتر گسترش یافته است. این پیچیدگی‌ها به علت طبیعت سه بعدی و وابستگی مستقیم روابط آن به اصل توسعه "زاده" و در نتیجه پیچیدگی محاسباتی آن حاصل شده است.

تمامی نامعینی‌های فوق باعث می‌شوند که با یک سیستم فازی با توابع عضویت نامطمئن روبرو باشیم. مجموعه‌های فازی نوع-۱ قادر به مدل کردن مستقیم نامعینی‌های فوق نیستند، زیرا توابع عضویت آنها کاملاً غیرفازی هستند.

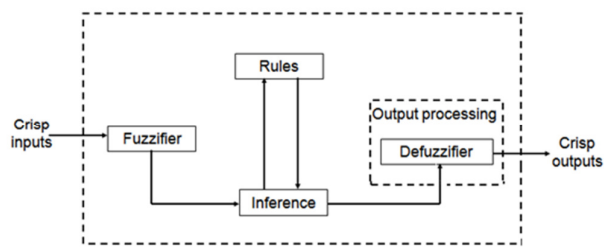
مجموعه‌های فازی نوع-۲ به دلیل اینکه دارای توابع عضویت فازی هستند قادر به مدل کردن نامعینی‌های فوق می‌باشند. لذا مدل‌سازی اینگونه عدم قطعیت‌ها باعث کاهش تأثیر آنها نیز خواهد شد. رویکرد یک مجموعه فازی نوع-۱ مدل کردن ابهامات با استفاده از یک عدد بین ۰ و ۱ است. که این یک عدد قطعی است. در واقع میزان تعلق هر عنصر به یک مجموعه فازی نوع-۱ یک عدد کاملاً قطعی است. در حالیکه میزان تعلق هر عنصر به یک مجموعه فازی نوع-۲ می‌تواند خود یک مقدار لغوی (زبانی) باشد. یک مجموعه فازی نوع-۲ عدم قطعیت را با استفاده از یک تابع نشان می‌دهد که خودش یک عدد فازی نوع-۱ است. از اینرو گاهی اوقات این نوع مجموعه‌ها را فازی نوع-۲ می‌نامند. در واقع یک مجموعه فازی نوع-۲ اعداد در دامنه قطعی^۲ را به اعداد فازی محدود شده در رنج [۰, ۱] نگاهت می‌دهد. در واقع توابع عضویت مجموعه‌های فازی نوع-۱ در یک فضای دو بعدی تعریف می‌شوند، در حالی که توابع عضویت مجموعه‌های فازی نوع-۲ در فضای سه بعدی هستند و همین بعد سوم مجموعه‌های فازی نوع-۲ است که با تأمین یک درجه آزادی بیشتر، امکان مدل کردن نامعینی‌ها را فراهم آورده است. در شکل (۳) یک تابع عضویت فازی نوع-۲، نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۳): یک تابع عضویت فازی نوع-۲

Fig. (3): A type-2 MF

ورودی را به یک بردار یا اسکالر در فضای خروجی انتشار می‌دهد. ساختار یک سیستم فازی معمولی در شکل (۲) مشخص شده است [۱۵].



شکل (۲): ساختار یک سیستم فازی نوع-۱ [۱۵]

Fig. (2): Type-1 FLC

در سیستم‌های فازی نوع-۱، به صورت کلی با مجموعه ای از قوانین «اگر- آنگاه» روبرو هستیم که معمولاً توسط داده‌های تجربی که از طریق کارشناسان و افراد خبره به دست آمده است و پایگاه قواعد که قلب یک سیستم فازی است را تشکیل می‌دهند. فرض کنید که پایگاه قوانین دارای M قانون بوده و امین قانون به صورت زیر باشد:

$$R^1: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^1 \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^1 \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ is } F_p^1 \text{ then } y \text{ is } G^1$$

x_i ها مجموعه‌های فازی ورودی هستند که توسط وسایل اندازه‌گیری به دست آمده‌اند، F_i^1 ها مجموعه‌های مقدمه هستند، G^1 ها مجموعه‌های نتیجه هستند و y مجموعه فازی خروجی است.

در حالت کلی در یک سیستم فازی، ورودی‌ها ابتدا توسط فازی‌ساز به یک مجموعه‌ی فازی تبدیل می‌شوند؛ که فازی‌سازی خود بنا به ساختمان سیستم فازی می‌تواند به صورت‌های فازی‌سازی منفرد، فازی‌سازی مثلثی، فازی‌سازی گوسین و ... باشد.

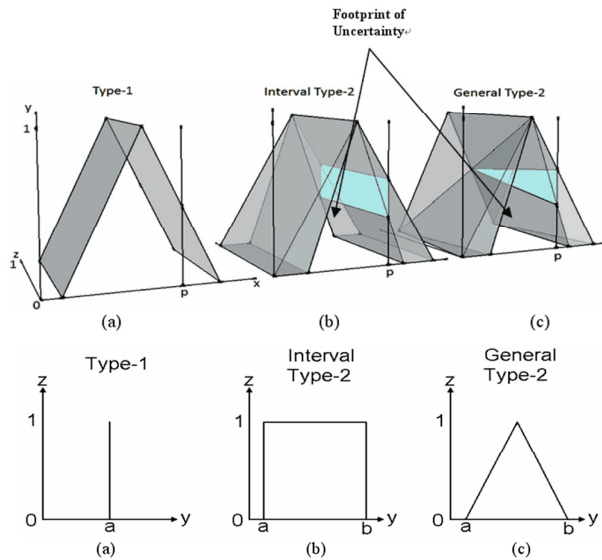
از نقطه نظر عملی، عمده کاربردهای تئوری فازی بر روی کنترل فازی متمرکز شده است. سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان کنترل‌کننده‌های حلقه‌باز و حلقه‌بسته مورد استفاده قرار داد. معمولاً هنگامی که به عنوان کنترل‌کننده حلقه باز استفاده می‌شود، سیستم فازی بعضی پارامترهای کنترل را معین کرده و آنگاه سیستم مطابق با این پارامترهای کنترل کار می‌کند. در بسیاری از موارد نیز سیستم فازی به عنوان یک کنترل‌کننده‌ی حلقه بسته استفاده می‌شود. در این حالت خروجی‌های فرآیند اندازه‌گیری شده و به طور همزمان عملیات کنترل انجام می‌شود.

