کنترل برج تقطیر با مدل غیرخطی به‌روش فازی نوع-۲ بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

عباس عسگری[۱]، کارشناسی؛ غلامرضا عرب مارکده[۲]، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، a.asgari@pogc.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، عضو قطب علمی آنالیز غیرخطی، بهینه‌سازی و کنترل، arab-gh@eng.sku.ac.ir

چکیده: فرآیند تقطیر از فرآیندهای مهم در صنایع شیمیایی به‌شمار می‌رود و کاربرد وسیعی در این صنایع دارد. برج تقطیر به‌عنوان یک ابزار محبوب نزد مهندسان شیمی به‌منظور جداسازی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد و متداول‌ترین روش در جداسازی مواد می‌باشد. ثابت نگه‌داشتن 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 به‌دلیل کارآیی این روش در کنترل سیستم‌های پیچیده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی نوع-۱ برای یک مدل غیرخطی برج تقطیر طراحی شده است. در طراحی این کنترل‌کننده فازی، الگوریتم ژنتیک (GA) مورد استفاده قرار گرفته 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 برای بهینه‌سازی عملکرد کنترل فازی-۲، گین‌های خروجی آن با روش GA تعیین گردیده است. نشان داده شده است که عملکرد فازی-۲ از لحاظ مختلف بهتر از فازی-۱ می‌باشد و همچنین در برابر تغییرات تغذیه، مقاوم‌تر است. در این تحقیق از نرم‌افزار MATLAB/ SIMULINK برای مدل‌سازی و پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی استفاده شده است.

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

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

A. Asgari[1], BSc; G. R. Arab Markadeh[2], Associate Professor

1- Faculty of technical and engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, a.asgari@pogc.ir
2- Faculty of technical and engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, arab-gh@eng.sku.ac.ir

Abstract: The distillation process is 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. At first, a type-1fuzzy controller is designed for non-linear model of distillation tower. In design of this Fuzzy controller, genetic algorithm (GA) is used for optimization of fuzzy. 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 to optimize the performance of fuzzy-2 control, its output gains is determined by GA 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.

Keywords: Distillation column, Non-liner model, Composition control, Fuzzy system, Type-2 fuzzy controller, Genetic algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲، ۱۳۹۶/۰۴/۲۳، ۱۳۹۶/۰۵/۲۶ و ۱۳۹۶/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵
نام نویسنده مسئول: غلامرضا عرب مارکده
نشانی نویسنده مسئول: ایران – شهرکرد - بلوار رهبر – دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

فرآیند تقطیر از فرآیندهای مهم در صنایع شیمیایی به‌شمار می‌رود و کاربرد وسیعی در این صنایع دارد. برج تقطیر به‌عنوان یک ابزار محبوب نزد مهندسان شیمی به‌منظور جداسازی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد و متداولترین روش در جداسازی مواد می‌باشد. مصرف انرژی که در صنعت به فرآیند تقطیر اختصاص داده می‌شود حدود ۳۰٪ از کل مصرف انرژی در صنعت می‌باشد. برای بهره‌برداری 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، بحث‌های مربوط به عرضه و تقاضا و قیمت محصولات و ... بهبود روش‌های کنترل در برج تقطیر بسیار حائز اهمیت شده است [۱]. تقطیر در واقع، جداسازی فیزیکی برش‌های نفتی است که اساس آن، اختلاف در نقطه جوش هیدروکربن‌های مختلف است. هر چه ه‌ی‌دروکربن سنگ‌ی‌ن‌تر باشد، نقطه جوش آن زیادتر است. برج تقطیر شامل چهار قسمت اصلی است؛ برج، جوش‌آور، چگالنده و تجهیزات کمکی.

چند اصطلاح پرکاربرد در فرایند تقطیر به‌شرح زیر می‌باشد:

خوراک[۱]: 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 می‌شود.

محصول بالاسری[۲]: آنچه از بالای برج به‌عنوان خروجی از آن دریافت می‌شود محصول بالاسری نامیده می‌شود که معمولاً غنی از جزئی که از نقطه جوش کمتری برخوردار است می‌باشد.

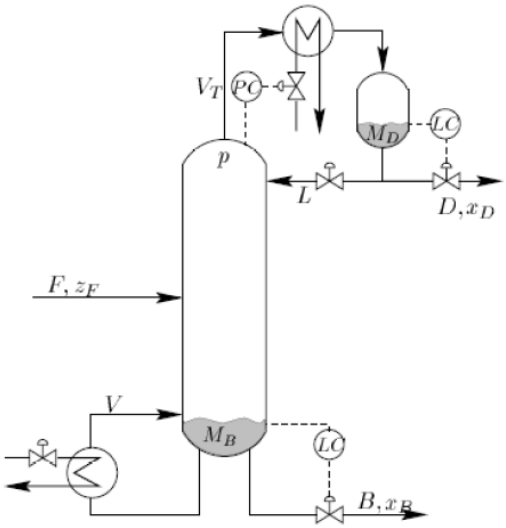
محصول ته‌مانده[۳]: ماده‌ای که از پایین برج خارج می‌شود ته‌مانده یا محصول انتهایی نام دارد و معمولاً غنی از جزء یا اجزاء سنگین‌تر (که از نقطه جوش بالاتری برخوردار می‌باشند) خواهد بود.

نسبت برگشت (پس ریز)[۴]: نسبت مقدار مایع برگشتی به برج بر حسب مول یا وزن به مایع یا بخاری که به‌عنوان محصول از سیستم خارج می‌شود را نسبت برگشتی می‌گویند.

۲- مبانی دینامیکی و مدل‌سازی سیستم

مدل کلی در نظر گرفته‌شده برای برج تقطیر در اینجا، به‌صورت شکل ۱ می‌باشد. این برج دو محصولی می‌باشد که محصول تقطیرشده از بالای برج و محصول باقی‌مانده از پایین برج خارج می‌گردد. هدف، کنترل غلظت محصول بالائی می‌باشد. همچنین تعریف متغیرها و واحدهای مربوطه در جدول ۱ آمده است.

مدل غیرخطی که در اینجا برای برج تقطیر در نظر گرفته شده است، مدل اسکاجستد[۵] می‌باشد [۴-۲]. در این مدل‌سازی فرض‌هایی از قبیل؛ جداسازی دوتایی، فشار ثابت، هولدآپ بخار قابل صرف‌نظر، مولار فلو ثابت، تعادل مایع و گاز در هر مرحله، ضریب فراریت ثابت و دینامیک فلو مایع ثابت، در نظر گرفته شده است. اگرچه این فرض‌ها به نظر محدودکننده می‌رسند اما این مدل تمامی ویژگی‌های مهم یک سیستم واقعی را دارا می‌باشد.



شکل ۱: مدل برج تقطیر

جدول ۱: متغیرهای برج تقطیر

متغیر	تعریف	واحد
F	نرخ تغذیه	Kmole/min
Z_F	ترکیب تغذیه	Mole fraction
q_F	نسبت مایع به گاز در تغذیه	-
D	فلو محصول تقطیرشده	Kmole/min
B	فلو محصول پایینی	Kmole/min
x_D	نسبت مولی ترکیب سبک در محصول تقطیرشده	Mole fraction
x_B	نسب مولی محصول سبک در محصول پایینی	Mole fraction
L	فلو پس‌ریز	Kmole/min
V	فلو بویل‌آپ	Kmole/min
N	تعداد تئوری مراحل تقطیر	-
x_i	نسبت مولی ترکیب سبک در مایع در هر مرحله	Mole fraction
y_i	نسبت مولی ترکیب سبک در بخار در هر مرحله	Mole fraction
L_i	فلو مایع در هر مرحله	Kmole/min
N_T	تعداد کل مراحل	-
V_i	فلو بخار در هر مرحله	Kmole/min
α	نسبت فراریت بین ترکیب سبک و سنگین	-
λ	ثابت اثر فلو بخار بر فلو مایع	-
τ_L	ثابت زمانی دینامیک فلو مایع در هر مرحله	Min
θ_L	ثابت زمانی دینامیک فلو مایع در برج	Min
M_i	هولدآپ مایع در هر مرحله	Kmole

در این مدل، سیستم دارای ۸۲ متغیر حالت است که ۴۱ متغیر حالت آن نسبت مولی در هر مرحله و ۴۱ متغیر، هولدآپ[۶] مایع در هر مرحله می‌باشد. ورودی‌های این ستون عبارتند از: پس‌ریز (L)، بویل‌آپ[۷] (V)، فلوی محصول تقطیرشده (D)، فلوی محصول پایینی (B)، فلوی تغذیه (F)، ترکیب تغذیه (ZF) و نسبت مایع به گاز در تغذیه (qF). همچنین خروجی‌های اصلی آن، غلظت (نسبت مولی) محصول

تقطیرشده (xD)، غلظت محصول پایینی (xB)، هولدآپ بالای برج (MD) و هولدآپ پایین برج (MB) می‌باشند.

