بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد متانول با استفاده از فناوری پینچ و اصلاح چیدمان مبدل‌های حرارتی

پیام برزگر[۱]، امین احمدپور[۱]، حمید کاظمی اسفه[۲]، محمد شارعی[۲]، سید محسن پیغمبرزاده[۲*]

۱. شرکت ملی صنایع پتروشیمی، شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی
۲. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر، ماهشهر، ایران

[*] نویسنده مسول: peyghambarzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

چکیده

در این بررسی، با استفاده از فناوری پینچ و اصلاح چیدمان مبدل‌های حرارتی در یکی از واحدهای تولید متانول شرکت صنایع پتروشیمی فرایند بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعه وضعیت موجود شبکه مبدل‌های حرارتی و داده‌های آنالیز شده نشان می‌دهد که امکان صرفه‌جویی انرژی با توجه به کل یوتیلیتی مصرفی در شبکه مبدل‌های فرآیندی به میزان ۳۰/۲۳ درصد وجود دارد. در ادامه، به هدف‌گذاری روی شبکه مورد بررسی و اصلاح شبکه و آنالیز پینچ با استفاده از نرم افزار ASPEN HYSYS (V9) و نرم افزار ASPEN ENERGY ANALAYZER پرداخته شد. همچنین سناریوهای مختلفی بر اساس آنالیز پینچ تدوین و به جهت امکان‌پذیری و قابلیت اجرا مورد تجزیه و تحلیل محاسباتی، فرآیندی و عملیاتی قرار گرفت. در این تحقیق، هفت سناریو جهت چیدمان مبدل‌ها مشخص گردید که امکان حذف یک مبدل پیش‌گرم‌کن و تبدیل آن به مبدلی که با استفاده از حرارت سیستم کار کند در سناریوی ۱ وجود دارد. سناریو های ۲ تا ۵ امکان ایجاد صرفه جویی ۳۲ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی را دارند. از طرف دیگر سناریوهای ۶ و ۷ به ترتیب باعث صرفه جویی انرژی ۴۳ و ۵۷ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی می‌شوند. سناریوی هفتم که بیشترین صرفه‌جویی انرژی را دارد، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های یوتیلیتی تا حدود ۱۱ میلیارد تومان در سال شود. جهت جمع‌بندی، بررسی فرایندی هفت سناریو از نظر هزینه اجرا و ریسک عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت سناریو شماره ۱ به عنوان بهترین سناریو انتخاب و معرفی گردید. بر اساس سناریوی منتخب، علاوه بر کاهش مصرف بخار، با کاهش توان مصرفی فن‌های هوایی، مصرف برق واحد نیز کاهش یافت. صرفه حاصل از انجام این سناریو حدودا معادل ۱/۵ میلیارد تومان در سال محاسبه گردید.

کلمات کلیدی: آنالیز پینچ، واحد متانول، نرم افزار ASPEN ، بهینه سازی انرژی.

مقدمه

انرژی در بسیاری از فرآیندهای پتروشیمیایی، پالایشگاهی، شیمیایی، غذایی، دارویی و غیره همواره به عنوان یک عامل مهم در تولید مطرح بوده و هزینه‌های مربوط به آن، نقش عمده‌ای را در تعیین بهای تمام شده محصولات ایفا نموده است. از این رو تعیین میزان بهینه و مطلوب مصرف انرژی به عنوان یکی از اصول مهم طراحی مهندسی بیش از پیش مورد توجه و نظر طراحان قرار گرفته است. بدین ترتیب که علاوه بر صرفه جویی اقتصادی گام‌های مهمی در جهت جلوگیری از افزایش آلودگی-های زیست محیطی برداشته شده است.