۵- سیستم‌های فازی نوع-۲

مفهوم مجموعه‌های فازی نوع-۲ توسط "زاده" به عنوان تعمیمی از مجموعه‌های فازی نوع-۱ مطرح شد. در یک مجموعه فازی نوع-۲ مقدار درجه عضویت برای هر نقطه، یک عدد فازی نرمال است که می‌تواند در محدوده [۰ و ۱] تغییر کند. چنین مجموعه‌هایی برای مواردی مناسب هستند که خود توابع عضویت، دارای نامعینی باشند. به عنوان مثال ممکن است نامعینی در شکل تابع عضویت باشد و یا اینکه

در سیستم‌های فازی نوع-۲، خروجی موتور استنتاج یک مجموعه‌ی فازی نوع-۲ است، بنابراین می‌توان با استفاده از اصل گسترش، روش‌های غیرفازی‌سازی را به گونه‌ای تعمیم داد که یک مجموعه فازی نوع-۲ را به یک مجموعه فازی نوع-۱ تبدیل کند. از اینرو عملیات غیرفازی‌سازی تعمیم یافته را عملیات کاهش مرتبه^{۲۳} می‌نامند و خروجی کاهش‌دهنده مرتبه را مجموعه کاهش یافته می‌نامند [۱۶].

سیستم‌های فازی نوع-۲ کلی^{۲۴} دارای محاسبات بسیار پیچیده و وقت‌گیری است. از اینرو تقریباً همه کاربردهای عملی از سیستم‌ها بر روی دسته خاصی از مجموعه‌های فازی نوع-۲ که تابع عضویت ثانویه آنها، به صورت مجموعه فازی نوع-۱ بازه‌ای می‌باشد، تمرکز پیدا می‌کند. یک مجموعه فازی نوع-۱ بازه‌ای، مجموعه فازی است که مقدار تابع عضویت آن در یک بازه برابر با یک بوده و در خارج از بازه صفر می‌باشد. در شکل (۵) مجموعه‌های فازی نوع-۱، نوع-۲ کلی و نوع-۲ بازه‌ای نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقدار عضویت در نقطه x_1 ، یک مجموعه فازی نوع-۱ بازه‌ای است [۱۷].



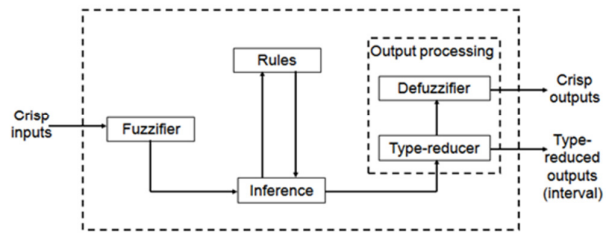
شکل (۵): مقایسه انواع مجموعه‌های فازی [۱۷]
Fig. (5): Comparison of different types of fuzzy sets

۶- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با معرفی پارامترها و تابع هزینه^{۲۵} آغاز می‌شود و همچنین خاتمه آن نیز مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با کنترل همگرایی مورد نظر می‌باشد. در این میان اگرچه الگوریتم ژنتیک از نقطه نظر آغاز و خاتمه مانند دیگر روش‌هاست اما از لحاظ عملکرد داخلی بهینه‌سازی نسبت به سایر روشها بسیار متفاوت می‌باشد.

به طور کلی مسیر بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک در شکل (۶) نشان داده شده است.

همچنین ساختار کلی یک سیستم فازی نوع-۲ در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): ساختار کلی سیستم فازی نوع-۲ [۱۶]

Fig. (4): Type-2 FLC

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود یک سیستم فازی نوع-۲ از لحاظ ساختاری شباهت زیادی با سیستم فازی نوع-۱ دارد. در ظاهر تنها تفاوت این دو، در این است که در یک سیستم فازی نوع-۱، بلوک پردازش خروجی فقط شامل غیرفازی‌سازی می‌باشد، در حالی که در یک سیستم فازی نوع-۲، بلوک پردازش خروجی علاوه بر غیرفازی‌سازی، شامل کاهش‌دهنده مرتبه نیز می‌باشد. اما در حقیقت در این سیستم تفاوت‌های دیگری هم نسبت به سیستم فازی نوع-۱ وجود دارد که همه این تفاوت‌ها به تفاوت در توابع تعلق بکار رفته در این دو سیستم بر می‌گردد.

تفاوت بین سیستم‌های فازی نوع-۱ و نوع-۲ در طبیعت قانون‌های عضویت نهفته است و در تعیین قوانین فرقی نمی‌کند. تنها تفاوت در این است که تمامی مجموعه‌های فازی مربوطه یا بعضی از آنها از نوع-۲ خواهند بود. بنابراین آئین قانون در یک سیستم فازی نوع-۲ به صورت زیر خواهد بود:

$\tilde{R}^1: IF x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^1 \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{F}_2^1 \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^1 \text{ then } y \text{ is } \tilde{G}^1$

توجه به این نکته حائز اهمیت است که لزومی ندارد که تمامی مجموعه‌های مقدمه و نتیجه از نوع-۲ باشند. بلکه فقط کافی است یکی از آنها از نوع-۲ باشد تا سیستم فازی را از نوع-۲ بنامیم.

در یک سیستم فازی نوع-۱، موتور استنتاج^۱، قوانین را ترکیب کرده و نگاشتی از مجموعه‌های فازی نوع-۱ ورودی به مجموعه فازی نوع-۱ خروجی ایجاد می‌کند. مقدمه‌های مختلف در یک قانون توسط T-نرم که متناظر با اشتراک مجموعه‌ها می‌باشد با همدیگر متصل می‌شوند. همچنین معمولاً برای ترکیب قوانین مختلف در یک سیستم فازی-۱ از S-نرم که متناظر با اجتماع مجموعه‌ها می‌باشد، استفاده می‌شود و با اینکه ابتدا خروجی فازی مربوط به هر قانون محاسبه شده و نهایتاً هنگام اجرای عملیات غیرفازی‌سازی توسط عملیات جمع وزن‌دار با هم ترکیب می‌شوند.

