

تلفیق روشهای ریاضی و تصادفی در سنتز واحد جداسازی سه جزیی غیر دقیق

طاهره پیرهوشیاران، سیروس شفیعی*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

مسئله بهینه سازی توالی ستون های تقطیر غیر دقیق در کلی ترین حالت یک مسئله MINLP با تابع هدفی غیر خطی می باشد. هدف این تحقیق آنست تا روشی دو مرحله ای ارائه دهد که متغیرها را به منظور ساده سازی مسئله به دو دسته تقسیم می کند. یک دسته از متغیرها که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی می شوند و دسته دیگر که می توانند به عنوان یک مسئله خطی با توجه به مقادیر به دست آمده از متغیرهای دسته قبلی بهینه شوند. این مطالعه یک سری روابط ریاضی را بین متغیرهای دسته اول با استفاده از عملیات ریاضی روی قیود غیر خطی مسئله استخراج می کند به طوری که با بهینه نمودن تعداد کمی از آنها سایر متغیرهای این دسته نیز توسط این روابط قابل دستیابی هستند. این روش قادر است که بهترین ساختار را از ابر ساختار کلی جداسازی در کوتاه ترین زمان ممکن بدون استفاده از هیچ نقطه شروعی برای جداسازی های سه جزیی ارائه دهد. برای تایید این روش سه مثال مورد بررسی قرار گرفت.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۹ آبان ۱۳۹۵

دریافت پس از اصلاح: ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۶

پذیرش نهایی: ۱۶ شهریور ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

بهینه سازی

جداسازی غیر دقیق

MINLP

الگوریتم ژنتیک

جداسازی سه جزیی

* عهده دار مکاتبات

sshafiei@sut.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

با توجه به طبیعت مرحله ای طراحی فرآیندهای صنعتی، خوراک ورودی به واحد پس از عبور از مرحله واکنش وارد مرحله جداسازی می‌شود. بخش جداسازی هر واحد صنعتی سهم عمده ای از مجموعه هزینه‌های یک واحد شیمیایی را به خود اختصاص می‌دهد. برج‌های تقطیر یکی از رایج‌ترین و پرهزینه‌ترین تجهیزات در واحدهای فرآیندی هستند. حدود ۹۵ درصد جداسازی‌ها در مراحل اولیه و نهایی در چنین مجتمع‌هایی بر عهده برج‌های تقطیر می‌باشد. برج‌های تقطیر تجهیزات فرآیندی با مصرف انرژی بالایی هستند. بنابراین طراحی بهینه این بخش هم از نظر امنیت طرح و هم از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. زمانی که بخواهیم یک مخلوط چند جزئی را مورد جداسازی قرار دهیم، امکان استفاده از آرایش‌های مختلفی وجود خواهد داشت. بنابراین در هر مرحله جداسازی به روش تقطیر، مهم‌ترین پرسشی که مطرح می‌باشد، تعیین بهترین توالی برج‌ها است. در حالت کلی فرآیندهای جداسازی به روش تقطیر، به دو دسته دقیق^۱ و غیر دقیق^۲ تقسیم بندی می‌شوند. در جداسازی دقیق در هر مرحله از جداسازی، یکی از اجزای خوراک از سیستم جدا می‌شود، بدان معنا که هر جزء از خوراک تنها در یک جریان محصول ظاهر می‌شود و جداسازی غیر دقیق یعنی جداسازی مواد در برج‌ها به گونه ای انجام می‌پذیرد که برخی مواد در دو جریان خروجی از برج تقطیر حضور دارند.

طی دهه‌های گذشته کارهای بسیاری بر روی جداسازی جریانات چند جزئی به محصولات خالص صورت گرفته، در حالی که تحقیقات کمتری در زمینه جداسازی جریانات چند جزئی به محصولات چند جزئی انجام شده است. در این دسته از جداسازی‌ها استفاده از ستون‌های تقطیر غیر دقیق می‌تواند منجر به کاهش بسیار زیاد در هزینه‌ها گردد [1]. ناد^۳ (۱۹۷۷) به بررسی زیر مسئله تفکیک کلی پرداخته است که شامل تفکیک یک جریان خوراک چند جزئی می‌باشد و بطور سیستماتیک، ایجاد انشعاب‌های غیر دقیق را مد نظر قرار می‌دهد [۲]. موراکی^۴ و هایاکاوا^۵ (۱۹۸۴) روشی را برای سنتز توالی‌های تقطیر انشعابی دقیق یا میانبری برای تولید دو محصول چند جزئی ارائه کرده‌اند. در مرحله اول، آنها از فرآیند

آزمایش برای نشان دادن ترتیب ستونها استفاده کردند [۳]. در مرحله دوم از بازنمایی گرافیکی فرآیند تفکیک از طریق استفاده از نمودار تخصیص مواد (MAD) پیشنهاد شده توسط ناد برای بهینه‌سازی فرآیند جداسازی با ایجاد تقسیم و ترکیب استفاده شده است [۲]. چن^۶ و لیو^۷ (۱۹۸۸) روش آزمایشی ساده ای را جهت سنتز سیستماتیک توالی‌های اولیه برای جداسازی‌های چند جزئی غیر دقیق پیشنهاد کرده‌اند. آنها نمودار تخصیص جزئی (CAD) را برای بازنمایی مسئله و جدول مشخصه جداسازی (SST) را جهت آنالیز عملی بودن معرفی کردند. این روش برای ارائه توالی‌های اولیه خوب، مفید است اما ممکن است ستون‌های بیشتر از حد نیاز را تولید کند [۴]. موراکی و هایاکاوا (۱۹۸۷) درجات دقت جداسازی را بررسی کردند و درجات بهینه ای از دقت جداسازی و نسبت‌های تقسیمات جریان را برای توالی جداسازی مذکور یافتند [۵]. موراکی و هایاکاوا (۱۹۸۸) این کار را با استراتژی دو مرحله ای اولیه ترکیب کردند. اولین مرحله شامل جستجو و بررسی توالی جداسازی است. در مرحله دوم، جستجو برای کمیت‌های مطلوب درجات دقت جداسازی و نسبت‌های تقسیم جریان انجام می‌گیرد. این دو مرحله تکرار می‌شود تا جاییکه یک فرآیند مطلوب سنتز شود [۶].

وهه^۸ و وستریگ^۹ (۱۹۹۰) روش مرزبندی را برای یافتن کمینه تعداد ستونهای لازم برای جداسازی یک خوراک چند جزئی با استفاده از توالی جداسازی غیردقیق ارائه کردند [۷]. آگروال^{۱۰} و فلوداس^{۱۱} در سال (۱۹۹۰) یک روش سیستماتیک برای سنتز توالی‌های تقطیر شامل انشعاب‌های غیر دقیق اجزاء با مد نظر قرار دادن بازیابی‌های اجزای کلیدی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی ارائه دادند. ابر ساختاری ایجاد شد که امکان انشعاب غیردقیق را میسر می‌سازد و شامل تمامی توالی‌های احتمالی همچنین گزینه‌هایی برای انشعاب، ادغام و میانبر می‌باشند. این ابر ساختار به عنوان یک مسئله MINLP برنامه ریزی غیرخطی بیان می‌شود که جواب آن توالی بهینه تقطیر را ارائه می‌کند. همچنین نشان داده شده است که این کار می‌تواند برای بررسی انشعاب‌های غیر دقیق برای مورد اجزای کلیدی غیر مجاور بسط یابد [1]. فلوداس و آگروال (۱۹۹۰) روش سنتز جداسازی غیر دقیق را برای ایجاد روش

⁶Cheng⁷Liu⁸Wehe⁹Westerberg¹⁰Aggarwal¹¹Floudas¹Sharp²Non sharp³Nath⁴Muraki⁵Hayakawa

Aspen Plus متصل می شود. بنابراین قادر است تا طراحی فرآیند و محاسبات تابع هدف را انجام دهد [15]. ایواکپور و کثیری (۲۰۰۹) یک روش الگوریتمی را برای تمامی توالی های ممکن جداسازی غیر دقیق به محصولات چند جزئی برمبنای مشخصات محصولات ارائه دادند. هر محصول مطلوب توسط مقادیر حداقل و حداکثر دبی محصولات و همچنین غلظت اجزا مشخص می شود. توالی های مطلوب توسط معرفی یک ماتریس جداسازی ایجاد می شوند [۱۶].