در این برج هیچ واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد. برای به‌دست آوردن معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم از قانون تعادل ماده استفاده می‌شود. این قانون برای هر مخلوط به‌صورت زیر می‌باشد:

مقدار ماده ورودی = مقدار ماده خروجی + مقدار ماده ذخیره‌شده

همچنین در این برج، هولدآپ مایع ثابت فرض نشده و دارای دینامیک می‌باشد.

بر اساس قانون کلی تعادل ماده در مرحله i و به‌ازای هر مرحله با $x_i\ (i=1,NT)$ و $M_i\ (i=1,NT)$ (کلاً 2*NT حالت) معادلات پایه به‌صورت روابط زیر می‌باشد:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - L_i + V_{i-1} - V_i \quad (۱)$$

$$\frac{d(M_i x_i)}{dt} = L_{i+1}x_{i+1} + V_{i-1}y_{i-1} - L_i x_i - V_i y_i \quad (۲)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \left(\frac{d(M_i x_i)}{dt} - x_i \frac{dM_i}{dt}\right)/M_i \quad (۳)$$

بر اساس تعادل مایع-بخار در هر مرحله از برج:

$$y_i = \frac{\alpha x_i}{1+(\alpha-1)x_i} \quad (۴)$$

از فرض ثابت‌بودن فلوهای مولی و با صرف‌نظر از دینامیک بخار:

$$V_i = V_{i-1} \quad (۵)$$

به‌جز مرحله تغذیه که:

$$V_{NF} = V_{NF-1} + (1-q_F)F \quad (۶)$$

بر اساس فرمول فرانسیس‌ویر Francis' Weir رابطه (۷) برقرار است.

$$L_i = L_{0i} + \frac{M_i - M_{0i}}{\tau_L} + (V_{i-1} - V_{0,i-1})\lambda \quad (۷)$$

(فلوی مایع به پس‌ماند مایع و فلوی بخار در هر مرحله وابسته است) که $L0_i$ [kmol/min] و $M0_i$ [kmol] به‌ترتیب فلوی نامی مایع و هولدآپ نامی مایع در مرحله i می‌باشند.

معادلات فوق برای تمام مراحل به‌جز مراحل چگالنده (بالای برج)، تغذیه و جوش‌آور (پایین برج)، اعمال می‌گردد. برای این سه مرحله نیز معادلات زیر برقرار خواهند بود:

- مرحله تغذیه به‌ازای i=NF:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - L_i + V_{i-1} - V_i + F \quad (۸)$$

$$\frac{d(M_i x_i)}{dt} = L_{i+1}x_{i+1} + V_{i-1}y_{i-1} - L_i x_i - V_i y_i + Fz_F \quad (۹)$$

- مرحله کندانسور به‌ازای i=NT , $(M_{NT} = M_D\ ,\ L_{NT} = L_T)$:

$$\frac{dM_i}{dt} = V_{i-1} - L_i - D \quad (۱۰)$$

$$\frac{d(M_i x_i)}{dt} = V_{i-1}y_{i-1} - L_i x_i - Dx_i \quad (۱۱)$$

- مرحله جوش‌آور به‌ازای i=1 , $(M_i = M_B\ ,\ V_i = V_B = V)$:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - V_i - B \quad (۱۲)$$

$$\frac{d(M_i x_i)}{dt} = L_{i+1}x_{i+1} - V_i y_i - Bx_i \quad (۱۳)$$

۳- مروری بر کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده پیشین

تاکنون روش‌های زیادی برای کنترل برج تقطیر ارائه شده است. در [۵] 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 فرانسیس [۶] یک کنترل تطبیقی مدل مرجع (MRAC)[۱۰] مبتنی بر قاعده MIT برای برج تقطیر باینری طراحی کرده‌اند. در این روش یک مدل خطی مرتبه کاهش‌یافته استخراج می‌شود به‌طوری که دینامیک‌های فرآیند تقطیر را بهتر منعکس کند و به‌عنوان مدل مرجع استفاده می‌شود.

در [۷] 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.

میشرا و همکارانش [۸] 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 ارائه‌شده در مقاله بهتر عمل می‌کند. همچنین استراتژی کنترل فازی از دیگر روش‌هایی است که در منابع مختلفی گزارش شده است. کاپور و همکارانش [۹] از کنترل‌کننده‌های PID و کنترل‌کننده‌های فازی به‌طور جداگانه برای کنترل دمای یک برج تقطیر واکنشی استفاده کرده و نتایج آن‌ها را مورد مقایسه قرار داده‌اند.

در [۱۰] 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 [۱۱] یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل دمای بخار در ستون تقطیر بخار برای نفت استخراج‌شده 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 [۱۲] 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 ورودی‌های

کنترل‌کننده‌های فازی به‌کار گرفته شده‌اند. در نهایت، نتایج به‌دست آمده با نتایج کنترل‌کننده‌های PID و MPC مقایسه گشته‌اند.

در [۱۳] یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل دمای سینی برج با استفاده از کنترل غیرمستقیم تغذیه طراحی‌شده و نشان داده شده است که نسبت به کنترل‌کننده PID در برابر تغییرات فلو و ترکیب تغذیه مقاوم‌تر است.

در [۱۴] از یک کنترل‌کننده PI فازی با ورودی فلوی بخار و یک کنترل‌کننده کمکی P فازی با ورودی فلوی پس‌ریز برای کنترل غلظت محصول برج استفاده شده است و نشان داده شده است که عملکرد کنترل‌کننده طراحی‌شده از نظر سرعت پاسخ، کاهش بالازدگی و مواجهه با اغتشاش از کنترل‌کننده حلقه بسته معمولی یا فازی بهتر است.

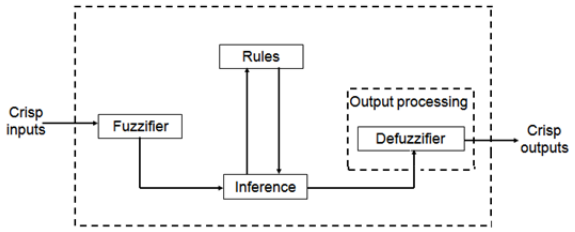
همچنین در [۱۵] یک ساختار کنترلی PID فازی نوع-۱ و نوع-۲ برای کنترل یک مدل خاص از برج تقطیر باینری طراحی شده و نتایج مقایسه، کنترل موثرتر و مقاوم‌تر فازی نوع-۲ را نسبت به نوع-۱ نشان داده است.