در یک سیستم فازی نوع-۱، غیرفازی‌سازی^{۲۲}، خروجی موتور استنتاج را که یک مجموعه فازی نوع-۱ می‌باشد، به یک عدد غیرفازی تبدیل می‌کند. در واقع می‌توان اینگونه در نظر گرفت که یک غیرفازی‌سازی، عدد فازی نوع-۱ را به عدد فازی نوع صفر تبدیل می‌کند.

در این نوع سیستم‌ها می‌توان به فاکتورهای آماری از قبیل مقدار میانگین^{۲۷} یک مجموعه، انحراف از معیار^{۲۸} و ... اشاره نمود که این فاکتورها می‌توانند به تنهایی و یا به صورت ترکیبی جهت ارائه شرط همگرایی به الگوریتم مورد استفاده قرار گیرند.

به عنوان یک جمع‌بندی، از مزایای الگوریتم تکاملی ژنتیک، می‌توان به خصوصیت مثبت الگوریتم ژنتیک در دستیابی به نقطه بهینه کلی به جای نقطه بهینه محلی، کارایی در حل انواع مسائل بهینه‌سازی (به دلیل عدم نیاز به استفاده از مشتقات تابع هدف) و سهولت در نحوه تعریف و پیاده‌سازی این الگوریتم با هر نرم‌افزار برنامه‌نویسی، اشاره کرد [۱۸].

۷- کنترل برج با روش فازی نوع-۲ بهینه‌شده با GA

۷-۱- طراحی کنترل‌کننده PI

در این بخش یک کنترل‌کننده PI برای مدل خطی برج که در بخش ۲ معرفی گردید، طراحی می‌شود. برای کنترل هر یک از خروجی‌ها از یک کنترل‌کننده PI به فرم رابطه‌های (۳) و (۴) استفاده می‌شود.

$$PI_1(s) = K_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 s} \right) \quad (3)$$

$$PI_2(s) = K_2 \left(1 + \frac{1}{T_2 s} \right) \quad (4)$$

که مقادیر K_1, K_2, T_1, T_2 برای هر یک از کنترل‌کننده‌ها باید تعیین گردد. ساختار سیستم حلقه‌بسته در حضور این کنترل‌کننده به صورت شکل (۷) در سیمولینک پیاده‌سازی شده است.

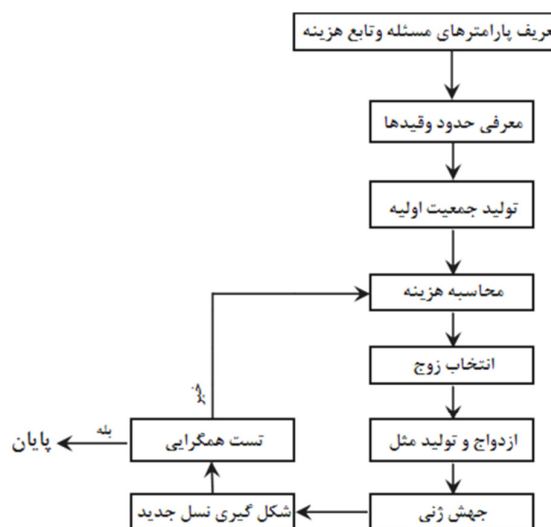
دو کنترل‌کننده PI در بلوک کنترل شده قرار داده شده است. ساختار این بلوک در شکل (۸) آمده است. قبل از بلوک کنترل‌کننده، یک سوئیچ قرار داده شده است که با قرار گرفتن روی مقدار صفر، سیستم حلقه‌باز می‌شود. همچنین یک ورودی مرجع پله به اندازه ۰.۵٪ به سیستم اعمال می‌شود و قرار است که پارامترهای کنترل‌کننده یعنی K_1, K_2, T_1, T_2 طوری تعیین شود که خروجی‌ها مقدار مرجع را دنبال کنند.

برای عدم تزویج بدین صورت عمل شده است که یک بهره کنترلی به شکل رابطه (۵) به سیستم اضافه شده است [۱۹].

$$D = \begin{bmatrix} 0.16 & -0.15 \\ 0.05 & -0.10 \end{bmatrix} \quad (5)$$

بهره کنترلی فوق با رابطه (۶) بدست آمده است.

$$D = G^{-1}(0) \quad (6)$$



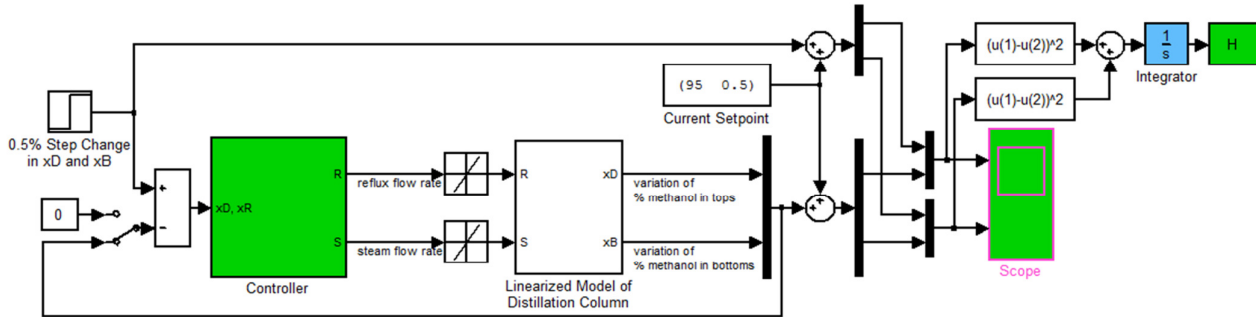
شکل (۶): فلوچارت بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک
Fig. (6): Genetic algorithm optimization Flowchart

تابع هزینه مقدار هزینه ناشی از مجموعه پارامترهای ورودی را تولید می‌کند. الگوریتم ژنتیک با معرفی یک سری جمعیت اولیه^{۲۶} که همان پارامترهای ورودی در ابتدا می‌باشند شروع به بهینه‌سازی می‌کند. کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شوند که p_i پارامترهای مسئله می‌باشند ($i = 1, 2, 3, \dots, N_{par}$).