همانطور که قبلا در مورد کار آگاروال و فلوداس گفته شد، مسئله بهینه سازی توالی ستونهای تقطیر غیر دقیق در حالت کلی یک مسئله MINLP است که تابع هدفی غیر خطی و حلی بسیار پیچیده با روشهای ریاضی به جهت وجود کمینه های محلی بسیار، دارد. تابع هدف هزینه های سالیانه می باشد که متعاقبا ذکر می گردد. در این تحقیق هدف آن است که بدون ساده سازی روی ابر ساختار کلی و توسط ترکیب روشهای ریاضی و الگوریتم های تصادفی حلی بسیار کامل تر و ساده تر نسبت به کارهای گذشته برای این MINLP پیچیده پیشنهاد نماید که بتواند بهترین ساختار را برای جداسازی های سه جزئی با تبدیل مساله به یک مساله خطی ارائه نماید. چرا که ساده سازی روی ابر ساختار ممکن است منجر به حذف تعدادی از ساختارهای ممکن و بهینه شود. همچنین عملیات ریاضی روی قیود غیر خطی مسئله MINLP انجام گرفته که با تفکیک متغیرهای بین صفر تا یک از سایر متغیرهای مساله روابطی مفید را بین آنها استخراج می کند به نحوی که لازم نیست تمام متغیرهای بین صفر تا یک به صورت یکجا بهینه شوند و بهینه نمودن تعداد کمی از آنها کافی است، چرا که سایر آنها نیز توسط روابط مذکور قابل دستیابی هستند. از طرفی تفکیک این متغیرها سبب می شود که مساله به نحوی به یک مساله خطی تبدیل می شود. بدین ترتیب از شمار متغیرها به نحو چشمگیری کاسته شده و حجم محاسبات و پیچیدگی های مساله نسبت به حالتی که این روابط استفاده نشوند و همچنین صرفا از روشهای ریاضی برای حل مساله استفاده شود، بسیار کاهش می یابد. دو مثال از کار آگاروال و فلوداس [1] و یک مثال از کار شیائو [11] جهت تایید اعتبار این روش مورد بررسی قرار گرفته اند.

تلفیق انرژی بسط دادند. فشار هر ستون و بازیابی اجزای کلیدی به صورت متغیرهای بهینه سازی تلقی شدند و روش تجزیه دو درجه ای برای راه حل مدل MINLP حاصل پیشنهاد شد [۸]. یک روش اکتشافی برای سنتز توالی تقطیر با محصولات چند جزئی نیز توسط لیو^{۱۲} و خو^{۱۳} (۱۹۹۵) توسعه داده شد. این روش بر مبنای باز نمایی ماتریس محصولات جداسازی است. این روش در مقایسه با برخی الگوریتم های منتشر شده نیازمند محاسبات کمتری است [9]. همچنین هو^{۱۴} و همکاران (۱۹۹۳) روشی اکتشافی را برای جداسازی به محصولات چند جزئی با استفاده از ستونهای دقیق و ساده ارائه کردند [10]. به کمک مقادیر بازیابی انتخاب شده برای طراحی توالی های غیر دقیق یک روش الگوریتمی توسط شیائو^{۱۵} و شیرد^{۱۶} (۱۹۹۶) مورد استفاده قرار گرفت. آنها دریافتند که به دست آوردن مقدار بهینه برای توزیع اجزای غیر کلیدی بسیار مهم است [11]. مک کارتی^{۱۷} و همکاران (۱۹۹۸) یک روش اتوماتیک برای حل مسئله سنتز محصولات چند جزئی ارائه دادند که نیازمند یک ابر ساختار صریح نیست. به منظور تعیین راه حل و جداسازی متغیرهای فرآیندی، جهت کاهش فضای جستجو، الگوریتم آنها از یک جستجوی درختی عمیق اولیه استفاده می کند. بنابراین یک سری از جوابهای ممکن که می توانند بعدا توسط روش های پیوسته بهینه شوند، تولید می شود [12]. یک روش جدید برای تولید ابر ساختار جامع و مدل برنامه ریزی ریاضی با تابع هدف خطی هم توسط کواس^{۱۸} و همکاران (۲۰۰۰) ارائه گردید [13]. وانگ^{۱۹} و لی^{۲۰} (۲۰۰۸) از الگوریتم ژنتیک برای سنتز توالی های غیر دقیق محصولات چند جزئی استفاده کردند، روش پیشنهادی آنها که هزینه سالیانه را حداقل می کند جریان های بهینه در جداسازی غیر دقیق را دنبال می کند تا پارامترهای اصلی تجهیزات مهم به دست آید که به عنوان یک پایه تئوری دقیق برای جداسازی های واقعی مورد استفاده واقع شوند [14]. هنریچ^{۲۱} و همکاران (۲۰۰۸) نیز روشی را توسعه دادند که ساختارهای مختلفرا توسط یک ابر ساختار جدید و انعطاف پذیر مدل می کند و توسط روش بهینه سازی الگوریتم های تکاملی به

¹²Liu

¹³Xu

¹⁴Hu

¹⁵Hsiao

¹⁶Sheppard

¹⁷McCarthy

¹⁸Kovács

¹⁹Wang

²⁰Li

²¹Henrich

۲- روش

۱-۲- بیان مسئله

یک جریان خوراک چند جزئی با شرایط معلوم و ترکیبات مشخص قرار است تا به تعدادی محصول چند جزئی با ترکیبات مشخص دیگر جداسازی شود. به عنوان مثال جریان خوراکی سه جزئی شامل A، B و C به ترتیب فراریت- با ترکیب درصد مشخص از این اجزا که قرار است به دو محصول سه جزئی دیگر با ترکیب درصدهای متفاوت- نسبت به خوراک- تفکیک شود در نظر گرفته می شود. مسئله، تعیین توالی بهینه ستون های تقطیر است که امکان استفاده از جداسازی های غیر دقیق را شامل می شود تا معیار حداقل هزینه های کل سالیانه را رعایت کند. فرضیات اصلی در این تحقیق از کار آگراوال [1] آورده شده است. بر طبق تحقیق آنها ابتدا بایستی ابر ساختار برای این جداسازی به دست آید. از آنجایی که ستونهای تقطیر از نوع ستونهای ساده^{۲۲}- دارای یک جریان خوراک و دو جریان محصول، یکی از بالا و یکی از پایین ستون- بوده و هر ستون، جداسازی بین اجزای کلیدی مجاور را انجام می دهد و همچنین اجتناب از داشتن بیش از یک ستون برای مجموعه مشابهی از اجزای کلیدی ایده اصلی است، ابر ساختار برای جداسازی جریان خوراک n جزئی متشکل از حداکثر n-1 ستون می باشد [1]. برای واضح تر شدن این مطلب در جداسازی جریان سه جزئی ابر ساختار پیشنهادی را می توان مطابق شکل (۱) ترسیم نمود که متشکل از حداکثر دو ستون تقطیر است. یعنی برای جداسازی جریان سه جزئی شامل A، B و C به دو محصول سه جزئی با ترکیب درصدهای دیگر استفاده از حداکثر دو ستون تقطیر کفایت و بسته به شرایط مساله می تواند این تعداد کاهش یابد (مثال ۲). ستون اول جهت تفکیک جزء A از B و C و ستون دوم جهت تفکیک جزء B از C پیش بینی شده است. بنابراین اجزای کلیدی مجاور سبک و سنگین در ستون تقطیر اول به ترتیب جزء A و جزء B و در ستون تقطیر دوم جزء B و جزء C می باشند. حروف بین پرانتزها، اجزایی را نشان می دهند که تنها در صورتی که جداسازی غیر دقیق صورت گیرد موجود خواهند بود. این بدان معناست که ابر ساختار، متشکل از هر دو گزینه ی جداسازی دقیق و غیر دقیق می باشد. تمامی گزینه های انشعاب، میانبر و اختلاط جریانات نیز وجود دارد. در هر ستون، اجزای کلیدی بین محصولات بالایی و پایینی

می توانند توزیع شوند. اجزای غیر کلیدی به طور کامل به محصولات بالایی یا پایینی بسته به اینکه سبک تر یا سنگین تر از اجزای کلیدی باشند می روند [1].