در مقاله حاضر، در ابتدا یک کنترل‌کننده فازی نوع-۱ برای یک مدل غیرخطی برج تقطیر طراحی شده است. در تنظیم ضرایب این کنترل‌کننده فازی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در ادامه کنترل‌کننده فازی نوع-۲ جایگزین فازی نوع-۱ شده و برای بهینه‌سازی عملکرد کنترل فازی-۲، گین‌های خروجی آن مجدداً با روش GA تعیین گردیده است. نشان داده شده است که عملکرد فازی-۲ از جنبه‌های مختلف بهتر از فازی-۱ می‌باشد و همچنین در برابر تغییرات هم‌زمان فلوی تغذیه و نسبت مولی، مقاوم‌تر است.

لازم به ذکر است تفاوت این تحقیق با مقالاتی با عنوان مشابه همچون [۱۵] صرف‌نظر از تفاوت در مدل‌های متفاوت برج تقطیر (و بالتبع 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 عدم‌قطعیت را در ساختار کنترلی منظور می‌کند. همچنین تفاوت دیگر، در ساختار به‌کار گرفته‌شده برای کاهش مرتبه است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با انتخاب مقادیر بهینه گین‌های خروجی در مسیر هر کدام از کنترل‌کننده‌های چهارگانه کاهش‌مرتبه یافته، کارآیی این روش را در پیاده‌سازی کنترل‌کننده برای مدل‌های غیرخطی پیچیده (مانند مدل اسکاجستد) تأیید می‌کند.

۴- سیستم‌های فازی نوع-۱

یک سیستم فازی معمولی که از این پس آن را سیستم فازی نوع-۱[۱۸] 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 ورودی را به یک بردار یا اسکالر در فضای خروجی انتشار می‌دهد. ساختار یک سیستم فازی معمولی در شکل ۲ مشخص شده است [۱۶].



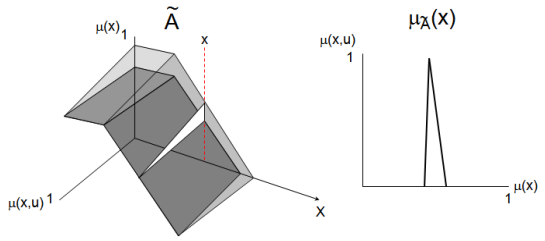
شکل ۲: ساختار یک سیستم فازی نوع-۱

در سیستم‌های فازی نوع-۱، به‌صورت کلی با مجموعه‌ای از قوانین «اگر- آن‌گاه» روبرو هستیم که معمولاً توسط داده‌های تجربی که از طریق کارشناسان و افراد خبره به‌دست آمده است و پایگاه قواعد که قلب یک سیستم فازی است را تشکیل می‌دهند.

۵- سیستم‌های فازی نوع-۲

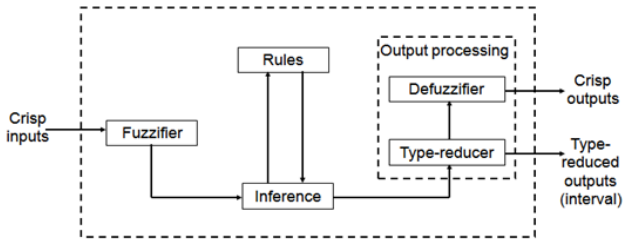
مفهوم مجموعه‌های فازی نوع-۲ توسط "زاده" به‌عنوان تعمیمی از مجموعه‌های فازی نوع-۱ مطرح شد. در یک مجموعه فازی نوع-۲ مقدار درجه عضویت برای هر نقطه، یک عدد فازی نرمال است که می‌تواند در محدوده [۱ و۰] تغییر کند. چنین مجموعه‌هایی برای مواردی مناسب هستند که خود توابع عضویت، دارای نامعینی باشند. به‌عنوان مثال ممکن است نامعینی در شکل تابع عضویت باشد و یا اینکه بعضی از پارامترهای تابع عضویت دارای نامعینی باشند[۱۷].

در واقع سیستم‌های فازی نوع-۲ به ما این امکان را می‌دهند تا تأثیرات عدم‌قطعیت در سیستم‌های فازی مبتنی بر قاعده را، مدل‌سازی کنیم و این تأثیرات عدم‌قطعیت را به حداقل برسانیم. در شکل ۳ یک تابع عضویت نمونه فازی نوع-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳: ی‌ک تابع عضویت نوع-۲

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



شکل ۴: ساختار کلی سیستم فازی نوع-۲

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 غیرفازی‌ساز می‌باشد، در حالی که در یک سیستم فازی نوع-۲، بلوک پردازش خروجی علاوه بر غیرفازی‌سازی، شامل کاهش‌دهنده‌ی 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 تمام مجموعه‌های فازی مربوطه یا بعضی از آن‌ها از نوع-۲ خواهند بود.

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[۱۹]، قوانین را ترکیب کرده و نگاشتی از مجموعه‌های فازی نوع-۱ ورودی به مجموعه فازی نوع-۱ خروجی ایجاد می‌کند.

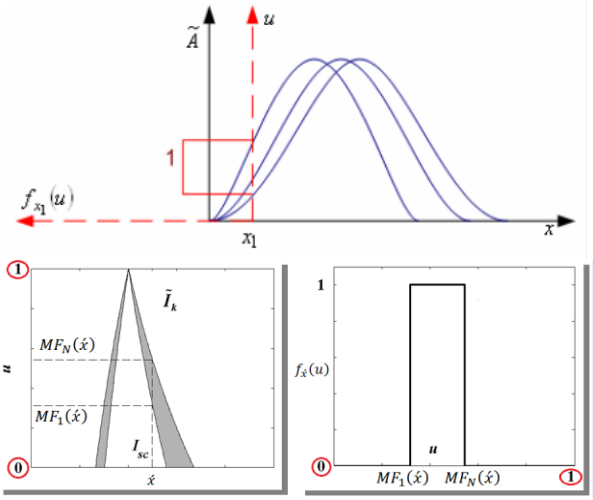
فرآیند استنتاج در سیستم‌های فازی نوع-۲، کاملاً مشابه سیستم‌های فازی نوع-۱ است. در یک سیستم فازی نوع-۲، موتور استنتاج، قوانین را ترکیب کرده و نگاشتی از مجموعه‌های فازی نوع-۲ ورودی به مجموعه فازی نوع-۲ خروجی ایجاد می‌کند. به همین دلیل، دانستن اجتماع و اشتراک مجموعه‌های فازی نوع-۲، و همچنین روابط فازی نوع-۲ ضروری می‌باشد.

در یک سیستم فازی نوع-۱، غیرفازی‌ساز[۲۰]، 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 غیرفازی‌ساز، عدد فازی نوع-۱ را به عدد فازی نوع صفر تبدیل می‌کند.

در سیستم‌های فازی نوع-۲، خروجی موتور استنتاج یک مجموعه فازی نوع-۲ است، بنابراین می‌توان با استفاده از اصل گسترش، روش‌های غیرفازسازی را به‌گونه‌ای 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[۲۱] می‌نامند و خروجی کاهش‌دهنده مرتبه را مجموعه کاهش یافته می‌نامند [۱۷].

سیستم‌های فازی نوع-۲ کلی[۲۲]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، به‌صورت 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، یک مجموعه فازی نوع-۲ بازه‌ای نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقدار عضویت در نقطه x_1، یک مجموعه فازی نوع-۱ بازه‌ای است.



شکل ۵: نمایش یک مجموعه فازی نوع-۲ بازه‌ای

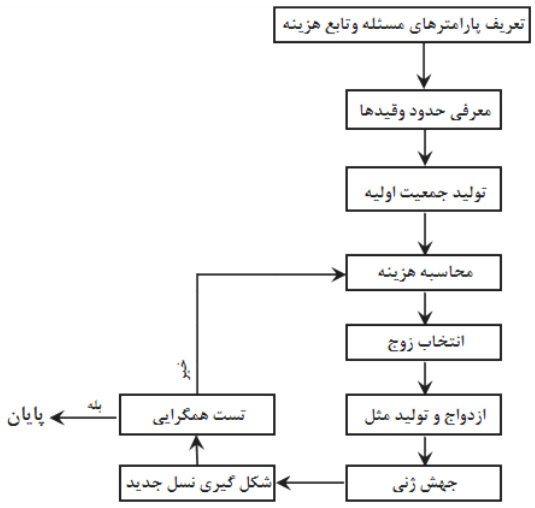
لازم به ذکر است که استفاده از روش فازی نوع-۲ تاکنون در شاخه‌های مختلف مهندسی مانند [۱۸]مطرح شده است و همچنان رو به گسترش می‌باشد.

