

میزان سازی بهینه کنترلرهای برج تقطیر واکنشی تولید متیل ترشیو بوتیل اتر با استفاده از الگوریتم ژنتیک غیر مغلوبی

علیرضا بهروزسارند*^۱ و رحیم حسن زاده^۲

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۲۴

چکیده

کنترل برج های تقطیر واکنشی یکی از مشکلات اصلی پیش روی این نوع فرآیندها می باشد که دلایل اصلی آن غیرخطی بودن زیاد سیستم، برهم کنش های بسیار شدید، چندگانگی در شرایط پایدار، تاخیر زمانی، عدم قطعیت فرآیند و تعداد بالای ساختارهای ممکن کنترلی می باشد. از سوی دیگر محصولاتی مانند متیل ترشیو بوتیل اتر و اتیل ترشیو بوتیل اتر از جمله محصولات مهمی هستند که از این روش تولید می شوند. در این پژوهش برای بهینه سازی ضرایب کنترلرهای تناسبی-انتگرالی- مشتقی برج تولیدکننده محصول متیل ترشیو بوتیل اتر از الگوریتم ژنتیک چند تابعی استفاده شده است. برای این منظور ضرایب بهینه کنترلرها از طریق کمینه سازی دو تابع هدف میزان فرارفت و انتگرال کل خطاهای حاصل از کنترلرها با استفاده از الگوریتم ژنتیک غیر مغلوبی ۲ تعیین شده است. نتایج عددی نشان می دهد که این الگوریتم دارای توانایی بسیار بالا در بهینه سازی ضرایب کنترلی فرآیندهای غیرخطی مانند تقطیر واکنشی تولید محصول متیل ترشیو بوتیل اتر در مقایسه با روش های قدیمی است.

کلمات کلیدی: متیل ترشیو بوتیل اتر، الگوریتم ژنتیک غیر مغلوبی ۲، کنترلرهای تناسبی-انتگرالی-مشتقی، بهینه سازی، مقادیر بهینه Pareto

مقدمه

تقطیر واکنشی دارای مزایای دیگری نسبت به راکتورها، جداسازهای متداول و همچنین فرآیندهایی با جریان های برگشتی می باشد. این مزایا عبارتند از کاهش عمده در تعداد مراحل پایین دستی، استفاده از گرمای واکنشی برای تبخیر فاز مایع، ساختار ساده کنترل دمایی، امکان تاثیرگذاری تعادل شیمیایی در اثر خارج سازی محصولات و دور شدن از مشکلات ناشی از مخلوط های آزنوتروپ [۱].

فرآیند تقطیر واکنشی^۱، تجمیعی از مراحل واکنش و جداسازی در یک تجهیز فرآیندی واحد می باشد. هم زمانی دو مرحله واکنش و جداسازی در یک فرآیند واحد، می تواند باعث بهبود انتخاب پذیری واکنش مطلوب شود. علاوه بر این، فرآیندهای

1. Reactive Distillation

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی: a.behroozsarand@uut.ac.ir

این تکنولوژی در مقیاس‌های صنعتی می‌باشد [۱۵]. در دهه گذشته مقالات متعددی در زمینه سیستم‌های کنترل این فرآیند ارائه شده است [۱۶]. برجسته‌ترین تحقیقی که در این زمینه صورت گرفته متعلق به ال- ارفج و لوبین می‌باشد که به صورت سری مقالاتی در زمینه کنترل سیستم‌های تقطیر واکنشی به چاپ رسیده است [۱۷-۲۲]. تحقیقاتی که توسط این دو دانشمند در بخش کنترل این نوع سیستم‌ها انجام گرفته به مشکلاتی پرداخته است که در سیستم‌های کنترل برای فرآیندهای تقطیر واکنشی اتفاق می‌افتد. آنها نشان دادند که کنترل دمای سینی در بخش جداسازی و ترکیب درصد در بخش واکنشی از اولویت‌های اصلی سیستم‌های کنترل برج‌های تقطیر واکنشی است. یکی دیگر از پارامترهایی که در کنترل سیستم‌های تقطیر واکنشی مورد مطالعه قرار گرفته، ثابت نگه‌داشتن نسبت استوکیومتری بین مواد واکنش‌دهنده در خوراک ورودی به برج به همراه دمای جریان خروجی برای تنظیم درصد خلوص محصول نهایی است. ال- ارفج و لوبین اشاره کردند که طرح کنترل نسبت شدت جریان خوراک‌های ورودی نمی‌تواند دقت بالایی در کنترل نسبت استوکیومتری بین واکنش‌دهنده‌ها ایجاد نماید [۲۳]. استفاده از آنالیزورهای آنالیز ترکیب درصد خوراک مانند کروماتوگرافی گازی برای برج‌های تقطیر واکنشی توصیه شده است. به دلیل قابلیت استفاده در حالت کنترل پس‌خور، توانایی کاهش و در برخی موارد به صفر رساندن اختلاف بین مقدار مقرر و مقدار پارامتر کنترلی با استفاده از پارامتر زمان انتگرالی، استفاده از کنترل‌کننده‌های تناسبی- انتگرالی- مشتقی^۱ در صنایع، بسیار رایج می‌باشد. در حقیقت در حدود ۹۵٪ از حلقه‌های کنترل از این نوع کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌نماید. از کل این کنترل‌کننده‌ها بخش

فرآیند تقطیر واکنشی عمدتاً برای سیستم‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آنها فراریت نسبی مواد واکنش‌دهنده و محصولات به گونه‌ای است که محصولات می‌توانند به آسانی از محیط واکنش خارج شوند، در حالی که مواد اولیه در مخلوط واکنشی باقی بمانند [۲]. کاربردهای موفق صنعتی فرآیند تقطیر واکنشی شامل سیستم‌های استریفیکاسیون مانند متیل استات [۳] و اتریفیکاسیون مانند متیل ترشیو بوتیل اتیل [۴]، اتیل ترشیو بوتیل اتیل [۵] و ترشیو آمیل متیل اتر [۶] می‌باشد. در سال‌های اخیر تعداد مقالات و پتنت‌ها درباره تقطیر واکنشی رشد چشم‌گیری داشته است [۷ و ۸]. مقاله مروری ارائه شده توسط تیلور و کریشنا [۹] مزایا، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و ساختار سخت‌افزاری تقطیر واکنشی را مورد بررسی قرار داده است. عملکرد یک فرآیند غیرخطی نظیر تقطیر واکنشی، توسط خواص ذاتی یک فرآیند برای دستیابی به عملکرد قابل قبول کنترلی در مقابل اغتشاش‌های مجهول اما محدود و همچنین عدم قطعیت مدل، با استفاده از متغیرهای قابل تنظیم و اندازه‌گیری‌هایی که توسط سنسورها انجام می‌گیرد، تعریف می‌شود [۱۰]. طبیعت چندتابعی تقطیر واکنشی نشات گرفته از ویژگی‌های غیرخطی راکتورها و جداکننده‌ها می‌باشد که در یک تجهیز فرآیندی جمع شده‌اند. بنابراین، دینامیک و کنترل تقطیر واکنشی در مقایسه با تک تک بخش‌ها مانند راکتورها و جداکننده‌ها پیچیده‌تر بوده و کمتر مطالعه شده است. حالت غیرخطی بودن شدید تقطیر واکنشی می‌تواند منجر به پدیده‌ای مانند چندگانگی^۱ حالت پایدار [۱۱-۱۴] شده و برخلاف حالت‌هایی که در برج‌های تقطیر بدون واکنش وجود دارد، باعث غیریکنواختی پروفایل دما گردد. به دلیل وجود درجه کنترل کمتر (شیرها) از درجه آزادی در مقایسه با فرآیندهای مرسوم در فرآیندهای تقطیر، طراحی سیستم کنترل قوی یکی از پارامترهای بسیار مهم در اجرای موفق

1. Multiplicity

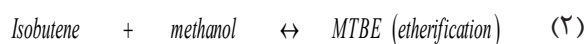
2. Proportional-Integral-Derivative

فرآیند تولید متیل ترشیو بوتیل اتر

فرآیندهای استریفیکاسیون و اتریفیکاسیون از کاربردهای موفق صنعتی فرآیند تقطیر واکنشی می‌باشند. فرآیند تقطیر واکنشی برای تولید محصول ترشیو بوتیل اتر برای اولین بار توسط دانشمندی به نام اسمیت در سال ۱۹۸۱ ثبت اختراع شد [۲۸]. محصول ترشیو بوتیل اتر به عنوان اضافه شونده ضد ضربه^۲ در سوخت‌های بدون سرب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹].