در مرحله بعدی تابع هدف بایستی تعیین شود. تابع هدف، کل هزینه های سالیانه^{۲۳} است که خود تابعی از هزینه سرمایه ای کل^{۲۴} (یعنی هزینه هر ستون شامل سینی ها، کندانسور و ریپویلر) و هزینه های عملیاتی سالیانه^{۲۵} (یعنی هزینه امکانات سرمایشی و گرمایشی) می باشد. داده های مورد نیاز برای توسعه تابع هدف با انجام شبیه سازی برای هر ستون در ابر ساختار - با فرض ۸۰۰۰ ساعت در سال به عنوان مبنای محاسبه کل هزینه عملیاتی سالیانه- می توانند ایجاد شوند. اگر نسبت جریان برگشتی مطلوب هر ستون در شبیه سازیها ۱/۲ برابر مینیمم آن در نظر گرفته شود آنگاه انتخاب مجموعه ای از بازیابی های اجزای کلیدی، امکان تعیین بقیه اطلاعات درباره آن ستون را برای یک جریان خوراک با دبی و ترکیب مشخص را فراهم می سازد. تحقیقات انجام گرفته برای مثال های مختلف نشان داد که در سیستم های هیدروکربنی، حدود پایینی مقادیر بازیابی اجزای کلیدی معمولاً ۰/۸ - ۰/۸۵ می باشند. بنابراین یک مجموعه از شبیه سازیهای میانبر برای هر ستون (حدود ۶۰ شبیه سازی) برای پوشش دادن محدوده ای از ترکیبات خوراک و بازیابی های اجزای کلیدی در دبی های مختلف خوراک انجام می گیرد [1].

با انجام شبیه سازی برای هر ستون در ابر ساختار ایجاد شده اند. اگر اندیس $I=\{i\}$ و $J=\{j\}$ و $N=\{n\}$ به ترتیب به اجزای جریانات، ستونها و مجموعه جریانات مربوط شود آنگاه تابع هزینه در حالت کلی برای یک ابر ساختار متشکل از J ستون مجموع هزینه های تک تک ستونها به صورت زیر است [1]:

$$Total\ cost =$$

$$\sum_{j \in J} a_{0,j} y_j + (a_{1,j} + a_{2,j} r_{i,j}^{lk} + a_{3,j} r_{i,j}^{hk} + \sum_{i \in I} b_{ij} x_{ij}) F_{input,j}$$

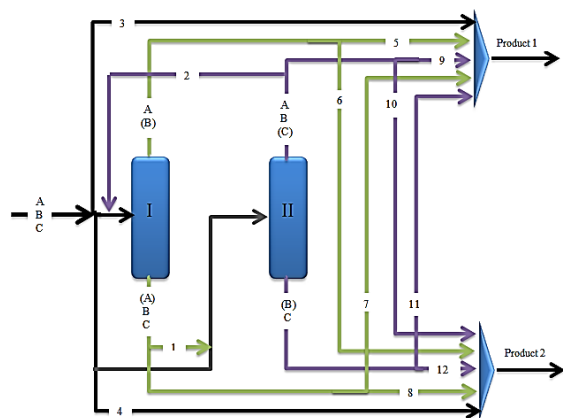
که $r_{i,j}^{lk}$ و $r_{i,j}^{hk}$ به ترتیب مقدار بازیابی جزء کلیدی سبک i در ستون j ام، مقدار بازیابی جزء کلیدی سنگین i در ستون j ام، ترکیب درصد جزء i در جریان ورودی به ستون j ام، مقدار دبی جریان ورودی به ستون j ام (که برابر مجموع جریانات خروجی از آن ستون است) می باشد.

²³ annual operating cost

²⁴ total capital cost

²⁵ annual operating cost

²² simple columns



شکل (۱) ابر ساختار جداسازی سه جزیی

سایر محدودیت ها هم شامل موازنه های جزیی، موازنه های جزیی برای مخلوط کننده ها در ورودی هر ستون، موازنه های جرم برای هر جزء در مخلوط کننده های نهایی، جمع بستن ترکیب درصد مولی اجزا، محدودیت های منطقی، حدود بازیابی ها و محدودیت های غیر منفی و انتگرالی (یکپارچگی) می توانند همانند موارد (الف) و (ب) نوشته شوند [17]. تمامی این محدودیت ها در پیوست الف آورده شده است. مشاهده می شود که مسئله از نوع MINLP با تابع هدف غیر خطی است. به دلیل وجود متغیرها و قیود زیاد (۳۰) متغیر و ۴۰ قید تنها در جداسازی سه جزیی که ۲۲ تای این قیود غیر خطی می باشند، حل این مساله با صرف استفاده از روشهای ریاضی بسیار پیچیده و امکان گیر افتادن در کمینه های نسبی در آن بالا می باشد. بدین منظور از تلفیقی از روشهای ریاضی و آماری در حل مساله استفاده شده است تا علاوه بر تفکیک متغیرهای بین ۰ تا ۱ از سایر متغیرها روابط مفید بین آنها با استفاده از قیود غیر خطی مساله به دست آید و مساله به نحوی به مساله خطی که حل بسیار قانونمند و سریعی دارد تبدیل شود.

۲-۲- روش حل

ایده اصلی در این روش بر آن است که ابتدا بتوان به طریقی مسئله را به حالت خطی در آورد. همانطور که از قیود مسئله پیداست غیر خطی بودن، مربوط به ترکیب درصد اجزای جریان ها و مقادیر بازیابی اجزای کلیدی است. لذا اگر این دسته از متغیرها به نحوی بتوانند معین شوند، قیود کاملاً خطی می شود و همچنین از تعداد آنها کاسته خواهد شد که این بار می توان مقدار دبی جریانات مختلف را بهینه نمود. بدین منظور ابتدا متغیرهای پیوسته به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم شدند. متغیرهایی که مقداری بین صفر تا یک دارند یعنی همان

$a_{0,j}, a_{1,j}, a_{2,j}, a_{3,j}$ و نیز ضرایب رگرسیون برای مجموعه شبیه سازیهای میانبر در هر ستون می باشند که با مشخص بودن مقادیر بازیابی اجزای کلیدی، ترکیب و دبی جریان خوراک ورودی در هر ستون و مقدار هزینه محاسبه شده متناظر با این مقادیر (توسط سایر اطلاعات به دست آمده از شبیه سازیهای میانبر) و جایگذاری آنها در مدل تابع هدف پیشنهادی فوق می توان این ضرایب را برای هر ستون با استفاده از آنالیز رگرسیون محاسبه نمود.

متغیر y نیز، متغیری گسسته است که حضور یا عدم حضور ستون z ام را در تابع هدف کلی نشان می دهد یعنی یا صفر یا یک است [1]. البته قابل ذکر است که برای محاسبه ضرایب تابع هزینه هر ستون به صورت مجزا این مقدار برابر یک لحاظ شده است. این مدل هزینه های هر ستون را بین ۵-۱۰٪ هزینه های واقعی آن مشخص می کند [1].

پس از مشخص شدن تابع هدف فرمول بندی ریاضی شکل می گیرد. برای جداسازی یک جریان سه جزیی متغیرها شامل:

(أ) دبی های جریان: F_1, F_2, \dots, F_{12}

(ب) ترکیبات تمامی جریانات خوراک و محصولات مرتبط:

feed stream: $\begin{cases} I: x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1} \\ II: x_{1,2}, x_{2,2}, x_{3,2} \end{cases}$

product of task I: $\begin{cases} \text{up product: } x_{1,1}^u, x_{2,1}^u, x_{3,1}^u \\ \text{down product: } x_{1,1}^d, x_{2,1}^d, x_{3,1}^d \end{cases}$

product of task II: $\begin{cases} \text{up product: } x_{1,2}^u, x_{2,2}^u, x_{3,2}^u \\ \text{down product: } x_{1,2}^d, x_{2,2}^d, x_{3,2}^d \end{cases}$

(ج) بازیابی های اجزای اصلی در ستون های ۱ و ۲:

$r_{1,1}^{lk}, r_{2,1}^{hk} : task I$

$r_{2,2}^{lk}, r_{3,2}^{hk} : task II$

مجموعه محدودیت ها هم شامل :

(أ) موازنه جرم کلی:

$F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} = F_{feed}$ (1)

(ب) موازنه های جزء کلیدی برای هر ستون:

$(F_2 + F_9 + F_{10})x_{2,2}^u - r_{2,2}^{lk} \cdot (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12})x_{2,2}^d =$ (2)

$(F_{11} + F_{12})x_{3,2}^d - r_{3,2}^{hk} \cdot (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12})x_{3,2}^d = 0$ (3)

$(F_5 + F_6)x_{1,1}^u - r_{1,1}^{lk} \cdot (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8)x_{1,1}^d = 0$ (4)

$(F_1 + F_7 + F_8)x_{2,1}^d - r_{2,1}^{hk} \cdot (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8)x_{2,1}^d = 0$ (5)

با توجه به اینکه در هر جریان مجموع ترکیب درصد اجزا یک می باشد می توان در هر جریان ترکیب درصد یکی از اجزا را به عنوان متغیر وابسته در این دسته از متغیرها در نظر گرفت و از شمار متغیرهای اصلی کم نمود. بنابراین انتخاب و تقسیم دو معادله از سه معادله موازنه جزئی بوده و می توان به عنوان مثال از تقسیم موازنه جزئی جزء A بر موازنه جزئی جزء C استفاده کرد و به رابطه ای که ارتباط ترکیب درصد جزء A و جزء C در ورودی و خروجی های ستون را نشان می دهد دست یافت.