از دیگر سو در همه سیستم‌های مصرف کننده انرژی یک تقابل اقتصادی بین هزینه سرمایه گذاری (capital cost) و هزینه‌های عملیاتی (Operating cost) وجود دارد و نقطه تعادل میان این دو، راندمان سیستم را نشان می‌دهد. در سیستم‌هایی که راندمان بالا است عموما هزینه‌های عملیاتی (وابسته به مصرف انرژی، انواع آن، درجه حرارت‌ها، قیمت‌ها و غیره) پایین و هزینه‌های سرمایه‌گذاری زیاد است. بالعکس، در سیستم‌هایی با راندمان پایین، مصرف انرژی بالا و میزان هزینه سرمایه گذاری کمتر خواهد بود. در این راستا و با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های کل تولید، تحقیقات و پژوهش‌های بسیاری به منظور بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی، به عنوان بخش بسیار مهمی از فرآیند به لحاظ امکان بازیافت انرژی صورت گرفته است که به دو شکل طراحی از پایه یا طراحی شبکه‌های جدید و دیگری طراحی اصلاحی و بهینه سازی شبکه مبدل‌های حرارتی موجود می‌باشد. در این راستا یکی از مهم‌ترین روش‌ها، روش‌های مبتنی بر اصول

ترمودینامیکی و آنالیز پینچ می‌باشد. در واقع تکنولوژی پینچ با استفاده از قوانین ترمودینامیک و اصول انتقال حرارت، قادر است کمترین میزان مصرف انرژی یک فرآیند که از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه است را مشخص نموده و در نهایت بازیافت حرارتی قابل توجهی را باعث شود. کاهش هزینه‌های برق مصرفی واحد، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش شدت انرژی و در نهایت کاهش نرخ بازگشت سرمایه از سایر نتایج مورد انتظار اجرای این پروژه خواهد بود. این پروژه با تعیین میزان بهینه و مطلوب مصرف انرژی، سبب کاهش هدر رفت انرژی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش آلایندگی محیط زیست می‌گردد. همچنین با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از احتراق در بویلرها و مصرف گاز دی اکسید کربن در واحد تولید متانول باعث کاهش اثرات گلخانه‌ای آن می‌شود.

لازمه افزایش بازیافت حرارتی از جریان‌های گرم و انتقال آن با استفاده از سطوح حرارتی به جریان‌های سرد، تهیه سطوح حرارتی بیشتر و نصب آنها با در نظر گرفتن مفاهیم پینچ است که نتیجه آن کاهش مصرف انرژی می‌باشد. اما ، نصب سطوح حرارتی جدید، نیازمند هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر است. تقابل میان صرفه‌جویی انرژی و هزینه سرمایه‌گذاری از نقاط بارز پروژه‌های تکنولوژی پینچ است و همواره نقطه‌ای که در آن مجموع هزینه‌ها کمینه گردد، بعنوان نقطه‌کاری تعیین می‌شود.

استفاده از تکنولوژی پینچ به مطالعه لینهوف در سال ۱۹۷۹ بر می‌گردد. از مهم ترین کاربردهای آن می توان به طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی، انتخاب صحیح و بهینه منابع حرارتی گرم و سرد خارجی، انتگراسیون حرارتی برج‌های تقطیر، رآکتورها، کاهش مصرف گازهای آلاینده، طراحی سیستم‌های مصرف‌کننده آب و تولید پساب و غیره اشاره نمود.

این تکنولوژی عمدتا ابزاری برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی است. امروزه استفاده از آنالیز پینچ در طراحی بهینه شبکه مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های بازیافت حرارت کاربرد بسیار وسیعی یافته است. حرکت انرژی از جریان‌های گرم به جریان‌های سرد توسط اختلاف دما ایجاد می‌شود. هر چه اختلاف دما بیشتر باشد، انتقال حرارت با سهولت بیشتری انجام می‌شود؛ این در حالیست که بالا بودن اختلاف دما در سیستم، ضایعات ترمودینامیکی را بالا می‌برد [۱]. بنابراین مهارت یک مهندس فرآیند آن است که بتواند با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی بهترین اختلاف دما را با بیشترین قابلیت بازیافت حرارت بین انواع جریان های مختلف پیدا کند. با ترسیم گرمای در دسترس فرآیند به عنوان "جریان مرکب گرم" و گرمای مورد نیاز "جریان مرکب سرد" ابزاری به دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان مقدار کل انرژی و اختلاف دمای مورد نیاز را تعیین کرد. در این سیستم حداقل اختلاف دمای مجاز ΔT_{min} تنها در یک نقطه اتفاق می‌افتد که اصطلاحاً آن را نقطه پینچ می‌گویند. این نقطه بیانگر حداقل نیروی محرکه از جریان مرکب گرم به سرد است. جونز و اسمیت آنالیز پینچ را با استفاده از مولفه‌های انتالپی و دما برای ارزیابی سیستم تبخیرکننده‌ها به کار بردند [۲]. با طراحی بهینه سطوح انتقال حرارت و نحوه قرارگیری آن‌ها در فرآیندهای مختلف می‌توان به طور مناسبی گرمایش جریان‌های سرد شبکه را با استفاده از حرارت بازیافتی از جریان‌های گرم انجام داد تا در حد بسیار زیادی تقاضای انرژی تامین شده توسط سرویس‌های جانبی کاهش یابد [۳].

