

بهینه‌سازی برج تقطیر با استفاده از مفهوم انتگراسیون حرارتی داخلی و تحلیل اکسرژی

لیلا ایزدی¹، بهاره بیدار²، فرهاد شهرکی^{3*}

1. کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
 2. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
 3. استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
- دریافت: 95/1/23 پذیرش: 96/10/10

چکیده

اگرچه تقطیر یکی از پرمصرف‌ترین فرآیندها از لحاظ مصرف انرژی است اما جزء متداول‌ترین واحدهای صنعتی محسوب می‌شود. لذا صرفه‌جویی انرژی در این بخش همواره مورد توجه محققان بوده است. در این مقاله روشی برای آنالیز ترمودینامیکی برج تقطیر بر مبنای انتگراسیون حرارتی داخلی با هدف به‌کاربردن جوش‌آور و خنک‌کننده جانبی ارائه گردیده است. در این روش از مفهوم اکسرژی به عنوان ملاک کیفیت انرژی و همچنین به عنوان نیرو محرکه‌ی جدید جهت بهینه‌سازی بار حرارتی و مکان مبدل جانبی و بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بر روی برج تقطیر دی‌بوتانایزر با استفاده از روش پیشنهادی نشان می‌دهد که مشکلاتی نظیر تغییرات دمایی و خطاهای ایجاد شده در بار حرارتی که بعد از جایگزین شدن جوش‌آور و خنک‌کننده جانبی در روش‌های قبلی ایجاد می‌شد، وجود ندارد. همچنین استفاده از این روش منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در انرژی مورد نیاز برج شده است.

کلمات کلیدی: تقطیر، بهینه‌سازی، انتگراسیون حرارتی داخلی، اکسرژی، مصرف انرژی

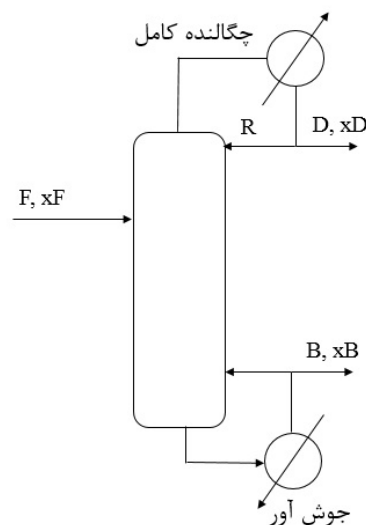
مقدمه

با وجود کشف روش‌های نوین جداسازی، تقطیر همچنان در حدود 95% از سیستم‌های جداسازی مورد استفاده در پالایشگاه‌ها و صنایع شیمیایی را به خود اختصاص داده و به عقیده کارشناسان تا چند دهه آینده نیز این جایگاه را در صنعت حفظ خواهد کرد [1]. این فرآیند سهم قابل‌ملاحظه‌ای از مصرف انرژی (حدود

* fshahraki@eng.usb.ac.ir

40 درصد کل انرژی مورد نیاز) را در صنعت به خود اختصاص داده است. لذا امروزه با توجه به افزایش بی‌رویه مصرف حامل‌های انرژی و قیمت جهانی انرژی تلاش برای یافتن راه‌کارهایی جهت بهبود مصرف انرژی در فرآیند تقطیر اهمیتی دو چندان یافته است. تقطیر فرآیندی بازگشت‌ناپذیر همراه با افت‌های ترمودینامیکی به علت انتقال حرارت و جرم، اختلاط، افت فشار، طراحی داخلی و ویژگی‌های برج مانند محصولات جانبی، سرمایش و گرمایش جانبی می‌باشد. جداسازی در فرآیند تقطیر براساس اختلاف نقطه جوش و با استفاده از گرمای بالای موجود در جوش‌آور و انتقال آن به دمای پایین‌تر در چگالنده انجام می‌شود. بنابراین تقطیر شبیه یک ماشین گرمایی است که کار جداسازی تحویل می‌دهد.

از نقطه نظر قانون دوم ترمودینامیک، برج‌های تقطیر متداول خیلی ضعیف عمل می‌کنند. شکل 1 نمای کلی یک برج تقطیر متداول را نشان می‌دهد. گرمای حاصل از میعان در چگالنده اغلب به هوا یا آب و یا هر دو منتقل می‌شود و گاهی نیز به عنوان پیش‌گرم‌کن جریان خوراک و یا در سایر موارد استفاده می‌گردد. از آنجایی که دمای بخش غنی‌سازی پایین‌تر از بخش عاری‌سازی است لذا نمی‌توان انرژی جوش‌آور را در چگالنده استفاده کرد. به‌علاوه بخشی از آن نیز به‌وسیله تشعشع و جابه‌جایی از بدنه برج به محیط منتقل می‌شود. حال اگر بخش غنی‌سازی دارای فشار بیشتری نسبت به بخش عاری‌سازی باشد، آنگاه می‌توان در بخش غنی‌سازی به دماهای بالاتری رسیده و در انرژی جوش‌آور صرفه‌جویی کرد.



شکل 1. نمای کلی یک برج تقطیر متداول

یکی از راه‌های افزایش بازدهی در این گونه برج‌ها استفاده از مبدل‌های حرارتی جهت توزیع گرمای اضافه شده و گرمای حذف شده در طول ستون تقطیر می‌باشد. جهت بهینه‌سازی برج تقطیر از روش‌هایی نظیر پیش‌گرم کردن یا خنک کردن خوراک ورودی، تقسیم‌کردن میزان خوراک ورودی به برج و وارد کردن آن در دو مرحله یا بیشتر، تعیین محل ورود خوراک، میزان و محل جریان برگشتی به برج، نصب چگالنده و

جوش‌آور جانبی اضافی استفاده می‌شود. در این راستا، از نمودار اتلاف اکسرژی جهت مشخص کردن اهداف بهینه‌سازی در آنالیز و طراحی فرآیندهای شیمیایی از جمله تقطیر، بهره می‌گیرند [5-2].

بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی برای کل تنظیمات موجود، از لحاظ زمانی و محاسبات طولانی بسیار مشکل است و همچنین از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. روش متداول بهبود راندمان انرژی در برج تقطیر، استفاده از حداقل شرایط ترمودینامیکی ستون‌ها براساس مدل برج‌های برگشت‌پذیر می‌باشد. در گذشته مراجع متعددی با بررسی و انجام محاسبات لازم، استفاده از برج‌های برگشت‌پذیر برای سیستم‌های دوتایی و اهمیت آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند [8-6].

یک روش پیشنهادی برای جداسازی مخلوط چندجزئی و امکان ایجاد شرایط برگشت‌پذیری در برج، تخمین شرایط حداقل جریان برگشتی است که نیازمند محاسبات گسترده در قسمت برگشت‌پذیری برج جهت تعیین نقطه پینچ¹ می‌باشد. نمودار دما-آنالتپی یک روش پیشنهادی برای برج‌های برگشت‌پذیر است. این نمودار برای تخمین بار جوش‌آور و خنک‌کننده جانبی در برج‌های واقعی به کار برده می‌شود و هدف آن رسیدن به شرایط حداقل جریان برگشتی برای ستون‌های عملیاتی متداول می‌باشد [2 و 9].

در سیستم‌های دو جزئی محاسبه‌ی نمودار برگشت‌پذیری آسان است، اما در سیستم‌های چندجزئی، صرفاً در جداسازی‌های محدود وضعیت یک برج برگشت‌پذیر به دست خواهد آمد و نمی‌توان بصورت مؤثر از اهداف به دست آمده از این نمودارها برای اصلاحات در برج واقعی استفاده کرد. مشکل اصلی به کار بردن نمودار برج برگشت‌پذیر، تعیین ناحیه‌ای برای جوش‌آور و خنک‌کننده جانبی در برج ایده‌آل (بدون در نظر گرفتن نیروی محرکه) می‌باشد، در صورتی که در برج واقعی نیرو محرکه‌ی نامعین توصیف شده است. روش‌هایی جهت توسعه طراحی برج تقطیر به وسیله‌ی آنالیز توزیع نیرو محرکه پیشنهاد داده شده است. در این روش‌ها انتخاب صحیح بار حرارتی و دمای انرژی‌های جانبی² منجر به بهبود توزیع نیروی محرکه می‌شود یا به بیان دیگر بازده قانون دوم ترمودینامیک افزایش می‌یابد [10 و 11].