همچنین می توان از ادغام دو معادله مربوط به موازنه اجزای کلیدی هر ستون با یک معادله از معادلات موازنه جزئی همان ستون هم استفاده کرد و به دو رابطه مفید دیگر که ارتباط بین ترکیب درصد اجزای ورودی و خروجی هر ستون را

$$\frac{(1 - r_{1,1}^{lk}) \cdot x_{1,1}}{r_{2,1}^{hk} \cdot x_{2,1}} = \frac{x_{1,1}^d}{x_{2,1}^d} \quad (13)$$

$$\frac{(1 - r_{2,1}^{hk}) \cdot x_{2,1}}{r_{1,1}^{lk} \cdot x_{1,1}} = \frac{x_{2,1}^u}{x_{1,1}^u} \quad (14)$$

همچنین از موازنه های جزئی در مخلوط کننده های ورودی به ستون I می توان نوشت:

$$\frac{x_{1,1} - x_{1,feed}}{x_{2,1} - x_{2,feed}} = \frac{x_{1,2}^u - x_{1,feed}}{x_{2,2}^u - x_{2,feed}} \quad (15)$$

تمامی معادلات فوق را می توان در مورد ستون تقطیر

دوم هم به صورت زیر نوشت:

$$\frac{(x_{1,2} - x_{1,2}^u)}{(x_{2,2} - x_{2,2}^u)} = \frac{(0 - x_{1,2})}{(x_{2,2}^d - x_{2,2})} \quad (16)$$

$$\frac{(1 - r_{2,2}^{lk}) \cdot x_{2,2}}{r_{3,2}^{hk} \cdot x_{3,2}} = \frac{x_{2,2}^d}{x_{3,2}^d} \quad (17)$$

$$\frac{(1 - r_{3,2}^{hk}) \cdot x_{3,2}}{r_{2,2}^{lk} \cdot x_{2,2}} = \frac{x_{3,2}^u}{x_{2,2}^u} \quad (18)$$

$$\frac{x_{1,2} - x_{1,feed}}{x_{2,2} - x_{2,feed}} = \frac{x_{1,1}^d - x_{1,feed}}{x_{2,1}^d - x_{2,feed}} \quad (19)$$

از معادلات فوق می توان چنین نتیجه گرفت که از ۱۶ تا از قیود غیر خطی موجود در مساله اولیه، ۸ معادله مفید که ارتباط بین متغیرهای اولیه را نشان می دهد، به دست آمده

ترکیب درصد اجزای جریانات و بازیابی اجزای کلیدی که متغیرهای اولیه هستند و دبی جریان ها به عنوان متغیرهای ثانویه معرفی می شوند. سپس با ساده سازی روی قیود غیر خطی روابط مفیدی بین متغیرهای اولیه به وجود آمده است به نحوی که می توان آنها را جدای از متغیرهای ثانویه بهینه سازی نمود و با بهینه نمودن تعداد کمی از آنها بقیه این دسته از متغیرها هم توسط این روابط ریاضی قابل محاسبه هستند. برای بهینه سازی آنها از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود. اما تکلیف متغیرهای گسسته (صفر و یک) که مربوط به حضور یا عدم حضور ستون تقطیر در ابر ساختار است هنوز مشخص نیست. برای توضیح بیشتر روش حل به دو مرحله کلی تقسیم شده است که در زیر به بیان کامل دو مرحله پرداخته خواهد شد:

۲-۱-۲- مرحله اول: تبدیل مساله MINLP به LP و کاهش قیود مساله

در این مرحله هدف تقسیم متغیرهای اصلی مساله به دو دسته اولیه و ثانویه و سپس به دست آوردن روابطی برای هر دسته از این متغیرها به صورت کاملا مجزا از هم با استفاده از قیود غیر خطی مساله جهت تبدیل مساله به یک مساله خطی است. متغیرهای اولیه شامل ترکیب درصد اجزای جریانها و میزان بازیابی های اجزای کلیدی است و متغیرهای ثانویه شامل دبی جریانات می باشد. بایستی سعی شود که با یک سری ساده سازی های کاملا منطقی ریاضی روی قیود مساله این دو دسته متغیر را به طور کامل از هم تفکیک کرد. مثلا در مورد ستون تقطیر I موازنه های جزئی به صورت زیر هستند:

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8)x_{1,1} - (F_5 + F_6)x_{1,1}^u - (F_1 + F_7 + F_8)x_{1,1}^d = 0 \quad (6)$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8)x_{2,1} - (F_5 + F_6)x_{2,1}^u - (F_1 + F_7 + F_8)x_{2,1}^d = 0 \quad (7)$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8)x_{3,1} - (F_1 + F_7 + F_8)x_{3,1}^d = 0 \quad (8)$$

که می توان آنها را به فرم زیر مرتب کرد:

$$(F_5 + F_6)(x_{1,1} - x_{1,1}^u) = (F_1 + F_7 + F_8)(x_{1,1}^d - x_{1,1}) \quad (9)$$

$$(F_5 + F_6)(x_{2,1} - x_{2,1}^u) = (F_1 + F_7 + F_8)(x_{2,1}^d - x_{2,1}) \quad (10)$$

$$(F_5 + F_6)(x_{3,1} - x_{3,1}^u) = (F_1 + F_7 + F_8)(x_{3,1}^d - x_{3,1}) \quad (11)$$

با تقسیم دو معادله اول از معادلات فوق به رابطه زیر می توان دست یافت که ارتباط بین ترکیب درصد جزء A و B ورودی و خروجی مربوط به ستون تقطیر ۱ را نشان می دهد:

$$\frac{(x_{1,1} - x_{1,1}^u)}{(x_{2,1} - x_{2,1}^u)} = \frac{(x_{1,1}^d - x_{1,1})}{(x_{2,1}^d - x_{2,1})} \quad (12)$$