واکنش ترشیو بوتیل اتر

واکنش اولیه در تولید محصول ترشیو بوتیل اتر، اتریفیکاسیون ایزوبوتن با متانول برای تولید محصول نهایی در حضور کاتالیست اسیدی بسیار قوی می‌باشد. واکنش انجام یافته به صورت زیر است:



در محاسبات تعادلات گاز-مایع در شبیه‌سازی انجام شده، ضرایب فعالیت فاز مایع با محاسبه از معادلات ترمودینامیکی ویلسون استفاده شده است. به منظور معرفی سینتیک واکنش و پارامترهای به کار رفته در آن، از روابط ارائه شده توسط رهفینگر و هافمن در شبیه‌سازی استفاده شده است [۳۰]. پارامترهای ویلسون و ضرایب سینتیکی در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق نویسندگان از بسته ترمودینامیکی نرم‌افزار Aspen HYSYS 7.2 برای محاسبات ترمودینامیکی بهره گرفته‌اند.

الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندتابعی

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از بهترین ابزارهای بهینه‌سازی با استفاده از روش جستجو در فضای بسیار بزرگی از جواب‌ها در زمان فرآیندی قابل قبول می‌باشد. یکی از مزایای این روش عدم نیاز به بررسی تقعر و تحدب تابع و همچنین مشتق‌پذیری تابع می‌باشد [۳۱].

عمده‌ای نیز از نوع تناسبی-انتگرالی می‌باشد [۲۴]. مهم‌ترین عاملی که استفاده از این نوع کنترل‌کننده‌ها را در صنعت متداول نموده، تعداد پارامترهای محدود برای تنظیم کارکرد آنها می‌باشد. با وجود این مزایا و تعداد محدود پارامترهای تنظیمی برای این نوع کنترل‌کننده‌ها، در حدود ۳۰٪ آنها در حالت دستی و بقیه به صورت اتوماتیک عمل می‌نمایند که ضرایب کنترلی آنها معمولاً بهینه تنظیم نشده است [۲۵]. روش‌ها و تکنیک‌های زیادی برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌ها وجود دارد و معمولاً از سه روش اصلی زیر استفاده می‌شود:

۱- روش‌های تجربی مانند زیگلر-نیکولز [۲۵].
۲- روش‌های تحلیلی مانند تکنیک‌هایی بر پایه ریشه‌های لوکاس [۲۵ و ۲۶].

۳- روش‌هایی براساس بهینه‌سازی، مانند روش‌های لوپز و سیانکون [۲۷]. در این روش‌ها ضرایب کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتقی براساس معیار انتگرال مجموع خطاها و با استفاده از یک مدل خطی مطابق رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau_s + 1} e^{-\theta s} \quad (1)$$

در این پژوهش مقادیر بهینه ضرایب کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی^۱ ۲ پیشنهاد شده است. کارایی روش پیشنهادی به وسیله بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی مورد استفاده در فرآیند تقطیر واکنشی تولید متیل ترشیو بوتیل اتر بررسی شده است. در تحقیق حاضر دو تابع هدف بهینه‌سازی تعریف شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش الگوریتم ژنتیک مغلوبی^۲ می‌تواند جواب‌های بهینه‌ای کمینه‌سازی انتگرال مجموع خطاها و کمینه‌سازی مجموع مقادیر فرارفت‌های کنترل‌کننده‌ها را برای دو تابع هدف، که در اکثر موارد رفتار متضادی از خود نشان می‌دهند، پیش‌بینی نماید.

1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

2. Anti-knock

جدول ۱- پارامترهای معادله ترمودینامیکی ویلسون و ضرایب سینتیکی واکنش تولید متیل ترشیوبوتیل اتر [۱]

پارامترهای ویلسون	نام ماده	ایزوبوتن	متانول	متیل ترشیوبوتیل اتر	نرمال بوتن
a_{ij}	ایزوبوتن	۰	-۰/۷۴۲	۰/۲۴۱۳	۰/۰۷۲۹
	متانول	۰/۷۴۲	۰	۰/۹۸۳۳	۰/۸۱۴۹
	متیل ترشیوبوتیل اتر	-۰/۲۴۱۳	-۰/۹۸۳۳	۰	-۰/۱۶۸۴
	نرمال بوتن	-۰/۰۷۲۹	-۰/۸۱۴۹	۰/۱۶۸۴	۰
b_{ij}	ایزوبوتن	۰	-۸۵/۵۴۴۷	۳۰/۲۴۷۷	۰
	متانول	-۱۲۶۹/۷۱۹	۰	-۷۴۶/۳۹۷۱	-۱۱۴۹/۲۸۰
	متیل ترشیوبوتیل اتر	-۱۳۶/۶۵۷۴	۲۰۴/۵۰۲۹	۰	۰
	نرمال بوتن	۰	-۱۹۲/۴۰۱۹	۰	۰
in K, R=8.314 J/mol-K Reaction Kinetics, a=activity, T Forward rate of reaction, $r_{forward}$ Backward rate of reaction, $r_{backward}$					$3/67 \times 10^{12} \exp(-92400/RT) \times a_{IB}/a_{MeOH}$ $2/67 \times 10^{17} \exp(-134454/RT) \times a_{MTBE}/a_{MeOH}^2$

بهینه‌ی Pareto^۱ شناخته می‌شود. با این شرط که هیچ مجموعه جواب دیگری در ناحیه ممکن جواب وجود نداشته باشد که توابع هدف را کمینه و یا بیشینه کند [۳۴]. حل مسائل بهینه‌سازی چندتابعی ترکیبی از جستجو و تصمیم‌گیری است [۳۵].

الگوریتم‌های ژنتیک چندتابعی

به علت توانایی الگوریتم ژنتیک در جستجوی چند ناحیه‌ای یک فضای حل، این روش را قادر می‌سازد تا مجموعه جواب‌های مختلف برای مسائل پیچیده بهینه‌سازی مانند توابع غیر محدب، ناپیوسته و دارای فضای جواب گوناگون را بررسی نماید. در این روش و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نیازی به استفاده از ضرایب وزنی برای محاسبه توابع هدف وجود ندارد. با توجه به این دلایل روش تصادفی الگوریتم ژنتیک می‌تواند یک روش بسیار مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی چند تابعی باشد. جونز و همکارانش [۳۶] گزارش نمودند که حدود ۹۰٪ از حل‌ها با استفاده از این روش به مقادیر بهینه پارتو عملی در مسائل مختلف رسیده است. اولین الگوریتم ارائه شده در بهینه‌سازی چند تابعی توسط الگوریتم ژنتیک، به نام الگوریتم ژنتیک ارزیابی برداری نامیده شده که توسط شافر پیشنهاد گردید [۳۷].

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط جان هالند در سال ۱۹۷۵ به صورت علمی به عنوان روشی برای بهینه‌سازی معرفی گردید [۳۲] و سرانجام یکی از دانشجویان وی به نام دیوید گلدبرگ در سال ۱۹۸۹ این روش را در تکمیل پایان‌نامه خود و در حل کنترل خط لوله انتقال گاز به کار برد [۳۳]. می‌توان به موارد زیر به عنوان وجه تمایز این روش نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی اشاره کرد:

- ۱- توانایی بهینه‌سازی متغیرهای پیوسته و ناپیوسته
- ۲- عدم احتیاج به اطلاعات مشتقات توابع
- ۳- جستجوی هم‌زمان توسط نمونه‌گیری از نقاط مختلف فضای جواب
- ۴- امکان بهینه‌سازی مسائلی با تعداد پارامترهای زیاد
- ۵- قابلیت استفاده در کامپیوترهای موازی
- ۶- توانایی خروج از بهینه‌های محلی
- ۷- ارائه چندین جواب مناسب به جای یک جواب
- ۸- تبدیل پارامترهای بهینه‌سازی به کدهای ویژه

بهینه‌سازی چندتابعی

مسلماً در مسائل دارای هدف‌های متناقض، یک جواب واحد به عنوان بهترین جواب برای کلیه توابع هدف محسوب نمی‌شود. این گونه مسائل با نام مسائل بهینه‌سازی چند تابعی شناخته می‌شوند. عموماً، جواب این گونه مسائل با نام گروه جواب

گرفته است. نکته قابل توجه این است که کنترلر ترکیب درصد متانول سینی ۱۰ با کنترلر شدت جریان مولی خوراک بوتن آبشاری شده است. کلیه اطلاعات تکمیلی درباره متغیرهای فرآیندی و خروجی کنترلرها در جدول ۳ ارائه شده است.