یکی از روش‌های بهبود راندمان انرژی در فرآیند تقطیر، روش فشرده کردن مجدد بخار³ است [12]. در این تکنیک بخار خروجی از بالای برج فشرده شده و سپس در جوش‌آور مربوط به همان برج چگالیده می‌شود و بدین طریق مقداری از گرمای مورد نیاز برای تولید بخار در برج تأمین می‌گردد. با در نظر داشتن این ایده و بهبود آن، روش جدید انتگراسیون حرارتی داخلی برج تقطیر که به اختصار HIDiC⁴ نامیده می‌شود، پیشنهاد شده است. این تکنیک اولین بار توسط ماه و همکارانش با استفاده از جریان برگشتی ثانویه و تبخیر⁵ (SRV) به منظور افزایش راندمان انرژی اجرا گردید. این شکل از برج، انرژی کمتری نسبت به برج تقطیر متداول مصرف می‌کند [13].

¹ Pinch Point

² Utility

³ Vapour Re-Compression (VRC)

⁴ Heat-Integrated Distillation Column

⁵ Secondary Reflux and Vaporization

دوآنی و همکارانش از آنالیز اکسرژی برای تحلیل عملکرد برج تقطیر استفاده کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که اکسرژی خروجی نسبتاً پایین و نرخ برگشت ناپذیری تولیدی در کل برج بصورت یکنواخت توزیع نمی‌شود و تنها در چگالنده، جوش‌آور و سینی ورود خوراک به برج از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است [14]. هوآنگ و همکارانش، از فشار بخار بالای تقطیر جهت پیش‌گرم کردن خوراک ورودی استفاده کردند و یک برج تقطیر حرارتی پیوسته⁶ را ارائه دادند. این برج سبب بهبود بازده ترمودینامیکی فرآیند تقطیر گردید. [15]. آگویر و همکارانش، روشی برای بهینه‌سازی ترمودینامیکی برج تقطیر با استفاده از خنک‌کننده‌ها⁷ و گرم‌کننده‌های⁸ داخلی ارائه دادند. در این تحقیق با تعیین مکان مناسبی برای خنک‌کننده و جوش‌آور جانبی میزان مصرف انرژی به حداقل رسانده شد [16].

در هر روش برای پیش‌بینی صحیح بار حرارتی هدف، نیاز به بررسی نیروی محرکه موجود دارد. در یک سینی برج تقطیر نیروی محرکه واقعی برای انتقال جرم و انتقال حرارت به ترتیب پتانسیل شیمیایی و اختلاف دما بین دو فاز می‌باشند که این اختلاف‌ها منجر به تبادل حرارت و یا جرم می‌شوند. محاسبه پتانسیل شیمیایی مشکل بوده و برای هر ترکیب در هر فاز معین منجر به مجموعه بزرگی از متغیرها به ویژه در سیستم‌های چند جزئی می‌گردد. در نتیجه نیروی محرکه کل انتقال جرم براساس پتانسیل شیمیایی مانند نیرو محرکه دما و یا اختلاف فشار به راحتی قابل محاسبه نیست. گانی و پدرسن، نیروی محرکه بر اساس اختلاف ترکیب پیشنهاد دادند [17]. گرچه این روش نیازمند انتخاب ترکیبات کلیدی است و به عنوان تنها داده‌های تعادلی در برج تقطیر لازم و ضروری هستند، توزیع نیروی محرکه را در ستون‌های مختلف به خوبی نشان نمی‌دهد. هم‌چنین این روش نمی‌تواند نیروی محرکه انتقال حرارت را محاسبه کند. دی کوپچر و همکارانش، توزیع انتقال حرارت به وسیله آنالیز نیروی محرکه و بهینه‌کردن انرژی در برج تقطیر آدیاباتیک را مورد مطالعه قرار دادند [18]. پینتو و همکارانش روش جدیدی برای بهینه‌سازی برج تقطیر پیشنهاد دادند. در این روش بهینه‌سازی ترمودینامیکی با به‌کار بردن مبدل‌های جانبی، کیفیت و راندمان مصرف انرژی بهبود بخشیده شد [19].

قربانی و همکارانش آنالیز اکسرژی و ارزیابی اقتصادی مرتبط با آن را در فرآیند جداسازی گاز مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق بازده اکسرژی برج‌های دی-بوتانایز، دی-پروپانایز و دی-اتانایز محاسبه گردید و نتایج نشان داد که بازده اکسرژی این برج‌ها بسیار پایین بوده و با اتلاف اکسرژی 64% بالاترین میزان اتلاف را در کل تجهیزات پالایشگاهی گاز و نفت خام دارا می‌باشند. پس از آن‌ها مبدل‌های حرارتی با 15% اتلاف و کمپرسورها با 13% اتلاف به ترتیب در رده دوم و سوم از نظر اتلاف اکسرژی قرار دارند. این تحقیق که براساس مطالعات اقتصادی انجام گرفته است، موقعیت‌های بالقوه‌ای برای اصلاح فرآیند پیشنهاد می‌دهد [20].

⁶ THIDiC

⁷ Inter-cooler

⁸ Inter-reboiler

ناکایوا و همکارانش رویکرد جدیدی را برای محاسبات داخلی در برج تقطیر یکپارچه حرارتی مطرح کردند و نتایج خود را با برج‌های معمولی مقایسه کردند. نتیجه مطالعات نشان داد که اختلاف فشار دو برج غنی‌سازی و عاری‌سازی مهم‌ترین پارامتر موجود است که اثر زیادی بر روی انرژی الکتریکی مصرفی کمپرسور دارد و می‌تواند بر توجیه‌پذیری اقتصادی عملیات جداسازی تأثیر زیادی داشته باشد. علاوه بر این، شدت جریان خوراک از پارامترهای اصلی است که بر بازده مصرف انرژی تأثیر زیادی دارد [21]. تاکاماستو و ناکایوا امکان‌سنجی استفاده از برج‌های یکپارچه حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از تحلیل اکسرژی، اتلاف اکسرژی را در برج‌های یکپارچه حرارتی به صورت پارامتری محاسبه کرده و آن را با اتلاف اکسرژی در برج‌های معمولی مقایسه کردند. نتایج محاسبات آن‌ها نشان می‌دهد که اتلاف اکسرژی در برج‌های یکپارچه حرارتی کمتر از برج‌های معمولی است [22].

از نظر گادالا و همکارانش بهترین راه برای بهینه‌سازی برج‌های یکپارچه حرارتی، روشی است که در آن، میزان کل بخار در گردش سیستم، کمینه باشد [23]. خلیفا و امتیر جداسازی مخلوط بنزن، تولوئن و زایلن را در برج‌های تقطیر یکپارچه حرارتی بررسی کردند. این دو محقق آرایش‌های مختلفی را برای این برج‌ها در نظر گرفته و با تعریف یک تابع هدف اقتصادی، گزینه‌های مختلف انتگراسیون حرارتی برج‌های تقطیر را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [24]. کهلر و آگویر دریافتند که مصرف انرژی در برج‌های یکپارچه حرارتی نسبت به برج‌های تقطیر متداول بین 20 تا 35 درصد و همچنین، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های سالیانه تنزیل شده بین 7 تا 25 درصد کاهش می‌یابد [25].