۲-۲-۲- مرحله دوم: استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت

بهینه سازی تعدادی از متغیرهای اولیه

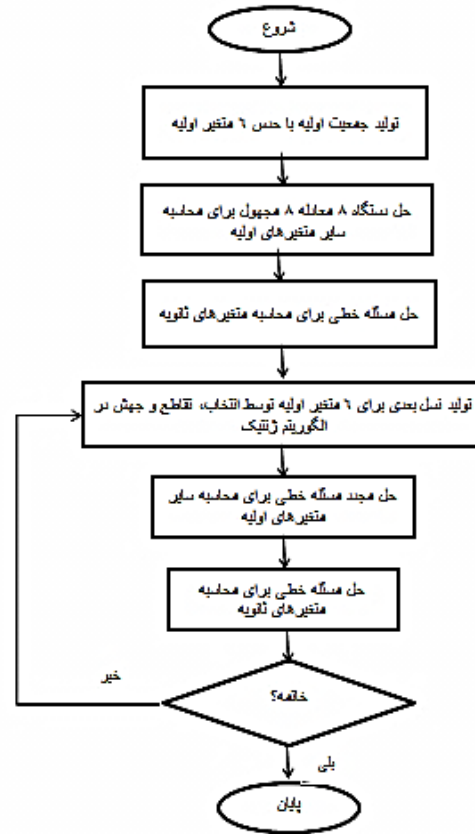
همانطور که در مرحله اول گفته شد مساله در حالتی خطی می شود که متغیرهای اولیه مشخص باشند. بین متغیرهای اولیه هم روابطی استخراج شد که با مشخص بودن تعداد کمی از آنها بقیه نیز با حل دستگاه معادلات مشخص می شوند. در مرحله دوم استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مشخص نمودن آن دسته از متغیرهای اولیه (۶ تایی که در مرحله دوم برای جداسازی جریان سه جزیی ذکر شد) و بهینه نمودن آنها بسیار کارآمد خواهد بود. ابتدا یک جمعیت اولیه از این ۶ متغیر به صورت کاملاً تصادفی در نظر گرفته می شود. سایر متغیرهای اولیه هم با توجه به روابط به دست آمده در مرحله دوم محاسبه می شوند. حال مسئله به صورت یک LP برای متغیرهای ثانویه یعنی دبی جریانات در می آید که با یک روش ساده و قانونمند مانند simplex method قابل حل است. بهترین جوابهای این جمعیت اولیه به نسل بعد فرستاده می شوند. همچنین عملیات تقاطع و جهش نیز در جای خود وارد عمل شده و بنابراین هر نسل جوابهایی بهتر از نسل قبل را ارائه می دهد. اگر در تعداد مشخصی از چند نسل متوالی بهبودی در بهترین جواب به وجود نیاید، الگوریتم ژنتیک خاتمه می یابد. از نقاط قوت این روش این است که تنها با تولید ۲۰ نسل می توان بهترین جواب یعنی ساختاری که کمترین مقدار هزینه را داشته باشد به دست آورد. نمودار جریانی روش پیشنهادی در شکل (۲) ترسیم شده است. روش ارائه شده در مقاله بسیار کلی است و برای جداسازی جریانات سه جزیی و بیشتر می تواند به کار گرفته شود.

است. $X_{i,feed}$ ها یعنی ترکیب درصد خوراک اصلی معلوم است. بنابراین ۱۴ مجهول در این ۸ معادله وجود دارد. اگر بتوان به طریقی ۶ مجهول را معلوم نمود سایر مجهولات باقیمانده توسط حل دستگاه معادلات ۸ معادله و ۸ مجهول قابل دستیابی هستند. در این تحقیق مقادیر بازیابی اجزای کلیدی در ستونها و ترکیب درصد دو جزء از اجزای جریانات به عنوان آن ۶ متغیر اولیه که بایستی مشخص شوند معرفی می شوند. مقدار $0/85$ به عنوان کران پایین بازیابی اجزای کلیدی انتخاب شده است به این دلیل که اگر کمتر از این مقدار انتخاب شود امکان توزیع سایر اجزای سنگین تر از اجزای کلیدی در محصول بالا و سبک تر از اجزای کلیدی در محصول پایین وجود خواهد داشت، کران بالای بازیابی اجزای کلیدی هم ۱ می باشد [1,17]. همچنین کران پایین و بالای ترکیب درصد دو جزء از اجزا هم با توجه به شرایط مسئله معین می شود (که از مقدار ترکیب درصد آن اجزا در خوراک اصلی تا هنگامیکه جداسازی کاملاً غیر دقیق توسط ستونها صورت گیرد می توانند تغییر کند). در واقع با مشخص بودن این ۶ متغیر ترکیب درصد تمامی اجزای سایر جریانات هم توسط روش ذکر شده فوق قابل محاسبه خواهند بود. با مشخص بودن این مقادیر که در واقع متغیرهای اولیه بودند قیود مساله اولیه بهینه سازی کاملاً خطی شده و تعدادی از آنها حذف می شوند و این بار هدف پیدا کردن مقدار بهینه برای دبی جریانات به عنوان متغیرهای ثانویه است. متغیرهای گسسته موجود در مساله یعنی y ها در تابع هدف را هم با این استدلال که اگر دبی جریان ورودی به یک ستون که معادل مجموع جریانهای خروجی از همان ستون است، نزدیک به صفر بود می توان از حضور آن ستون در مساله صرف نظر کرد، کاهش داد. یعنی ابتدا مقدار ۱ را برای آنها در تابع هدف در نظر گرفت. در پایان بهینه سازی اگر مجموع جریانات خروجی از ستونی صفر بود آنگاه به متغیر y مربوط به آن ستون عدد صفر را اختصاص داد، یعنی هزینه های آن ستون را از کل هزینه ها کم نمود.

می توان از وجود آن ستون صرفنظر کرد و سپس مقدار ضریب رگرسیون متغیر y مربوط به آن ستون را از تابع هدف کسر نمود. همچنین در کار آگاروال تمامی جریانات اعم از ورودی و خروجی های برج نامگذاری شده اند، اما در این تحقیق جهت کم نمودن تعداد متغیرها و قیود تنها نامگذاری جریانات خروجی کفایت می کند.

مثال ۱:

در این مثال، قرار است که یک جریان سه جزیی شامل پروپان، نرمال بوتان و ایزو بوتان با ترکیباتی که در جدول (۱) آورده شده است به دو محصول سه جزیی که ترکیب محصولات نیز در این جدول آمده تفکیک شود. نتایج به دست آمده در جدول (۲) و (۳) لیست شده اند. جدول (۲) مقادیر متغیرهای اولیه ای که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می شوند و جدول (۳) مقادیر بهینه متغیرهای ثانویه را نشان می دهد. مقادیر بازبایی اجزای کلیدی در جدول (۲) نشان دهنده توالی غیر دقیق ستونهاست. مقدار جریان ۱ در جدول (۳)، صفر و همچنین مقدار 0.333 در جدول (۲) برای ترکیب درصد ایزوبوتان ورودی به ستون ۲ نشان می دهد که جریان خوراک اصلی مستقیماً به ستون دوم وارد شده است، مقدار جریان ۲ در جدول (۳) نشان می دهد که ستون اول متعاقب ستون دوم در ساختار می باشد و مقدار 0.425 برای ایزوبوتان ورودی به ستون اول در جدول (۲) نشان می دهد که هیچ جریانی از خوراک اصلی به این ستون وارد نمی شود و جریان ۲ تنها جریان ورودی به ستون ۱ می باشد چرا که اگر جریان خوراک اصلی هم به این ستون وارد می شد مقدار $x_{2,1}$ بین 0.333 و 0.425 به دست می آمد (این دو مقدار به عنوان حدود پایین و بالا برای ایزوبوتان ورودی به ستون اول از معادلات ذکر شده در مرحله اول روش حل با توجه به شرایط جریان خوراک این مثال استخراج شده اند). بنابراین با توجه به مقادیر این جداول بهترین آرایش توالی ستون ۲ و ۱ به حالت سری و غیر دقیق می باشد. این آرایش مطابق ساختار به دست آمده در کار فلوداس است. اما روش مذکور این قابلیت را دارد تا بدون هیچگونه ساده سازی بر روی ابر ساختار، بهترین ساختار را در جداسازی های سه جزیی مشخص نماید این در حالی است که در کار آگاروال و فلوداس از سه ساختار ساده تر (توالی ستون ۱ و ۲ به صورت سری با حذف جریانهای شماره ۲ و جریان خوراک به ستون ۲، توالی ستونهای ۲ و ۱ به صورت سری با حذف جریانهای شماره ۱ و جریان خوراک به ستون ۲ و توالی



شکل (۲) نمودار جریانی حل مسئله

۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته ها

در این بخش جداسازی یک جریان سه جزیی شامل پروپان، نرمال بوتان و ایزوبوتان به محصولاتی با ترکیب درصدهای متفاوت طی سه مثال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تابع هدف مورد استفاده برای این جداسازی با توجه به مطالب ذکر شده در بالا از کار آگاروال آورده شده که با اندکی تغییر (در شماره گذاری جریانات و همچنین برابر یک قرار دادن متغیرهای گسسته) به صورت زیر است [1]:

$$\begin{aligned} MIN & 2394.7 + \\ & [-1399.04 + 935.14.x_{1,1}^{jk} + 773.08.x_{2,1}^{hk} + 57.19.x_{1,1} + 426.56.x_{2,1}](F_1 + F_3 + F_6 + F_7 + F_8) + \\ & 75835 + \\ & [-6615.88 + 3381.47.x_{2,2}^{jk} + 3733.49.x_{3,2}^{hk} + 163.71.x_{1,2} + 2899.96.x_{2,2}](F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}) \end{aligned}$$

با مقایسه عبارت فوق با تابع هدف ذکر شده در بخش ۲-۱ می توان گفت که در این تحقیق با توجه به آنچه در مرحله اول روش حل ذکر گردید، متغیرهای y که مربوط به حضور یا عدم حضور یک ستون است در وهله اول برابر ۱ در نظر گرفته شده اند، زیرا اگر جریانات خروجی از یک ستون (که مجموع آنها برابر جریان ورودی به همان ستون است) صفر باشند

در ساختار بهینه وجود ندارد. مقادیر بازیابی اجزای کلیدی ستون اول نیز مطابق جدول (۵)، توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده اند. نتایج این دو جدول نشان می دهد بهترین آرایش جداسازی غیر دقیق ستون ۱ می باشد. در جداسازی دقیق نیاز است تا هر دو ستون موجود باشند. این نتایج نیز در تطابق با کار فلوداس و هنریچ می باشند [1,15]. اما همانند مثال ۱ می توان مزایای مهمی را برای حل با این روش برشمرد که بسیار در خور توجه است.