فرمولاسیون مسئله بهینه‌سازی

بهینه‌سازی برج تقطیر واکنشی با درصد خلوص بالاتر از ۹۹٪ انجام شده است. در این برج تقطیر واکنشی، تعداد کل سینی‌ها در برج ثابت می‌باشد. در بهینه‌سازی انجام شده در این تحقیق دو تابع هدف به‌صورت همزمان مد نظر قرار گرفته که عبارتند از: الف) کمینه‌سازی انتگرال خطاهای مطلق و ب) کمینه‌سازی مجموع فرارفت‌های کنترلر. انتگرال خطاهای مطلق معیار مناسبی برای بررسی عملکرد سیستم‌های کنترلی می‌باشد که مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$I_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (7)$$

مسئله بهینه‌سازی زمان ریاضی مطابق روابط ۸ تا ۲۸ بیان شده است:

تابع هدف اول: کمینه‌سازی مجموع فرارفت‌های کنترلرها

$$Object(1) = OSH \quad (8)$$

$$Object(1) = OSH(\text{بخش ۱}) + OSH(\text{بخش ۲}) + OSH(\text{بخش ۳}) + OSH(\text{بخش ۴}) + OSH(\text{بخش ۵}) + OSH(\text{بخش ۶}) + OSH(\text{بخش ۷}) + OSH(\text{بخش ۸}) + OSH(\text{بخش ۹}) + OSH(\text{بخش ۱۰}) \quad (9)$$

تابع هدف دوم: کمینه‌سازی انتگرال خطاهای مطلق

$$Object(2) = L_{IAE} \quad (10)$$

$$Object(2) = I_{IAE}(Cond.PC) + I_{IAE}(Cond.LC) + I_{IAE}(FCMeOH) + I_{IAE}(FCC4) + I_{IAE}(TC12) + I_{IAE}(Reb.LC) + I_{IAE}(CC10) \quad (11)$$

قیدهای حاکم بر مسئله:

$$6.46 < K_p(Cond.PC) < 19.37 \quad (12)$$

$$.5.13sec. < \tau_f(Cond.PC) < 15.4sec \quad (13)$$

$$.1.14sec. < \tau_d(Cond.PC) < 3.42sec \quad (14)$$

$$0.25 < K_p(Cond.LC) < 0.75 \quad (15)$$

$$.60sec. < \tau_f(Cond.LC) < 180sec \quad (16)$$

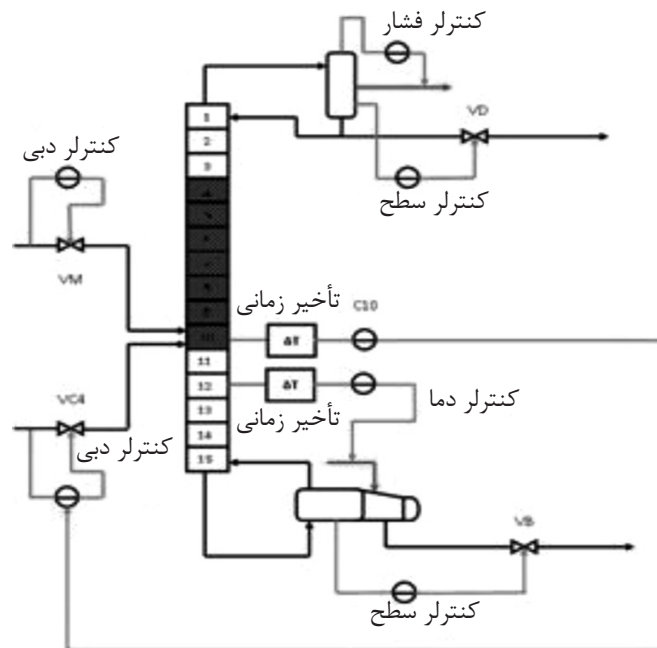
$$0.3 < K_p(FCMeOH) < 0.91 \quad (17)$$

پس از آن روش‌های مختلف بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه گردید که شامل روش‌های الگوریتم ژنتیک چندتابعی [۳۸]، الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ [۳۵]، الگوریتم ژنتیک بر اساس ضرایب وزنی [۳۹]، الگوریتم ژنتیک بر اساس ضرایب وزنی تصادفی [۴۰]، الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی [۴۱]، الگوریتم ارزیابی پارتو مقاوم [۴۲]، روش پیشرفته‌تر و اصلاح شده الگوریتم ارزیابی پارتو مقاوم [۴۳]، الگوریتم انتخابی بر اساس پوشش پارتو [۴۴]، استراتژی ارزیابی آرشیوی پارتو [۴۵]، استراتژی ارزیابی آرشیوی پارتو ممتیکی [۴۶]، الگوریتم انتخابی اصلاح شده بر اساس پوشش پارتو [۴۷]، روش سریع الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی [۴۸]، روش ارزیابی چندتابعی [۴۹]، روش میکرو-الگوریتم ژنتیک [۵۰]، روش الگوریتم ژنتیک بر اساس رتبه‌بندی چگالشی [۵۱] و روش الگوریتم ارزیابی دینامیکی [۵۲] می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که در مقالات، روش‌های بسیاری بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه شده است، ولی روش‌های اشاره شده بالا مهم‌ترین روش‌هایی است که در این گروه از روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی نیز با استفاده از آنها به‌دست آمده است. مقالات بسیاری به بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی چند تابعی پرداخته است. سوئلو در حدود ۲۰۰۰ [۳۹] مرجع را در این موضوع در سایت خود لیست کرده است.

مورد مطالعاتی

شرح فرآیندی

شکل ۱ شماتیکی از فرآیند صنعتی تولید محصول ترشیوبوتیل‌اثر را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی انجام شده در تحقیق حاضر مطالعه شده است. واکنش تولید محصول ترشیوبوتیل‌اثر بین دو سینی ۴ تا ۱۰ در برج تقطیر واکنشی روی می‌دهد. اطلاعات تکمیلی برای شبیه‌سازی برج مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. مطابق شکل ۱، تعداد مشخصی از کنترلرهای تناسبی-انتگرالی-مشتقی و تناسبی-انتگرالی برای کنترل برج تقطیر واکنشی تولید متیل‌ترشیوبوتیل‌اثر مورد استفاده قرار



شکل ۱- تصویری از ساختار کنترلی استفاده شده در شبیه‌سازی

جدول ۲- مشخصات خوراک و برج تقطیر واکنشی

عنوان پارامتر	خوراک متانول	خوراک بوتن	ترکیب درصد مولی	خوراک متانول	خوراک بوتن
دما (K)	۳۲۰	۳۵۰	ایزوبوتن	۰	۳۶
فشار (atm)	۱۱	۱۱	نرمال بوتن	۰	۶۴
شدت جریان مولی (kmol/hr)	۷۱۱	۱۹۶۵	متانول	۱۰۰	۰