الوجیک و همکارانش 5 چیدمان مختلف برج‌های HiDiC را بر روی واحد جداکننده پروپان/ پروپیلن که از لحاظ ترمودینامیکی ناکارآمد محسوب می‌شوند، را بررسی نمودند. بهترین چیدمان در حدود 30 الی 40 درصد نسبت به حالتی که از برج با پمپ حرارتی استفاده شود، اجازه کاهش مصرف انرژی را می‌دهد [26]. سوفانیت به بررسی توزیع حرارت در طول بخش‌های دیاباتیک⁹ در برج‌های HiDiC پرداخت. دو ساختار، توزیع حرارت یکنواخت و سطح انتقال حرارت یکنواخت را توسط دو مطالعه موردی جداکننده تولوئن/بنزن و پروپان/پروپیلن مورد بررسی قرار داد. سوفانیت از نرم افزار Aspen plus برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده نمود [27]. سوفانیت در بررسی دیگری به بهینه‌سازی توزیع حرارت در این برج‌ها پرداخت و اثر توزیع حرارت را عملکرد انرژی و قیمت مورد بررسی قرار داد. نتایج بهینه‌سازی منجر به آرایش‌های دیگری گردید که می‌تواند به جای روش فشرده کردن مجدد بخار به کار گرفته شود و دارای حداقل هزینه سالانه کلی کمتری باشد [28].

رویگرد دیگری که مطرح است، بررسی بهبود راندمان برج با در نظر گرفتن انتگراسیون حرارتی داخلی برج و تأثیر بار حرارتی جوش‌آور و خنک‌کننده جانبی بر روی راندمان برج به‌طور همزمان است، که هنوز به درستی به آن پرداخته نشده است. با توجه به مطالعات پیشین می‌توان گفت که استفاده از روش انتگراسیون حرارتی داخلی با استفاده از نیرو محرکه‌ی اتلاف اکسرژی به منظور بهبود راندمان برج و همچنین استفاده از مبدل‌های حرارتی جانبی در طول ستون تأثیر زیادی بر کاهش مصرف انرژی دارد. بنابراین نیاز به یک

⁹ Diabatic

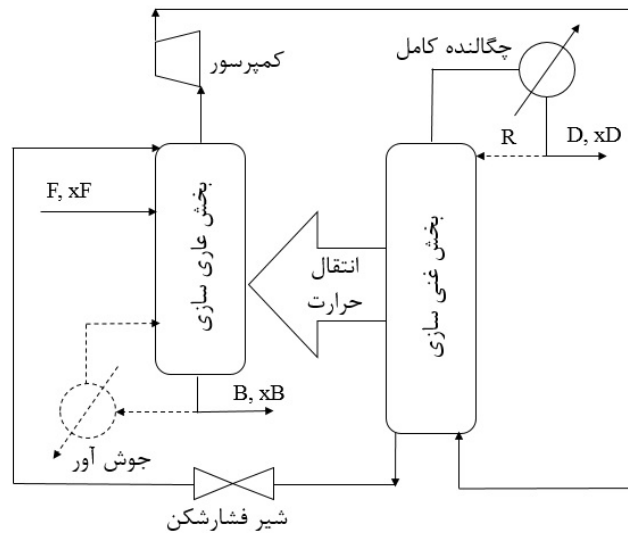
الگوریتم بهینه‌سازی جهت به‌کارگیری آنالیز اکسرژی برای تعیین بار حرارتی هدف مبدل‌های جانبی در یک برج یکپارچه حرارتی احساس می‌گردد. هدف این مقاله ارائه روشی جدید به منظور یافتن بار حرارتی بهینه و بهترین مکان برای مبدل جانبی در این آرایش و بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی و هم‌چنین بهبود کیفیت انرژی است. در این روش از مفهوم اکسرژی به عنوان ملاک کیفیت انرژی و به عنوان نیروی محرکه‌ی جدید برای ترسیم نمودار برگشت‌پذیری استفاده شده است.

انتگراسیون حرارتی داخلی برج تقطیر

در برج تقطیر متداول دمای بالای برج یعنی بخش غنی‌سازی کمتر از دمای پایین برج یعنی بخش عاری-سازی می‌باشد. حال اگر برج به دو قسمت تقسیم شود و با نصب کمپرسور دمای بخش غنی‌سازی بالا برده شود، می‌توان از گرمای این بخش به نفع بخش عاری‌سازی استفاده کرد. شکل 2 یک ساختار یکپارچه حرارتی (HIDiC) را نشان می‌دهد. آرایش یکپارچه حرارتی مشتمل بر دو برج مجزا است، ابتدا عاری‌سازی و سپس غنی‌سازی، که در فشارهای مختلفی کار می‌کنند. هدف از این ساختار فراهم ساختن شرایط عملیاتی است که انتقال حرارت از بخش غنی‌سازی به بخش عاری‌سازی امکان‌پذیر باشد. برج غنی‌سازی در فشار بالاتری کار می‌کند در نتیجه دمای آن نیز بالاتر خواهد بود. مایع پایین برج غنی‌سازی به عنوان خوراک، وارد برج عاری‌سازی می‌گردد. بخار خروجی از بالای برج غنی‌سازی به عنوان محصول سبک و خروجی پایین برج عاری‌سازی به عنوان محصول سنگین می‌باشد [29].

انتقال حرارت در هر مرحله از دو برج، با تماس غیر مستقیم جریان بخار داغ از بخش غنی‌سازی و جریان مایع سرد از بخش عاری‌سازی انجام می‌گیرد تا بدین وسیله دمای برج غنی‌سازی کم شود. بنابراین دمای چگالنده در ساختار یکپارچه حرارتی نسبت به برج‌های متداول بیشتر است و خود موجب کاهش بار حرارتی چگالنده می‌گردد، زیرا تغییرات دما و بار حرارتی چگالنده خلاف جهت یکدیگر است. از طرفی جریان مایع خروجی بازگشتی از بخش غنی‌سازی به بخش عاری‌سازی در ساختار یکپارچه حرارتی نسبت به برج‌های متداول، دما و در نتیجه آنتالپی بالاتری دارد که خود موجب کاهش بار حرارتی جوش‌آور می‌شود. اگر انتقال حرارت بین دو برج انجام نشود میزان بار حرارتی لازم در جوش‌آور نیز بالا خواهد رفت که در این صورت برج معادل با برج تقطیر متداول می‌گردد. به عبارت دیگر ممکن است ساختار یکپارچه حرارتی به صورت جزئی عمل کند، این وقتی است که انرژی لازم در جوش‌آور کاهش یافته است. اگر نحوه و میزان انتقال حرارت به گونه‌ای باشد که میزان حرارت در جوش‌آور به صفر برسد یک ساختار یکپارچه حرارتی ایده‌آل به وجود می‌آید [30].

ساختار یکپارچه حرارتی با کاهش 20 الی 50 درصدی در مجموع بار حرارتی چگالنده و جوش‌آور موجب کاهش هزینه‌های سالیانه واحد گردیده و در مقابل به دلیل افزوده شدن یک کمپرسور و یک مبدل حرارتی سبب افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود. بنابراین می‌بایست علاوه بر امکان‌سنجی ساختار، سودآوری اقتصادی آن نیز مورد بررسی قرار گیرد.



شکل 2. ساختار برج یکپارچه حرارتی (HIDiC)

آنالیز اکسرژی

به طور مرسوم از آنالیز انرژی جهت بهینه کردن بازده تولید محصول مطلوب استفاده می شود. از دیدگاه دیگر، با توجه به دلایل اقتصادی، زیست محیطی و محدودیت منابع انرژی، هدف، بهینه کردن استفاده از منابع انرژی است و در این راستا، آنالیز اکسرژی روشی رایج محسوب می شود. در یک بهینه سازی ترمودینامیکی قابل اطمینان، می بایست میزان نرخ تولید آنتروپی را کاهش و به حداقل رساند و یا با هزینه اکسرژی معادل سازی کرد. در یک واحد تقطیر، بازیافت انرژی از طریق بهینه سازی پارامترهای عملیاتی و اجرای برنامه های تعمیراتی پیشرفته، با صرف اندک سرمایه گذاری قابل حصول است. این روند با کمینه کردن کیفیت گرمای ورودی به برج و همزمان بیشینه کردن کیفیت گرمای خروجی از برج انجام پذیر است. در فرآیندهای شیمیایی محصولات و نیروهای محرکه به خوبی تعریف شده اند، بنابراین با به کارگیری کمیت های اولیه ترمودینامیکی بازده های مختلف قابل محاسبه هستند که مستقیماً به عنوان تابع هدف جهت بهینه سازی استفاده می شوند.

