

طراحی بهینه برج‌های تقطیر دیواره‌میانی - مطالعه موردی سامانه بنزن، تولوئن و زایلین

سجاد عبدالله‌پور^۱، حسام احمدیان بهروز^{۲*}، علی فاضلی^۳ و^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۴- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه علوم و فناوری کره جنوبی

پیام‌نگار: ahmadian@sut.ac.ir

چکیده

طراحی یک برج تقطیر دیواره‌میانی برای جداسازی ترکیب سه جزئی بنزن، تولوئن و زایلین برای رسیدن به میزان خلوص نهایی حداقل ۹۹٪ مولی بررسی شده است؛ اثر تغییر در ترکیب درصد خوراک ورودی بر روی سه ساختار توالی مستقیم، توالی غیرمستقیم و برج دیواره‌میانی و انتخاب ساختار بهینه برطبق نتایج حاصل از بهینه‌سازی باهدف حداقل‌سازی هزینه‌های سالانه کل مطالعه شده است. برای ساختار تک‌برجی، در حالتی که کسر مولی اجزای خوراک مساوی باشند، نشان داده شده است که امکان کاهش هزینه انرژی مصرفی در جوش آور تا حدود ۳۰٪ و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در حدود ۲۷٪ نسبت به ساختار توالی مستقیم وجود دارد؛ ولی این امکان برای تمامی شرایط خوراک ممکن نیست. استفاده از ساختار دیواره‌میانی همواره باعث کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی می‌شود ولی با در نظر گرفتن هزینه‌های سالانه کل به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری، در حالتی که زایلین جزء غالب باشد ساختار غیرمستقیم مناسب‌تر است.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۳

شماره صفحات: ۶۶ تا ۸۰

کلیدواژه‌ها: برج تقطیر

دیواره‌میانی، بهینه‌سازی، کوپل

حرارتی، بنزن، تولوئن، زایلین

۱. مقدمه

مصرف آن در جهان، انرژی مصرفی [۱ و ۲] برای تولید مقادیر زیادی از این ترکیب همانند فرایند تقطیر نفت خام بسیار زیاد است. پس از جداسازی مواد غیر آروماتیک از راه فرایند تقطیر - استخراجی^۱، جداسازی و تهیه ترکیبات BTX به صورت خالص، به وسیله عملیات تقطیر که از فرایندهای بزرگ مصرف‌کننده انرژی در صنعت پتروشیمی است انجام می‌شود [۳ و ۴]. تقطیر در صنایع پتروشیمی و شیمیایی نقشی اساسی دارد و شامل ۹۵٪ از جداسازی مایعات و

بنزن، تولوئن و زایلین^۱ از جمله مواد شیمیایی مهم در صنایع پتروشیمی و بالادستی هستند که در تولید بسیاری از محصولات پتروشیمیایی به‌عنوان ماده اولیه یا ماده واسطه استفاده می‌شوند. تولید BTX، حاصل یک فرایند مولکول‌شکنی کاتالیستی به‌همراه فرایندهای استخراج و تقطیر است. در نتیجه و با توجه به میزان بالای

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند

2. Extractive Distillation

1. BTX

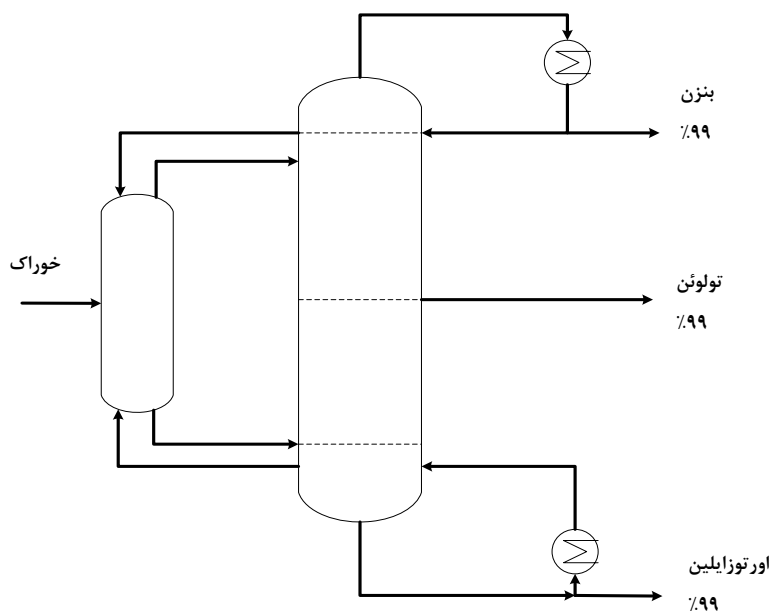
کاهش انرژی و هزینه نسبت به ساختارهای متوالی دارد. سه‌نوع کوپل حرارتی که بیشتر مطالعه شده‌اند عبارت‌اند از ساختار متوالی دارای یک جداساز جانبی^۴، ساختار متوالی دارای یک جریان‌ساز جانبی^۵ و ساختار کوپل کامل حرارتی یا همان ستون پتلیوک^۶. دانشمندان ساختار پتلیوک (شکل (۱)) را بیش از ۵۰ سال از جنبه‌های مختلف مطالعه کرده‌اند. بر اساس مطالعات انجام‌شده، ساختار پتلیوک می‌تواند نسبت به حالت ستون‌های متوالی حدود ۳۰٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی داشته‌باشد.

در ساختار پتلیوک می‌توان با قراردادن یک دیواره عمودی در وسط ستون، قسمت ورودی خوراک برج را از قسمت میانی برج جدا کرد و با تبدیل کردن به یک پوسته ستون و یک جوش‌آور و یک چگالنده نسبت به حالت ستون متوالی می‌توان کاهش در هزینه‌های ثابت را پیش‌بینی کرد که به این ساختار جدید برج تقطیر دیواره‌میانی^۷ گفته می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده‌است. طراحی برج‌های تقطیر دیواره‌میانی [۶] تاکنون به وسیله محققان بسیاری از جمله جانا [۷]، ژنگ و همکاران [۸]، وانگ و همکاران [۹]، ال گاندی و همکاران [۱۰]، رامیرز و همکاران [۱۱] و سیهاب و همکاران [۱۲] مطالعه شده‌است.

همچنین ۳٪ از مصرف‌کنندگان انرژی در جهان است. تقطیر، فرایند جداسازی متداولی است که به‌طور گسترده در فرایندهای مربوط به مواد شیمیایی صنعتی استفاده می‌شود و اگرچه دارای کاستی‌هایی در تأمین انرژی موردنیاز آن شامل افزایش میزان گازهای گلخانه‌ای و هدررفت انرژی در جهان است ولی با استفاده سامانه‌ای از روش‌های انتگرال‌یون حرارتی می‌توان انرژی موردنیاز فرایند تقطیر را کاهش داد [۵].

روش متداول در جداسازی BTX استفاده از ستون‌های تقطیر متوالی است که هرکدام از ستون‌ها شامل جوش‌آور و چگالنده مربوط به خود است که این امر باعث اتلاف انرژی در مبدل‌های حرارتی می‌شود و مقرون به صرفه نیست [۳]. کاهش اتلاف انرژی نیز یکی از راه‌کارهای کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های ناشی از آن است. یکی از علل اصلی اتلاف انرژی، تلفات ناشی از اختلاط^۱ است که ناشی از اختلاط مجدد ماده دارای نقطه جوش میانی^۲ در انتهای ستون تقطیر در ساختارهای متوالی مستقیم و غیرمستقیم است.

کوپلینگ حرارتی^۳ در فرایند تقطیر می‌تواند تلفات ناشی از اختلاط را کاهش دهد. طراحی سامانه‌های تقطیر همراه با کوپل حرارتی در سال‌های اخیر بسیار مطالعه شده‌است؛ زیرا که توان بالقوه‌ای در



شکل ۱. ساختار پتلیوک.