جدول ۳- مشخصات کامل کنترلرهای مورد استفاده در برج تقطیر واکنشی

شماره کنترلر	نوع	نام کامل	متغیر فرآیندی	متغیر خروجی	حالت
Cond.PC	PID	کنترل‌کننده فشار چگالنده	فشار چگالنده	بار حرارتی چگالنده	Auto
Cond.LC	PI	کنترل‌کننده سطح چگالنده	درصد سطح چگالنده	شیر VD	Auto
FCMeOH	PID	کنترل‌کننده شدت جریان متانول	شدت جریان متانول	شیر VM	Auto
FCC4	PID	کنترل‌کننده شدت جریان بوتن	شدت جریان بوتن	شیر VC4	Cascade
TC12	PI	کنترل‌کننده دمای سینی ۱۲	دمای سینی ۱۲	بار حرارتی جوشاننده	Auto
Reb.LC	PI	کنترل‌کننده سطح جوشاننده	درصد سطح جوشاننده	شیر VB	Auto
CC10	PI	کنترل‌کننده ترکیب درصد متانول در سینی ۱۰	ترکیب درصد متانول در سینی ۱۰	کنترلر شدت جریان بوتن	Auto

$$6.0 \text{ J} < \tau_i (LC) < 18.0 \text{ J} \quad (26)$$

$$-0.25 < K_p (CC10) < -0.75 \quad (27)$$

$$75.0 \text{ J} < \tau_i (CC10) < 225.0 \text{ J} \quad (28)$$

حد بالا و پایین برای متغیرهای تصمیم‌گیری برج تقطیر واکنشی براساس $\pm 5\%$ ضرایب پیشنهادی تیروس-لویین بوده که در حالت دینامیکی پایه مد نظر قرار گرفته است.

$$1.16 \text{ J} < \tau_i (FCMeOH) < 3.49 \text{ J} \quad (18)$$

$$0.26 \text{ J} < \tau_d (FCMeOH) < 0.78 \text{ J} \quad (19)$$

$$0.07 < K_p (FCC_\xi) < 0.2 \quad (20)$$

$$1.28 \text{ J} < \tau_i (FCC_\xi) < 3.85 \text{ J} \quad (21)$$

$$0.29 \text{ J} < \tau_d (FCC_\xi) < 0.86 \text{ J} \quad (22)$$

$$0.19 < K_p (TC12) < 0.58 \quad (23)$$

$$39.0 \text{ J} < \tau_i (TC12) < 117.0 \text{ J} \quad (24)$$

$$-0.25 < K_p (LC) < -0.75 \quad (25)$$

روش حل

داشتن درک مناسبی از رفتار دینامیکی فرآیند تقطیر واکنشی کمک فراوانی به طراحی ساختار کنترلی و همچنین بهینه‌سازی فرآیند می‌نماید. علاوه بر این، هدف اولیه از فرآیند کنترل، طراحی موثر و قوی سیستم کنترلی است تا کلیه مقادیر متغیرهای موثر را در مقادیر مقرر نقطه پایدار نگه دارد. بنابراین قبل از شبیه‌سازی دینامیکی و بهینه‌سازی پارامترهای کنترلرها به وسیله الگوریتم ژنتیک، لازم است برج تقطیر واکنشی تولید محصول ترشیو بوتیل‌اتر در حالت پایدار شبیه‌سازی شود. پس از این مرحله، شبیه‌سازی حالت ناپایدار با اضافه شدن کنترلرهای مورد نیاز که در شکل ۱ نشان داده شده، انجام می‌گیرد. در این پژوهش مقادیر پارامترهای کنترلرها در هر مرحله توسط الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی ۲ پیشنهاد می‌گردد. به دلیل همزمانی مراحل واکنش و جداسازی در این نوع برج‌ها، فرآیند تقطیر واکنشی به دمای خوراک و سینی‌ها بسیار حساس است.

در این مقاله تغییر $\pm 10\%$ برای دمای خوراک متانول به عنوان اغتشاش ورودی به سیستم کنترل، مد نظر قرار گرفته و مقادیر بهینه ضرایب کنترلی برای دفع این اغتشاش محاسبه شده است. بدیهی است که در صورت تغییر محدوده و نوع اغتشاش ورودی به برج، ضرایب پیشنهادی تغییر می‌نماید. توابع هدف تعریف شده در بخش فرمولاسیون در هر مرحله محاسبه می‌شوند. در این مطالعه، از نرم‌افزار Aspen HYSYS 7.2 به عنوان شبیه‌ساز استفاده شده است. کد بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی ۲ در محیط برنامه‌نویسی ویژوال ++C تهیه شده و توسط نرم‌افزار MTLAB به عنوان فصل مشترک نرم‌افزار Aspen HYSYS 7.2 و محیط برنامه‌نویسی ویژوال ++C به هم اتصال داده شده است. شکل ۲ فلوجارت مراحل حل مسأله شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی حالت پایدار برج تقطیر واکنشی

جدول ۴ نشان می‌دهد که نتایج محاسبه شده دارای انطباق مناسب با داده‌های ارائه شده در مقاله

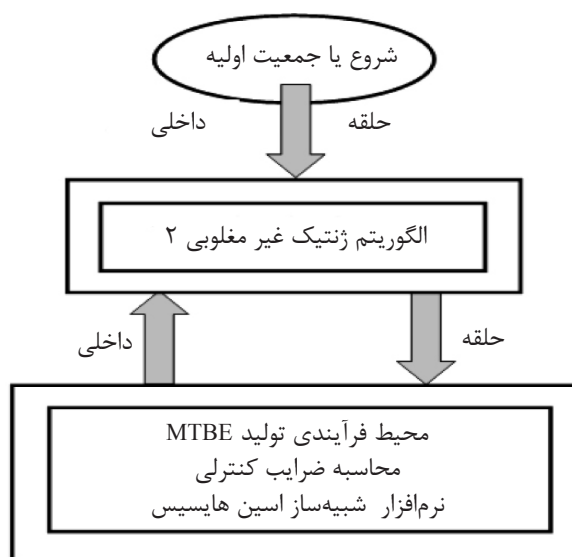
آقای سینگ و همکاران [۱۴] دارد. در شکل‌های (۳ الف و ۳ ب) به ترتیب نیمرخ دما و ترکیب درصد مواد در برج شبیه‌سازی، رسم شده است.

شبیه‌سازی حالت ناپایدار برج تقطیر واکنشی

مسأله بهینه‌سازی دارای دو تابع هدف است که رفتارهای کاملاً متناقضی نسبت به هم نشان می‌دهند. توابع هدف با در نظرگیری کلیه قیود حاکم بر مسأله و بازه‌های متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی شده است. همان‌گونه که بیشتر اشاره شد از الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی ۲ برای بهینه‌سازی مسئله و بدست آوردن جواب‌های بهینه پارتو استفاده شده است. تعداد جمعیت ۲۰ با ضرایب ادغام و جهش $0/9$ و $0/05$ در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته و کلیه پارامترها و مقادیر آنها در جدول ۵ ارائه شده است. مجموعه جواب‌های بهینه پارتو پس از ۱۵۰ مربوطه تولید جمعیت در جدول ۶ آورده شده است. شکل ۴ کلیه جواب‌های بهینه پارتو را نشان می‌دهد. در این شکل حاضر مجموع فرارفت‌ها بر حسب انتگرال مجموع خطاهای کنترلرها رسم شده است.

کنترلر شدت جریان خوراک متانول ورودی

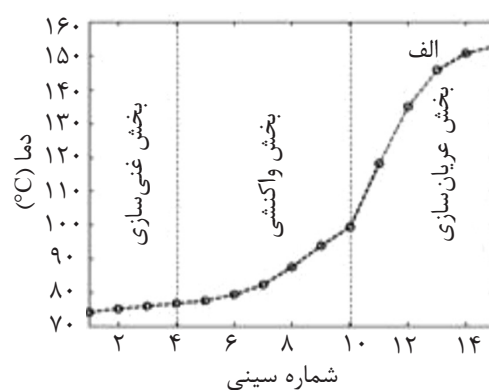
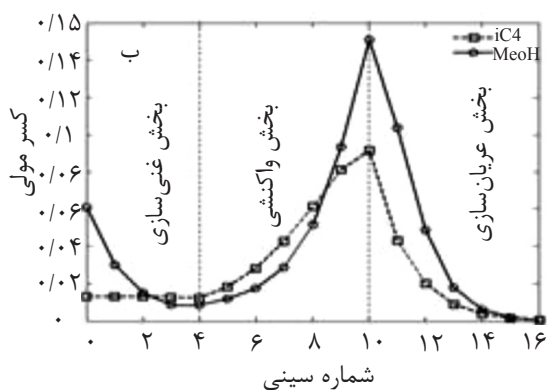
شکل‌های ۵ الف و ۵ ب پاسخ کنترلر شدت جریان خوراک متانول ورودی به اغتشاش $\pm 10\%$ دمای متانول را نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، شدت جریان مولی متانول در لحظه اولیه کاهش می‌یابد. ولی در کمتر از ۲ min، شدت جریان به مقدار مقرر برمی‌گردد. شکل ۵-ب نشان می‌دهد که شدت جریان دارای رفتار نوسانی است. اما توجه به مقادیر بیشینه و کمینه نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به هم می‌باشند. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد کنترلر شدت جریان متانول ورودی که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده، دارای عملکرد مناسبی است.