موازنه اکسرژی برای برج های تقطیر در یک فرآیند پایا به شکل زیر نوشته می شود.

$$Ex_{Loss} = Ex_{Feed} + Ex_{Reboiler} - Ex_{Condenser} - Ex_{Distillate} - Ex_{Bottoms} \quad (1)$$

اکسرژی هر یک از جریان های خوراک و محصول از رابطه زیر به دست می آیند.

$$Ex_{Stream} = \Delta H - T_0 \Delta S + q \lambda \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + TR_0 \sum_{i=1}^{NC} x_i \ln(x_i \gamma_i) \quad (2)$$

که در آن q کیفیت بخار، λ گرمای نهان تبخیر و x_i, γ_i نیز به ترتیب غلظت جزء i در فاز مایع و ضریب اکتیویته آن جزء هستند. اکسرژی چگالنده و جوش آور نیز به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند.

$$Ex_{Condensator} = Q_c \left(1 - \frac{T_c}{T}\right) \quad (3)$$

$$Ex_{Reboiler} = Q_r \left(1 - \frac{T_r}{T}\right) \quad (4)$$

برای ساختار HiDiC نیز تلفات اکسرژی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$Ex_{Loss} = Ex_{Feed} + Ex_{Reboiler} + Ex_{Compressor} - Ex_{Condensator} - Ex_{Distillate} - Ex_{Bottoms} \quad (5)$$

که در آن اکسرژی کمپرسور از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Ex_{Compressor} = W_{Compressor} \quad (6)$$

با افزایش نسبت تراکم کمپرسور، تلفات اکسرژی در ساختار یکپارچه حرارتی افزایش می‌یابد. با این وجود، تلفات آن از تلفات اکسرژی برج تقطیر متداول کمتر است [31 و 32].

بهینه‌سازی ترمودینامیکی برج تقطیر

در برج‌های واقعی برای هر جداسازی چیدمان‌های متعددی با بارهای حرارتی، محل سینی خوراک و تعداد سینی‌های متفاوت وجود دارد و مهم‌تر از آن، توزیع و پخش نیروی محرکه‌ی متفاوت در داخل برج‌ها است. در یک سینی برج تقطیر نیروی محرکه‌ی واقعی برای انتقال جرم، پتانسیل شیمیایی و برای انتقال حرارت، اختلاف دما بین دو فاز می‌باشد که این اختلاف منجر به تبادل حرارت و یا جرم می‌گردد. به‌طور کلی انتخاب صحیح نیروی محرکه در یک سینی برج تقطیر با توجه به محدود کردن نیروی محرکه در طول فرآیند به دست می‌آید که سبب از دست دادن فرصت برای کار مفید می‌شود و اتلاف اکسرژی افزایش می‌یابد. به‌همین دلیل، شناسایی مکان مناسب برای مبدل جانبی با توجه به هر دو شرایط مکان و بار حرارتی و با در نظر گرفتن نیروی محرکه که در مطالعات گذشته و در روش‌های سنتی مدل برج برگشت پذیر مطرح نشده بود، نکته‌ی بسیار مهمی است.

بهینه‌سازی به منظور تعیین محل مناسب مبدل‌های جانبی برای رسیدن به اهداف ترمودینامیکی و اقتصادی در برج، به شرایط حداقل جریان برگشتی بستگی دارد. در نتیجه نقطه‌ی شروع برای طراحی برج تقطیر، انتخاب شدت مناسب جریان برگشتی¹⁰ است. هنگامی که حداقل نیروی محرکه در فرآیند تقطیر مشخص گردد، می‌توان بار حرارتی بهینه مبدل‌های جانبی را مشخص نمود. برای رسیدن به این مهم می‌بایست شرایط زیر برقرار باشد:

- کل بار حرارتی در برج ثابت باشد. علاوه بر این مبدل جانبی نباید توازن انرژی در برج را تغییر دهد.
- در برج اصلاح شده (برج اصلی که به دو برج جذب و دفع تقسیم می‌شود و با استفاده از انرژی بالای برج دفع و مبدل حرارتی انتگراسیون حرارتی انجام می‌گردد) باید به خصوصیات جداسازی مطلوب اولیه دست یافت.
- اتلاف اکسرژی هیچ سینی نباید کمتر از حداقل اتلاف اکسرژی انتخاب شده باشد.

¹⁰ Reflux Flow Rate

الگوریتم پیشنهادی

با توجه به شبیه‌سازی برج و هم‌گرایی آن، روش محاسبات به صورت زیر انجام می‌گردد:

- 1- معین کردن مقدار قابل قبول حداقل نیروی محرکه
- 2- در هر سینی m در قسمت غنی سازی در برج اصلی
 - 1-2- اضافه کردن یک سینی در پایین برج
 - 2-2- جایگزین کردن جوش‌آور جانبی در سینی m و محاسبه بار حرارتی که کل انرژی مورد نیاز ثابت نگه داشته شود.
 - 2-3- محاسبه نمودار اتلاف اکسرژی و شناسایی سینی در اطراف جوش‌آور جانبی یا سینی پایین جوش‌آور جانبی جایی که حداقل اتلاف اکسرژی رخ می‌دهد.
 - 2-4- اگر اختلاف حداقل اکسرژی برابر با حداقل نیروی محرکه انتخاب شده باشد و یا شکلی از نمودار حداقل اتلاف اکسرژی کشف شده باشد، بار حرارتی به دست آمده، بار حرارتی هدف است. در غیر این صورت به مرحله (2-1) برمی‌گردیم و مراحل را دوباره تکرار می‌کنیم تا به هدف مورد نظر برسیم.

3- مراحل قبل برای هر سینی m در قسمت عاری سازی از برج اصلی هم تکرار می‌شود.

- 4- ترکیب بار حرارتی هدف در تمام مراحل از دو برج برای به دست آوردن نمودار حداقل نیروی محرکه این روش شامل حل دقیق موازنه جرمی و حرارتی برای هر سینی در برج است و می‌توان هر یک از این دو را در شبیه‌سازی برج عملیاتی استفاده کرد یا به وسیله ی برنامه‌ی کامپیوتری پیشرفته انجام داد. اولین نتیجه‌ای که از روش نمودار حداقل نیروی محرکه به دست می‌آید، تعیین مشخصات بار حرارتی مبدل جانبی هدف برای هر سینی برج است. نتیجه مهم دیگر، تعیین مکان بهینه برای جایگزینی مبدل جانبی است. هر بار حرارتی هدف می‌تواند اثر متفاوتی بر روی بازده ترمودینامیکی برج داشته باشد و از آنجا که اکسرژی منعکس کننده گرمای مورد نیاز برج است، جداسازی مطلوب را انجام می‌دهد. این اکسرژی لازم به وسیله جریان جانبی برآورده می‌شود و توسط رابطه‌ی 7 محاسبه می‌گردد:

$$Ex_{Exchanger} = Q_{Exchanger} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_{Ideal Utility}}\right) \quad (7)$$

درجه حرارت ایده‌آل انرژی جانبی در این مرحله استفاده می‌شود. اتلاف انرژی در این حالت ناشی از انتقال حرارت بین انرژی جانبی و سینی در نظر گرفته شده است. اکسرژی جریان جانبی مورد نیاز اصلی به صورت زیر تعریف شده است:

$$Ex_{base} = Ex_{Reboiler,base} + Ex_{Condensor,base} \quad (8)$$

$$Ex_{mod} = Ex_{Reboiler,mod} + Ex_{Condensor,mod} + \sum_j Ex_{side} \quad (9)$$