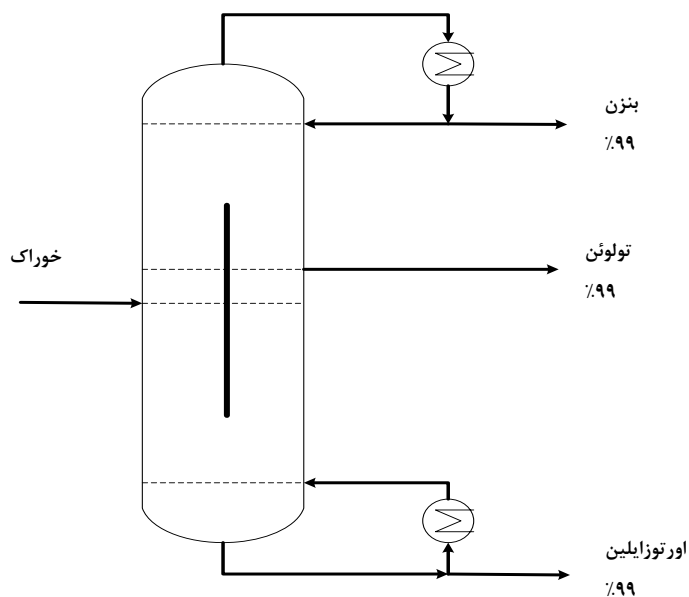
- | | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 1. Mixing Losses | 2. Intermediate Boiling | 3. Thermal Coupling | 4. Side-Rectifier Arrangement |
| 5. Side-Stripper Arrangement | 6. Petlyuk | 7. Dividing-Wall Column | |

آینده به‌عنوان روش تقطیر استاندارد استفاده شود. مطالعات متعددی به‌وسیله محققان زیادی در مورد برج‌های تقطیر دیواره‌میانی انجام شده‌است که می‌توان به کار داژنویچ و همکاران [۱۶] اشاره کرد، که مرور جامعی بر روی برج دیواره‌میانی با دیدگاه کاربرد صنعتی و مسائل کنترلی برج انجام داده‌اند.

چالش‌های مرتبط با کنترل فرایند، مانع از پیشرفت این خانواده از برج‌های تقطیر شد تا اینکه کیبل دو سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۷ این برج را از نو در کانون توجه قرارداد و عبدالمطلب و اسمیت [۶] در سال ۱۹۹۸ کارهای متعددی در حوزه شبیه‌سازی دینامیک و کنترل این برج انجام دادند. همچنین در سال ۲۰۰۲ مورال کریشنا و همکارانش [۱۷] بر روی طراحی آن‌ها به نتایج خوبی رسیدند و تاکنون طرح‌های صنعتی زیادی به‌وسیله شرکت‌های مونتر^۱ و بسف به‌منظور افزایش بهره‌وری این برج‌ها طراحی و ساخته شده‌است [۱۸]. علاوه بر تأثیری که نوع اجزای تشکیل‌دهنده خوراک بر ساختار بهینه انتخابی و مؤلفه‌های آن دارد، ترکیب درصد خوراک نیز می‌تواند بر این انتخاب مؤثر باشد. به‌عنوان یک قاعده سرانگشتی پیشنهاد می‌شود که جزئی که بیشترین مقدار را دارد در ابتدای فرایند تفکیک شود؛ به‌عنوان مثال اگر جزء سبک بیشترین مقدار خوراک را تشکیل می‌دهد، ساختار مستقیم بر ساختار غیرمستقیم ارجحیت دارد.

کویل حرارتی برج‌های تقطیر در جداسازی چندجزئی یکی از راه‌حل‌های کاهش میزان مصرف انرژی است. برج تقطیر دیواره‌میانی ابزاری مناسب برای پیاده‌سازی عملی چنین آرایش‌هایی است که با توجه به تجمع دو یا چند برج در قالب یک برج واحد می‌تواند هزینه ساخت برج را نیز کاهش دهد. از کاربردهای برج‌های دیواره‌میانی در صنعت می‌توان به موارد متعددی از جمله جداسازی ترکیبات بنزن، تولوئن و زایلین با ۴۳٪ کاهش در هزینه‌های عملیاتی و ۱۴٪ کاهش در هزینه‌های ثابت اولیه نسبت به حالت تقطیر معمول و همچنین ترکیبات بنزن، تولوئن و اتیل بنزن با کاهش ۳۵٪ در هزینه عملیاتی و ۱۴٪ در هزینه‌های ثابت اولیه اشاره کرد [۱۳].

لازم به ذکر است که ادغام دو ستون و تبدیل آن به یک ستون به‌عنوان برج‌های دیواره‌میانی، باعث تداخل^۱ میان متغیرهای کنترلی سامانه برج تقطیر خواهد شد و همین موضوع، عنوان تحقیق عده‌ای از محققان قرار گرفته‌است. برج‌های تقطیر دیواره‌میانی به‌عنوان یک اختراع در سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ مطرح شد و آقای پتلیوک و همکارانش تحقیقات بسیاری برای پیشرفت این نظریه داشتند [۱۴]. طراحی ابتدایی برج زایلین در سال ۱۹۴۹ به‌وسیله آقای رایت انجام شده‌است [۱۵]. سرانجام اولین برج زایلین در سال ۱۹۸۵ به‌وسیله شرکت بسف^۲ به طراحی صنعتی انجامید و تا سال ۲۰۱۰ به بیش از ۱۰۰ مورد در جهان رسید و پیش‌بینی می‌شود تا ۵۰ سال



شکل ۲. برج تقطیر دیواره‌میانی.

نیز به دست آوردن حالت بهینه از منظر اقتصادی برای ترکیب درصدهای مختلف خوراک ورودی به سامانه جداسازی تقطیر است. به عبارتی دیگر هدف بررسی اثر ترکیب درصد خوراک بر انتخاب آرایش‌های یادشده است.

خوراک مورد مطالعه در این مقاله ترکیب سه جزئی بنزن، تولوئن و زایلین با نقاط جوش به ترتیب ۳۵۳ کلوین، ۳۸۵ کلوین و ۴۱۹ کلوین است. خوراک ورودی در دمای ۳۵۸ درجه کلوین و فشار ۱ هواکره در نظر گرفته شده است. فرایند تقطیر به روش توالی مستقیم مطابق شکل (۳) از دو برج و دو چگالنده و دو جوش آور شکل یافته است. خوراک وارد برج اول می‌شود و جریان بالای برج اول به عنوان محصول بنزن و جریان پایین برج اول ترکیبی از تولوئن و زایلین است که وارد برج دوم می‌شود و محصول بالای برج دوم به عنوان محصول تولوئن و محصول پایین برج دوم به عنوان محصول زایلین است.

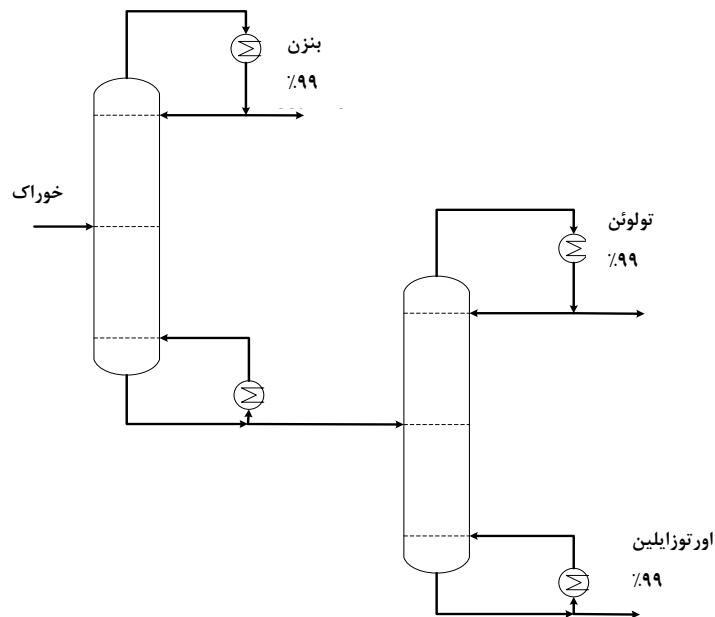
فرایند تقطیر به روش توالی غیرمستقیم مطابق شکل (۴) از دو برج و دو چگالنده و دو جوش آور شکل یافته است. خوراک به برج اول وارد می‌شود و جریان پایین برج اول به عنوان محصول زایلین خارج می‌شود و جریان بالای برج شامل بنزن و تولوئن است که وارد برج دوم می‌شود. جریان بالای برج دوم به عنوان محصول بنزن و جریان پایین آن به عنوان محصول تولوئن است.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود پیکربندی و طراحی منحصر به فرد برج تقطیر دیواره‌میانی به دلیل وجود دیواره عمودی در وسط پوسته ستون، برج را به دو قسمت خوراک و جریان جانبی تقسیم می‌کند و از پدیده اختلاط خوراک در وسط برج جلوگیری می‌کند، بازده سینی‌ها را بالا می‌برد و خلوص محصول بیشتر می‌شود. برای جداسازی سه جزء، می‌توان دیوار جداکننده را در محل‌های مختلفی قرارداد. در اولین نوع که به وسیله رایت [۱۹] ثبت شده و متداول تر است، دیوار جداکننده و همچنین خوراک و پیش‌نیازهای جانبی معمولاً در وسط ستون قرار می‌گیرند. پیکره‌های مختلف برج بر اساس تعداد اجزای خوراک ورودی به برج می‌تواند به حالت‌های مختلف باشد [۲۰]. از دیگر اجزای برج تقطیر دیواره‌میانی تقسیم‌کننده مایع و بخار است که به کار بردن تقسیم‌کننده مایع در بالای برج دیواره‌میانی نشان‌دهنده انتقال جریان برگشتی به دو طرف دیواره در برج است.