از دیگر سو واحدهای تولید متانول از جمله فرآیندهای پتروشیمیایی به شدت انرژی‌بر محسوب می شوند زیرا برای تهیه گاز طبیعی سولفورزدایی شده، تهیه گاز سنتز، تولید گاز متانول در دما و فشار بالا و در نهایت تقلیل فشار، خنک کردن، تقطیر و خالص سازی محصول، انرژی فراوانی هم به صورت حرارتی برای سرمایش و گرمایش جریان‌ها و انجام فرآیندهای شیمیایی و هم به صورت کار محوری جهت پمپاژ مایعات و چگالش (فشرده سازی) گازها موردنیاز می‌باشد. با یکپارچه سازی فرآیند تولید متانول با استفاده از آنالیز پینچ این امکان وجود دارد که با استفاده از حرارت‌های اتلافی ناشی از عملیات سرمایش جریان‌های گرم فرآیندی، استفاده مناسبی برای گرمایش جریان‌های سرد فرآیندی به عمل آورد [۴, ۵].

پورانی و همکاران [۶] با هدف بهینه سازی بازدهی انرژی در واحدهای تولید متانول با استفاده از فرآیند گازی سازی زیست توده‌ها، مطالعه‌ای تحقیقی را به انجام رساندند. اگر چه فرآیند تولید متانول در این تحقیق با فرآیند تولید با گاز طبیعی در بخش‌هایی متفاوت است ولی در قسمتی از نتیجه‌گیری این محققان به وجود جریان‌های گرم بسیار در این فرآیند اشاره نموده و توصیه کردند که با استفاده از این جریان‌ها در تولید بخار می‌توان ارزش افزوده ایجاد نموده و راندمان کلی مصرف انرژی در واحد را افزایش داد.

کیجوکانین و همکاران [۷] بازیافت انرژی و مطالعه اقتصادی یک فرآیند تولید متانول را با به‌کارگیری تکنولوژی پینچ به انجام رساندند. آنها توانستند با استفاده از جریان گرم خروجی از کمپرسورهای گاز سنتز برای پیش‌گرم کردن خوراک راکتور متانول تا ۳۰ درصد در مصرف انرژی و هزینه آن صرفه جویی کنند. لازم به ذکر است که پکیج کمپرسور از محدوده ارزیابی پروژه حاضر خارج بوده و امکان بررسی این سناریو میسر نبود.

نصر و ابریشمی [۸] با هدف مدیریت انرژی و بهبود فرآیندی، واحد تولید متانول پتروشیمی فن آوران را مورد تحقیق قرار دادند. چندین منبع فارسی مشابه نیز از نگارندگان این مقاله وجود دارد که همگی برگرفته و یا مشابه همین تحقیق بوده اند. آنها جهت اجرای تحقیق خود از تکنولوژی پینچ و تکنولوژی تیوب های پیچشی استفاده نمودند. آنها گزارش کردند که با ایجاد تغییراتی در واحد، امکان بازیافت انرژی از محل کاهش مصرف ۳۵ درصدی در یوتیلیتی سرد و کاهش مصرف ۱۸ درصدی در یوتیلیتی گرم امکان‌پذیر است. همچنین بازگشت سرمایه اجرای این پروژه یک سال محاسبه شده است. اهم پیشنهادهای فنی آنها اضافه کردن مبدل های حرارتی جهت تبادل حرارت جریان ها به شرح زیر بوده است.