$$\text{Chromosome} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{par}}] \quad (2)$$

پس از انتخاب جمعیت اولیه، مرحله بعد، انتخاب در بین جمعیت اولیه به منظور تعیین کروموزوم‌های مناسب جهت شرکت در تولید نسل جدید می‌باشد. جمعیت اولیه در حقیقت یک آموزش ابتدایی به الگوریتم ژنتیک جهت جستجو به دنبال هزینه بهینه می‌باشد. بنابراین با اجرای سیاستی بر روی جمعیت اولیه تعدادی از کروموزوم‌ها کنار گذاشته می‌شوند و عملیات بهینه‌سازی بر روی کروموزوم‌های حفظ شده انجام می‌شود. سیاست مذکور بستگی به این دارد که هدف از بهینه‌سازی جستجوی حداقل هزینه باشد یا حداکثر.

به عنوان شرط همگرایی برای اتمام الگوریتم ژنتیک می‌توان گفت زمانی که نسلی تولید شود که تمام جمعیت آن، خصوصیات دقیقاً یکسان داشته باشند. اما این شرط در مورد مسائل بزرگ (از لحاظ تعداد پارامترها و شکل تابع هزینه) به سادگی محقق نمی‌شود. به عبارتی برای رسیدن به این هدف نیاز به صرف زمان و هزینه زیادی جهت اجرای الگوریتم خواهیم داشت. بنابراین برای انتخاب شرط همگرایی

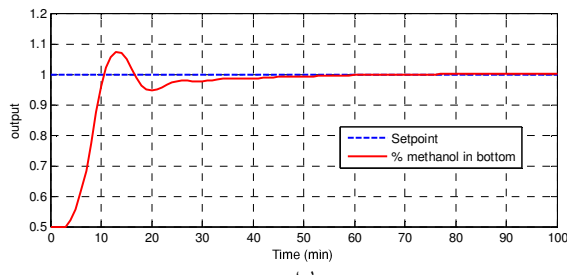
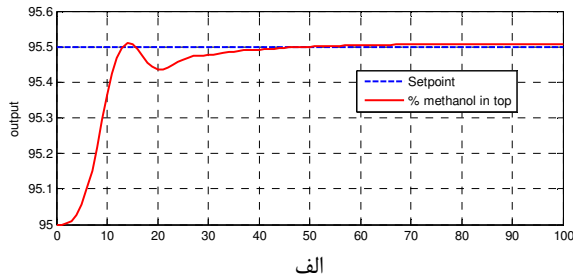


شکل (۷): ساختار سیستم حلقه بسته در سیمولینک
 Fig. (7): The structure of closed loop system in Simulink

می‌شود. به جمعیت (ماتریس) پارامترها در هر تکرار، یک نسل گفته می‌شود. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که تابع هزینه دیگر تغییر نکند و ثابت بماند و یا اینکه تعداد نسلها محدود باشد. در نهایت نیز پارامترهای بهینه x به عنوان خروجی GA تعیین می‌شوند. با اجرای GA، مقدار بهینه پارامترهای کنترل کننده به صورت رابطه (۹) به دست آمده است.

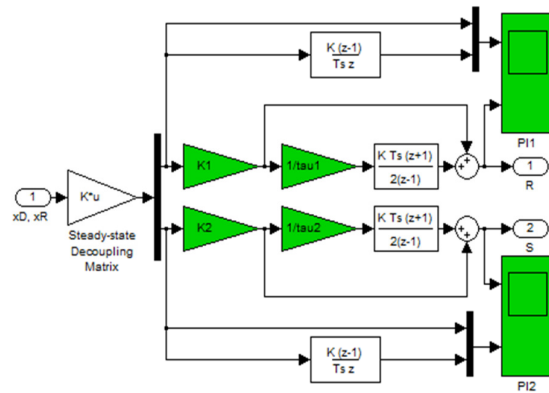
$$[K_1 \ K_2 \ T_1 \ T_2] = [1.375 \ 3.385 \ 32.76 \ 27.04] \quad (9)$$

با قرار دادن این مقادیر در شبیه سازی و اجرای آن، خروجی شبیه سازی به صورت شکل (۹) خواهد بود.



شکل (۹): پاسخ کنترل کننده PI، درصد متانول (الف) در بالا ب) در پایین برج
 Fig. (9): PI controller response, the percentage of methanol in a) the above and b) the bottom of the tower

همان طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، خروجی به خوبی توانسته است ورودی مرجع را دنبال کند و خطا به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک می‌باشد. این پاسخ یک پاسخ اولیه برای این سیستم است. در واقع کنترل کننده‌های دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند به نتایج بهتری منجر شوند. یکی از این کنترل کننده‌ها، کنترل کننده فازی است.



شکل (۸): کنترل کننده PI مدل خطی در سیمولینک
 Fig. (8): PI controller for linear model in Simulink

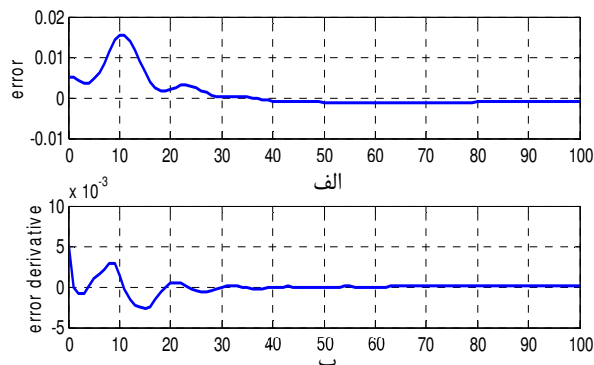
در اینجا برای تعیین پارامترهای کنترل کننده، از روش الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده می‌شود و تابع هزینه، همان طور که در سمت راست شکل (۹) نشان داده شده است معیار "مجموع مربعات خطا" (SSE) و به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته شده است.