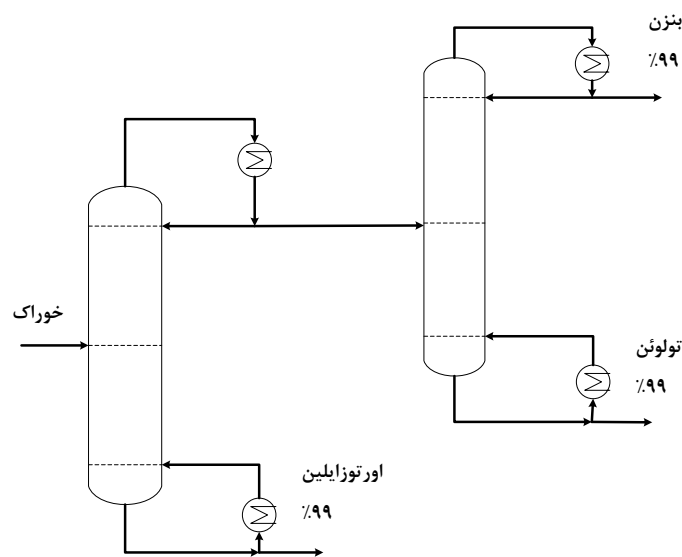
در این کار ما دنبال پاسخ به این سؤال هستیم که برای سامانه BTX برای رسیدن به یک خلوص مشخص از محصولات، چه آرایشی از برج‌های تقطیر بهینه است و اینکه ترکیب درصد اجزای تشکیل‌دهنده خوراک چه تأثیری بر نوع آرایش بهینه برج‌های تقطیر و مؤلفه‌های آن دارد؛ به عنوان مثال در صورتی که برای یک ترکیب درصد مشخصی از خوراک، استفاده از برج دیواره‌میانی باعث کاهش هزینه‌های انرژی و نیز سرمایه‌گذاری شود، آیا عوض شدن ترکیب درصد اجزا در خوراک بر این رفتار تأثیری دارد و آیا می‌توان نتایج به دست آمده را تعمیم داد؟ برای پاسخ به این پرسش، ابتدا آرایش برج‌ها در سه ساختار توالی مستقیم، توالی غیرمستقیم و برج دیواره‌میانی بررسی شده است و سپس با توجه به اینکه برای شبیه‌سازی برج دیواره‌میانی در نرم‌افزارهای تجاری در حال حاضر مازول آماده‌ای در دسترس نیست، الگوهای موجود برای این منظور بررسی و مقایسه خواهند شد. در پایان، شبیه‌سازی براساس بهترین الگوی پیشنهادی انجام خواهد گرفت. از آنجایی که مسأله طراحی فرایند را می‌توان در قالب یک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف هزینه، قیدهای فرایندی همچون خلوص محصولات و نیز مؤلفه‌های طراحی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری نیز در نظر گرفت، این نگرش مبنای کار طراحی برای همه ساختارها قرار می‌گیرد و جزئیات آن شامل تابع هدف، قیود و متغیرهای تصمیم‌گیری بحث خواهد شد. همچنین با توجه به درجه آزادی در هر یک از ساختارهای مورد بررسی، متغیرهای تصمیم‌گیری برای آن ساختار مشخص می‌شود و در فرمول‌بندی مسأله بهینه‌سازی به کار خواهد رفت. در این راستا، در بخش ۲ به طرح دقیق مسأله مورد بررسی پرداخته و نیز شبیه‌سازی سامانه بحث خواهد شد. در بخش ۳، هم‌نهایت فرایند به کمک بهینه‌سازی ارائه شده و در بخش ۴، مقایسه نتایج از منظر اقتصادی برای ساختارهای مختلف مد نظر خواهد بود. در پایان و در بخش ۵ به نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

۲. طرح مسأله

هدف اصلی از تحقیق انجام‌شده، مقایسه نتایج حاصل از فرایند جداسازی ترکیب سه جزئی بنزن، تولوئن و زایلین به اجزای با خلوص ۹۹٪ مولی با استفاده از روش تقطیر در حالت‌های توالی مستقیم، توالی غیرمستقیم و تقطیر با استفاده از برج دیواره‌میانی و



شکل ۳. توالی مستقیم.



شکل ۴. توالی غیر مستقیم.

فیزیکی^۲ چاوو سیدر^۳ برای فرایند جداسازی این سه ترکیب مناسب است.

به منظور امکان استفاده از آب خنک کن در چگالنده برجها، فشارهای عملیاتی به گونه ای انتخاب می شوند که دمای بالای برج برابر ۳۲۲ کلوین شود. بنابراین در ساختار توالی مستقیم، فشار برج اول و دوم به ترتیب برابر ۰/۳۷ و ۰/۱۳ هواکره و برای ساختار توالی

۱-۲ شبیه سازی

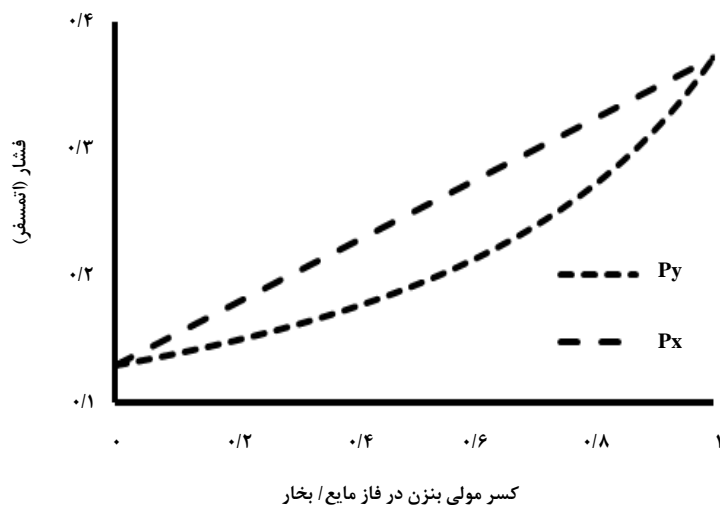
شبیه سازی ساختارهای معرفی شده با استفاده از الگوهای غیر خطی و دقیق در نرم افزار شبیه ساز اسپن پلاس انجام شده است که الگوی ردفرک^۱ برای شبیه سازی برج تقطیر استفاده و شماره گذاری پیش فرض نرم افزار، به صورت مخزن جریان بازگشتی معادل مرحله ۱ و جوش آور معادل مرحله نهایی رعایت شده است. بسته ویژگی های