۱- استفاده از گرمای جریان گاز ریفورمر برای پیش‌گرم کردن هوای احتراق
۲- استفاده از گرمای جریان خروجی کمپرسور گاز سنتز برای پیش‌گرم کردن خوراک راکتورهای متانول
۳- استفاده از گرمای جریان خروجی راکتورهای متانول برای پیش‌گرم کردن خوراک آن راکتورها
۴- استفاده از گرمای جریان خروجی راکتورهای متانول برای استفاده در ریبویلر برج های جداسازی

با بررسی و مقایسه دقیق پیشنهادهای آنها و پروژه حاضر باید اشاره نمود که پیشنهاد اول و دوم که به ترتیب مربوط به پکیج کوره و پکیج کمپرسور بوده‌اند در محدوده بررسی این تحقیق نمی‌باشند. پیشنهاد سوم در پروژه حاضر توسط طراح دیده شده است و در نهایت پیشنهاد چهارم در سناریو های اصلاحی تحقیق حاضر آمده است.

لیو و همکاران [۹] با هدف آنالیز شبکه مبدل‌های حرارتی در یک واحد تولید متانول تحقیقی را با بکارگیری تکنولوژی پینچ به انجام رساندند. آنها ضمن مقایسه یک فرآیند اولیه و یک فرآیند پینچ شده تعداد مبدل‌های حرارتی فرآیندی را به ترتیب دو و هفت مبدل گزارش نمودند. در ادامه با ارائه یک الگوریتم ریاضی جهت تحلیل انعطاف پذیری شبکه مبدل‌های حرارتی، دو تغییر را امکان‌پذیر دانسته اند که در مجموع می تواند باعث کاهش حدود ۱۴ درصدی در مصرف انرژی شود. تغییرات پیشنهادی این گروه تحقیقاتی به شرح زیر است:

۱. استفاده از جریان‌های گرم برای پیش‌گرم کردن هوای احتراق ورودی
۲. استفاده از جریان‌های گرم برای گرمایش ریبویلرها در بخش جداسازی متانول

همانگونه که قبلا هم اشاره شد با توجه به محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای تحقیق حاضر امکان ارزیابی پیشنهاد اول وجود ندارد و همچنین پیشنهاد دوم در سناریوهای اصلاحی تحقیق حاضر آمده است.

فیلیا و همکاران [۱۰] مطالعه آنالیز پینچ را برای یک واحد تولید متانول از متان مورد تحقیق قرار دادند. هدف اصلی آنها دستیابی به بهترین اختلاف دمای حداقل در شبکه مبدل‌های حرارتی با مقایسه داده‌های هزینه بهره برداری، هزینه ساخت و در نهایت هزینه کل بوده است. آنها برای اجرای این پروژه از داده‌ها و فرآیند تولید ارائه شده توسط کیجوکانین و همکاران [۷] که در همین بخش بررسی شد، استفاده نمودند. این مطالعه در محدوده اختلاف دمای حداقل ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و بهترین نتیجه را در ۱۰ درجه سانتی‌گراد گزارش نمودند. شایان ذکر است که در مطالعه پیش رو نیز اختلاف دمای حداقل برای شبکه مبدل های حرارتی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

لیو و همکاران [۱۱] شبکه مبدل حرارتی (HEN) در فرآیند تبدیل گاز سنتز به متانول بر اساس فناوری پینچ تحت شرایط عملیاتی پایدار را طراحی و بهینه‌سازی نمودند تا مصرف انرژی و سود اقتصادی متعادل شود. سپس یک HEN انعطاف پذیر با روش تقسیم و ادغام بعدی جریان‌ها طراحی کردند که به‌ترتیب منجر به کاهش ۱۳.۸۹٪ و ۲۰.۸۲٪ در مصرف انرژی و هزینه کل شد.