شکل ۲- فلوچارت روش حل

جدول ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی برج تقطیر واکنشی متیل ترشیوبوتیل اتر و داده های مقالات [۱۴]

خطای مطلق ^b	خطای نسبی ^a (%)	مقالات	محاسبه شده	
ترکیب درصد مولی				
جریان بالای برج				
۰/۱۴	۲/۸۵۱	۴/۹۱	۵/۰۵	ایزوبوتن
۱/۰۷	۱/۱۹	۸۹/۸۸	۹۰/۹۵	نرمال بوتن
۱/۱۸	۲۲/۷۸	۵/۱۸	۴	متانول
۰/۰۰۳	۰	۰	۰	متیل ترشیوبوتیل اتر
ترکیب درصد مولی جریان پایین برج				
۰/۳۴۰	۰/۳۴۳	۹۹/۲۶	۹۹/۶	متیل ترشیوبوتیل اتر
بار حرارتی (MW)				
	۱/۴۰۴	۴۹/۴۴	۵۰/۱۳	بار حرارتی چگالنده
	۵/۵۲	۳۶/۹۲	۳۸/۹۶	بار حرارتی جوشاننده
^a Relative Error=abs((Calculated-Literature Data)/Literature Data)*100 ^b Absolute Error=abs((Calculated-Literature Data))				



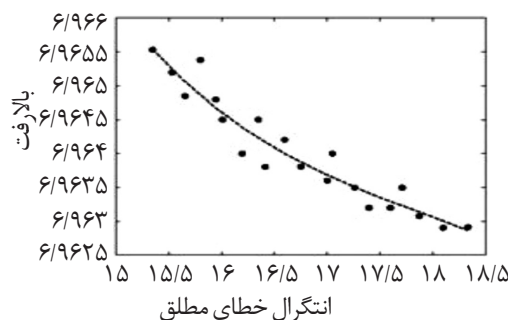
شکل ۳- پروفایل های دما (الف) و (ب) ترکیب درصد متانول و بوتن در برج تقطیر واکنشی

جدول ۵- پارامترهای حاکم بر الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی ۲

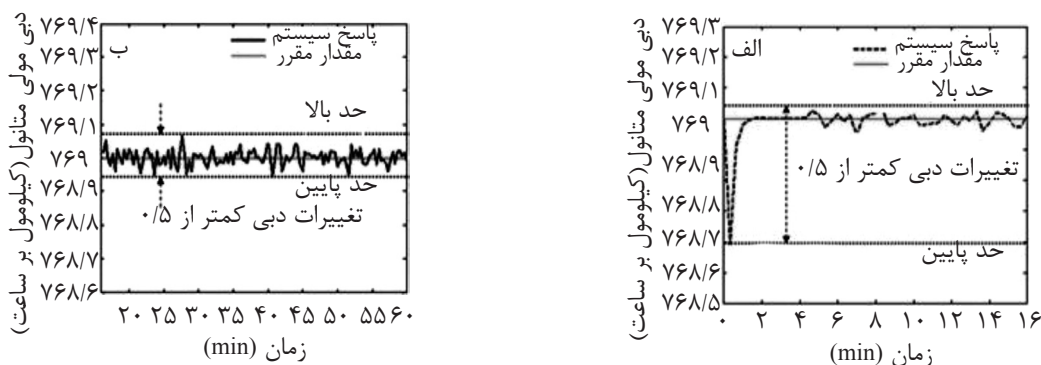
عنوان پارامتر	روش و مقدار	عنوان پارامتر	روش و مقدار
تعداد متغیرهای تصمیم گیری	۱۷	اندازه استخر تورنمنت	۲
تعداد توابع هدف	۲	روش ادغام	دو نقطه‌ای
اندازه جمعیت	۲۰	احتمال ادغام	۰/۹
بیشینه تعداد تولید	۱۵۰	روش جهش	انتخابی
نسبت جایگزینی	۰/۹۵	احتمال جهش	۰/۰۵