بار حرارتی هدف از نمودار حداقل نیروی محرکه به کار برده شده در محاسبه اکسرژی جریان جانبی مورد نیاز در برج اصلاح شده به دست می‌آید. اکسرژی جریان جانبی اصلاح شده مورد نیاز به وسیله اکسرژی

مورد نیاز جوش آور اصلی و اصلاح شده و چگالنده و مبدل جانبی محاسبه می‌شود. حداقل بار حرارتی هدف بر اساس حداقل نیروی محرکه با استفاده از رابطه 10 محاسبه می‌شود [33].

$$Ex_{Loss} = Q_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) + Ex_{Stream,in} - Ex_{Stream,out} \quad (10)$$

اکسرژی ذخیره شده بعد از استفاده از مبدل جانبی به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\text{درصد اکسرژی ذخیره شده} = \left(1 - \frac{Ex_{mod}}{Ex_{base}}\right) \times 100 \quad (11)$$

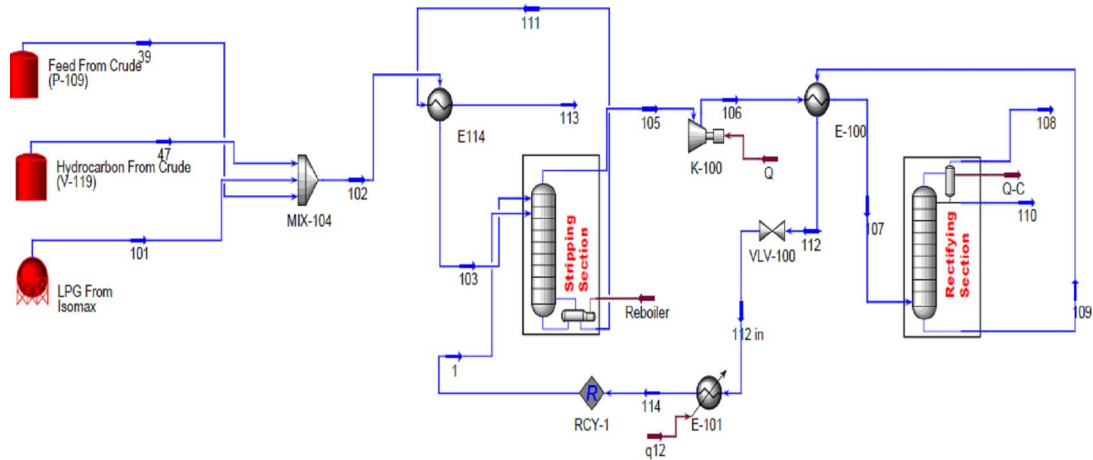
شبیه‌سازی برج تقطیر

برای شبیه‌سازی ساختار انتگراسیون حرارتی داخلی برج‌های تقطیر و انجام محاسبات مورد نظر نیازمند مدل ریاضی برج تقطیر هستیم. به طور کلی مدل ریاضی برج تقطیر شامل مجموعه معادلات دیفرانسیل معمولی است که از موازنه جرم و انرژی مراحل برج به دست می‌آیند. علاوه بر آن برخی معادلات جبری نیز برای پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی سینی‌ها، تعادل ترمودینامیکی، خصوصیات ترموفیزیکی اجزاء و غیره مورد نیاز هستند. در این بررسی محاسبات مورد نیاز سیستم توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز فرآیند Hysys انجام گرفت. به منظور اعتبارسنجی، الگوریتم بیان شده بر روی برج تقطیر واحد دی‌بوتانایزر پالایشگاه شیراز مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. مایع خالص بالاسری ستون نفت خام و هیدروکربن‌های میعانات گازی از برج تقطیر نفت خام و گاز مایعی که از واحد آیزوماکس¹ خارج می‌شوند، با هم ترکیب شده و خوراک برج تقطیر دی‌بوتانایزر را تشکیل می‌دهند. این برج شامل 30 سینی است. بار حرارتی جوش آور به وسیله نفت گازی که از مبدل واحد تقطیر نفت خام می‌آید، تأمین می‌شود. محصول بالای برج گاز مایع² است که پس از عبور از پمپ مایع مایع می‌شود و برای تصفیه به واحد تصفیه گاز مایع فرستاده می‌شود. با اعمال روش انتگراسیون حرارتی داخلی برج تقطیر، برج اصلی به دو برج غنی‌سازی و عاری‌سازی تقسیم می‌شود. شکل 3 انتگراسیون حرارتی برج دی‌بوتانایزر را نشان می‌دهد. مشخصات جریان‌های موجود و برج‌ها در جدول‌های 2 و 3 آورده شده است.

به منظور پیاده‌سازی ساختار انتگراسیون حرارتی داخلی، می‌بایست تجهیزات فرآیندی نظیر کمپرسور، مبدل حرارتی و شیر فشار شکن شبیه‌سازی شوند. مشخصات جریان ورودی به کمپرسور معلوم بوده و هدف محاسبه دمای جریان خروجی و کار مصرفی کمپرسور است. فشار جریان خروجی از کمپرسور نیز با معلوم بودن نسبت تراکم کمپرسور به راحتی قابل محاسبه است. در طراحی مبدل حرارتی، مشخصات جریان‌های سرد و گرم ورودی به آن معلوم بوده و هدف محاسبه‌ی دمای جریان خروجی و سطح انتقال حرارت است. از آنجایی که در روش $\dot{E}-NTU$ می‌بایست سطح انتقال حرارت معلوم باشد تا بتوان دمای جریان‌های خروجی از مبدل را به دست آورد، در اینجا از روش حداقل دمای نزدیکی استفاده شده است.

¹ Isomax

² Liquefied petroleum gas (LPG)



شکل 3. ساختار انتگراسیون حرارتی داخلی برج دی بوتانایزر

جدول 1. مشخصات جریان‌های موجود

مشخصه	جریان 39	جریان 101	جریان 47	جریان 1	جریان 103	جریان 105
دما (°C)	40,71	28	-	206,5	101	164,7
فشار (kPa)	1351	1067	-	866,2	866,2	787,8
شدت جریان مولی (kgmol/h)	738,7	41,43	-	476,1	780,2	603,2
درصد مولی	-	0,0557	-	0,0015	0,0030	0,0050
	-	0,0100	-	0,0001	0,0005	0,0008
	-	0,0368	-	0,0009	0,0020	0,0032
	0,0029	0,02341	-	0,0111	0,0152	0,0284
	0,0048	0,2564	-	0,0206	0,0182	0,0398
	0,0220	0,2129	-	0,0426	0,0321	0,0752
	0,0332	0,1260	-	0,0907	0,0382	0,1210
	0,0318	0,0680	-	0,0920	0,0337	0,1157
	0,0005	-	-	0,0002	0,0005	0,0008
	H ₂ O	-	-	-	-	-

مقدار ضریب کلی انتقال حرارت ثابت و برابر با $300 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که اختلاف دمای جریان سرد و گرم ورودی به مبدل حرارتی بین 7°C (به ازای نسبت تراکم $1/5$ در کمپرسور) تا 10°C (به ازای نسبت تراکم $3/5$ در کمپرسور) متغیر است، مقدار حداقل دمای نزدیکی 5°C انتخاب گردید تا تبادل حرارت در تمامی حالات امکان پذیر باشد. آنتالپی جریان و دمای سیال عبوری از شیر فشار

شکن ثابت در نظر گرفته شده است. از آنجا که نسبت تراکم کمپرسور، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار است، محاسبات مربوطه به ازای مقادیر مختلف، نسبت به تراکم کمپرسور انجام شده است. مصرف انرژی یک برج تقطیر (QCDC¹)، مجموع انرژی مصرفی چگالنده و جوش‌آور است.