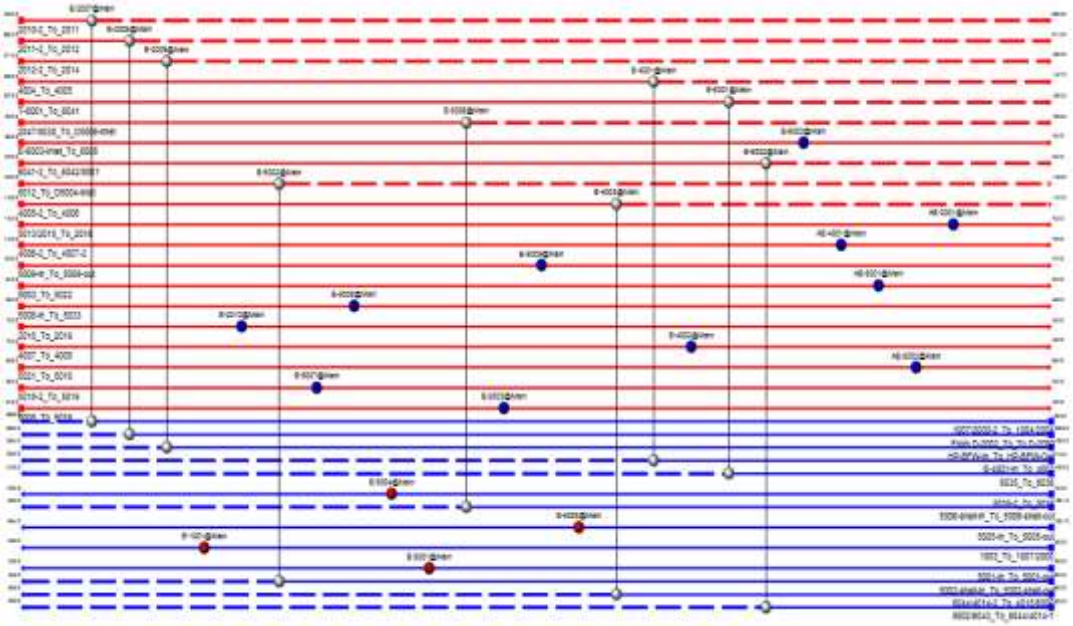
نایانا و گیگی [۱۲] با توسعه یک مدل دینامیکی به یکپارچه‌سازی حرارتی یک راکتور متانول با دانش فنی Lurgi پرداختند. به عنوان اولین گام، کارخانه در حالت پایدار در نرم افزار UniSim برای تولید متانول از گاز طبیعی شبیه سازی شد. گاز طبیعی از طریق اصلاح چند مرحله‌ای به گاز سنتز تبدیل می‌شود و با یک سری عملیات واکنش و جداسازی به متانول تبدیل می‌شود. سپس از شبیه‌سازی دینامیکی برای مطالعه رفتار گذرای کارخانه با قرار گرفتن در نقطه تنظیم و تغییرات بار و کنترل دمای جریان‌ها استفاده می‌شود. به منظور بهبود بهره‌وری انرژی کارخانه متانول، یکپارچه‌سازی حرارتی با استفاده از فناوری پینچ با استفاده از نرم افزار HINT انجام شد و بازیابی حرارت برآورد گردید.

پوهار و همکاران [۱۳] به بررسی کاهش هزینه، انرژی و انتشار فرآیند تولید فرمالین از طریق اصلاح بخار متان پرداختند. فرآیند تولید فرمالین با استفاده از Aspen HYSYS شبیه‌سازی گردید و یکپارچه‌سازی حرارتی فرآیند تولید بر اساس طراحی شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم افزار GAMS انجام شد. تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی و زیست محیطی برای هر دو طرح غیریکپارچه و یکپارچه انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی، مصرف گرما را تا حدود ۳۹ درصد کاهش می‌دهد که منجر به صرفه‌جویی ۱۱ درصدی در هزینه سرمایه و تبدیل هزینه عملیاتی سالانه به درآمد مثبت می‌شود.

بنابراین، در تحقیق حاضر با مطالعه مقالات گذشته در مورد بهینه سازی مصرف انرژی در واحدهای تولید متانول، سناریوهای مختلفی جهت بهینه سازی مصرف انرژی در این واحد برگزیده و با استفاده از تکنولوژی پینچ میزان مصرف انرژی در این واحد و همچنین میزان صرفه اقتصادی سناریوهای مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این تحقیق تمرکز بر روی مبدل‌های حرارتی فرآیندی می‌باشد. به همین جهت برخی از تجهیزات انرژی بر که در چهارچوب مبدل‌های فرآیندی قرار نمی‌گیرند از محدوده این تحقیق کنار گذاشته شدند.