مثال ۳:

در این مورد مطالعاتی که از کار شیائو و شپرد [11] آورده شده ترکیب خوراک مانند دو مثال قبلی است اما ترکیب محصولات باز هم متفاوت است. جدول (۷) ترکیب خوراک و محصولات را نشان می دهد. در کار شیائو و شپرد حد پایینی خاصی برای بازیابی اجزای کلیدی تعیین نشده است (در واقع در کار آنها مقدار بازیابی اجزای کلیدی جزء متغیرهای بهینه سازی نیست). اما در این کار جهت تایید اعتبار روش مطرح شده همان مقدار $0/85$ به عنوان حد پایین برای بازیابی اجزای کلیدی در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه سازی هم در جداول ۸ و ۹ لیست شده اند. تمامی پارامترهای جدول (۸) توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده اند. مقادیر بهینه بازیابی اجزای کلیدی در هر دو ستون ۱ و ۲ در این جدول، $0/85$ به دست آمده که توالی غیر دقیق ستونها را نشان می دهد. همینطور مقدار $0/333$ برای ایزوبوتان ورودی به برج های ۱ و ۲ که در دو ستون آخر این جدول ذکر شده و نیز با توجه به اینکه دبی جریان های ۱ و ۲ در جدول (۹) صفر به دست آمده نشان می دهد که خوراک اصلی به طور مستقیم به هر دو برج وارد شده است (زیرا ترکیب درصد ایزوبوتان در خوراک اصلی مطابق جدول (۷) مقدار $0/333$ می باشد). این بدان معناست که بهترین ساختار آرایش موازی و غیر دقیق ستونهای ۱ و ۲ با مقادیر بهینه دبی جدول (۹) می باشد (شکل ۳). قابل ذکر است که با توجه به متفاوت بودن متغیرهای بهینه سازی در این کار و کار شیائو مقایسه ای بین ساختارهای بهینه در دو کار نمی توان انجام داد.

ستونها به صورت موازی با حذف جریان شماره ۱ و ۲ به عنوان نقطه شروع محاسبات استفاده شده است که این باعث از بین رفتن عمومیت حل مساله شده و برخی از ساختارهای ممکن بهینه (آرایش های سری- موازی) حذف می شوند. یا در کار هنریچ و همکاران [15] از چهار ساختار ساده تر شده جهت اتصال به Aspen Plus به عنوان نقاط شروع استفاده شده است (توالی سری- موازی ستونهای ۱ و ۲ با حذف جریان شماره ۲، توالی سری- موازی ستونهای ۲ و ۱ با حذف جریان شماره ۱، ستون ۱ به تنهایی و ستون ۲ به تنهایی). در روش آنها برخی از متغیرها توسط الگوریتم های تکاملی و برخی توسط Aspen-Plus بهینه می شوند. از دیگر مزایای این روش این است که بین متغیرهای اولیه روابط منطقی ریاضی استخراج شده به طوریکه نیاز نیست تمامی این دسته از متغیرها به صورت یکجا بهینه شوند و با مشخص شدن ۶ تای آنها بقیه این متغیرها نیز توسط روابط مذکور به دست می آیند که این خود منجر کاهش زیاد حجم محاسبات و سرعت بیشتر در رسیدن به جواب می گردد. همچنین همانطور که پیشتر نیز اشاره شد توسط روش پیشنهادی مذکور، با مشخص بودن مقدار متغیرهای اولیه در هر بار تکرار الگوریتم ژنتیک مسئله جهت یافتن جواب بهینه برای متغیرهای ثانویه کاملاً خطی شده و تعداد قیود نیز به طرز چشمگیری کاهش می یابد (در واقع با مشخص بودن مقدار متغیرهای اولیه، بسیاری از قیود بدیهی می شوند) که این مسئله نیز کاهش بار محاسباتی را در پی خواهد داشت. این نکته نیز در خور توجه است که این روش دارای این انعطاف پذیری است که برای هر نقطه شروع دلخواهی مورد استفاده قرار گیرد.

مثال ۲:

ترکیب خوراک مثال دوم همانند مثال اول بوده اما محصولات ترکیبات متفاوتی دارند. اطلاعات مربوط به ترکیب خوراک و محصولات در جدول (۴) آورده شده است. نتایج بهینه به دست آمده برای هر دو دسته متغیرهای اولیه و ثانویه در جداول ۵ و ۶ آورده شده است دبی جریان های خروجی از ستون دوم در جدول (۶) صفر هستند (جریانهای ۲، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) و این نشان دهنده آن است که ستون تقطیر دوم

جدول (۱) جریان های بهینه در حالت

جداسازی غیر دقیق مثال ۱

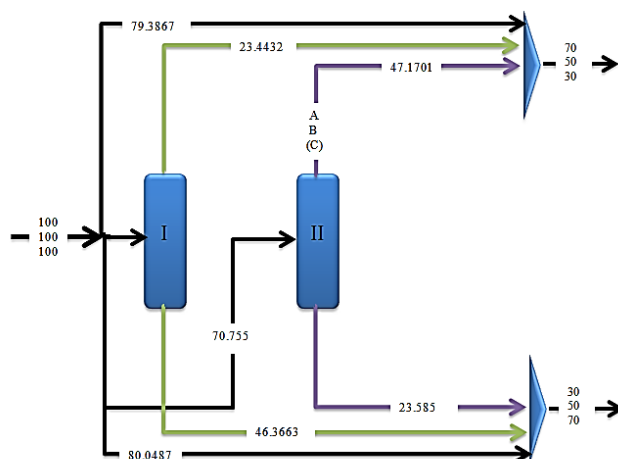
K	$F_k(\text{kgmol/hr})$
۱	۰
۲	۵۷/۴۲۹
۳	۱۳۷/۱۴۲۹
۴	۷۷/۱۴۲۹
۵	۰
۶	۲۴/۲۸۵۷
۷	۳۲/۸۵۷۱
۸	۰
۹	۰
۱۰	۰
۱۱	۰
۱۲	۲۸/۵۷۱۴

جدول (۱) ترکیب خوراک و محصولات مثال ۱

محصولات (kgmole/h)		خوراک (gmole/h)	اجزا
P_2	P_1		
۷۰	۳۰	۱۰۰	پروپان
۵۰	۵۰	۱۰۰	ایزو بوتان
۷۰	۳۰	۱۰۰	نرمال بوتان

جدول (۲) نتایج بهینه سازی هزینه ها و متغیرهای اولیه مثال ۱

مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای اولیه توسط الگوریتم ژنتیک در جداسازی غیر دقیق						هزینه در جداسازی دقیق (دلار)	هزینه در جداسازی غیر دقیق (دلار)
$x_{2,2}$	$x_{2,1}$	$r_{3,2}^{hk}$	$r_{2,2}^{lk}$	$r_{2,1}^{hk}$	$r_{1,1}^{lk}$		
۰/۳۳۳	۰/۴۲۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۱	۰/۸۵	۲۱۰۵۵۴	۱۵۶۷۰۷



شکل (۳) ساختار بهینه مثال ۳

جدول (۶) جریان های بهینه در حالت

جداسازی غیر دقیق مثال ۲

K	$F_k(\text{kgmol/hr})$
۱	۰
۲	۰
۳	۵۹/۹۹۸
۴	۲۸/۲۳۳۸
۵	۷۰
۶	۰
۷	۰
۸	۱۴۱/۷۶۵۳
۹	۰
۱۰	۰
۱۱	۰
۱۲	۰