2. Physical Property Package
3. Chao-Seader

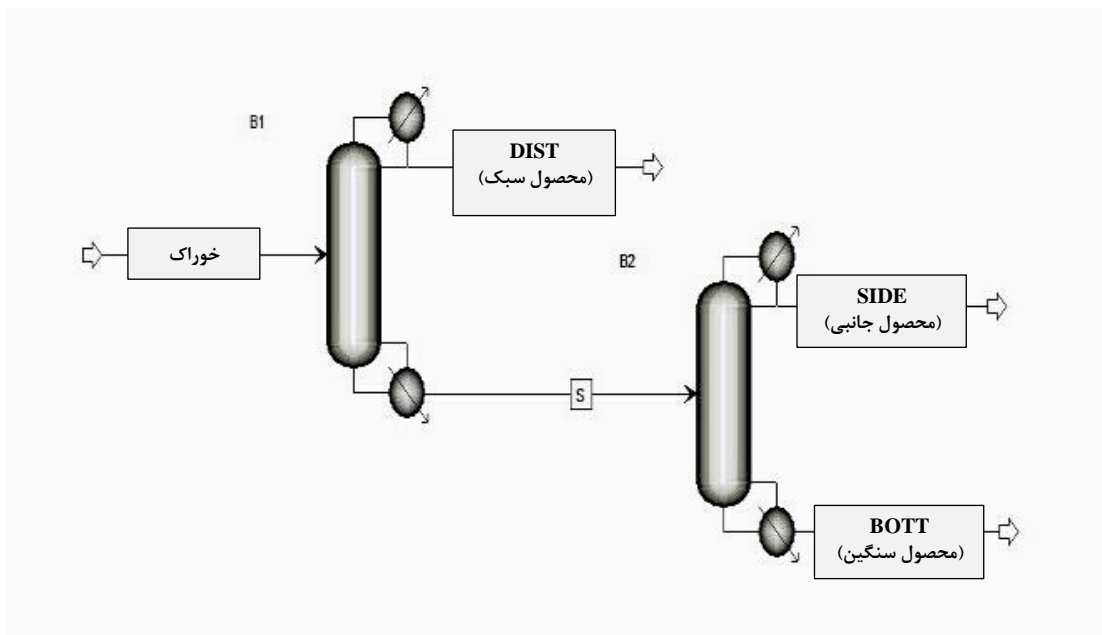
1. RadFrac

جریان FEED به‌عنوان خوراک، جریان S به‌عنوان جریان ورودی به برج دوم و جریان DIST به‌عنوان محصول بالای برج و جریان BOTT به‌عنوان محصول پایین برج معرفی شده‌اند. چگالنده‌ها از نوع کامل است و جوش‌آورها از نوع کتل^۱ است. به‌ترتیب ساختار شبیه‌سازی برای توالی مستقیم و غیرمستقیم در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌است.

غیرمستقیم، فشار برج اول با توجه به شکل (۵) که نمودار Pxy مخلوط بنزن و تولوئن در دمای ۳۲۲ کلوین است انتخاب می‌شود و فشار برج دوم با توجه به محصول بالای آن که تولوئن است برابر ۰/۳۷ هواکره است. در ساختار DWC هم‌فشار بالای برج برابر ۰/۳۷ هواکره خواهد بود. در محیط شبیه‌سازی برای حالت توالی مستقیم و غیرمستقیم،

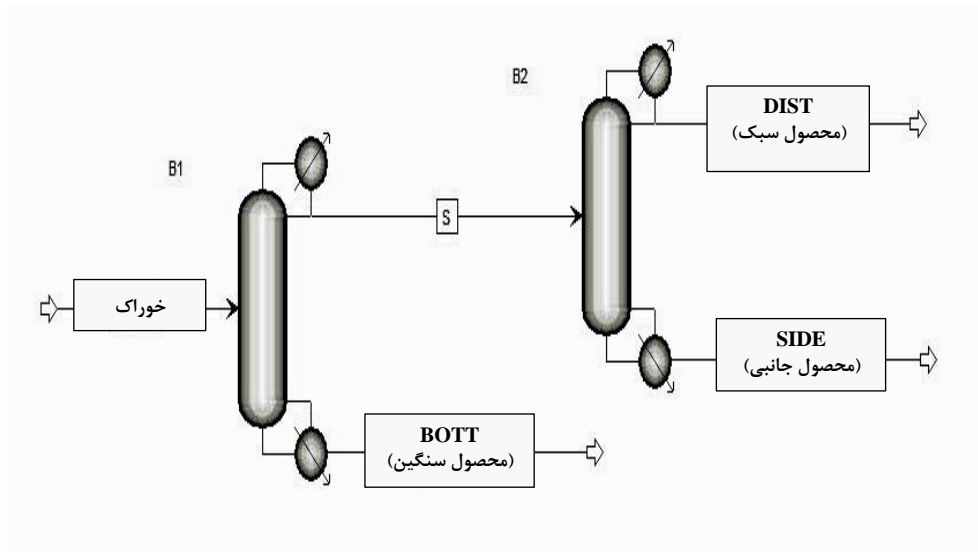


شکل ۵. نمودار Pxy مخلوط بنزن و تولوئن در دمای ۳۲۲ کلوین.

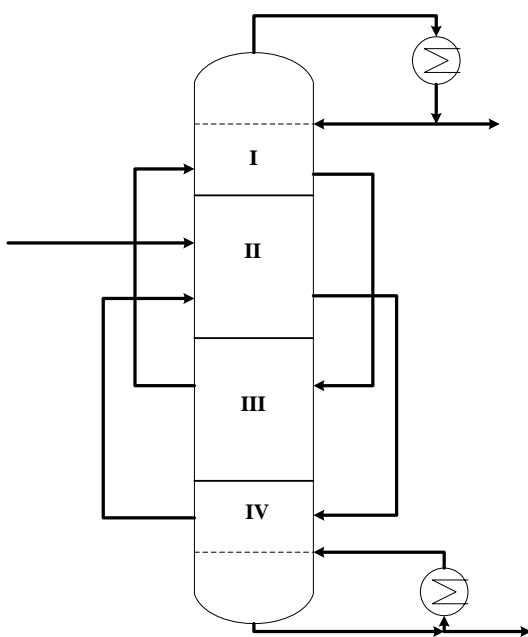


شکل ۶. ساختار توالی مستقیم.

1. Kettle



شکل ۷. ساختار توالی غیرمستقیم.



شکل ۸. الگوی پمپ جانبی معادل برج تقطیر دیواره‌میانی

۲-۲ الگوی دو ستون

این الگو مطابق شکل (۹) دارای دو ستون است که از لحاظ ترمودینامیک شبیه به برج دیواره‌میانی است. این الگو نسبت به الگوی پمپ جانبی دارای انعطاف بیشتری است؛ ولی نتایج حاصل از آن تقریباً مشابه حالت پمپ جانبی است [۲۱].

۲-۲ شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره‌میانی

تاکنون الگوی استاندارد و قابل اطمینانی از برج تقطیر دیواره‌میانی در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ارائه نشده است تا با استفاده از آن کار شبیه‌سازی انجام و نتایج رضایتمندی کسب شود. بنابراین الگوهای مختلفی با برج‌های متعددی در چینش‌های مناسب برای الگوسازی برج دیواره‌میانی ارائه شده است که موضوع تحقیق بسیاری از محققان بوده است که به بررسی و معرفی چندی از آن‌ها می‌پردازیم.

۱. الگوی پمپ جانبی

۲. الگوی دو ستون

۳. الگوی سه ستون

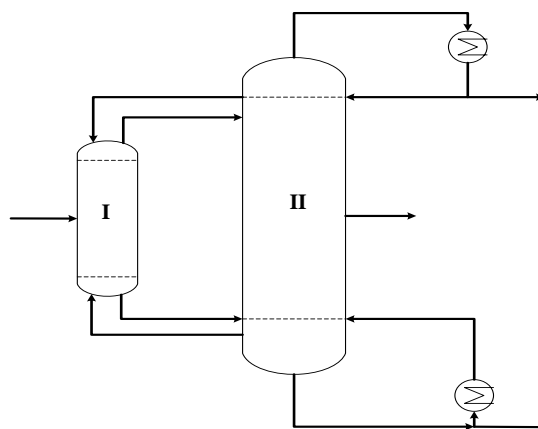
۴. الگوی چهارستون

۲-۲-۱ الگوی پمپ جانبی

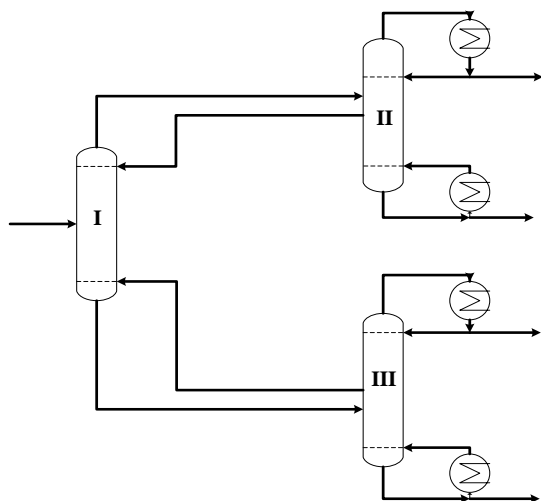
این الگو یک روش ساده و ابتدایی برای الگوسازی برج دیواره‌میانی است که برج دیواره‌میانی می‌تواند مانند شکل (۸) در یک برج که دارای قسمت‌های مختلفی که روی هم به صورت عمودی چیده شده‌اند؛ نشان داده شود و جریان‌های مایع و بخار به وسیله پمپ‌هایی که در دور برج قرار دارند بین قسمت‌های مختلف برج تبادل می‌شوند. اما مشکل بزرگ این الگو آن است که کل دبی‌های مایع و بخار برج به دو نقطه کشیده می‌شوند و قسمت‌های دیگر برج خالی از جریان مایع و بخار باقی می‌مانند.