$$\text{cost function} = H = \int_0^T (r - y)^2 dt \quad (7)$$

که در آن r ، y به ترتیب ورودی مرجع و خروجی سیستم می‌باشند. همان طور که در بخش ۶ به تفصیل بیان گردید، روش GA یک روش برای تعیین پارامترهای بهینه سیستم است. در این الگوریتم، ابتدا یک جمعیت اولیه^{۲۹} از پارامترها انتخاب می‌شود که منظور از جمعیت، ماتریسی با n سطر و m ستون است که تعداد سطرها هرچه بیشتر باشد دقت تعیین پارامترها بیشتر بوده و تابع هزینه کمتر می‌شود. تعداد ستون‌ها نیز برابر تعداد پارامترها است. به ازای هر دسته (هر سطر) از پارامترها که در متغیر x ریخته می‌شود، یک بار شبیه سازی اجرا می‌شود و مقدار تابع هزینه محاسبه می‌شود. متغیر x در اینجا به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$x = [K_1 \ K_2 \ T_1 \ T_2] \quad (8)$$

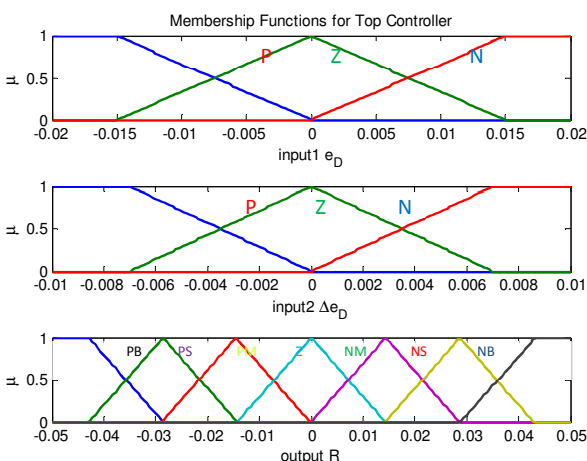
شبیه سازی به تعداد n بار اجرا شده و توابع هزینه محاسبه می‌گردند. سپس تعدادی از بهترین دسته از پارامترها با کمترین تابع هزینه انتخاب شده و بقیه سطرها با هم ترکیب شده و دوباره روند قبلی تکرار



شکل (۱۱): نمودارهای الف) خطا ب) مشتق خطا برای یکی از کنترل‌کننده‌های PI

Fig. (11): a) Error b) error derivative diagrams for a PI controller

توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی به صورت مثلثی^{۳۰} انتخاب می‌شود. در هر کنترل‌کننده، برای هر کدام از ورودی‌های خطا و مشتق خطا، ۳ تابع عضویت مثلثی و برای خروجی، ۷ تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) و شکل (۱۳) این توابع عضویت را به ترتیب برای کنترل‌کننده اولی و دومی نشان می‌دهند.



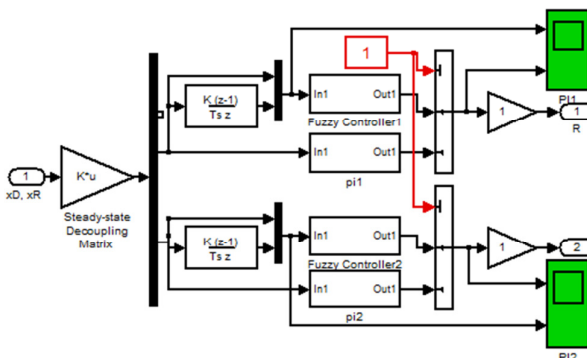
شکل (۱۲): توابع عضویت برای کنترل‌کننده اولی

Fig. (12): The membership functions for the first controller

۲-۷- طراحی کنترل‌کننده فازی

در مرحله قبل، کنترل‌کننده PI برای هر دو محصول بالای برج (x_D) و پایین برج (x_B) طراحی شد به طوری که ورودی‌های مرجع x_{Dr} و x_{Br} را دنبال کنند. در این بخش به جای هر کنترل‌کننده PI که در بخش قبلی طراحی شد، یک کنترل‌کننده فازی جایگزین می‌گردد. در کنترل‌کننده بالایی (کنترل‌کننده اول)، ورودی‌ها شامل خطا در محصول بالایی برج ($e_D(k) = x_{Dr}(k) - x_D(k)$) و نرخ تغییر خطا بازگشتی R می‌باشد. در کنترل‌کننده پایینی (کنترل‌کننده دوم)، ورودی‌ها، خطا در محصول پایینی ($e_B(k) = x_{Br}(k) - x_B(k)$) و نرخ تغییر خطا ($\Delta e_B(k) = e_B(k) - e_B(k-1)$) بوده و خروجی نیز نرخ جریان بخار S است.

شکل (۱۰) بلوک کنترل‌کننده را در حضور کنترل‌کننده فازی نشان می‌دهد. یک سوئیچ بین کنترل‌کننده PI و فازی قرار داده شده است که با انتخاب عدد ۱، کنترل‌کننده فازی و با انتخاب عدد ۲، کنترل‌کننده PI فعال می‌گردد.



شکل (۱۰): بلوک کنترل‌کننده در حضور کنترل فازی

Fig. (10): Controller blocks with fuzzy control

نمودار خطا، مشتق خطا و سیگنال کنترلی برای یکی از کنترل‌کننده‌های PI به صورت شکل (۱۱) می‌باشند. برای طراحی کنترل‌کننده فازی، باید توابع عضویت ورودی و خروجی را انتخاب کرده و قواعد فازی برای ارتباط بین ورودی با خروجی تعیین گردد. نمودار شکل (۱۱) در انتخاب محدوده تغییرات نمودار افقی در توابع عضویت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

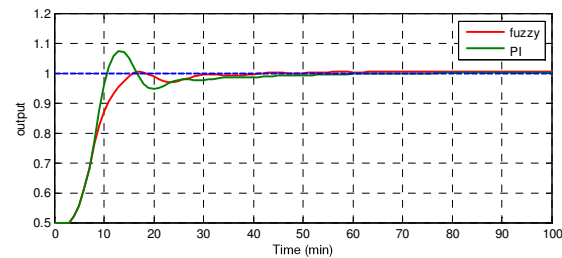
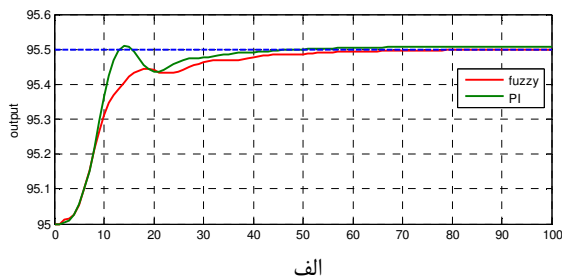
بعد از اجرای GA، قواعد بهینه، مثلاً برای کنترل کننده اولی به صورت جدول (۳) تعیین گردیده است.