جدول (۴) ترکیب خوراک و محصولات مثال ۲

محصولات (kgmole/h)		خوراک (kgmole/h)	اجزا
P_2	P_1		
۲۰	۸۰	۱۰۰	پروپان
۷۰	۳۰	۱۰۰	ایزو بوتان
۸۰	۲۰	۱۰۰	نرمال بوتان

جدول (۵) نتایج بهینه سازی هزینه ها و متغیرهای اولیه مثال ۲

مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای اولیه توسط الگوریتم ژنتیک						هزینه در جداسازی دقیق (دلار)	هزینه در جداسازی غیر دقیق (دلار)
$x_{2,2}$	$x_{2,1}$	$r_{3,2}^{hk}$	$r_{2,2}^{lk}$	$r_{2,1}^{hk}$	$r_{1,1}^{lk}$		
-	۰/۳۳۳	-	-	۰/۸۵۸۳۳	۰/۸۵	۲۱۰۱۳۶	۶۲۵۹۶

جدول (۹) جریان های بهینه در حالت

جداسازی غیر دقیق مثال ۳

K	$F_k(\text{kgmol/hr})$
۱	۰
۲	۰
۳	۷۹/۳۸۶۷
۴	۸۰/۰۴۸۷
۵	۲۳/۴۴۳۲
۶	۰
۷	۰
۸	۴۶/۳۶۶۲۲
۹	۴۷/۱۷۰۱
۱۰	۰
۱۱	۰
۱۲	۲۳/۵۸۵۰

جدول (۷) ترکیب خوراک و محصولات مثال ۳

محصولات (kgmole/h)		خوراک (kgmole/h)	اجزا
P_2	P_1		
۳۰	۷۰	۱۰۰	پروپان
۵۰	۵۰	۱۰۰	ایزو بوتان
۷۰	۳۰	۱۰۰	نرمال بوتان

جدول (۸) نتایج بهینه سازی هزینه ها و متغیرهای اولیه مثال ۳

مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای اولیه توسط الگوریتم ژنتیک						هزینه در جداسازی دقیق (دلار)	هزینه در جداسازی غیر دقیق (دلار)
$x_{2,2}$	$x_{2,1}$	$r_{3,2}^{hk}$	$r_{2,2}^{lk}$	$r_{2,1}^{hk}$	$r_{1,1}^{lk}$		
۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۲۱۶۷۳۸	۱۴۳۹۵۵

۴- جمع بندی:

شد. بدین ترتیب که ابتدا توسط ساده سازی های ریاضی که بر روی قیود غیر خطی مساله انجام گرفت، روابطی استخراج شد که علاوه بر اینکه متغیرهایی بین صفر تا یک را از سایر متغیرها جدا می کرد لازم نبود که تمامی آن متغیرها با هم بهینه شوند و بهینه سازی تعداد کمی از آنها کفایت می کرد. این دسته از متغیرها توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می شدند. همچنین در هر بار تکرار این الگوریتم، مسئله برای به دست آوردن سایر متغیرها کاملاً خطی شده که حل بسیار ساده و قانونمندی دارند و تعداد قیود به طرز چشمگیری کاهش یافت

فرمولاسیون طراحی و یا توالی جداسازی ذاتاً از نوع MINLP می باشد که با توجه به فرمولاسیون ریاضی مساله، تعداد متغیرها و قیود غیر خطی در مساله بسیار زیاد بوده و در واقع حل مسائلی از این دست به دلیل وجود همزمان متغیرهای پیوسته و ناپیوسته و فضای ناهمگن جواب، امری سخت می باشد. این مشکل با استفاده ی همزمان روش های آماری بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک در کنار روش های تحلیلی و با استخراج روابط مفید ریاضی در این تحقیق حل

که منجر به سهولت بسیار زیاد در رسیدن به جواب می شود
وامکان گیر افتادن در کمینه های محلی بسیار کاهش
می یابد.

در برخی تحقیقات گذشته که از الگوریتم های آماری
برای حل مسئله استفاده کرده اند سعی بر آن بوده که به
نحوی مساله را خطی کنند. اما اینکار به تنهایی و بدون ارتباط
همزمان با نرم افزارهای شبیه ساز امکان پذیر نبوده است.
یعنی تعدادی از متغیرها را انتخاب نموده که توسط روشی
مانند الگوریتم ژنتیک بهینه شوند و سایر متغیرها از طریق
ارتباط با نرم افزارهای شبیه سازی بهینه سازی می شوند. با
استفاده از روابط استخراج شده این تحقیق نیازی به اتصال به
نرم افزارهای شبیه سازی وجود نخواهد داشت. در برخی دیگر
از تحقیقات هم ساده سازی های بسیاری بر روی ابر ساختار
صورت گرفته است که این می تواند منجر به از دست دادن
ساختارهای بهینه بسیاری شود. اما روش پیشنهادی در این
مقاله سعی داشته تا در جداسازی های سه جزئی عمومیت
حل مساله حفظ شده و عملاً هیچ ساده سازی بر روی
ابر ساختار اصلی صورت نگیرد که این کار عملاً منجر به کسب
نتایج دقیق تر شده است. لازم به ذکر است که روش
پیشنهادی در این تحقیق برای جداسازی جریانهای با تعداد
اجزای بیشتر از سه جزء - با اعمال یک سری تغییرات در
روش حل - قابل تعمیم است که با توجه به در دست نبودن
ضرایب تابع هدف به کارهای آتی موکول خواهد شد.

علایم اختصاری و نمادها

a_{0j} : ضریب ثابت هزینه برای ستون j

a_{1j} : ضریب هزینه متناظر برای دبی جریان به ستون j

a_{2j} : ضریب هزینه متناظر با جزء کلیدی سبک در ستون j

a_{3j} : ضریب هزینه متناظر با جزء کلیدی سنگین در ستون j

b_{1j} : ضریب هزینه متناظر با جزء i در ستون j

F_n : دبی جریان n ام

F_{feed} : دبی جریان کلی خوراک

I : اندیس مجموعه اجزا

J : اندیس مجموعه ستونها

Lb_{1j} : حد پایین بازیابی برای جزء i در ستون j

N : اندیس مجموعه جریانها

x_{ij}^{lk} : بازیابی جزء کلیدی سبک i در ستون j

x_{ij}^{hk} : بازیابی جزء کلیدی سنگین i در ستون j

ub_{1j} : حد بالا بازیابی برای جزء i در ستون j

$x_{i,feed}$: ترکیب جزء i در ورودی در خوراک اصلی

$x_{i,j}$: ترکیب جزء i در ورودی ستون j

$x_{i,j}^u$: ترکیب جزء i در محصول بالای ستون j

$x_{i,j}^d$: ترکیب جزء i در محصول پایین ستون j

y_j : متغیر دوتایی که اشاره به حضور یا عدم حضور ستون j
دارد.