ادامه جدول 1. مشخصات جریان‌های موجود

جریان 111	جریان 110	جریان 109	جریان 108	جریان 107	مشخصه
201,6	121,6	199,8	121,6	202,9	دما (°C)
854,5	1889	1956	1889	1970	فشار (kPa)
653,1	107,6	475,6	19,97	603,2	شدت جریان مولی (kgmol/h)
-	0,0131	0,0015	0,0457	0,0050	H ₂ S
-	0,0015	0,0001	0,0127	0,0008	Methane
-	0,0083	0,0009	0,0314	0,0032	Ethane
-	0,0796	0,0112	0,1637	0,0284	Propane
-	0,1061	0,0206	0,1392	0,0398	i-Butane
-	0,1927	0,0426	0,2171	0,0752	n-Butane
-	0,2450	0,0906	0,1750	0,1210	i-Pentane
0,0005	0,2166	0,0919	0,1385	0,1157	n-Pentane
-	0,0018	0,0002	0,0094	0,0008	H ₂ O

ترکیب درصد مولی

$$Q_{CDC} = Q_r + Q_c \quad (12)$$

در مورد ساختار HiDiC مصرف انرژی شامل مجموع انرژی مصرفی چگالنده، جوش‌آور و کمپرسور است. از آنجا که انرژی مصرفی کمپرسور از نوع الکتریکی است، برای آنکه بتوانیم آن را با انرژی مصرفی چگالنده و جوش‌آور، مستقیماً جمع کنیم، ابتدا باید معادل حرارتی آن را محاسبه کنیم. بدین منظور، از بازدهی تبدیل انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی استفاده می‌شود.

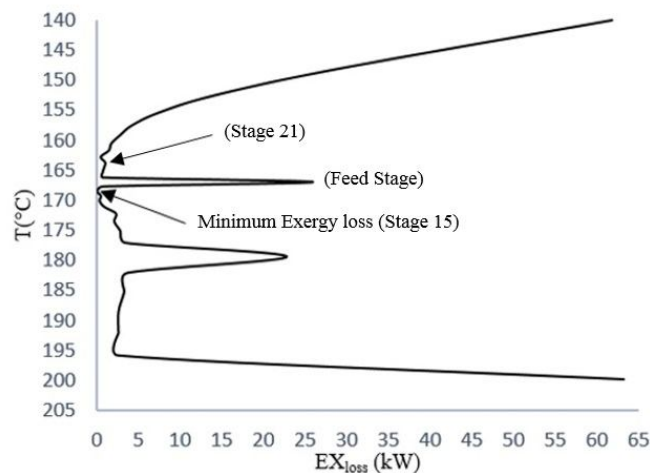
$$Q_{HiDiC} = Q_r + Q_c + \frac{W_{compressor}}{\eta} \quad (13)$$

η بازدهی تبدیل انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی است و مقدار آن برابر با 33 درصد در نظر گرفته شده است.

بحث و تحلیل نتایج

¹Conventional Distillation Column

شبیه‌سازی کل واحد دی بوتانایزر توسط نرم افزار Hysys انجام گردید که در این بررسی تنها برج دی بوتانایزر در نظر گرفته شده است. محاسبات مربوطه با اضافه کردن سینی و همچنین مبدل جانبی در هر یک از سینی‌های مورد مطالعه به آسانی بدون تغییرات در شرایط اولیه توسط نرم افزار انجام پذیرفت و برج هم‌گرا گردید. به‌طور کلی انتخاب صحیح نیروی محرکه در یک سینی برج تقطیر با توجه به محدود کردن نیروی محرکه در طول فرآیند به دست می‌آید. از این رو منجر به از دست دادن فرصت برای کار مفید می‌شود و اتلاف اکسرژی افزایش می‌یابد. میزان حداقل اتلاف اکسرژی این فرآیند با توجه به محاسبه‌ی اتلاف اکسرژی در هر سینی و در برج عاری‌سازی 0/05 kW به دست آمد. کمترین اتلاف اکسرژی با مقایسه‌ی دو برج غنی‌سازی و عاری‌سازی، در برج عاری‌سازی رخ داد. با توجه به شکل 4 حداقل نیروی محرکه در دمای 168°C (معرف سینی 15 در برج) تشکیل شده است که در واقع این سینی نزدیک به سینی خوراک است. با توجه به اجتناب ناپذیر بودن تلفات اختلاط ناشی از دما و ترکیب، به دلیل عدم تطابق دو جریان خوراک و سینی خوراک، معمولاً اوج اتلاف اکسرژی در سینی خوراک مشاهده می‌شود.

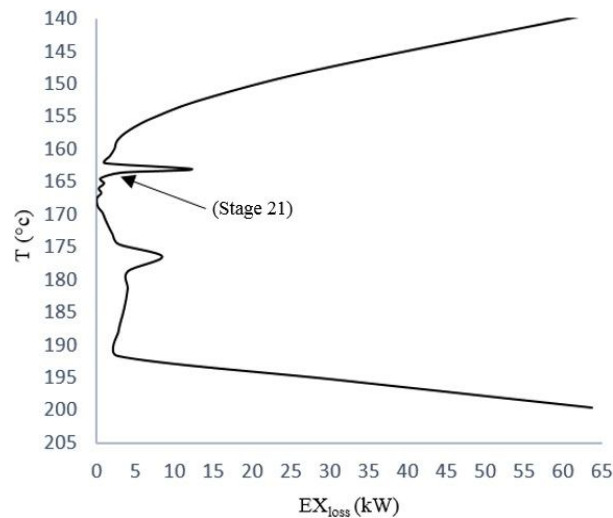


شکل 4. نمودار اتلاف اکسرژی برج دی بوتانایزر

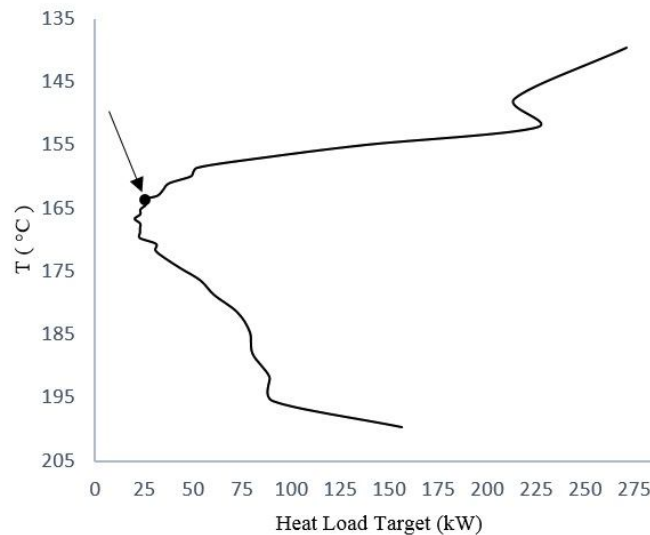
در این سینی می‌توان روشی پیشنهادی برای امکان پذیر بودن محاسبه‌ی بار حرارتی هدف مبدل جانبی را اعمال کرد. با اجرای الگوریتم و رعایت شرایط ذکر شده بر روی برج مورد مطالعه، بهترین مکان برای مبدل جانبی و به دست آوردن بار حرارتی هدف، سینی شماره 21 با دمای 164°C است. شکل 5 تغییرات نمودار اتلاف اکسرژی با اضافه شدن جوش‌آور جانبی را نشان می‌دهد. با قرار دادن جوش‌آور جانبی نیروی محرکه در قسمت نزدیک به جوش‌آور جانبی کاهش و مصرف نیروی محرکه در بالای جوش‌آور جانبی افزایش می‌یابد.