۶- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با معرفی پارامترها و تابع‌هزینه[۲۳] 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.

به‌طور کلی مسیر بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مراحل بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک

تابع‌هزینه مقدار هزینه ناشی از مجموعه پارامترهای ورودی را تولید می‌کند. الگوریتم ژنتیک با معرفی یک سری جمعیت اوّلیه[۲۴] که همان پارامترهای ورودی در ابتدا می‌باشند شروع به بهینه‌سازی می‌کند. کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شوندکه p_iها ($i = 1,2,3\ldots, N_{par}$) پارامترهای مسئله می‌باشند.

$$\text{Chromosome} = [p_1, p_2, p_3, \ldots, p_{Npar}] \qquad (۱۴)$$

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

به‌عنوان 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 تابع‌هزینه) به‌سادگی محقق نمی‌شود. به‌عبارتی برای رسیدن به این هدف نیاز به صرف زمان و هزینه زیادی جهت اجرای الگوریتم خواهیم داشت، بنابراین برای انتخاب شرط همگرایی در این نوع سیستم‌ها می‌توان به فاکتورهای آماری از قبیل مقدار میانگین[۲۵] یک مجموعه، انحراف از معیار[۲۶] و ... اشاره نمود که این فاکتورها می‌توانند به تنهایی و یا به‌صورت ترکیبی جهت ارائه شرط همگرایی به الگوریتم مورد استفاده قرار گیرند.

به‌عنوان 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 (به‌دلیل عدم نیاز به استفاده از مشتقات تابع هدف) و سهولت در نحوه تعریف و پیاده‌سازی این الگوریتم با هر نرم‌افزار برنامه نویسی، اشاره کرد.

موارد بسیاری از کاربردهای مختلف این الگوریتم بهینه‌سازی در مقالات معتبر ارائه شده است [۱۹، ۲۰] و با پیشرفت رایانه‌ها و نرم‌افزارها رو به گسترش می‌باشد.

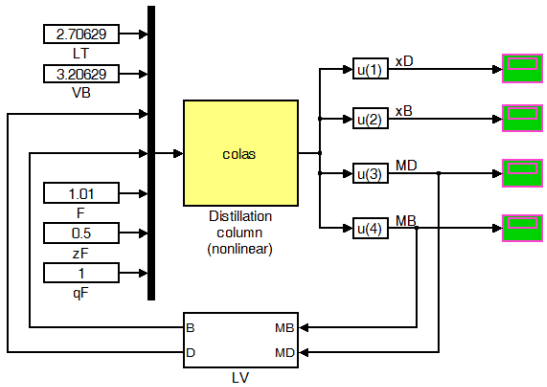
۷- کنترل برج با روش فازی نوع-۲ بهینه‌شده با GA

برای کنترل برج تقطیر معرفی‌شده در بخش ۲، ساختارهای مختلفی همچون؛ LV, DV, DB وLB پیشنهاد می‌شود که هر کدام از این ساختارها مزایا و معایب خاص خود را دارد.

پیکربندی LV متداول‌ترین پیکربندی در صنعت است. اصلی‌ترین حسن آن این است که متغیرهای کنترلی مستقیماً در غلظت محصول موثراند و نیز اغلب به تنظیم سطح وابسته نمی‌باشد. به‌علاوه این پیکربندی برای کنترل تک نقطه به‌خوبی کار می‌کند. [۲۱]

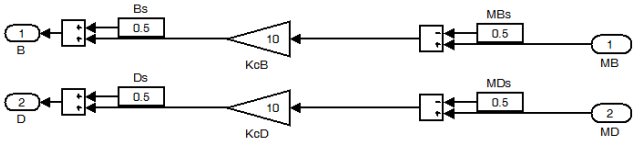
در اینجا نیز به‌منظور کنترل این برج، از ساختار کنترلی LV استفاده شده است. در این ساختار، مقدار بویل‌آپ و پس‌ریز ثابت فرض می‌شوند و فلوی محصول در بالا و پایین برج برای کنترل، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همچنین در خصوص استفاده از دکوپلر در ساختار کنترل، نکته‌ای مهم در اینجا وجود دارد؛ مقالات علمی سال‌ها در خصوص استفاده از دکوپلرها به‌عنوان بخشی از کنترل‌کننده بحث کرده‌اند. [۲] و [۲۲] و [۲۳] به‌طور واضح نشان می‌دهند که دکوپلرها فقط باید برای پلنت‌هایی با RGA[۲۷] کوچک استفاده شوند. این مطلب برای کنترل برج تقطیر با پیکربندی LV دلالت بر این دارد که نباید در ساختار کنترل از دکوپلرها استفاده شود. در واقع در اینجا می‌توان از اثر دکوپلینگ دینامیک‌های فلو در پاسخ فرکانس بالای سیستم، در اهداف کنترلی بهره جست. در مدل برج تقطیر پس‌ریز (L)، اثر مستقیم در غلظت محصول بالای برج دارد اما تنها با تأخیر زیاد در x_B اثر دارد و به‌طور مشابه بویل‌آپ، اثر مستقیم در xB دارد ولی تنها اثر کوچک اولیه بر روی xD خواهد داشت. این بدین معناست که می‌توان با یک کنترل‌کننده به‌نسبت سریع، از تداخل بین ترکیب بالا و پایین جلوگیری کرد. شبیه‌سازی برج با مدل ذکرشده در بخش ۲، در حضور ساختار کنترلی LV، در شکل ۹ نشان داده شده است.



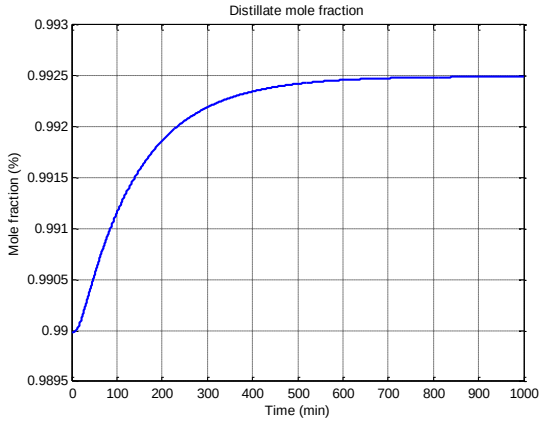
شکل ۹: شبیه‌سازی مدل غیرخطی برج در حضور ساختار کنترلی LV

در بلوک ساختار کنترلی LV همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، از یک کنترل‌کننده تناسبی ساده استفاده شده است. پارامترهای MBs و MDs مقادیر نامی هولدآپ و Ds و Bs مقادیر نامی فلوی بالا و پایین می‌باشند. پارامترهای KcB و KcD نیز مقادیر کنترل‌کننده می‌باشند.



شکل ۱۰: ساختار کنترلی LV

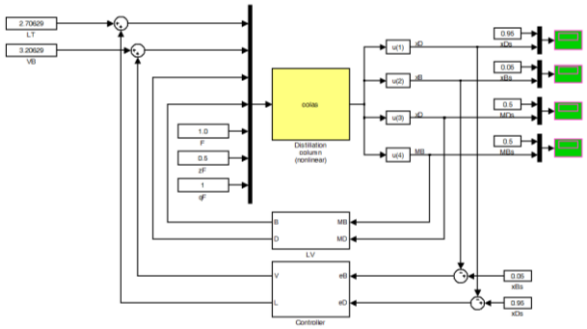
پاسخ سیستم فوق به ورودی‌هایی که در شکل ۹ نشان داده شده است، به‌صورت شکل ۱۱ می‌باشد که هرچند پاسخ به مقدار مشخصی میل می‌کند اما با مقدار مطلوب مورد نظر متفاوت است.