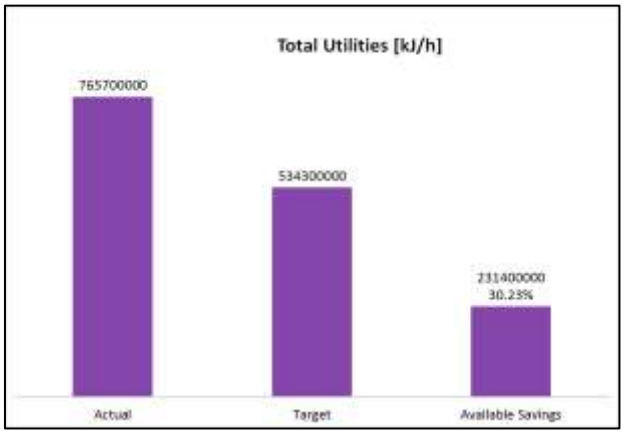
روش تحقیق

شبکه مبدل‌های حرارتی موجود در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل، دایره‌های آبی، قرمز و خاکستری به‌ترتیب نشان‌دهنده کولر، هیتر و مبدل‌های حرارتی می‌باشند. در این شبکه، کل دستگاه‌های تبادل حرارتی ۲۴ دستگاه بوده که از این تعداد ۹ مبدل حرارتی جریان‌های فرآیندی و ۴ هیتر برای گرم کردن سیال سرد فرآیندی و ۷ کولر و ۴ فن هوایی برای سرد کردن سیال گرم فرآیندی می باشد. همچنین دستگاه‌های تبادل حرارت بخش استیم سازی در زمره مبدل‌های حرارتی فرآیندی در نظر گرفته نشده‌اند. جریان یوتیلیتی در هیترها، بخار فشار پایین و در کولرها، آب کولینگ می باشد.



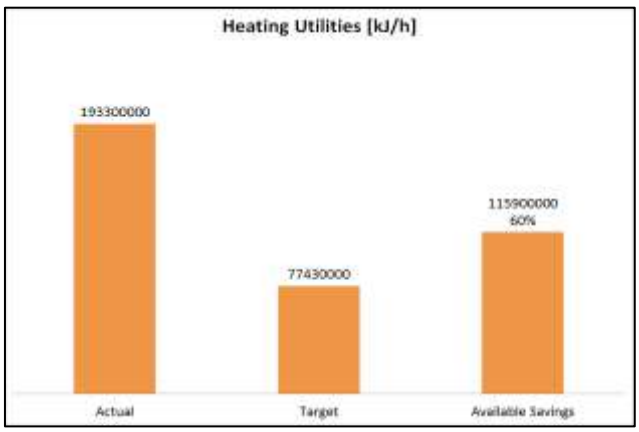
شکل(۱): شبکه مبدل‌های حرارتی تحقیق حاضر.

کل یوتیلیتی مصرفی در شبکه مبدل های حرارتی واحد متانول این شرکت حدودا معادل ۷۶۶ میلیون کیلوژول بر ساعت می‌باشد. هدف گذاری این پروژه در شرایط ایده‌آل کاهش یوتیلیتی مصرفی به حدود ۵۳۴ میلیون کیلوژول بر ساعت محاسبه شده است. بنابراین با تفریق مقدار یوتیلیتی مصرفی شرایط ایده‌آل از کل یوتیلیتی مصرفی در شبکه موجود حدود ۲۳۲ میلیون کیلوژول بر ساعت صرفه جویی انرژی احتمالی خواهیم داشت. این مقدار صرفه جویی انرژی در شرایط ایده‌آل بیشتر از ۳۰ درصد کل یوتیلیتی مصرفی در واحد خواهد بود. کلیه موارد فوق الذکر در شکل (۲) به صورت گرافیکی خلاصه شده است. توضیح اینکه کل یوتیلیتی مصرفی شامل یوتیلیتی گرم و سرد می‌باشد که رقمی معادل ۷۶۶ میلیون کیلوژول بر ساعت است. مقدار ارائه شده بر مبنای لیست مبدل‌های موجود در محدوده تحقیق حاضر می‌باشد و بیانگر کل یوتیلیتی مصرفی واحد نمی‌باشد. مقدار هدف گذاری مصرف یوتیلیتی توسط نرم افزار محاسبه می‌شود که بر مبنای کمترین دمای نزدیکی در مبدل‌های حرارتی و همچنین مقدار یوتیلیتی محدودکننده قابل استحصال که در این تحقیق، یوتیلیتی گرم می‌باشد، محاسبه می شود. مقدار محاسبه شده قابل تبادل جریان گرم با توجه به هدف گذاری فوق حدود ۱۱۶ میلیون کیلوژول بر ساعت می‌باشد که می‌تواند در تبادل با جریان‌های سرد قرار گرفته و بدین صورت همین مقدار نیز از یوتیلیتی سرد کاهش می‌یابد.