مشخصات بار حرارتی برج برگشت پذیر مورد نظر در شکل 6 نشان داده شده است. مکان قرارگیری جوش‌آور جانبی در این شکل مشخص شده است. در دمای 164°C بار حرارتی هدف جوش‌آور جانبی 26 kW

تعیین شده، که این مقدار بار حرارتی ایده‌آل در یک سینی برج است. چون بار حرارتی مشخص شده در نمودار برج ایده‌آل با محدود کردن تعداد سینی‌ها تعیین می‌شود در این برج شبیه‌سازی شده، بار حرارتی هدف در سینی 21 است. نمودار بار حرارتی با در نظر گرفتن حداقل نیروی محرکه برای هر یک از سینی‌ها در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 5. نمودار اتلاف اکسرژی بعد از اصلاحات

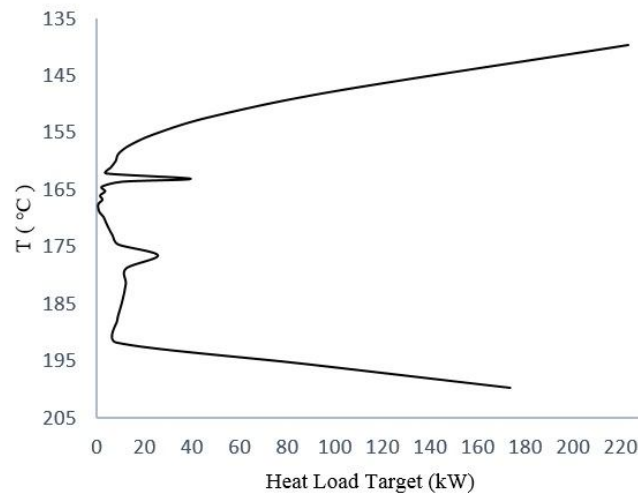


شکل 6. نمودار بار حرارتی هدف در برج برگشت پذیر

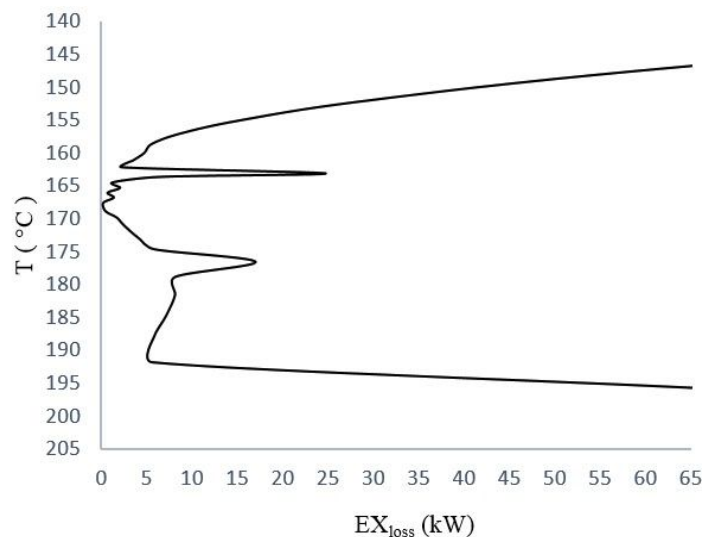
با مقایسه‌ی دو شکل 6 و 7 مشخص می‌شود که استفاده از حداقل نیروی محرکه، بار حرارتی هدف را کاهش می‌دهد. این کاهش در اطراف جوش‌آور جانبی بیشتر مشاهده می‌شود. با استفاده از بار حرارتی جدید که از

حداقل اتلاف اکسرژی به دست آمد، نمودار اتلاف اکسرژی از رابطه 10 محاسبه و رسم گردید. از مقایسه‌ی دو شکل 4 و 8 نیز معلوم می‌شود که نمودار در قسمت بالای جوش‌آور جانبی تغییری نکرده است اما در پایین جوش‌آور جانبی اتلاف اکسرژی کاهش پیدا کرده است.

درصد اکسرژی ذخیره شده از رابطه 11 محاسبه شده و در شکل 9 نشان داده شده است. در برج دی-بوتانایزر با توجه به نمودار اکسرژی ذخیره شده انرژی جانبی بهترین مکان برای جوش‌آور جانبی سینی 21 در دمای 164°C است که اکسرژی ذخیره شده آن 90/22% به دست می‌آید. در نتیجه با اضافه کردن یک سینی به برج اصلی بهترین مکان با استفاده از نمودار حداقل اتلاف اکسرژی به دست آورده شده است. جدول 2 داده‌های شبیه‌سازی برج را قبل و بعد از انجام اصلاحات نشان می‌دهد. برج اصلاح شده با 31 سینی و جوش‌آور جانبی در سینی 21 و بار حرارتی هدف 26 کیلووات به دست آمده است.



شکل 7. نمودار بار حرارتی با حداقل نیروی محرکه (0/05 kW)

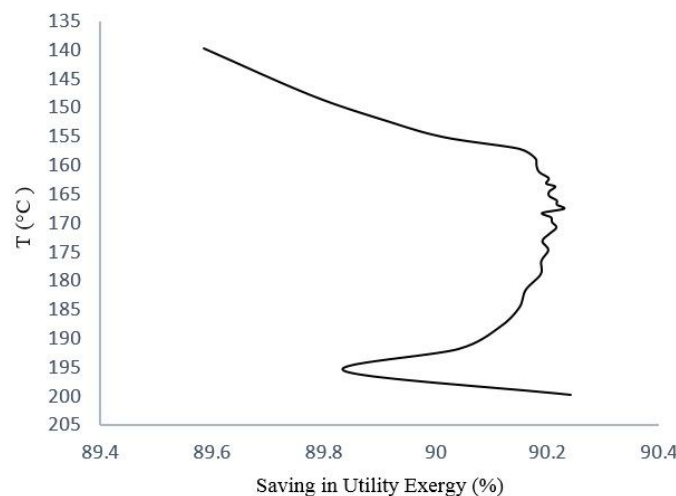


شکل 9. نمودار اتلاف اکسرژی با حداقل نیروی محرکه (0/05 kW)

مقایسه‌ی بار حرارتی جوش‌آور و چگالنده در دو حالت ذکر شده در جدول 2 نشان می‌دهد که بار حرارتی جوش‌آور و چگالنده در برج اصلاح شده، کاهش یافته است. هم‌چنین با اضافه شدن مبدل جانبی در سینی 21 از بار حرارتی چگالنده نیز کاسته شده است. از آنجایی که اصلاحات در بخش عاری سازی صورت گرفته و مبدل جانبی با در نظر گرفتن حداقل نیروی محرکه و شرایط ذکر شده در بخش عاری‌سازی اضافه گردیده است، بیشترین کاهش بار حرارتی در چگالنده (در حدود 5%) مشاهده شده است.

جدول 3. نتایج شبیه‌سازی برج اولیه و برج اصلاح شده

مرحله	مبدل	دما (°C)	بار حرارتی (kW)
برج اولیه	1	122/2	2380
	30	201/6	4746
برج اصلاح شده	1	122/2	2263
	21	164	26
	30	201/6	4744



شکل 10. درصد اکسرژی ذخیره شده انرژی جانبی

نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر انتگراسیون حرارتی داخلی برج تقطیر بر روی میزان مصرف انرژی و کیفیت آن مورد بررسی قرار گرفت و یک روش جدید برای تجزیه و تحلیل برج تقطیر ارائه گردید. ایده اصلی روش پیشنهادی، معرفی حداقل اتلاف اکسرژی به عنوان نیروی محرکه برای برج تقطیر است. با تعیین حداقل نیروی محرکه می‌توان مقدار بار حرارتی هدف را مشخص کرد که بهینه‌شدن این مقدار همراه با حداقل شدن هزینه‌ها می‌تواند به صورت هم‌زمان از نظر اقتصادی و ترمودینامیکی برای واحد مقرون به صرفه باشد. در این روش

دیگر نیازی به شبیه‌سازی‌های طولانی و وقت گیر نیست. علاوه بر این می‌توان بهترین مکان برای جایگزینی مبدل‌های جانبی را تعیین کرد. با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی بر روی برج تقطیر دی‌بوتانایزر مقدار حداقل نیروی محرکه در هر یک از سینی‌های برج، 0/05 kW به دست آمد که با توجه به این نیروی محرکه، نمودار بار حرارتی هدف ترسیم شده و مقدار حداقل بار حرارتی هدف مشخص گردید. با به‌کار بردن نمودار دما-حداقل اتلاف اکسرژی بهترین مکان مبدل جانبی برای بهینه کردن انرژی برج، تعیین گردید. با اضافه کردن یک سینی به برج و اضافه شدن مبدل جانبی در سینی 21 بار حرارتی چگالنده به میزان 5% کاهش یافت.