مراجع

- [1] A. Aggarwal, C. A. Floudas (1990) "Synthesis of general distillation sequences- nonsharp separations", *Comp. & Chem. Eng.*, 14, 631-653
- [2] R. Nath (1977) *Studies in the Synthesis of Separation Processes*, PhD thesis, University of Houston, Texas.
- [3] M. Muraki, T. Hayakawa (1984) "Separation processes synthesis for multicomponent products", *J. Chem. Eng. Japan.* 17(5), 533-538.
- [4] S. H. Cheng, Y. A. Liu (1988) "Studies in chemical process design and synthesis: 8. A simple heuristic method for systematic synthesis of initial sequences for sloppy multicomponent separations", *I&ECRes.*, 27 (12), 2304-2322
- [5] M. Muraki, T. Hayakawa (1987) "Multi component separation process synthesis with separation sharpness", *J. Chem. Eng. Japan.*, 20, 195-198.
- [6] M. Muraki, T. Hayakawa (1988) "Synthesis of a multicomponent multiproduct separation process with nonsharp separators", *Chem. Eng. Sci.*, 43(2):259-268.
- [7] R. R. Wehe, A. W. Westerberg (1990) "A bounding procedure for the minimum number of columns in nonsharp distillation sequences", *Chem. Eng. Sci.*, 45(1): 1-11.
- [8] A. Aggarwal, C. A. Floudas (1992) "Synthesis of heat integrated nonsharp distillation sequences", *Comp. & Chem. Eng.*, 16, 89-108.
- [9] Z. Liu, X. Xu (1995) "Heuristic procedure for the synthesis of distillation sequences with multicomponent products", *Chemical Engineering Science*, 50, 1997-2004.
- [10] Z. Hu, B. Chen, X. He (1993) "Heuristic synthesis for multicomponent products with simple and sharp separators", *Chemical Engineering Science*, 17, 379-397.
- [11] S. B. Hsiao, C. M. Sheppard (1996) "Algorithmic synthesis of general non-sharp simple distillation column sequences", *Chemical Engineering Communications*, 140, 1-19.
- [12] E. McCarthy, E. S. Flaga, J. W. Ponton (1998) "An automated procedure for multicomponent Product Separation Synthesis", *Computers chem. Engng.*, 22, 77-88.
- [13] Z. Kovačs, Z. Ercsey, F. Friedler, L. T. Fan (2000) "Separation-network synthesis: global optimum through rigorous super-structure", *Computers and Chemical Engineering*, 24, 1881-1900.
- [14] X. H. Wang, Y. G. Li (2008) "Synthesis of Multicomponent Products Separation Sequences via Stochastic GP Method", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 8815-8822.
- [15] F. Henrich, C. Bouvy, C. Kausch, K. Lucas, M. Preu, G. Rudolph, P. Roosen (2008) "Economic optimization of non-sharp separation sequences by means of evolutionary algorithms", *Computers and Chemical Engineering*, 32, 1411-1432.
- [16] J. Ivakpour, N. Kasiri, (2009) "Synthesis of Distillation Column Sequences for Nonsharp Separations", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 8635-8649.

[17] C. A. Floudas (1995) *Nonlinear and mixed integer optimization*, Oxford University press, New York.

پیوست الف

لیست کامل قیود در جداسازی جریان سه جزئی:

(أ) موازنه جرم کلی:

$$F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} = F_{feed}$$

(ب) موازنه های جزء کلیدی برای هر ستون:

$$(F_5 + F_6).x_{1,1}^u - r_{1,1}^{lk} \cdot (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{1,1} = 0$$

$$(F_1 + F_7 + F_8).x_{2,1}^d - r_{2,1}^{hk} \cdot (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{2,1} = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10}).x_{2,2}^u - r_{2,2}^{lk} \cdot (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{2,2} = 0$$

$$(F_{11} + F_{12}).x_{3,2}^d - r_{3,2}^{hk} \cdot (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{3,2} = 0$$

(ت) موازنه های جزئی:

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{1,1} - (F_5 + F_6).x_{1,1}^u - (F_1 + F_7 + F_8).x_{1,1}^d = 0$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{2,1} - (F_5 + F_6).x_{2,1}^u - (F_1 + F_7 + F_8).x_{2,1}^d = 0$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{3,1} - (F_1 + F_7 + F_8).x_{3,1}^d = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{1,2} - (F_2 + F_9 + F_{10}).x_{1,2}^u = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{2,2} - (F_2 + F_9 + F_{10}).x_{2,2}^u - (F_{11} + F_{12}).x_{2,2}^d = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{3,2} - (F_2 + F_9 + F_{10}).x_{3,2}^u - (F_{11} + F_{12}).x_{3,2}^d = 0$$

(ث) موازنه های جرم برای هر جزء در مخلوط

کننده های قبل از ستونها:

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{1,1} - (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 - F_2).x_{1,feed} - F_2.x_{1,2}^u = 0$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{2,1} - (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 - F_2).x_{2,feed} - F_2.x_{2,2}^u = 0$$

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8).x_{3,1} - (F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 - F_2).x_{3,feed} - F_2.x_{3,2}^u = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{1,2} - (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} - F_1).x_{1,feed} - F_1.x_{1,1}^d = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{2,2} - (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} - F_1).x_{2,feed} - F_1.x_{2,1}^d = 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}).x_{3,2} - (F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12} - F_1).x_{3,feed} - F_1.x_{3,1}^d = 0$$

(ج) موازنه های جرم برای هر جزء در مخلوط

کننده های نهایی:

$$F_3.x_{1,feed} + F_5.x_{1,1}^u + F_7.x_{1,1}^d + F_9.x_{1,2}^u = P_{1,1}$$

$$F_3.x_{2,feed} + F_5.x_{2,1}^u + F_7.x_{2,1}^d + F_9.x_{2,2}^u + F_{11}.x_{2,2}^d = P_{1,2}$$

$$F_3.x_{3,feed} + F_7.x_{3,1}^d + F_9.x_{3,2}^u + F_{11}.x_{3,2}^d = P_{1,3}$$

$$F_4.x_{1,feed} + F_6.x_{1,1}^u + F_8.x_{1,1}^d + F_{10}.x_{1,2}^u = P_{2,1}$$

$$F_4.x_{2,feed} + F_6.x_{2,1}^u + F_8.x_{2,1}^d + F_{10}.x_{2,2}^u + F_{12}.x_{2,2}^d = P_{2,2}$$

$$F_4.x_{3,feed} + F_8.x_{3,1}^d + F_{10}.x_{3,2}^u + F_{12}.x_{3,2}^d = P_{2,3}$$

(ح) جمع بستن ترکیب درصد مولی اجزا:

$$x_{1,1} + x_{2,1} + x_{3,1} = 1$$

$$x_{1,2} + x_{2,2} + x_{3,2} = 1$$

$$x_{1,1}^u + x_{2,1}^u = 1$$

$$x_{1,1}^d + x_{2,1}^d + x_{3,1}^d = 1$$

$$x_{1,2}^u + x_{2,2}^u + x_{3,2}^u = 1$$

$$x_{2,2}^d + x_{3,2}^d = 1$$

(خ) محدودیت های منطقی:

$$(F_1 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8) - F_{feed} \cdot y_1 \leq 0$$

$$(F_2 + F_9 + F_{10} + F_{11} + F_{12}) - F_{feed} \cdot y_2 \leq 0$$

y_1 و y_2 متغیرهای ۰-۱ هستند که وجود ستونهای I و II

را به ترتیب نشان می دهند.

(د) حدود بازیابی ها:

$$lb_{1,1} \leq r_{1,1}^{lk} \leq ub_{1,1}$$

$$lb_{2,1} \leq r_{2,1}^{hk} \leq ub_{2,1}$$

$$lb_{2,2} \leq r_{2,2}^{lk} \leq ub_{2,2}$$

$$lb_{3,2} \leq r_{3,2}^{hk} \leq ub_{3,2}$$

(ذ) شرایط غیر منفی و انتگرالی:

$$F_1, F_2, \dots, F_{12} \geq 0$$

$$F_5 + F_6 > 0$$

$$F_7 + F_8 + F_1 > 0$$

$$F_9 + F_{10} + F_2 > 0$$

$$F_{11} + F_{12} > 0$$

$$x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1}, x_{1,2}, x_{2,2}, x_{3,2} \geq 0$$

$$x_{1,1}^u, x_{2,1}^u, x_{1,1}^d, x_{2,1}^d, x_{3,1}^d \geq 0$$

$$x_{1,2}^u, x_{2,2}^u, x_{3,2}^u, x_{2,2}^d, x_{3,2}^d \geq 0$$

$$y_1, y_2 = 0 \text{ or } 1$$

The combination of mathematical and stochastic methods in the synthesis of non-sharp ternary separation unit

Tahereh Pirhoushyaran, Sirous Shafiei*

Chemical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In general, the non-sharp distillation columns sequence optimization problem is formulated as a MINLP with a non-linear objective function. This study is an attempt to provide a two-phase approach which categorizes the variables into two classes in order to simplification of the problem. A set of variables are managed and optimized by Genetic Algorithm, the other set of the remaining variables can be solved as a LP problem for estimated values of the first set. The study formulates some mathematical relationships between the first set of variables from the non-linear constraints so that by optimizing some of them, others are obtained with the assistance of the relationships. The method has the ability to obtain the best structure from the overall superstructure directly in short time without using any starting points for ternary separation. Three published examples were used to validate the proposed method.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: October 30, 2016

Received in revised form: May 15, 2017

Accepted: September 7, 2017

Key words:

optimization

non-sharp separation

MINLP

Genetic Algorithms

ternary separations

*Corresponding Author:

sshafiei@sut.ac.ir

All right reserved.