است که پیچیدگی‌هایی نیز دارد. در این تحقیق، الگوی استفاده‌شده برای شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره‌میانی، الگوی چهارستون است.

برای شبیه‌سازی فرایند تقطیر با برج تقطیر دیواره‌میانی با استفاده از ساختار معادل چهارستون، مطابق شکل (۱۱) که شامل چهارستون و یک چگالنده و یک جوش‌آور است که قسمت بالای برج و پایین برج و قسمت جریان جانبی و قسمت ورودی خوراک با ستون‌های مجزا مشخص شده‌اند.



شکل ۹. الگوی دو ستون معادل برج تقطیر دیواره‌میانی.



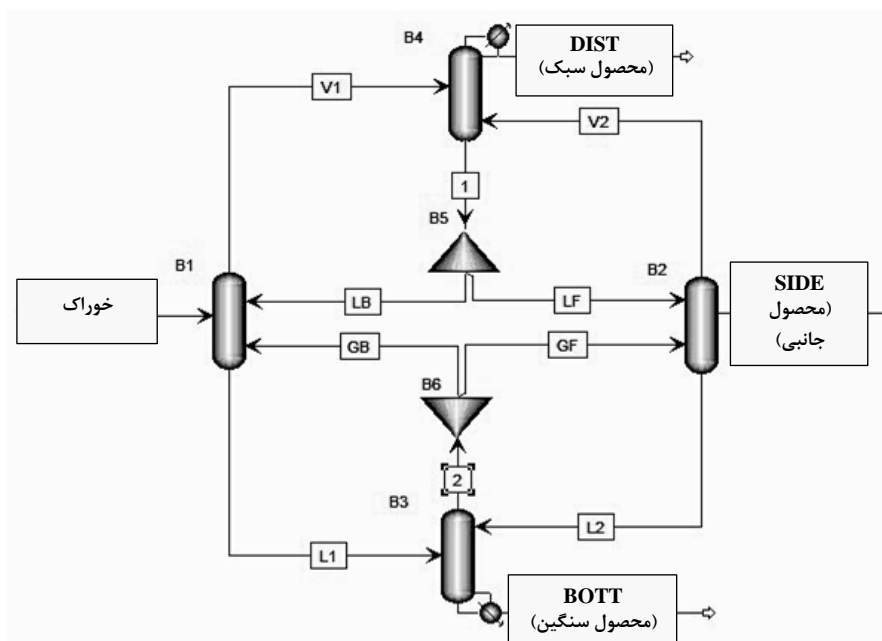
شکل ۱۰. الگوی سه ستون معادل برج تقطیر دیواره‌میانی.

۲-۲-۳ الگوی سه ستون

این الگو مطابق شکل (۱۰) شامل سه برج جداگانه است که قسمت‌های بالای برج و پایین برج به صورت برج‌های جداگانه نشان داده می‌شود و جریان پایین برج بالا و جریان بالای برج پایین، جمع و به‌عنوان محصول میانی خارج می‌شود.

۲-۲-۴ الگوی چهارستون

در پایان این الگو بهترین و کامل‌ترین الگویی است که تاکنون ارائه شده‌است و دارای بیشترین انعطاف در مقاردهی و طراحی قسمت‌های مختلف برج دیواره‌میانی است و البته لازم به یادآوری



شکل ۱۱. ساختار چهارستون معادل برج تقطیر دیواره‌میانی.

نسبت جوش‌آوری^۲، نسبت توزیع جریان مایع برگشتی بین دو سمت دیواره و نیز نسبت توزیع جریان بخار برگشتی بین دو سمت دیواره است. لازم به ذکر است که با توجه به این که تعداد سینی‌ها در دو طرف دیواره‌میانی برج یعنی طرف خوراک و محصول میانی باهم برابرند؛ بنابراین تعداد سینی‌ها در قسمت بالای دیواره، سمت خوراک دیواره، محل ورود خوراک، محل سینی محصول میانی و نیز قسمت پایین دیواره به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری لحاظ خواهند شد.

۳-۲ تابع هدف

بر مبنای روابط ارائه‌شده در مرجع [۲۲]، تابع هدف اقتصادی، حداقل‌سازی هزینه‌های سالانه کل^۳ است که برای مبنای هزینه‌های عملیاتی سالانه (انرژی مصرفی در جوش آور) و هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه (مجموع هزینه‌های مبدل‌ها و پوسته برج) با ۳ سال دوره بازگشت سرمایه و ۸۰۰۰ ساعت عملیاتی در طول سال حساب می‌شود. لازم به ذکر است که به‌علت پیچیدگی‌های بیشتر در اجزا و ساختار داخلی برج دیواره‌میانی نسبت به برج‌های متداول، ۲۰٪ هزینه ساخت اضافی برای پوسته برج نسبت به میزان محاسبه‌شده از فرمول جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱) مؤلفه‌های اقتصادی را نشان می‌دهد که در آن ارتفاع برج با در نظر گرفتن ۰/۶۱ متر فاصله بین‌سینی هر دو سینی و ۲۰٪ طول پوسته اضافی حساب می‌شود. هزینه بخار مصرفی نیز ۷/۷۸ دلار به ازای هر گیگاژول است.

برای به‌دست‌آوردن قطر برج دیواره‌میانی، ابتدا قطر هر یک از برج‌های B1 تا B4 در شکل (۱۱) از راه ابزار Tray Sizing در نرم‌افزار اسپن‌پلاس حساب می‌شود، سپس قطر معادل بخش دیواره‌دار برج از راه رابطه (۱) به‌دست‌می‌آید. در پایان بزرگ‌ترین مقدار از میان قطر برج‌های B1، قسمت میانی D_e و برج B3 به‌عنوان قطر برج دیواره‌میانی انتخاب می‌شود.

$$A_e = \frac{\pi D_e^2}{4} = A_{B1} + A_{B2} = \frac{\pi D_{B1}^2}{4} + \frac{\pi D_{B2}^2}{4} \quad (1)$$

لازم به ذکر است که به‌علت پیچیدگی‌های بیشتر در اجزا و ساختار داخلی برج دیواره‌میانی نسبت به برج‌های متداول، ۲۰٪ هزینه

خوراک ورودی وارد ستون اول می‌شود و ستون بالا شامل یک چگالنده است و ستون پایین شامل یک جوش‌آور است؛ بخار تولیدشده از جوش‌آور ستون پایین به‌وسیله یک جداکننده بخار بین دو ستون جانبی تقسیم می‌شود و نیز جریان مایع خروجی از انتهای ستون بالا به‌وسیله یک جداکننده مایع بین دو ستون جانبی تقسیم می‌شود. نسبت جداسازی مایع و بخار در این جداکننده‌ها بر خلوص نهایی محصولات و بار حرارتی چگالنده و جوش‌آور تأثیرگذار خواهد بود. محصول خروجی از چگالنده ستون بالا به‌عنوان محصول بنزن و محصول خروجی از جوش‌آور ستون پایین به‌عنوان محصول زایلین به شمار می‌آید. محصول جانبی تولوئن نیز از ستون جانبی سمت راست خارج می‌شود. تمامی برج‌ها از نوع سینی‌دار هستند و چگالنده از نوع کامل و جوش‌آور از نوع کنترل است. در محیط شبیه‌سازی همانند شکل (۱۱) خوراک با جریان FEED نشان داده می‌شود؛ جریان‌های بالای برج و میانی و پایین برج به ترتیب بانام DIST و SIDE و BOTT نشان داده می‌شود و طبق فرایند توضیح داده‌شده جریان‌های خوراک و محصولات و همچنین چگالنده و جوش‌آور جانمایی می‌شوند.

۳. بهینه‌سازی

۳-۱-۲ متغیرهای تصمیم‌گیری

برای طراحی بهینه هر یک از سه ساختار بحث‌شده شامل توالی مستقیم، توالی غیرمستقیم و برج دیواره‌میانی، یک مسأله بهینه‌سازی قطعی^۱ تعریف می‌شود که متغیرهای تصمیم‌گیری آن (شامل متغیرهای تصمیم‌گیری طراحی و عملیاتی) به شرح زیر است:

برای هر یک از برج‌ها در ساختار مستقیم و نیز غیرمستقیم، متغیرهای تصمیم‌گیری عبارت است از تعداد سینی‌های بالای سینی ورود خوراک، تعداد سینی‌های پایین سینی ورود خوراک، نسبت برگشتی. هم‌چنین دبی جریان محصول بالای برج برای ساختار مستقیم و دبی جریان محصول پایین برج برای ساختار غیرمستقیم جزء متغیرهای تصمیم‌گیری هستند.