شکل ۱۱: پاسخ غلظت محصول تقطیرشده به ورودی‌های ثابت

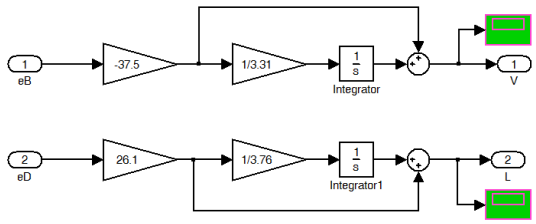
۷-۱- طراحی کنترل‌کننده PI

برای آن‌که بتوان به مقدار مطلوبی از غلظت محصول در بالای برج (xD) رسید، باید آن را به‌شیوه‌ای کنترل کرد. سیگنال‌های کنترلی که برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد، فلوی پس‌ریز (L) و فلوی بویل‌آپ (V) است. شکل ۱۲، سیستم حلقه‌بسته را در حضور کنترل‌کننده نشان می‌دهد. ورودی‌های کنترل‌کننده، خطای غلظت محصول بالایی و پایینی و خروجی‌های کنترل‌کننده فلوی پس‌ریز و بویل‌آپ است.



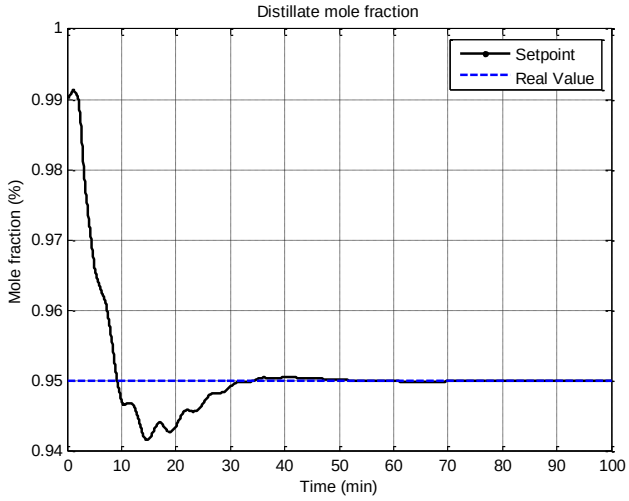
شکل ۱۲: سیستم حلقه‌بسته برج تقطیر

آقای اسکاجستد[۲۸] از کنترل‌کننده PI برای کنترل غلظت محصول استفاده کرده است. ساختار این کنترل‌کننده PI در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: کنترل‌کننده PI در ساختار کنترلی اسکاجستد

پاسخ غلظت محصول بالایی در حضور این کنترل‌کننده به‌صورت شکل ۱۴ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ به مقدار نهایی رسیده است اما دارای نوسانات بوده و حدود ۲۰٪ نیز فراجهش دارد و لذا باید بهبود یابد.



شکل ۱۴: غلظت محصول بالایی در حضور کنترل‌کننده PI

۷-۲- طراحی کنترل‌کننده فازی-۱

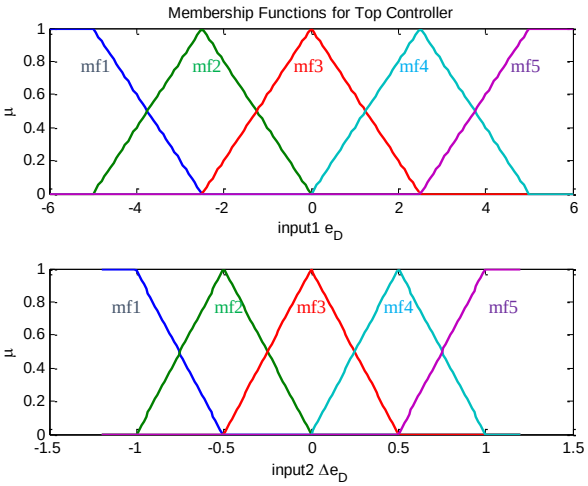
برای بهبود پاسخ غلظت محصول، از کنترل‌کننده فازی استفاده خواهد شد. در کنترل‌کننده بالایی، ورودی اول خطا در محصول بالای برج ($e_D(k)=x_{Dr}(k)-x_D(k)$) و همچنین ورودی دوم، نرخ تغییر خطا ($\Delta e_D(k)=e_D(k)-e_D(k-1)$) بوده و خروجی نیز نرخ پس‌ریز (L) می‌باشد. در کنترل‌کننده پایینی، ورودی اول خطا در محصول پایین برج ($e_B(k)=x_{Br}(k)-x_B(k)$) و همچنین ورودی دوم نیز، ($\Delta e_B(k)=e_B(k)-e_B(k-1)$) بوده و خروجی نیز نرخ بویل‌آپ (V) است.

برای طراحی کنترل‌کننده فازی از روش ارائه‌شده در [۲۴] استفاده شده است. در کنترل‌کننده فازی طراحی‌شده، توابع عضویت ورودی‌ها به‌صورت مثلثی[۲۹] یا ذوزنقه‌ای[۳۰] انتخاب می‌شود. در هر کنترل‌کننده، برای هر کدام از ورودی‌های خطا و مشتق خطا، ۵ تابع عضویت در نظر گرفته شده است. شکل ۱۵ این توابع عضویت‌ها را نشان می‌دهد.

توابع عضویت خروجی به‌صورت منفرد انتخاب شده است که در شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشد.

حال نوبت به تولید پایگاه قواعد "اگر-آن‌گاه" فازی می‌رسد. این قواعد در جدول ۲ آمده است. هر خانه از جدول بیان‌گر شماره تابع عضویت خروجی است که عددی بین ۱ و ۹ می‌باشد.

هر المان جدول ۲، یک قاعده "اگر-آن‌گاه" است. برای مثال، اگر ورودی برابر mf1 باشد و ورودی برابر mf2 باشد، خروجی برابر MF2 است. بنابراین ۲۵ قاعده برای هر کنترل‌کننده وجود خواهد داشت. ساختار کنترل‌کننده فازی در نظر گرفته شده به‌صورت شکل ۱۷ می‌باشد.



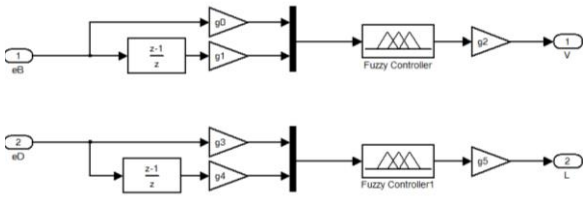
شکل ۱۵: توابع عضویت ورودی برای کنترل‌کننده‌های فازی برج

```
[Output1]
Name='output'
Range=[-10 10]
NumMFs=9
MF1='out1mf1':'constant',[-8]
MF2='out1mf2':'constant',[-6]
MF3='out1mf3':'constant',[-4]
MF4='out1mf4':'constant',[-2]
MF5='out1mf5':'constant',[0]
MF6='out1mf6':'constant',[2]
MF7='out1mf7':'constant',[4]
MF8='out1mf8':'constant',[6]
MF9='out1mf9':'constant',[8]
```

شکل ۱۶: توابع عضویت خروجی برای کنترل‌کننده فازی بالای برج

جدول ۲: پایگاه قواعد فازی

Δe_D \ e_D	mf1	mf2	mf3	mf4	mf5
mf1	1	2	3	4	5
mf2	2	3	4	5	6
mf3	3	4	5	6	7
mf4	4	5	6	7	8
mf5	5	6	7	8	9