جدول ۶- نتایج بهینه نهایی پارتنر خروجی کد بهینه سازی بعد از ۱۵۰ تولید نسل

No	LC1		LC2		PC		TC		CC		FCMeOH		FCC4		IAE	Over-shoot	
	Kc	Ti	Kc	Ti	Kc	Ti	Kc	Ti	Kc	Ti	Kc	Ti	Kc	Ti			Td
۱	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۹/۳۲	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۳۹	۹۷۳/۵۳	۰/۷۹	۲/۳۹	-۰/۷۰	۲/۴۲	۰/۷۷	۱۵/۳۵	۶/۹۶۶
۲	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۸۴	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۴	۱۰۰۲/۵۹	۰/۷۹	۲/۳۹	-۰/۵۶	۲/۴۲	۰/۷۷	۱۵/۵۴	۶/۹۶۵
۳	۰/۳۹	۱۴۴/۷۱	۰/۶۳	۱۱۴/۱۲	۱۹/۳۲	۱۰/۰۸	۰/۲۵	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۳۹	۱۰۰۲/۵۹	۰/۶۴	۲/۳۹	-۰/۵۷	۲/۴۲	۰/۷۷	۱۶/۰۱	۶/۹۶۵
۴	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۹/۳۲	۱۳/۶۳	۰/۲۷	۱۰/۹۳/۵۳	۰/۳۹	۱۰۰۲/۵۹	۰/۸۰	۲/۳۹	-۰/۵۷	۲/۴۲	۰/۶۳	۱۶/۶۰	۶/۹۶۴
۵	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۸۴	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۳۹	۱۰۰۲/۵۹	۰/۸۰	۲/۳۹	-۰/۵۸	۱/۵۳	۰/۷۷	۱۷/۸۷	۶/۹۶۳
۶	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۸۴	۱۵/۴۰	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۳	۹۷۳/۵۳	۰/۷۸	۲/۳۹	-۰/۳۷	۲/۲۶	۰/۷۷	۱۷/۲۶	۶/۹۶۴
۷	۰/۳۹	۱۷۶/۷۱	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۶۴	۱۴/۰۳	۰/۲۵	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۴	۱۱۱۴/۷۱	۰/۷۹	۲/۶۸	-۰/۴۷	۱/۵۰	۰/۳۶	۱۵/۶۶	۶/۹۶۵
۸	۰/۴۲	۱۷۶/۷۱	۰/۶۴	۱۱۳/۶۵	۱۲/۶۴	۱۴/۰۳	۰/۲۵	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۴	۱۱۱۴/۷۱	۰/۷۹	۲/۳۹	-۰/۵۷	۱/۷۷	۰/۷۷	۱۶/۳۵	۶/۹۶۵
۹	۰/۴۲	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۸۴	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۹۹/۸۷۱	۰/۳۵	۱۰۰۲/۵۹	۰/۷۹	۱/۳۲	-۰/۵۶	۲/۴۲	۰/۷۹	۱۷/۰۵	۶/۹۶۴
۱۰	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۰۶/۱۲	۱۲/۷۴	۱۵/۳۲	۰/۳۶	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۳	۹۷۳/۵۳	۰/۸۶	۲/۳۹	-۰/۳۷	۲/۲۶	۰/۷۷	۱۶/۷۵	۶/۹۶۴
۱۱	۰/۷۱	۱۰۹/۸۸	۰/۷۱	۱۰۵/۶۵	۹/۵۰	۱۰/۳۳	۰/۵۶	۵۰/۳۱۸	۰/۴۰	۱۳۵/۰۰	۰/۷۸	۲/۳۹	-۰/۶۵	۱/۶۱	۰/۷۷	۱۷/۴۰	۶/۹۶۳
۱۲	۰/۷۱	۱۰۹/۸۸	۰/۷۴	۱۰۵/۶۵	۸/۶۹	۱۰/۳۳	۰/۵۶	۵۰/۳۱۸	۰/۴۰	۱۴۴۴/۱۲	۰/۶۰	۳/۰۱	-۰/۳۷	۳/۱۸	۰/۷۷	۱۵/۹۵	۶/۹۶۵
۱۳	۰/۴۳	۱۷۷/۶۵	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۰۳	۱۴/۷۶	۰/۳۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۴	۱۳۹۷/۰۶	۰/۸۲	۲/۶۹	-۰/۵۵	۲/۴۲	۰/۸۴	۱۷/۷۱	۶/۹۶۴
۱۴	۰/۳۹	۱۴۴/۷۱	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۹/۳۲	۱۴/۵۹	۰/۲۷	۱۱۴۲/۴۷	۰/۳۹	۲۰۷۳/۵۳	۰/۹۱	۲/۶۱	-۰/۷۷	۳/۰۲	۰/۳۴	۱۸/۱۰	۶/۹۶۳
۱۵	۰/۶۴	۱۰۹/۸۸	۰/۷۱	۱۰۵/۶۵	۸/۶۹	۱۱/۶۱	۰/۵۶	۵۰/۳۱۸	۰/۴۳	۱۳۵۵/۸۸	۰/۸۰	۲/۳۹	-۰/۳۲	۱/۵۳	۰/۷۷	۱۷/۰۰	۶/۹۶۴
۱۶	۰/۷۱	۱۰۹/۸۸	۰/۵۹	۱۰۵/۶۵	۷/۸۸	۱۰/۳۳	۰/۵۶	۵۳/۹/۸۸	۰/۴۰	۱۳۵/۰۰	۰/۷۸	۲/۳۹	-۰/۶۵	۱/۶۱	۰/۴۸	۱۶/۲۰	۶/۹۶۴
۱۷	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۹/۳۲	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۳۹	۱۰۰۲/۵۹	۰/۷۹	۲/۳۹	-۰/۵۷	۲/۴۲	۰/۷۷	۱۸/۳۴	۶/۹۶۳
۱۸	۰/۳۹	۱۴۸/۴۷	۰/۶۳	۱۱۴/۱۲	۱۹/۳۲	۱۵/۲۴	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۶۴	۱۰۰۲/۵۹	۰/۸۰	۲/۳۹	-۰/۵۸	۱/۵۳	۰/۷۷	۱۵/۸۰	۶/۹۶۵
۱۹	۰/۷۱	۱۰۹/۸۸	۰/۷۴	۱۰۵/۶۵	۹/۵۰	۱۰/۳۳	۰/۵۶	۵۰/۳۱۸	۰/۴۰	۱۳۲۶/۴۷	۰/۷۹	۲/۳۶	-۰/۶۴	۱/۶۱	۰/۷۷	۱۷/۶۰	۶/۹۶۳
۲۰	۰/۳۹	۱۴۰/۹۴	۰/۶۳	۱۱۳/۶۵	۱۲/۸۴	۱۵/۴۰	۰/۲۷	۱۰/۹۶/۵۹	۰/۳۹	۹۷۳/۵۳	۰/۷۹	۱/۳۲	-۰/۷۰	۳/۰۶	۰/۴۸	۱۶/۴۲	۶/۹۶۴



شکل ۴- جواب‌های بهینه پارتو پس از تولید ۱۵۰ نسل



شکل ۵- رفتار کنترلر شدت جریان متانول در مقابل اغتشاش ورودی

کنترلر دمای سینی شماره ۱۲

شکل ۶ الف پاسخ کنترلر دمای سینی شماره ۱۲ را نمایش می‌دهد. مقدار مقرر دمای سینی 135°C است. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، دمای سینی‌ها و پروپایل دما در عملکرد برج تقطیر واکنشی و همچنین میزان تبدیل واکنش‌های حاکم، بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که در شکل ۶ الف مشاهده می‌شود، انحراف دمایی در سینی ۱۲ کمتر از 1°C می‌باشد که مقدار بسیار مناسبی در حلقه کنترل دمایی است.

کنترلر ترکیب درصد متانول در سینی ۱۰

شکل ۶ ب پاسخ کنترلر ترکیب درصد متانول در سینی شماره ۱۰ را نشان می‌دهد. به دلیل اتصال این کنترلر به کنترلر شدت جریان خوراک بوتن ورودی به‌صورت آبشاری، این کنترلر نقش بسیار کلیدی در کنترل کل برج تقطیر واکنشی بر عهده دارد. نتایج عددی نشان می‌دهد که ساختار آبشاری این دو کنترلر عملکرد بسیار مناسبی در مقابل اغتشاش وارد شده دارد. در نگاه اول، به نظر می‌رسد که انحراف کسر مولی متانول دارای مقدار بالایی است. اما توجه به میزان درصد خلوص محصول

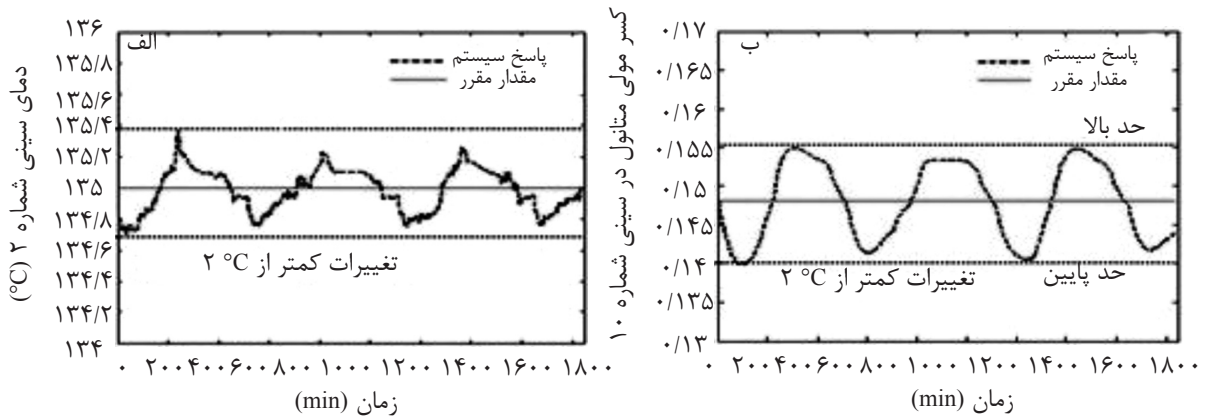
نهایی نشان می‌دهد که این انحرافات تاثیر چندانی بر عملکرد کل فرآیند ندارد.

کنترلر شدت جریان مولی خوراک بوتن ورودی

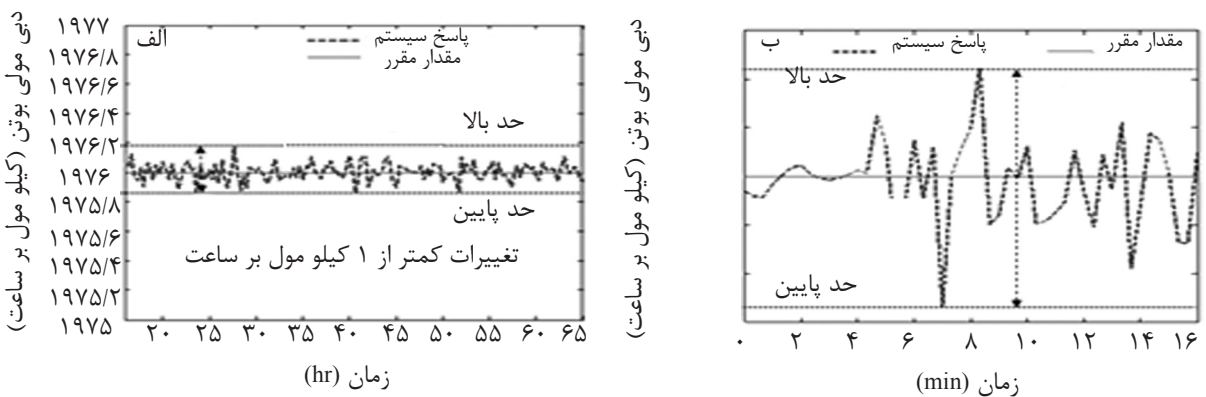
در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب پاسخ کنترلر شدت جریان مولی خوراک بوتن ورودی را در دو حالت زمان‌های کوتاه و طولانی شبیه‌سازی دینامیکی رسم شده است. براساس شکل ۷-الف در زمان‌های اولیه، شدت جریان بوتن رفتار نوسانی بسیار شدیدی از خود نشان می‌دهد که با گذشت زمان این رفتار میرا می‌شود. این تغییرات و نوسانات در بازه‌های کمتر از 1 kmol/hr روی می‌دهد. بنابراین پاسخ حاصل از این کنترلر نیز قابل قبول می‌باشد.