در مورد ساختار برج دیواره‌میانی، تعداد درجات آزادی بیشتر است و شامل تعداد سینی‌ها در هر یک از بخش‌های برج، نسبت برگشتی،

2. Boil-Up Ratio
3. Total Annual Cost (TAC)

1. Deterministic

ساخت اضافی برای پوسته برج نسبت به میزان حساب شده از فرمول جدول (۱) لحاظ می‌شود.

جدول ۱. مؤلفه‌های اقتصادی.

$c_1(\$) = 17640(ID_c)^{1.066}(L)^{0.802}$ $L = N \times 0.61 \times 1.2$	پوسته برج
$c_2(\$) = 7296(A_c)^{0.65}$, $U_c = 0.852 \frac{kW}{K \cdot m^2}$	چگالنده
$c_3(\$) = 7296(A_R)^{0.65}$, $U_R = 0.568 \frac{kW}{K \cdot m^2}$	جوش آور

۳-۳ قید

به منظور اطمینان از کیفیت محصولات نهایی، سه قید در مورد حداقل خلوص محصولات در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به فراریت نسبی مواد، ترکیب بالای برج شامل حداقل ۹۹٪ مولی بنزن و ترکیب جریان جانبی برج شامل حداقل ۹۹٪ مولی تولوئن و ترکیب پایین برج شامل حداقل ۹۹٪ مولی زایلین است.

۴. ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

مسئله بهینه‌سازی مطرح شده در بخش ۳ به‌ازای ترکیب درصدی مختلفی از خوراک شامل ۴ حالت زیر حل و نتایج اصلی در جداول (۲) تا (۵) خلاصه شده‌است.

حالت ۱: کسر مولی هر سه جز برابر باشد.

حالت ۲: بنزن جزء غالب (۷۵٪ مولی بنزن، ۱۲/۵٪ مولی تولوئن و ۱۲/۵٪ مولی زایلین).

حالت ۳: تولوئن جزء غالب (۱۲/۵٪ مولی بنزن، ۷۵٪ مولی تولوئن و ۱۲/۵٪ مولی زایلین).

حالت ۴: زایلین جزء غالب (۱۲/۵٪ مولی بنزن، ۱۲/۵٪ مولی تولوئن و ۷۵٪ مولی زایلین).

بعد از شبیه‌سازی هریک از ساختارهای مورد بحث در محیط نرم‌افزار اسپن‌پلاس [۲۴] و نیز پیاده‌سازی الگوی اقتصادی در محیط نرم‌افزار متلب [۲۳]، ارتباط بین این دو نرم‌افزار از راه فناوری COM برقرار می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری به‌وسیله بهینه‌ساز از محیط متلب به محیط اسپن‌پلاس ارسال می‌شود و بعد از انجام شبیه‌سازی و بررسی همگرایی، مؤلفه‌های موردنیاز برای محاسبه قیود همچون

خلوص محصولات و نیز محاسبات اقتصادی همچون بار حرارتی از شبیه‌سازی استخراج می‌شود و در الگوی اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از ارزیابی مقدار قیود و تابع هدف به‌وسیله بهینه‌ساز، مقادیر به‌روز شده متغیرهای تصمیم‌گیری برای ادامه روند بهینه‌سازی به شبیه‌ساز ارسال شده و این چرخه تا محقق شدن همگرایی ادامه پیدا می‌کند.

با جمع‌بندی و بررسی نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی هر سه ساختار به ازای هریک از حالت‌های فرض شده برای خوراک، به نکات زیر می‌توان اشاره کرد:

فرایند جداسازی BTX، یک فرایند با میزان مصرف انرژی بالا است؛ به‌عنوان مثال در توالی مستقیم به‌ازای خوراک با کسر مولی برابر هر سه جز، مجموع هزینه انرژی مصرفی در جوش آور ۱۱/۹ میلیون دلار است درحالی‌که مجموع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ستون‌های تقطیر و مبدل‌های مربوطه، ۷/۱۳ میلیون دلار است. در نتیجه ۸۳٪ از TAC این فرایند مربوط به هزینه‌های انرژی است و کاهش این هزینه‌ها از راه کوپل حرارتی به‌شدت موردنیاز است.

اکنون به مقایسه سه ساختار بحث شده برای یکی از حالات خوراک می‌پردازیم؛ به‌عنوان مثال، ساختار بهینه برای حالت ۱ که در آن کسر مولی هر سه جز باهم برابر هستند در جدول (۲) آورده شده‌است که در این جدول، مؤلفه‌های اساسی این سه ساختار از جمله بار حرارتی و دمای چگالنده و جوش آور، تعداد سینی و محل سینی خوراک و محصول جانبی، نسبت برگشتی و نسبت جوش‌آوری در کنار مؤلفه‌های اقتصادی مانند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ساخت ستون و مبدل‌ها، هزینه انرژی و TAC مشخص شده‌است.

همان‌طور که در جدول (۲) آمده‌است، برای خوراکی با ترکیب درصد مساوی از اجزا، ساختار توالی مستقیم متشکل از دو برج به‌ترتیب با قطرهای ۶/۶ و ۸/۱۴ متر و ۳۲ و ۲۴ سینی است. ساختار توالی غیرمستقیم نیز از دو برج به‌ترتیب با قطرهای ۸/۸۵ و ۶/۲۷ متر و ۲۴ و ۳۱ سینی تشکیل شده‌است. با وجودی که مجموع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای هر دو ساختار تقریباً برابر است ولی مجموع هزینه انرژی دو برج در توالی مستقیم حدود ۱۶/۸٪ نسبت به توالی غیرمستقیم کمتر است و از میان این دو ساختار، با در نظر گرفتن شاخص TAC، مشخص است که ساختار توالی مستقیم انتخاب

جایگزین ساختارهای متداول مستقیم و غیرمستقیم شود قطری برابر ۷/۲۵ متر و ۴۵ سینی خواهد داشت که این جایگزینی می‌تواند حدود ۳۰٪ در هزینه انرژی مصرفی در جوش آور و حدود ۲۷٪ در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به مجموع برج‌ها و مبدل‌های ساختار توالی مستقیم صرفه‌جویی به دنبال داشته باشد و در مجموع باعث کاهش ۲۹/۵٪ در TAC فرایند تک‌برجی شود.

مناسب‌تری خواهد بود. مجموع بار حرارتی جوش آورها در توالی مستقیم برابر با ۵۳ مگاوات است که این مقدار برای برج دیواره‌میانی حدود ۳۷ مگاوات است. از لحاظ تعداد مراحل جداسازی نیز تعداد ۴۵ سینی برج دیواره‌میانی می‌تواند همان جداسازی صورت گرفته در دو برج با ۳۲ و ۲۴ سینی در توالی مستقیم را فراهم نماید. بنابراین براساس نتایج بهینه‌سازی، برج دیواره‌میانی که می‌تواند

جدول ۲. نتایج بهینه‌سازی برای حالت ۱ از خوراک.

برج دیواره‌میانی	توالی غیرمستقیم			توالی مستقیم			
	مجموع	برج دوم	برج اول	مجموع	برج دوم	برج اول	
۴۵	۵۵	۳۱	۲۴	۵۶	۲۴	۳۲	تعداد سینی
۲۵		۱۵	۱۳		۱۳	۱۵	محل سینی خوراک
۲۱							محل سینی محصول جانبی
۲/۵۰		۱/۲۴	۰/۶۳		۱/۲۹	۱/۵۵	نسبت برگشتی
۳/۱۵		۳/۴۶	۲/۷۳		۱/۸۴	۱/۱۸	نسبت جوش‌آوری
۷/۲۵		۶/۲۷	۸/۸۵		۸/۱۴	۶/۶۰	قطر ستون (متر)
۰/۲۷							نسبت توزیع جریان مایع
۰/۴۰							نسبت توزیع جریان بخار
۳۶/۲۵	۶۳/۴۶	۲۴/۳۱	۳۹/۱۵	۵۵/۵۶	۲۸/۰۰	۲۷/۵۷	بار حرارتی چگالنده (مگاوات)
۳۷/۲۵	۶۳/۸۲	۲۷/۹۸	۳۵/۸۴	۵۳/۱۱	۲۴/۴۰	۲۸/۷۱	بار حرارتی جوش‌آور (مگاوات)
۲/۳۳	۴/۲۲	۱/۸۵	۲/۳۷	۳/۸۴	۱/۸۸	۱/۹۵	هزینه مبدل‌ها (میلیون دلار)
۲/۴۰	۳/۳۲	۱/۵۳	۱/۷۹	۳/۲۹	۱/۶۴	۱/۶۵	هزینه ستون (میلیون دلار)
۵/۲۱	۷/۵۴	۳/۳۸	۴/۱۷	۷/۱۳	۳/۵۲	۳/۶۱	مجموع هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)
۸/۳۵	۱۴/۳۰	۶/۲۷	۸/۰۳	۱۱/۹۰	۵/۴۷	۶/۴۳	هزینه انرژی (میلیون دلار)
۱۰/۰۸	۱۶/۸۱	۷/۴۰	۹/۴۲	۱۴/۲۸	۶/۶۴	۷/۶۴	هزینه سالانه کل (میلیون دلار)

جدول ۳. نتایج بهینه‌سازی برای حالت ۲ از خوراک.