شکل ۱۷: ساختار کنترل‌کننده فازی

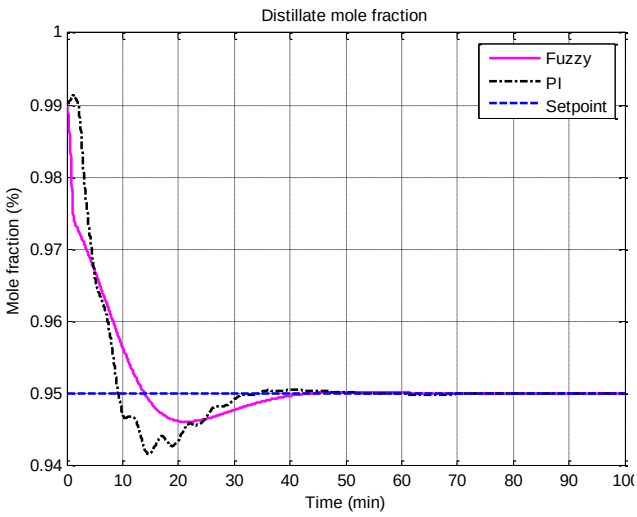
بر سر راه هر ورودی و خروجی یک بهره تنظیم قرار گرفته است. این بهره‌ها برای تنظیم محدوده‌های تغییرات ورودی و خروجی به‌منظور بهبود عملکرد کنترل‌کننده فازی است. در مجموع ۶ بهره تنظیم وجود دارد که باید مقدار بهینه آن‌ها تعیین شود. این بهره‌های بهینه با استفاده از الگوریتم GA انتخاب خواهد شد. مطابق توضیحات بخش الگوریتم ژنتیک، ابتدا یک جمعیت اولیه از پارامترها انتخاب شده است 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. به‌ازای هر دسته (هر سطر) از پارامترها که در متغیری مانند X ریخته می‌شود:

X=[g0 g1 g2 g3 g4 g5]

شبیه‌سازی به تعداد n بار اجرا شده و تابع هزینه (در اینجا، مجموع مربعات خطا) محاسبه می‌گردد. 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 می‌شود. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که تابع هزینه دیگر تغییر نکند و ثابت بماند و یا اینکه تعداد نسل‌ها محدود باشد. بعد از شبیه‌سازی و اجرای برنامه بهینه‌سازی GA، پارامترهای بهینه به‌دست آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

```
%% Scaling Parameters
g0 = ۰/۶۷۶۲;
g1 = ۲/۹۰۶۸;
g2 = ۰/۹۷۵۶;
g3 = ۲/۹۷۲۷;
g4 = ۲/۷۹۸۸;
g5 = ۲/۹۶۹۲;
```

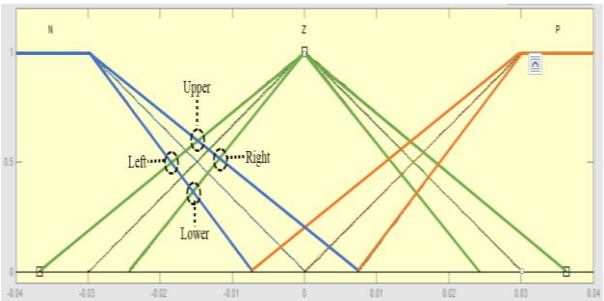
پس از قراردادن کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده در شبیه‌سازی و اجرای آن و مقایسه پاسخ حاصل با پاسخ کنترل‌کننده PI، مطابق شکل ۱۸، مشاهده می‌گردد که کنترل‌کننده فازی نسبت به کنترل‌کننده PI دارای فراجهش کمتری است و نوسانات آن کاملاً از بین رفته است و بهبودی پاسخ مشهود می‌باشد.



شکل ۱۸: مقایسه نتایج کنترل‌کننده فازی با کنترل‌کننده PI

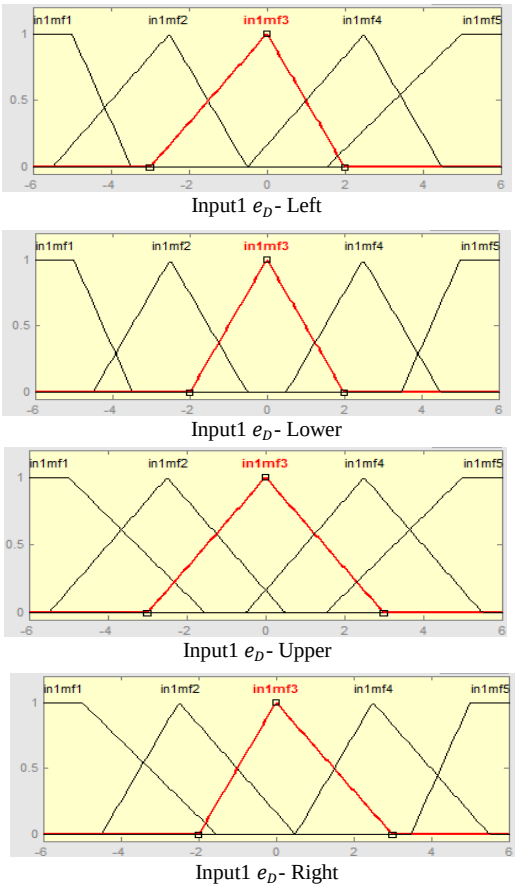
۷-۳- طراحی کنترل‌کننده فازی نوع-۲

در ادامه باید، کنترل‌کننده فازی نوع-۱ به نوع-۲ تبدیل گردد. برای این منظور باید به توابع عضویت، عدم قطعیت اضافه شود. ۱۰٪ عدم قطعیت به پهنای توابع عضویت اعمال می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، در این حالت هر دو تابع عضویت مجاور، هم‌دیگر را در چهار نقطه قطع می‌کنند. بدین ترتیب، هر تابع عضویت به ۴ تابع عضویت با نام‌های "بالا"، "پایین"، "چپ" و "راست" تبدیل می‌شود.



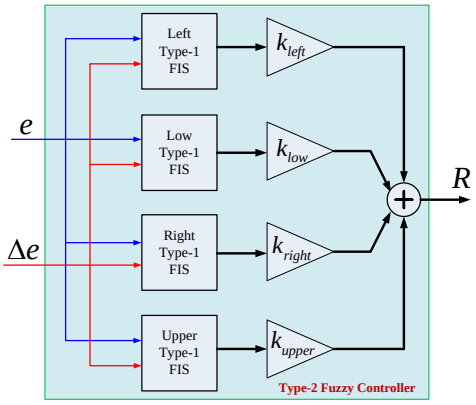
شکل ۱۹: نقاط تقاطع در دو تابع عضویت نوع-۲ مجاور

این توابع عضویت به‌عنوان مثال برای ورودی e_D در یکی از کنترل‌کننده‌ها در شکل ۲۰ آمده است.



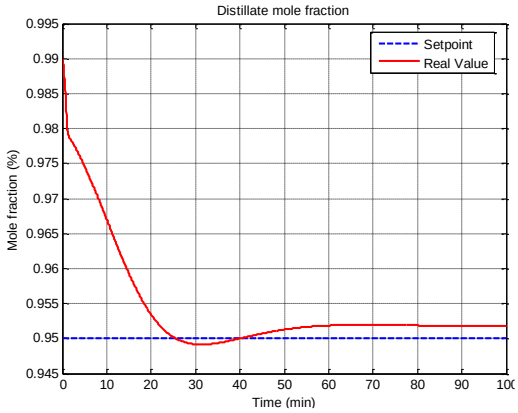
شکل ۲۰: توابع عضویت کاهش‌رتبه یافته برای ورودی e_D یکی از کنترل‌کننده‌ها

ساختاری که برای کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود، مطابق شکل ۲۱، بدین صورت است که بر سر راه هر یک از مجموعه توابع عضویت ذکر شده، یک گین 0.25 قرار می‌گیرد و خروجی این گین‌ها با هم جمع می‌شوند.