کنترلر سطح مایع در چگالنده و جوشاننده

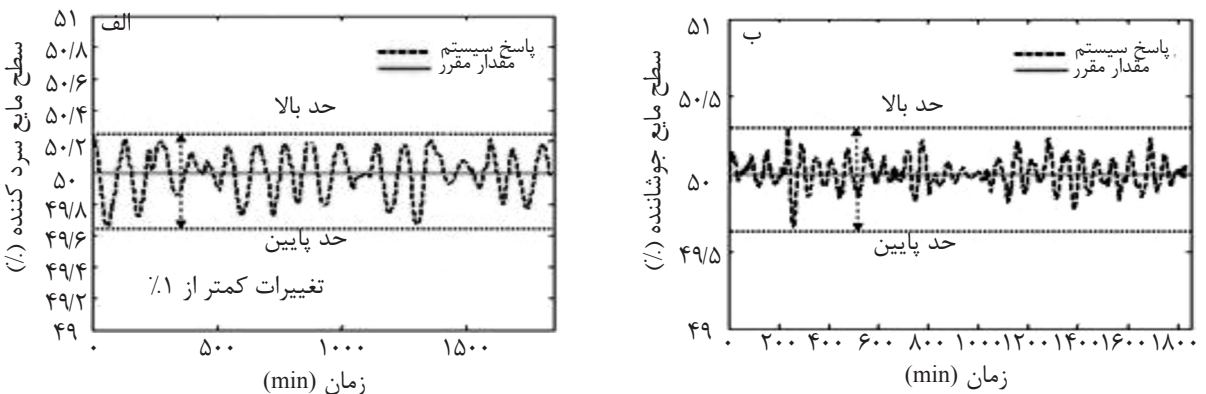
شکل‌های ۸-الف و ۸-ب پاسخ کنترلر سطوح مایع در چگالنده و جوشاننده را نشان می‌دهد. مقدار مقرر برای هر دو کنترلر 50% است و نتایج نشان می‌دهد که حد بالا و پایین میزان درصد سطح مایع بیش از 1% تغییر نمی‌کند. این بازه تغییرات از دیدگاه کنترلی بسیار مناسب می‌باشد و ضرایب پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک برای کنترلرهای سطوح، مناسب است.



شکل ۶- رفتار کنترل‌های الف (دمای سینی ۱۲ و ب) کسر مولی متانول سینی ۱۰ در مقابل اغتشاش ورودی



شکل ۷- رفتار کنترلر شدت جریان بوتن ورودی در مقابل اغتشاش ورودی در طول زمان‌های الف) کوتاه و ب) طولانی

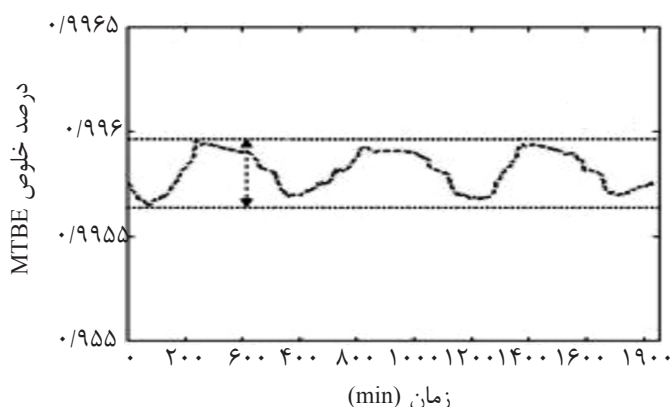


شکل ۸- رفتار کنترل‌های سطح مایع الف) چگالنده و ب) جوشاننده در مقابل اغتشاش ورودی

درصد خلوص محصول باید بیشتر از ۹۹٪ باشد. بنابراین تغییرات درصد خلوص نباید به گونه‌ای باشد که مقدار آن از ۹۹٪ کاهش یابد. این شکل نشان می‌دهد که ساختار کنترلی حاضر برای برج تقطیر واکنشی که ضرایب کنترل‌های آن توسط الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی ۲ تعیین شده در کنترل درصد خلوص محصول موفق عمل کرده است.

بررسی تاثیر اغتشاش بر درصد خلوص محصول نهایی

درصد خلوص محصول نهایی یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند تقطیر واکنشی است. در شکل ۹ تغییرات درصد خلوص محصول متیل ترشیوبوتیل اتر براساس زمان فرآیندی رسم شده است. مطابق مقاله ارائه شده توسط سینگ و همکارانش [۱۴]،



شکل ۹- رفتار تغییرات درصد خلوص محصول بالای برج در مقابل اغتشاش ورودی

علائم و نشانه‌ها

$CC10$: کنترلر درصد ترکیب

PID : کنترلر تناسبی-انتگرالی مشتقی

$Cond.LC$: کنترلر سطح چگالنده

$Reb.LC$: کنترلر سطح جوشاننده

$Cond.PC$: کنترلر فشار چگالنده

$TC12$: کنترلر دمای سینی

$FCC4$: کنترلر شدت جریان بوتن

VLE : تعادل بخار-مایع

$FCMeOH$: کنترلر شدت جریان متانول

VLV : شیر کنترلی

GA : الگوریتم ژنتیک

$|e(t)|$: مقدار مطلق خطا

$G(S)$: تابع انتقال کنترلر

K_p : بهره تناسبی کنترلر

IAE : انتگرال مجموع خطاها

OSH : فرارفت

$MTBE$: متیل ترشیوبوتیل اتر

τ_d : ثابت زمانی مشتقی (sec)

$NSGA-II$: الگوریتم ژنتیک غیرمغلوبی

τ_i : ثابت زمانی انتگرالی (sec)

PI : کنترلر تناسبی-انتگرالی

نتیجه‌گیری

از روش‌های بسیار قوی در بهینه‌سازی چندتابعی می‌باشد، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب کنترلی پیشنهادی توسط این الگوریتم برای کنترلرهای نوع تناسبی-انتگرالی و تناسبی-انتگرالی-مشتقی بسیار مناسب و موثر در کنترل اغتشاش ورودی به سیستم فرآیندی عمل می‌نماید.

در این پژوهش، از حالت‌های پایدار و دینامیکی برای بررسی ویژگی‌های فرآیندی و طراحی ساختار کنترلی برای برج تقطیر واکنشی استفاده شده است. به دلیل اینکه مسائل بهینه‌سازی کنترلرها از گروه مسائل بهینه‌سازی چندتابعی است، از روش الگوریتم ژنتیک چند تابعی غیرمغلوبی ۲ که یکی

مراجع

- [1]. Katariya A. M., Moudgalya K. M. and Mahajani S. M., "Non-linear dynamic effects in reactive distillation for synthesis of TAME," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 45 12, pp. 4233-4242, 2006.
- [2]. Luyben W. L., "Distillation design and control using ASPEN, Wiley-VCH," New York, Chapter 9, pp. 232-250, 2006.
- [3]. Agreda V. H. and Partin L. R., "Reactive distillation process for the production of methyl acetate," US Patent,

4435595, 1984.