جدول (۳) پایگاه قواعد فازی بعد از بهینه سازی با GA
Table (3): Fuzzy Rulebases after GA optimization

e_D	N	Z	P
Δe_D	NM	PS	NS
	NS	Z	PS
	NS	PB	PM

بعد از به دست آمدن پارامترهای بهینه کنترل کننده های فازی با GA، کنترل کننده شبیه سازی و اجرا می گردد.

اگر این کنترل کننده با کنترل کننده PI که نتایج آن پیش تر آمده است مقایسه شود، مشاهده می گردد که کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده PI دارای فراجاهش کمتری است. شکل (۱۴) نتایج این مقایسه را نشان می دهد.

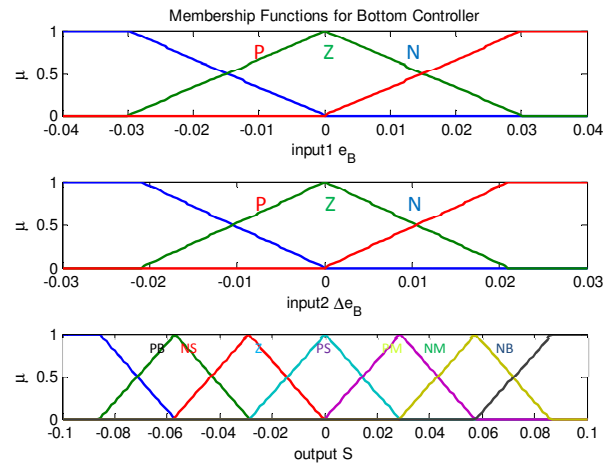


شکل (۱۴): مقایسه عملکرد کنترل کننده های فازی-۱ و PI در الف) بالا و ب) پایین برج

Fig. (14): Comparison of the performance of fuzzy-1 and PI controllers in a) the above and b) the bottom of the tower

۳-۷ طراحی کنترل کننده فازی نوع-۲

با توجه به وجود نوسانات در پاسخ کنترل کننده های PI و فازی نوع-۱ طراحی شده و نظر به اهمیت کاهش آن، به نظر می رسد استفاده از کنترل کننده فازی نوع-۲ با لحاظ نمودن عدم قطعیت در قوانین فازی، بتواند این نوسانات را کاهش داده و نیز زمان نشست پاسخ را بهبود بخشد. برای این منظور باید به توابع عضویت، عدم قطعیت اضافه شود. ۱۰٪ عدم قطعیت به پهنای توابع عضویت اعمال می گردد. همان طور که در شکل (۱۵) دیده می شود در این حالت هر دو تابع عضویت



شکل (۱۳): توابع عضویت برای کنترل کننده دومی

Fig. (13): The membership functions for the second controller

حال نوبت به تولید پایگاه قواعد اگر-آنگاه فازی می رسد. این قواعد در ابتدا به صورت جدول (۲) در نظر گرفته می شود.

جدول (۲): پایگاه اولیه قواعد فازی

Table (2): Primary Fuzzy Rule Bases

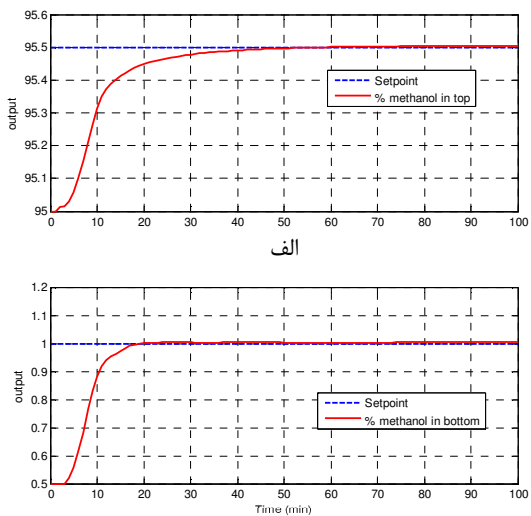
e_D	N	Z	P
Δe_D	PB	PM	Z
	PS	Z	NM
	Z	NS	NB

هر المان این جدول، یک قاعده اگر-آنگاه است. برای مثال، اگر ورودی e_D برابر Z^{31} باشد و ورودی Δe_D برابر P^{32} باشد، خروجی برابر NS^{33} است. بنابراین ۹ قاعده برای هر کنترل کننده وجود دارد. این قواعد باید با استفاده از دانش فرد خیره درباره سیستم استخراج گردد. از آنجایی که اطلاعات کافی نسبت به رفتار سیستم در اینجا وجود ندارد، قواعد مناسب (تابع عضویت خروجی در هر کدام از ۹ خانه جدول) با استفاده از الگوریتم GA انتخاب خواهد شد. برای این منظور از [۳] ایده گرفته شده است.

در اینجا دو کنترل کننده فازی وجود دارند که هر کدام دارای ۹ قاعده می باشند. لذا در مجموع ۱۸ پارامتر باید با استفاده از GA بهینه شوند. از آنجا که برای هر کنترل کننده، ۷ تابع عضویت خروجی در نظر گرفته شده است، لذا حد بالا و پایین هر پارامتر به ترتیب ۷ و ۱ قرار داده می شود.

برای بهینه سازی قواعد، با بهره گیری از ایده مطرح شده در [۲۰]، تابع هزینه به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می شود که در این رابطه، SSE معادل "مجموع مربعات خطا" بوده و در شبیه سازی محاسبه می گردد ($MSE = H(end)$). همچنین ess و os به ترتیب، میزان "خطای حالت دائمی" و "فراجاهش" می باشند.