شکل ۲۱: ساختار در نظر گرفته‌شده برای کنترل‌کننده فازی نوع-۲

نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی در شکل ۲۲ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچند رفتار گذرا مشابه فازی نوع-۱ می‌باشد اما خروجی به مقدار مطلوب نرسیده است و لذا پاسخ نسبت به فازی-۱ بهبودی نیافته است و می‌بایست اصلاح گردد.



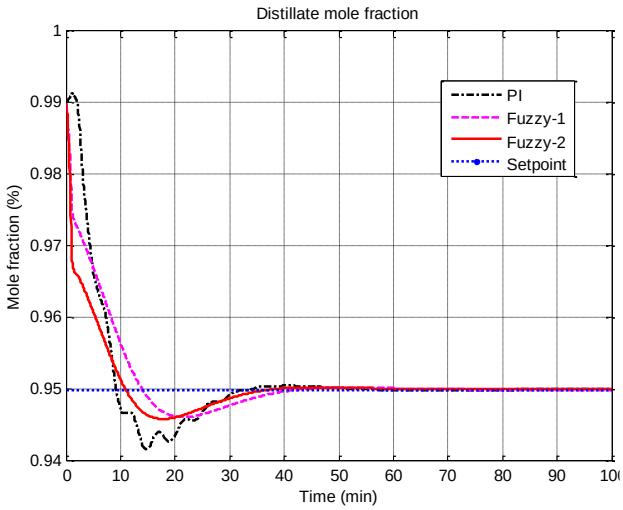
شکل ۲۲: غلظت محصول در حضور کنترل‌کننده فازی نوع-۲

برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده فازی نوع-۲ در مقایسه با فازی نوع-۱ باید گین‌های اعمالی آن بهینه گردد. برای این منظور از روش الگوریتم GA استفاده خواهد شد. هر کنترل‌کننده دارای ۴ گین است و در مجموع ۸ گین وجود دارد که باید بهینه شوند. مشابه روند بخش قبل، گین‌های بهینه حاصل از اجرای GA به‌صورت زیر می‌باشند:

```
%% Optimization Parameters
K1_up = ۰/۱۷۸;
K1_low = ۰/۴۲۱;
K1_lef = ۰/۲۶۶۵;
K1_rig = ۰/۲۳۸;
K2_up = ۰/۷۲۰;
K2_low = ۰/۱۵۳;
```

K2_lef = ۰/۲۴۲;
K2_rig = ۰/۲۳۹;

پس از اجرای شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی نوع-۲ با گین‌های بهینه فوق، چنان‌چه نتایج با کنترل‌کننده فازی نوع-۱ و PI که پیش‌تر آمده، مقایسه گردد، مشخص می‌شود که کنترل‌کننده فازی نوع-۲ نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر دارای عملکرد بهتری است. در واقع کنترل‌کننده فازی نوع-۲ نسبت به کنترل‌کننده فازی نوع-۱، سرعت پاسخ‌دهی (زمان خیز و زمان نشست) را کاهش داده است. شکل ۲۳ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳: مقایسه نتایج کنترل‌کننده‌های فازی نوع-۲ و فازی نوع-۱ و PI

همچنین نتایج مقایسه عددی شاخص‌های عملکردی این سه کنترل‌کننده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: مقایسه عددی شاخص‌های عملکردی سه کنترل‌کننده

شاخص / کنترل‌کننده	فراجهش (٪)	زمان صعود (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)
PI	۲۰/۷	۸/۵	۳۰
فازی-۱	۹/۷	۱۱/۳	۳۶/۴
فازی-۲	۱۰	۸/۵	۳۱/۹

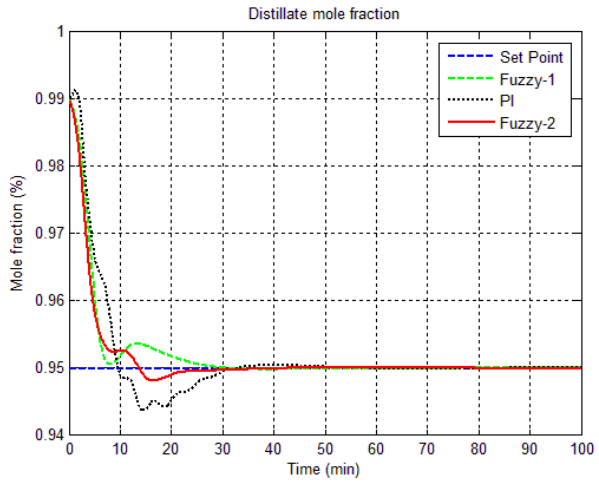
همان‌طور که در جدول ۳ می‌شود، کنترل‌کننده فازی نوع-۲ از نظر زمان صعود و زمان نشست تقریباً مشابه کنترل‌کننده PI و از لحاظ فراجهش بسیار بهتر عمل کرده است، به‌طوری که میزان فراجهش حدود ۱۰٪ کاهش یافته است که میزان قابل توجهی است. در واقع این کنترل‌کننده مزیت‌های دو کنترل‌کننده دیگر (فراجهش کم و سرعت زیاد) را هم‌زمان دارد.

۷-۴- اثر تغییر در تغذیه

مدل برج تقطیر یک مدل با پارامترهای قطعی می‌باشد و تنها نامعینی که در سیستم به‌وجود می‌آید ناشی از تغییراتی است که در ترکیب و فلوی تغذیه ایجاد می‌گردد. در این بخش، عملکرد کنترل‌کننده فازی نوع-۲ طراحی‌شده در حضور اغتشاش در تغذیه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

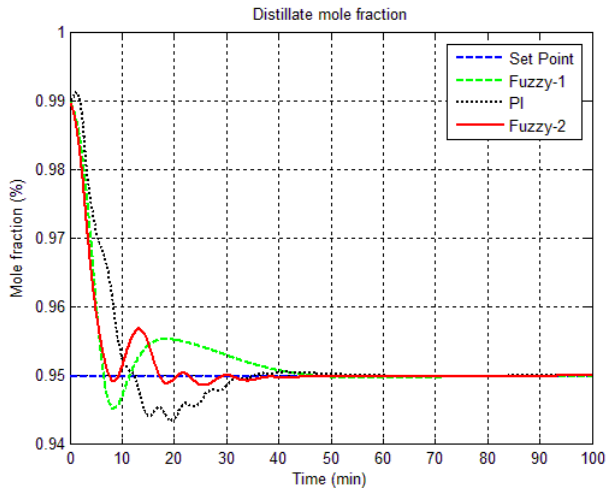
در ابتدا اثر تغییر در ترکیب مولی تغذیه (Z) بررسی می‌شود. برای این منظور، مقدار نسبت مولی تغذیه را برابر ۰/۷ قرار داده و عملکرد کنترل‌کننده‌های PI، فازی-۱ و فازی-۲ با هم مورد مقایسه قرار می‌گیرند. توجه شود که فلوی تغذیه (F) در این حالت برابر با ۱ است.

نتایج مربوط به غلظت محصول بالایی برج تقطیر به‌ازای این تغییر نسبت مولی در شکل ۲۴ آمده است.