- [4]. Smith L. A., "Chemical research and licensing company," US Patent, 4307254, 1994.
- [5]. Thiel C., Sundmacher K. and Hoffmann U., "Synthesis of ETBE: residue curve maps for the heterogeneously catalysed reactive distillation process," *Chem. Eng. J.*, Vol. 66, pp. 181-191, 1997.
- [6]. Hickey T. P. and Adams J. R., "Multi-Purpose catalytic distillation column and etherification process using same," US Patent, 5321163, 1994.
- [7]. Doherty M. F. and Malone M. F., "Conceptual design of distillation system," NY: McGraw-Hill, New York, 2001.
- [8]. Sundmacher K. and Kienle A., "Reactive distillation: status and future directions," Germany: Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [9]. Taylor R. and Krishna R., "Modeling reactive distillation," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 55, pp. 5183-5229, 2002.
- [10]. Skogestad S. and Postlethwaite I., *Multivariable feedback control*, Second ed., John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [11]. Jacobs R., and Krishna R., "Multiple solutions in reactive distillation for methyl-tert-butyl ether synthesis," *I&EC*, Vol. 32, pp. 1706-1709, 1993.
- [12]. Ciric A. R. and Gu D., "Synthesis of non-equilibrium reactive distillation processes by MINLP optimization," *AIChE J.*, Vol. 40, pp. 1479-1487, 1994.
- [13]. Chen F., Huss R. S., Doherty M. F. and Malone M. F., "Multiple steady states in reactive distillation: kinetic effects," *Comput. Chem. Eng.*, Vol. 26, pp. 81-93, 2002.
- [14]. Singh B. P., Singh R., Kumar M. V. P. and Kaistha N., "Steady state analysis for reactive distillation control: an MTBE case study," *J. Loss. Prev. Proc. Ind.*, Vol. 18, pp. 283-292, 2005.
- [15]. Suresh Babu K., Pavan Kumar M. V. and Kaistha N., "Controllable optimized designs of an ideal reactive distillation system using genetic algorithm," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 64 (23), pp. 4929-4942, 2009.
- [16]. Hung S. B., Lee M. J., Tang Y. T., Chen Y. W., Lai I. K., Hung W. J., Huang H. P. and Yu C. V., "Control of Different Reactive Distillation Configurations," *AIChE J.*, Vol. 52, pp. 1423-1440, 2005.
- [17]. Al-Arfaj M. A. and Luyben W. L., "Comparison of alternative control structures for an ideal two-product reactive distillation column," *I&EC.*, Vol. 39, pp. 3298-3307, 2000.
- [18]. Al-Arfaj, M. A., Luyben, W. L., "Comparative control study of ideal and methyl acetate reactive distillation," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 57, pp. 5039-5050, . 2002a.
- [19]. Al-Arfaj M. A. and Luyben W. L., "Design and control of olefin metathesis reactive distillation column," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 57, pp. 715, 2002b.
- [20]. Al-Arfaj M. A. and Luyben W. L., "Control of ethylene glycol reactive distillation column," *AIChE J.*, Vol. 48, pp. 905-908, 2002c.
- [21]. Al-Arfaj M. A. and Luyben W. L., "Control study of ETBE reactive distillation," *I&EC.*, Vol. 41, pp. 3784-3796, 2002d.
- [22]. Al-Arfaj M. A. and Luyben W. L., "Plant wide control for TAME production using reactive distillation," *AIChE J.*, Vol. 50, pp. 1462-1473, 2004.

- [23]. Wang S. J. and Wong D. S. H., "Control of reactive distillation production of high-purity isopropanol," *J. Process Control*, Vol. 16, pp. 385-394, 2006.
- [24]. Astrom K. and Hagglund T., *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC., 1995.
- [25]. Herreros A., Baeyens E. and Peran J. R., "Design of PID-type controllers using multiobjective genetic algorithms," *ISA Trans.*, Vol. 41, pp. 457-472, 2002.
- [26]. Blasco Xavier F., Martínez M., Senent J. and Sanchis J., *Sistemas automáticos*, Editorial U.P.V., 2000.
- [27]. Marlin T. E., "Process control, designing processes and control systems for dynamic performance," McGraw-Hill, New York, 1995.
- [28]. Smith L. A., "Catalytic distillation process and catalyst," European Patent Application," EP8860, 1980.
- [29]. Satyanarayana T. and Saha P., "Modeling and control structure selection for reactive distillation process using Aspen custom modeler," CHEMCON, New Delhi, 2005.
- [30]. Rehfinger A. and Hoffmann U., "Kinetics of methyl tertiary butyl ether liquid phase synthesis catalyzed by ion exchange resin—I. Intrinsic rate expression in liquid phase activities," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 45, pp. 1605-1617, 1990.
- [31]. Bingul Z., "Adaptive genetic algorithms applied to dynamic multiobjective problems," *Appl. Soft. Comput.*, Vol. 7, pp. 791-799, 2007.
- [32]. Holland J. H., "Adaptation in natural and artificial systems," University of Michigan Press.
- [33]. Weile D. S., Michielssen E. and Goldberg D. E., "Genetic algorithm design of pareto optimal broad band microwave absorbers," *I.T.E.I.C. IEEE.*, Vol. 38, pp. 518-525, 1975.
- [34]. Coello C. A. C., "Evolutionary multiobjective optimization: a historical view of the field," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol.1(1), pp. 28-36, 2006b.
- [35]. Horn J. and Nafpliotis N., "Goldberg DE A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization," In: Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on, IEEE, pp. 82-87, 1994.
- [36]. Jones A. and De Moura Oliveira P., "Genetic autotuning of PID controller," In Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Sheffield, UK, IEE, No. 141, pp. 141-145, 1995.
- [37]. Schaffer J. D., "Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms," Proc. 1st ICGA, Carnegie-Mellon University, USA, pp. 93-100, 1985.
- [38]. Fonseca C. M. and Fleming P. J., "Multiobjective genetic algorithms," In: IEE Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering, Digest No. 1993/130, Vol. 28, London, UK, IEE, 1993.
- [39]. Hajela P. and Lin C.y., "Genetic search strategies in multicriterion optimal design, struct optimization," Vol.4 (2), pp. 99-107, 1992.
- [40]. Murata T. and Ishibuchi H., *MOGA: Multiobjective genetic algorithms*, Proc. 2nd IEEE ICEC (Perth Australia), pp. 289-294, 1995.
- [41]. Srinivas N. and Deb K., "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms," *J.*

Evol. Comput. Vol. 2 (3), pp. 221–248, 1994.

[42]. Zitzler E. and Thiele L., “*Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach*,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 3 (4), p. 257, 1999.

[43]. Zitzler E., Laumanns M. and Thiele L., “*SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm*,” Swiss Federal Institute Technology: Zurich, Switzerland, 2001.

[44]. Come D. W., Knowles J. D. and Oates M. J., “*The pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization*,” In: *Proceedings of Sixth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Paris, France: Springer, 2000.

[45]. Knowles J. D. and Corne D. W., “*Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy*,” *Evol. Comput.*, Vol. 8 (2), p. 149, 2000.

[46]. Knowles J. and Corne D., “*Memetic algorithms for multiobjective optimization: issues, methods and prospects*,” In *Recent Advances in Memetic Algorithms*. Krasnogor, N., Smith, J.E., and Hart, W.E. (eds), pp. 313-352, Springer, 2004.

[47]. Come D. W., Jerram N. R., Knowles J. and Oates J., “*PESA-II: region-based selection in evolutionary multiobjective optimization*,” In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, San Francisco, CA, 2001.

[48]. Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyerivan T., “*A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 6 (2), p. 182, 2002.

[49]. Sarker R., Liang K. H. and Newton C., “*A new multiobjective evolutionary algorithm*,” *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 140(1), pp. 12–23, 2002.

[50]. Coello C. A. C. and Pulido G. T., “*A micro-genetic algorithm for Multiobjective optimization*,” In *Evolutionary Multi-criterion Optimization, First International Conference, EMO 2001*, Zurich, Switzerland: Springer, 2001.

[51]. Lu H. and Yen G. G., “*Rank-density-based multiobjective genetic algorithm and benchmark test function study*,” *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol. 7 (4), p. 325, 2003.

[52]. Yen G. G. and Lu H., “*Dynamic multiobjective evolutionary algorithm: adaptive cell-based rank and density estimation*,” *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol. 7 (3), p. 253, 2003.