برج دیواره‌میانی	توالی غیرمستقیم			توالی مستقیم			
	مجموع	برج دوم	برج اول	مجموع	برج دوم	برج اول	
۴۰	۵۰	۲۷	۲۳	۴۹	۲۳	۲۶	تعداد سینی
۲۳		۱۳	۱۴		۱۲	۱۳	محل سینی خوراک
۲۲							محل سینی محصول جانبی
۰/۶۷		۰/۶۰	۰/۲۷		۱/۳۳	۰/۶۵	نسبت برگشتی
۸/۰۷		۱۰/۴۰	۶/۴۵		۱/۸۰	۴/۱۷	نسبت جوش‌آوری
۷/۳۳		۷/۷۴	۸/۵۳		۴/۸۱	۷/۲۸	قطر ستون (متر)
۰/۳۴							نسبت توزیع جریان مایع
۰/۲۵							نسبت توزیع جریان بخار
۴۰/۶۸	۷۷/۰۷	۳۸/۹۷	۳۸/۱۰	۵۰/۳۹	۱۰/۱۵	۴۰/۲۳	بار حرارتی چگالنده (مگاوات)
۳۸/۱۳	۷۳/۹۱	۴۲/۱۶	۳۱/۷۶	۴۶/۲۵	۸/۹۵	۳۷/۳۰	بار حرارتی جوش‌آور (مگاوات)
۲/۴۵	۴/۷۵	۲/۴۷	۲/۲۷	۳/۴۰	۰/۹۸	۲/۴۲	هزینه مبدل‌ها (میلیون دلار)
۲/۲۱	۳/۳۸	۱/۷۱	۱/۶۷	۲/۴۶	۰/۹۰	۱/۵۵	هزینه ستون (میلیون دلار)
۵/۱۰	۸/۱۳	۴/۱۸	۳/۹۴	۵/۸۶	۱/۸۸	۳/۹۸	مجموع هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)
۸/۵۴	۱۶/۵۶	۹/۴۵	۷/۱۲	۱۰/۳۶	۲/۰۱	۸/۳۶	هزینه انرژی (میلیون دلار)
۱۰/۲۴	۱۹/۲۷	۱۰/۸۴	۸/۴۳	۱۲/۳۲	۲/۶۳	۹/۶۸	هزینه سالانه کل (میلیون دلار)

به‌عنوان جزء غالب خوراک است، ساختار غیر مستقیم دارای TAC کمتری نسبت به توالی مستقیم است؛ این نتیجه هم منطبق بر قاعده سرانگشتی زیر است که بیان می‌کند که جزئی که کسر بیشتری از خوراک را تشکیل می‌دهد بهتر است زودتر جدا شود که در این حالت معادل با ساختار توالی غیر مستقیم است.

با بررسی جداول (۲) تا (۵) در مورد مقایسه دو ساختار مستقیم و غیرمستقیم مشاهده می‌شود که برای حالت ۲ که سبک‌ترین جزء یعنی بنزن جزء غالب است حدود ۳۶٪ برتری در TAC توالی مستقیم مشاهده می‌شود. ولی در حالت ۳ که جزء میانی یعنی تولوئن به‌عنوان جز غالب خوراک است، اختلاف بین این دو ساختار بسیار کمتر می‌شود و در حالت ۴ که سنگین‌ترین جزء یعنی زایلین

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی برای حالت ۳ از خوراک.

برج دیواره‌میانی	توالی غیر مستقیم			توالی مستقیم			
	مجموع	برج دوم	برج اول	مجموع	برج دوم	برج اول	
۴۸	۵۶	۳۳	۲۳	۶۰	۲۱	۳۹	تعداد سینی
۲۹		۱۲	۱۳		۱۱	۱۲	محل سینی خوراک
۲۵							محل سینی محصول جانبی
۱۰/۴۸		۴/۳۸	۰/۵۰		۰/۵۵	۵/۴۹	نسبت برگشتی
۱۰/۶۷		۱/۰۵	۹/۱۹		۷/۷۶	۰/۹۱	نسبت جوش‌آوری
۸/۶۸		۶/۶۰	۹/۹۳		۱۰/۰۳	۶/۷۲	قطر ستون (متر)
۰/۱۴							نسبت توزیع جریان مایع
۰/۵۶							نسبت توزیع جریان بخار
۴۸/۴۴	۷۰/۰۲	۲۱/۴۳	۴۸/۵۹	۶۹/۷۰	۴۲/۵۲	۲۶/۱۸	بار حرارتی چگالنده (مگاوات)
۴۹/۴۹	۷۱/۱۵	۲۷/۳۳	۴۳/۸۲	۶۴/۷۷	۳۶/۸۹	۲۷/۸۸	بار حرارتی جوش‌آور (مگاوات)
۲/۸۱	۴/۴۸	۱/۷۶	۲/۷۲	۴/۳۹	۲/۴۹	۱/۹۰	هزینه مبدل‌ها (میلیون دلار)
۳/۰۷	۳/۶۶	۱/۷۰	۱/۹۶	۳/۸۲	۱/۸۴	۱/۹۸	هزینه ستون (میلیون دلار)
۶/۴۸	۸/۱۳	۳/۴۵	۴/۶۸	۸/۲۱	۴/۳۳	۳/۸۸	مجموع هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)
۱۱/۰۹	۱۵/۹۴	۶/۱۲	۹/۸۲	۱۴/۵۱	۸/۲۷	۶/۲۵	هزینه انرژی (میلیون دلار)
۱۳/۲۵	۱۸/۶۵	۷/۲۸	۱۱/۳۸	۱۷/۲۵	۹/۷۱	۷/۵۴	هزینه سالانه کل (میلیون دلار)

افزایش محسوس هزینه سرمایه‌گذاری برای حالت ۴ که عمدتاً از قطر بزرگ مورد نیاز برای داشتن جداسازی مطلوب و نیز حفظ فاصله ایمن از شرایط طغیان ناشی می‌شود باعث ارجحیت ساختار غیر مستقیم می‌شود و استفاده از برج دیواره‌میانی از لحاظ اقتصادی مطلوب نیست.

به‌غیر از حالت ۴ که زایلین جزء غالب است در بقیه حالت‌ها مشاهده می‌شود که استفاده از ساختار دیواره‌میانی نسبت به ساختارهای متداول مستقیم و غیر مستقیم باعث کاهش TAC شده است. لازم به ذکر است که در تمامی حالات، استفاده از ساختار دیواره‌میانی باعث کاهش هزینه‌های انرژی می‌شود ولی این روند لزوماً در مورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری صدق نمی‌کند، به‌طوری‌که

جدول ۵. نتایج بهینه‌سازی برای حالت ۴ از خوراک.