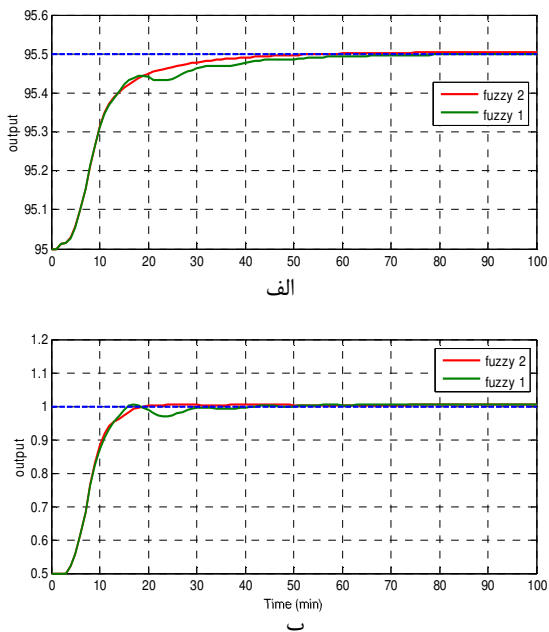
$$f = MSE + 500 \times ess + 500 \times os \quad (10)$$



شکل (۱۸): پاسخ در حضور کنترل کننده فازی-۲ در الف) بالا و ب) پایین برج

Fig. (18): Fuzzy type-2 controller response, in a) the above and b) the bottom of the tower

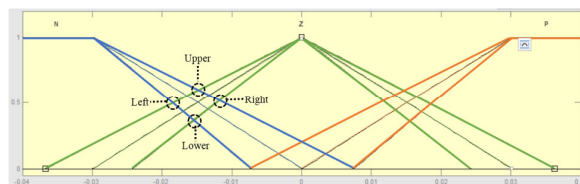
اگر این کنترل کننده با کنترل کننده فازی نوع-۱ که نتایج آن پیش‌تر آمده است، مقایسه گردد، مشخص خواهد شد که کنترل کننده فازی نوع-۲ نسبت به کنترل کننده فازی نوع-۱ دارای عملکرد بهتری است و نوسانات را کاملاً از بین برده است. شکل (۱۹) نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.



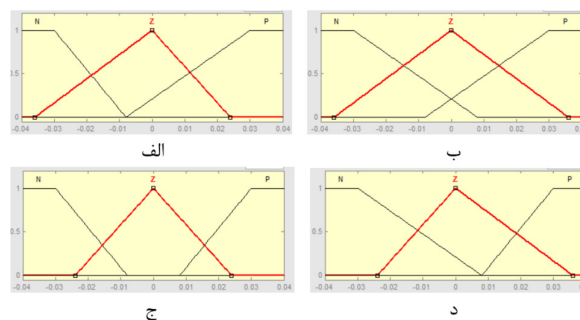
شکل (۱۹): مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های فازی-۱ و فازی-۲ در الف) بالا و ب) پایین برج

Fig. (19): Comparison of the performance of fuzzy-1 and fuzzy-2 controllers in a) the above and b) the bottom of the tower

مجاور، همدیگر را در چهار نقطه قطع می‌کنند و بدین ترتیب، مشابه شکل (۱۶) هر تابع عضویت فازی-۲ به ۴ تابع عضویت فازی-۱ با نام‌های "بالا"^{۳۴}، "پایین"^{۳۵}، "چپ"^{۳۶} و "راست"^{۳۷} تبدیل می‌شود.

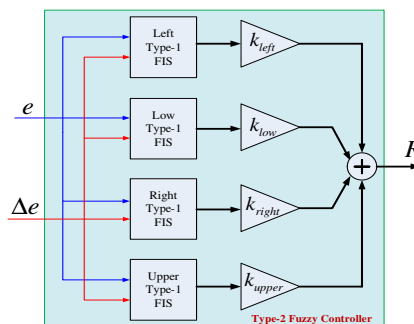


شکل (۱۵): نقاط تقاطع در دو تابع عضویت نوع-۲ مجاور (ورودی e_B)
Fig. (15): Intersection points in two adjacent type-2 membership functions (input e_B)



شکل (۱۶): مجموعه توابع عضویت: الف) چپ، ب) بالا، ج) پایین، د) راست
Fig. (16): Membership functions sets: a) left b) upper c) lower d) right

برای پیاده‌سازی این کنترل کننده، خروجی هر یک از FIS^{TA} های چهارگانه نوع-۱ در یک عدد بهره ضرب و سپس با هم جمع می‌شوند. این ساختار در شکل (۱۷) نشان داده شده است. e و Δe ورودی‌های کنترل کننده و R خروجی کنترل کننده است.



شکل (۱۷): ساختار در نظر گرفته شده برای کنترل کننده فازی نوع-۲
Fig. (17): The intended structure for type-2 fuzzy controller

در ساختار فوق، تمام بهره‌ها برابر با 0/25 در نظر گرفته می‌شوند و شبیه‌سازی در حضور کنترل کننده فازی نوع-۲ اجرا می‌گردد. نتایج حاصل از اجرا در شکل (۱۸) آمده است.

همچنین نتایج مقایسه عددی شاخص‌های عملکردی این سه کنترل‌کننده در جدول (۴) آمده است. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK حاکی از کاهش نوسانات و بهبود زمان نشست پاسخ سیستم می‌باشد.