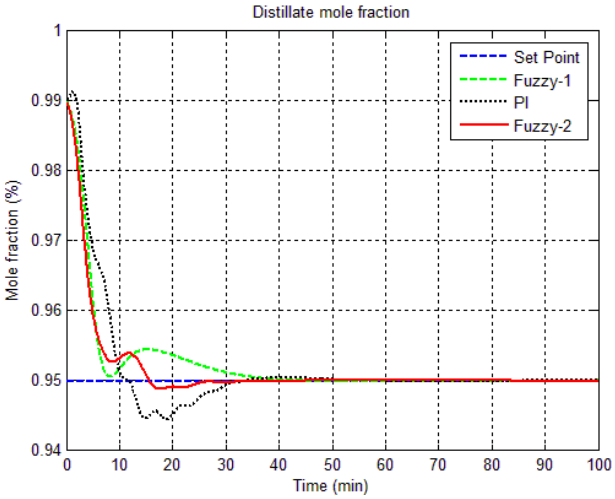
شکل ۲۴: مقایسه نتایج کنترل‌کننده‌ها به‌ازای تغییر نسبت مولی تغذیه

همچنین اثر تغییر در فلوی تغذیه در شکل ۲۵ قابل مشاهده است. در این حالت، فلوی تغذیه برابر ۰/۸ و نسبت مولی تغذیه برابر با ۰/۵ است.



شکل ۲۵: مقایسه نتایج کنترل‌کننده‌ها به‌ازای تغییر فلوی تغذیه

همچنین اثر تغییر هم‌زمان در فلوی تغذیه و نسبت مولی (فلوی تغذیه ۰/۹ و نسبت مولی ۰/۷) در شکل ۲۶ آمده است.



شکل ۲۶: مقایسه نتایج به‌ازای تغییر هم‌زمان فلوی تغذیه و نسبت مولی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده فازی-۲ توانسته است با وجود تغییر در نسبت مولی تغذیه، تغییر در فلوی تغذیه و یا تغییر هم‌زمان نسبت مولی و فلوی تغذیه، به‌خوبی مقدار مطلوب خروجی را دنبال کند و عملکرد فازی-۲ در همه حالت‌ها بهتر از عملکرد دو کنترل‌کننده دیگر است.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه محاسبه ضرایب بهینه کنترلر فازی با روش الگوریتم ژنتیک به‌صورت آفلاین انجام می‌شود و پس از به‌دست آوردن ضرایب بهینه، کنترل‌کننده پیاده‌سازی می‌شود بنابراین حجم محاسبات بهینه‌سازی در مرحله طراحی، نقشی در حجم محاسبات آنلاین ندارد.

اما در خصوص حجم محاسبات کنترل‌کننده فازی در سیستم آنلاین باید گفت عموماً برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی، مجموعه قوانین فازی و خروجی کنترل‌کننده فازی به‌فرم جدول نظاره در می‌آید و در حافظه ذخیره می‌شود. یا اگر به فرم (سوگنو) باشد که خروجی به‌صورت خطی یا ثابت به‌دست می‌آید. اما یقیناً حجم محاسبات با کنترل‌کننده PI به مراتب کمتر از کنترل‌کننده فازی می‌باشد. این درحالی است که وابستگی شدید کنترلر PI به نقطه کار سیستم غیرخطی (مشابه برج تقطیر) و همچنین مقاوم‌نبودن آن به تغییرات پارامترهای سیستم غیر قابل اغماض است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش فازی نوع-۲ بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک برای کنترل برج تقطیر با یک مدل غیرخطی، ارائه شده است که توانسته است بهتر از بسیاری از کنترل‌کننده‌های قبلی مثل فازی نوع-۱ و نیز کنترل PI مرسوم عمل کند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کارآیی روش 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 در نظر می‌گیرد. همچنین ساختار به‌کار گرفته‌شده برای کاهش مرتبه سیستم قادر است پیاده‌سازی کنترل‌کننده را برای مدل‌های غیرخطی پیچیده برای برج تقطیر نظیر مدل اسکاجستد تأیید نماید. علاوه بر آن مقایسه روش پیشنهادی با روش فازی نوع ۱ و روش کنترل PI حاکی از مقاوم‌بودن روش در برابر تغییرات همزمان فلوی تغذیه و نسبت مولی می‌باشد.

مراجع

[1] S. Skogestad and M.Morari, “Shortcut model for distillation column,” California Institute of Technology, Chemical Engineering, PhD Thesis, 1997.
[2] S. Skogestad and M. Morari, “Understanding the dynamic behavior of distillation columns,” Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 27, no. 10, pp. 1848-1862, 1988.
[3] S. Skogestad, “Dynamics and Control of Distillation Columns - A Critical Survey,” Modeling, Identification and Control, vol. 18, no. 3, pp. 177--217, 1997.
[4] S. Skogestad and I. Postlethwaite, “Multivariable feedback control: analysis and design,” Wiley, 2007.
[5] R. Irani, R. Nasimi and 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.
[6] A. George, P. Riya and 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, pp. 555–558, Jun. 2015.
[7] N. Sharma and 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.
[8] P. Mishra, V. Kumar and 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.
[9] U. Kapoor, A. Rani, V. Singh and J. R. P. Gupta, “Simulation and control of reactivedistillation column,” India International Conference on Power Electronics (IICPE), New Delhi, pp. 1-7, Jan. 2011.
[10] J. Mo-yi and M. Lei, “The application of fuzzy control in extractive distillation column,” 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), Chengdu, vol. 6, pp. 322-324, Aug. 2010.
[11] N.N. Mohammad, N. Kasuan, M. H. F. Rahiman and M. N. Taib, “Steam temperature control using fuzzy logic for steam distillation essential oil extraction process,” IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, pp. 53-58, Jun. 2011.
[12] A. K. Singh, B. Tyagi and V. Kumar, “Comparative performance analysis of fuzzy logic controller for the composition control of binary distillation column,” IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), Trivandrum, pp. 515-519, Sep. 2011.
[13] S. Javahernia and 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.
[14] A. Vasičkaninová, M. Bakošová and A. Mészáros, "Fuzzy Control of a Distillation Column," Elsevier B.V, vol. 26, pp. 1299–1304, 2016.
[15] M. Miccio and 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.
[16] L.X.Wang, “A Course in Fuzzy Systems and Control,” Prentice-Hall international Inc., 1997.
[17] J. M. Mendel, “Advances in type-2 fuzzy sets and system,” Information Sciences, vol.177, no. 1, pp. 84-110, Jan. 2007.
[18] M. Nabipour, M. Razzaz, S.G. Seifossadat and S.S. Mortazavi, “injected voltage control of the dvr using a new hybrid adaptive controller in compensating network faults,” Tabriz Journal of Electrical Eng., vol. 46, no. 2, pp. 307-321, Summer 2016.

[19] H. Jafari and H. Kharrati, "3D Path planning system design and development for unmanned aerial vehicle," Tabriz Journal of Electrical Eng., vol. 46, no. 3, pp. 83-94, Autumn 2016.
[20] M. Behnam and H. Pourghassem, "Epilepsy detection based on optimization of fused hartley transform feature with hybrid model of mlp and ga using memetic learning strategy," Tabriz Journal of Electrical Eng., vol. 45, no. 4, pp. 51-67, Winter 2015.
[21] S. Skogestad, "Dynamics and control of distillation columns - A critical survey," Modeling, Identification and Control, vol. 18, no. 3, pp. 177--217, 1997.
[22] S. Skogestad and M. Morari, "A systematic approach to distillation column control," Symposium Distillation, Brighton, 1987.
[23] S. Skogestad and I. Postlethwaite, "Multivariable feedback control: analysis and design," Wiley, 2007.
[24] J. H. Lilly, "Fuzzy control and identification," New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2010.

زیرنویس‌ها

[1] Feed
[2] Overhead Product
[3] Bottom Product
[4] Reflux Ratio
[5] S. Skogestad [2], [3], [4]
[6] Hold up
[7] Boil up
[8] Artificial Neural Network
[9] Model Predictive Control
[10] Model Reference Adaptive Control
[11] Proportional-Iintegral-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] Type-1 fuzzy system
[19] Inference Engine
[20] Defuzzitier
[21] Type Reduction
[22] Generallized Type-2 Fuzzy System
[23] Cost Function
[24] Initial Population
[25] Average
[26] Standard Deviation
[27] Relative Gain Array
[28] S. Skogestad [21]
[29] Trimf
[30] Trapmf