برج	توالی غیر مستقیم			توالی مستقیم			دیواره‌مییانی
	مجموع	برج دوم	برج اول	مجموع	برج دوم	برج اول	
۳۵	۵۴	۲۸	۲۶	۴۵	۲۳	۲۲	تعداد سینی
۲۱		۱۳	۱۱		۱۲	۹	محل سینی خوراک
۱۹							محل سینی محصول جانبی
۶/۱۷		۱/۲۴	۲/۰۶		۵/۴۷	۲/۷۲	نسبت برگشتی
۱/۲۳		۲/۵۷	۰/۹۷		۰/۸۲	۰/۶۰	نسبت جوش‌آور
۱۱/۱۳		۳/۶۲	۷/۸۵		۸/۳۸	۵/۹۳	قطر ستون (متر)
۰/۲۹							نسبت توزیع جریان مایع
۰/۴۸							نسبت توزیع جریان بخار
۶۶/۵۱	۳۵/۸۵	۹/۱۱	۲۶/۷۴	۴۳/۲۰	۲۸/۱۷	۱۵/۰۳	بار حرارتی چگالنده (مگاوات)
۷۱/۹۷	۳۹/۱۷	۱۰/۴۲	۲۸/۷۵	۴۴/۷۰	۲۴/۵۸	۲۰/۱۳	بار حرارتی جوش‌آور (مگاوات)
۳/۵۰	۲/۹۱	۰/۹۸	۱/۹۳	۳/۳۱	۱/۸۹	۱/۴۲	هزینه مبدل‌ها (میلیون دلار)
۳/۱۰	۲/۴۷	۰/۷۸	۱/۶۸	۲/۷۳	۱/۶۴	۱/۰۹	هزینه ستون (میلیون دلار)
۷/۲۲	۵/۳۸	۱/۷۶	۳/۶۲	۶/۰۴	۳/۵۳	۲/۵۱	مجموع هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)
۱۶/۱۳	۸/۷۸	۲/۳۳	۶/۴۴	۱۰/۰۲	۵/۵۱	۴/۵۱	هزینه انرژی (میلیون دلار)
۱۸/۵۳	۱۰/۵۷	۲/۹۲	۷/۶۵	۱۲/۰۳	۶/۶۸	۵/۳۵	هزینه سالانه کل (میلیون دلار)

غالب خوراک است، ساختار غیر مستقیم دارای TAC کمتری نسبت به توالی مستقیم است. استفاده از ساختار دیواره‌مییانی همواره باعث کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی می‌شود ولی با در نظر گرفتن TAC به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری، درحالی‌که زایلین جزء غالب باشد ساختار غیرمستقیم مناسب‌تر است. بنابراین نتایج مقایسه دو ساختار متداول توالی مستقیم و غیرمستقیم با برج دیواره‌مییانی برای ترکیب درصدی مختلف از خوراک نشان می‌دهد که هر چند کاهش انرژی مصرفی در جوش‌آور در تمامی حالات امکان‌پذیر است ولی کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ستون تقطیر الزاماً در تمامی شرایط محقق نشده و وابسته به شرایط خوراک است که همزهشت فرایند به‌کمک ابزار بهینه‌سازی می‌تواند پاسخ این پرسش را به‌صورت کمی برای شرایط مد نظر برای خوراک مشخص کند.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برج تقطیر دیواره‌مییانی به‌عنوان راهکاری عملی برای پیاده‌سازی راهبرد کوپل حرارتی برج‌های تقطیر باهدف کاهش مصرف انرژی برای سامانه بنزن، تولوئن و زایلین بررسی شد. از میان دو ساختار توالی مستقیم و غیرمستقیم با در نظر گرفتن شاخص TAC برای خوراکی با ترکیب درصد مساوی از اجزاء، ساختار توالی مستقیم انتخاب مناسب‌تری است و نیز برج دیواره‌مییانی می‌تواند حدود ۳۰٪ در هزینه انرژی مصرفی در جوش‌آور و حدود ۲۷٪ در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به ساختار توالی مستقیم صرفه‌جویی به‌دنبال داشته‌باشد و در مجموع باعث کاهش ۲۹/۵٪ در TAC فرایند تک‌برجی شود. در حالی‌که سبک‌ترین جزء- یعنی بنزن- جزء غالب است حدود ۳۶٪ برتری در TAC توالی مستقیم مشاهده می‌شود و برعکس در حالی‌که سنگین‌ترین جزء یعنی زایلین به‌عنوان جزء

مراجع

- wall columns involving sustainable indexes for a class of quaternary mixtures", *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 148: p. 107833, (2020).
- [12] Seihoub, F. Z., Benyounes, H., Shen, W., Gerbaud, V., "An improved shortcut design method of divided wall columns exemplified by a liquefied petroleum gas process", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56: pp. 9710–9720, (2017).
- [13] رحیمی، ر.، البرزی، ا.، سودمند، م. ح.، زیودار، م.، "شناختی از برج‌های دیوار میانی و تأثیر آن بر کاهش انرژی مورد نیاز در فرایندهای تقطیر"، *فصلنامه علمی ترویجی فرایند نو*، ۷ (۳۸)، (۱۳۹۱).
- [14] Petlyuk, F. B., "Distillation theory and its application to optimal design of separation units", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, First Edition (2004).
- [15] Solar-Gonzalez, R., Monroy-Loperena, R., Velasco-Perez, A., "Simulation and Control Configuration of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Column", *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2: pp. 847–852, (2011).
- [16] Dejanović, I., Matijašević, L., Halvorsen, I. J., Skogestad, S., Jansen, H., Kaibel, B., Olujić, Ž., "Designing four-product dividing wall columns for separation of a multicomponent aromatics mixture", *Chemical Engineering Research and Design*, 89: pp. 1155–1167, (2011).
- [17] Muralikrishna, K., Madhavan, V. K. P., Shah, S. S., "Development of dividing wall distillation column design space for a specified separation", *Chemical Engineering Research and Design*, 80: pp. 155–166, (2002).
- [18] Szabó, L., Balaton, M., Németh, S., Szeifert, F., "Analysing divided wall columns", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13: pp. 633–636, (2011).
- [19] Wright, R. O., "Fractionation apparatus", Google Patents, (1949).
- [20] Yildirim, Ö., Kiss, A. A., Kenig, E. Y., "Dividing wall columns in chemical process industry: a review on current activities", *Separation and Purification Technology*, 80: pp. 403–417, (2011).
- [21] Dejanović, I., Matijašević, L., Olujić, Ž., "Dividing wall column—a breakthrough towards sustainable distilling", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49: pp. 559–580, (2010).
- [22] Luyben, W. L., "Distillation design and control using Aspen simulation", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Second Edition, (2013).
- [23] Mathworks, Inc. Matlab. (2019).
- [24] Aspen Technology, Inc. Aspen Plus. (2019).
- [۱] فلاح، ح.، ولی پور، م. ص.، "مدل‌سازی و بهینه‌سازی نیروگاه دودکش خورشیدی با الگوریتم‌های SA و PSO"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، ۱۶ (۵۳)، (۱۳۹۷).
- [۲] پورمیرزاآقا، ه.، ابراهیمی، ر.، انصاری، ا. ب.، "تحلیل انرژی و انرژی سیستم ترکیبی توربین گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامد"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، ۱۵ (۵۱)، (۱۳۹۶).
- [3] Young, H. K., "Energy Savings in the Benzene-Toluene-Xylene Separation Process Using an Extended Divided-Wall Column", *Chemical Engineering & Technology*, 39: pp. 2312–2322, (2016).
- [4] Cui, C., Zhang, X., Sun, J., "Design and optimization of energy-efficient liquid-only side-stream distillation configurations using a stochastic algorithm", *Chemical Engineering Research and Design*, 145: pp. 48–52, (2019).
- [5] Mustafa, M. F., Samad, N. A. F. A., Ibrahim, K. A., Ibrahim, N., Hamid, M. K. A., "Design of Energy Efficient Distillation Columns Systems", *International Symposium on Green Manufacturing and Applications (ISGMA)*: pp. 66–69, (2014).
- [6] Mutalib, M. A., Smith, R., "Operation and control of dividing wall distillation columns: Part 1: Degrees of freedom and dynamic simulation", *Chemical Engineering Research and Design*, 76: pp. 308–318, (1998).
- [7] Jana, A. K., "A new divided-wall heat integrated distillation column (HIDiC) for batch processing: Feasibility and analysis", *Applied Energy*, 172: pp. 199–206, (2016).
- [8] Zheng, L., Cai, W., Zhang, X., Wang, Y., "Design and control of reactive dividing-wall column for the synthesis of diethyl carbonate", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 111: pp. 127–140, (2017).
- [9] Wang, S. J., Lee, C. J., Jang, S. S., Shieh, S. S., "Plant-wide design and control of acetic acid dehydration system via heterogeneous azeotropic distillation and divided wall distillation", *Journal of Process Control*, 18: pp. 45–60, (2008).
- [10] El-Gendy, E. M., Saafan, M. M., Elksas, M. S., Saraya, S. F., Areed, F. F., "New Suggested Model Reference Adaptive Controller for the Divided Wall Distillation Column", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58: pp. 7247–7264, (2019).
- [11] Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Quiroz-Ramírez, J. J., Angelina-Martínez, A. Y., Cortazar, V. V., Segovia-Hernández, J. G., "Design of dividing