جدول (۴): مقایسه عددی شاخص‌های عملکردی سه کنترل‌کننده

Table (4): Comparison of the performance indicators of the three controllers

کنترل‌کننده شاخص	فراجهش (%)	زمان صعود (دقیقه)	زمان نشست (دقیقه)
PI (محصول بالایی)	۴	۱۸	۳۳
PI (محصول پایینی)	۱۶/۷	۱۷	۲۲
فازی-۱ (محصول بالایی)	۰	۱۲/۵	۴۰
فازی-۱ (محصول پایینی)	۱	۷/۵	۲۷
فازی-۲ (محصول بالایی)	۰	۱۲/۵	۳۰
فازی-۲ (محصول پایینی)	۰	۷/۵	۱۶

پی‌نوشت:

1. Feed
2. Overhead Product
3. Bottom Product
4. Reflux Ratio
5. Wood and Berry
6. Reflux
7. Steam
8. Artificial Neural Network
9. Model Predictive Control
10. Model Reference Adaptive Control
11. Proportional-Integral-Derivative
12. Neural Network Predictive Control
13. Tert-Amyl Methyl Ether
14. Takagi-Sugeno
15. Field-Programmable Gate Array
16. Auto Regressive-Moving-Average
17. Pseudo-Random Binary Signals
18. Particle Swarm Optimization
19. Type-1 fuzzy system
20. Crisp
21. Inference Engine
22. Defuzzifier
23. Type Reduction
24. Generalized Type-2 Fuzzy System
25. Cost Function
26. Initial Population
27. Average
28. Standard Deviation
29. Initial Population
30. Trimf
31. Zero
32. Positive
33. Negative-Small
34. Upper
35. Lower
36. Left
37. Right
38. Fuzzy Inference System

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش فازی نوع-۲ بهینه شده با الگوریتم ژنتیک برای کنترل برج تقطیر با یک مدل خطی، ارائه شده است که توانسته است بهتر از بسیاری از کنترل‌کننده‌های قبلی مثل فازی نوع-۱ و نیز کنترل PI مرسوم عمل کند. به طور مشخص تفاوت این مقاله با مقالات ذکر شده در مراجع، صرفنظر از تفاوت در مدل‌های متفاوت برج تقطیر (و در نتیجه تفاوت در ساختار کنترلی)، استفاده همزمان از روش فازی نوع-۲ و الگوریتم ژنتیک در طراحی کنترل‌کننده است که هم وابستگی به اطلاعات خبره در طراحی را حذف و هم عدم قطعیت را در ساختار کنترلی منظور می‌کند. همچنین تفاوت دیگر در ساختار به کار گرفته شده برای کاهش رتبه است که در صورت لزوم می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند GA به منظور انتخاب مقادیر بهینه بهره‌های خروجی در مسیر هر کدام از کنترل‌کننده‌های چهارگانه کاهش رتبه یافته، از این روش در پیاده‌سازی کنترل‌کننده مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر نیز بهره برد.

References

- [1] S. Skogestad, "Dynamics and control of distillation columns- A critical survey", Modeling, Identification and Control, Vol. 18, No. 3, pp. 177-217, 1997.
- [2] R.K. Wood, M.W. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", Chemical Engineering Sciences, Vol. 28, pp. 1707-1707, 1973.
- [3] R. Irani, R. Nasimi, M. Shahbazian, "Approximate predictive control of a distillation column using an evolving artificial neural network coupled with a genetic algorithm", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 37, No. 5, pp. 518-535, Feb. 2015.
- [4] A. George, R.M. Francis, "Model reference adaptive control of binary distillation column composition using mit adaptive mechanism", International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 4, No. 6, Jun. 2015.
- [5] N. Sharma, K. Singh, "Model predictive control and neural network predictive control of tame reactive distillation column", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 59, pp. 9-21, Sep. 2012.
- [6] P. Mishra, V. Kumar, K.P.S. Rana, "A fractional order fuzzy PID controller for binary distillation column control", Expert Systems with Applications, Vol. 42, No. 22, pp. 8533-8549, Dec. 2015.

- [7] U. Kapoor, A. Rani, V. Singh, J.R.P. Gupta, "Simulation and control of reactive distillation column", Proceeding of the IEEE/IICPE, New Delhi, pp. 1-7, Jan. 2011.
- [8] J. Mo-yi, M. Lei, "The application of fuzzy control in extractive distillation column", Proceeding of the IEEE/ICACTE, Chengdu, Vol. 6, pp. 322-324, Aug. 2010.
- [9] N.N. Mohammad, N. Kasuan, M.H.F. Rahiman, M.N. Taib, "Steam temperature control using fuzzy logic for steam distillation essential oil extraction process", Proceeding of the IEEE/ICSGRC, Shah Alam, pp. 53-58, Jun. 2011.
- [10] A.K. Singh, B. Tyagi, V. Kumar, "Comparative performance analysis of fuzzy logic controller for the composition control of binary distillation column," Proceeding of the IEEE/RAICS, Trivandrum, pp. 515-519, Sep. 2011.
- [11] M. Mehrpoya, A. Vatani, S. hejazi, "Non-linear control of a distillation column using fuzzy logic and PSO optimization method", **Proceeding of the IEEE/IntelliSys**, pp.1-5,17-18, Sep. 2013.
- [12] S. Javahernia, F. Masoudinia. "A new approach based on fuzzy inference system to control the product distillation column," *Journal of Current Research in Science*, Vol. S (1), pp. 963-972, 2016.
- [13] A. Vasičkaninová, M. Bakošová, A. Mészáros, "Fuzzy control of a distillation column", Proceeding of the ESCAPE, Vol. 26, pp. 1299-1304, June 2016.
- [14] M. Miccio, B. Cosenza, "Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers", *Journal of Process Control*, Vol. 24, No. 5, pp. 475-484, 2014.
- [15] L.X. Wang, "A course in fuzzy systems and control", Prentice-Hall international Inc., 1997.
- [16] J.M. Mendel, "Type-2 fuzzy sets and systems: An overview", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-29, 2007.
- [17] H. Hani, C. Wagner, "Introduction to interval type-2 fuzzy logic controllers-towards better uncertainty handling in real world applications", *IEEE Systems, Man and Cybernetics Newsletter* 27, 2009.
- [18] S.N. Sivanandam, S.N. Deepa, "Introduction to genetic algorithms", Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [19] K.J. Astrom, K.H. Johansson, Wang Q.G., "Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems", *IEEE Proc. on Control Theory and Applications*, Vol. 149, No. 1, pp. 74-81, Jan. 2002.
- [20] L. Zhang, X. Song, Y. Wu, "Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems", *Proceeding of the AsiaSim/SCS AutumnSim*, Beijing, China, Oct. 2016.