فهرست نمادها

نشانه	علامت
دبی مولی محصول پایین برج	$B(\text{kgmolh}^{-1})$
ضریب تصحیح	CF
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	$Cp(\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1})$
دبی مولی محصول مقطر	$D(\text{kgmolh}^{-1})$
اکسرژی	$Ex(\text{kW})$
دبی مولی جریان خوراک	$F(\text{kgmolh}^{-1})$
آنتالپی	$H(\text{kJkg}^{-1})$
شمارنده اجزاء	i
مرحله	j
تعداد مول‌ها	n
فشار	$P(\text{Pa})$
بار حرارتی	$Q(\text{kJ})$
ثابت عمومی گازها	$R(\text{JK}^{-1}\text{kgmol}^{-1})$
انتروپی	$S(\text{kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1})$
دما	$T(\text{°C})$
کار	$W(\text{kJ})$
ترکیب مولی در فاز مایع	x
ترکیب مولی در فاز گاز	y
راندمان آیزنتروپیک	η

اختلاف	Δ
محیط	0

منابع

1. Hurowitz S., Anderson J., Duvall M. and Riggs J. B., Distillation control configuration selection, *Journal of Process Control*, Vol. 13, 2003, 357–362.
2. Dhole V. and Linnhoff B., Distillation column targets, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 17, 1993, pp. 549–560.
3. Wankat P.C. and Kessler D.P., Two-feed distillation. Same composition feeds with different enthalpies, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 32, No. 12, 199, pp. 3061–3067.
4. Agrawal R. and Herron D.M., Optimal thermodynamic feed conditions for distillation of ideal binary mixtures, *AIChE journal*, Vol. 43, No. 11, 1997, pp. 2984–2996.
5. Bandyopadhyay S., Effect of feed on optimal thermodynamic performance of a distillation column, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 88, No.1, 2002, pp. 175–186.
6. Fonyo Z., Thermodynamic analysis of rectification. II. Finite cascade models, *International Chemical Engineering*, Vol. 14, 1974b, pp. 203–210.
7. Fonyo Z., Thermodynamic analysis of rectification. I. Reversible model of rectification, *International Chemical Engineering*, Vol. 14, 1974a, pp. 203–210.
8. Franklin N.L. and Wilkinson M.B., Reversibility in the separation of multicomponent mixtures, *Transaction of the Institute of Chemical Engineers*, Vol. 60, 1982, pp. 276–282.
9. Bandyopadhyay S., Malik R.K. and Shenoy U.V., Temperature–enthalpy curve for energy targeting of distillation columns, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 12, 1998, pp. 1733–1744.
10. De Koeijer G.M., Kjelstrup S., Van der Kooi H.J., Knoche K.F. and Andersen T.R., Positioning heat exchangers in binary tray distillation using iso-force operation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 9–12, 2002a, pp. 1571–1581.
11. De Koeijer G.M., Kjelstrup S., Salamon P., Siragusa G., Schaller M. and Hoffmann K. H., Comparison of entropy production rate minimization methods for binary



- diabatic distillation, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 41, No. 23, 2002b, pp. 5826–5834.
12. Stupin W.J. and Lockhart F.J., Thermally coupled distillation—a case history, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 68, No. 10, 1972, pp. 71–77.
 13. Mah R.S.H., Nicholas Jr J.J. and Wodnik R.B., Distillation with Secondary Reflux and Vaporization: A Comparative Evaluation, *AIChE Journal*, Vol. 23, No. 5, 1977, pp. 651–658.
 14. Douani M. and Terkhi S., Distillation of complex mixture. Part II, Performance analysis of a distillation column using exergy, *Entropy*, Vol. 9, No. 3, 2007, pp 137–151.
 15. Huang K., Shan L. and Zhu Q., A totally heat-integrated distillation column (THIDiC), the effect of feed pre-heating by distillate., *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 8–9, 2008, pp. 856–864.
 16. Aguirre P., Espinosa J., Tarifa E. and Scenna N., Optimal thermodynamic approximation to reversible distillation by means of inter-heaters and inter-coolers, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 36, No. 11, 1997, pp. 4882–4893.
 17. Gani R. and Bek-Pedersen E., Simple new algorithm for distillation column design, *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 6, 2000, pp. 1271–1274.
 18. De Koeijer G., Rosjorde A. and Kjelstrup S., Distribution of heat exchange in optimum diabatic distillation column, *Energy*, Vol. 29, No. 12–15, 2004, pp. 2425–2440.
 19. Pinto F.S., Zemp R., Jobson M. and Smith R., Thermodynamic optimization of distillation columns, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 13, 2011, pp. 2920–2934.
 20. Ghorbani B., Salehi G.R., Amidpour M. and Hamedei M.H., Exergy and exergoeconomic evaluation of gas separation process, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 9, 2012, pp. 86–93.
 21. Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T., Nakane T., Sato M., Takamatsu T. and Yoshitome H., Potential energy saving in ideal heat-integrated distillation column, *Applied Thermal Energy*, Vol. 18, No. 11, 1998, pp. 1077–1087.

22. Takamatsu T., Nakaiwa M. and Huang K., Simulation oriented development of a new heat integrated distillation column and its characteristics for energy saving, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 21, 1997, pp. 243–247.
23. Gadalla M., Olujic Z., Sun L., De Rijke A. and Jansens P.J., Pinch analysis–based approach to conceptual design of internally heat–integrated distillation columns, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 83, No. 8, 2005, pp. 987–993.
24. Khalifa M. and Emtir M., Rigorous optimization of heat–integrated and Petlyuk column distillation configurations based on feed conditions, *Clean Technology Environment Policy*, Vol. 11, No. 1, 2009, pp. 107–113.
25. Koehler J., Aguirre P. and Blass E., Minimum reflux calculations for non–ideal mixtures using the reversible distillation model, *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, 1991, pp. 3007–3021.
26. Olujic, Ž., Sun, L., Gadalla, M., De Rijke, A. and Jansens, P. J., Enhancing thermodynamic efficiency of energy intensive distillation columns via internal heat integration, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, Vol. 22, No. 4, 2008, pp. 383–392.
27. Suphanit, B., Design of internally heat-integrated distillation column (HIDiC): uniform heat transfer area versus uniform heat distribution. *Energy*, Vol. 35, No. 3, 2010, pp. 1505–1514.
28. Suphanit, B., Optimal heat distribution in the internally heat-integrated distillation column (HIDiC), *Energy*, Vol. 36, No. 7, 2011, pp. 4171–4181.
29. Treybal R.E., *Mass Transfer Operation*, Third Edition, McGraw-Hill, 1981.
30. Gadalla M., Olujic Z., De Rijke A. and Jansens P.J., Reducing CO₂ emissions of internally heat–integrated distillation columns for separation of close boiling mixtures, *Energy*, Vol. 31, No. 13, 2006, pp. 2409–2417.
31. Iwakabe K., Nakaiwa M., Huang K., Nakanishi T., Rosjorde A., Ohmori T., Endo A. and Yamamoto T., Energy saving in multi component separation using an internally heat–integrated distillation column (HIDiC), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, 2006, pp 1362–1368.
32. Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T, Nakane T., Sato M., Takamatsu T. and Yoshitome H, Potential energy saving in ideal heat integrated distillation column, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, 1998, pp 1077–1087.



33. Rivero R., Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation, *Energy*, Vol. 26, No. 6, 2001, pp. 561–593.
34. Hammond G.P., *Industrial energy analysis, thermodynamics and sustainability*, Vol. 84, 2007, pp 675–700.
35. Seider W., Seader J. and Lewin D., *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Design*, John Wiley and Sons, 2004.