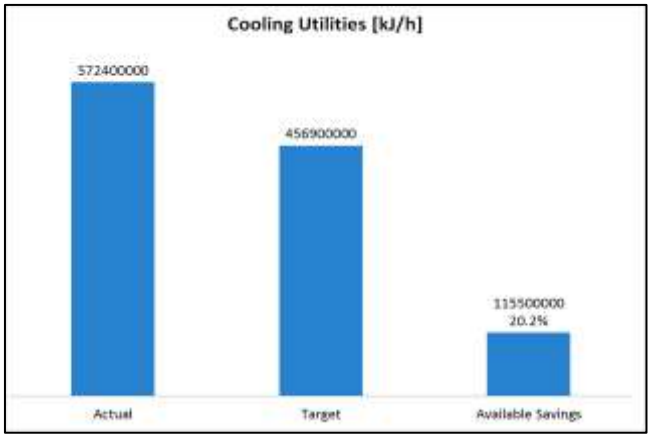
شکل (۲): میزان کل یوتیلیتی مصرفی، انرژی هدف ایده آل و انرژی قابل صرفه جویی در محدوده این تحقیق.

کل یوتیلیتی گرم مصرفی در شبکه مبدل‌های حرارتی واحد حدودا معادل ۱۹۳ میلیون کیلوژول بر ساعت می‌باشد. هدف گذاری این پروژه در شرایط ایده‌آل کاهش یوتیلیتی گرم مصرفی به حدود ۷۷ میلیون کیلوژول بر ساعت محاسبه شده است. بنابراین با تفریق مقدار یوتیلیتی گرم مصرفی شرایط ایده‌آل از کل یوتیلیتی گرم مصرفی در شبکه موجود حدود ۱۱۶ میلیون کیلوژول بر ساعت صرفه جویی انرژی خواهیم داشت. این مقدار صرفه‌جویی انرژی در شرایط ایده‌آل معادل ۶۰ درصد کل یوتیلیتی گرم مصرفی در واحد خواهد بود. کلیه موارد فوق‌الذکر در شکل (۳) به صورت گرافیکی خلاصه شده است.



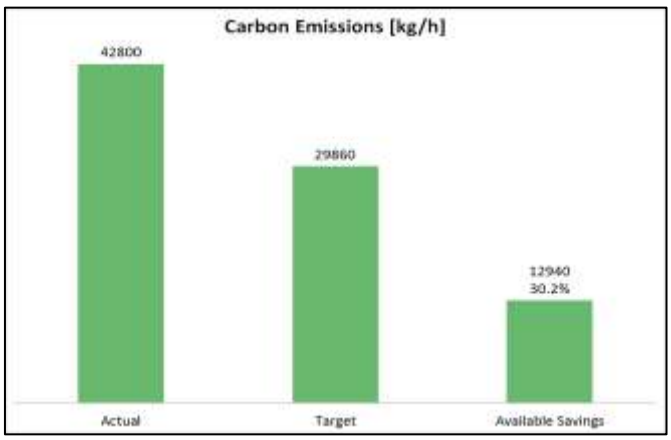
شکل(۳): میزان یوتیلیتی گرم مصرفی، هدف ایده‌آل و انرژی گرم قابل صرفه جویی در محدوده این تحقیق.

کل یوتیلیتی سرد مصرفی در شبکه مبدل‌های حرارتی واحد حدودا معادل ۵۷۲ میلیون کیلوژول بر ساعت می‌باشد. هدف گذاری این پروژه در شرایط ایده‌آل کاهش یوتیلیتی سرد مصرفی به حدود ۴۵۷ میلیون کیلوژول بر ساعت محاسبه شده است. بنابراین با تفریق مقدار یوتیلیتی سرد مصرفی شرایط ایده‌آل از کل یوتیلیتی سرد مصرفی در شبکه موجود حدود ۱۱۵ میلیون کیلوژول بر ساعت صرفه جویی انرژی خواهیم داشت. این مقدار صرفه جویی انرژی در شرایط ایده‌آل حدودا معادل ۲۰ درصد کل یوتیلیتی سرد مصرفی در واحد خواهد بود. کلیه موارد فوق الذکر در شکل (۴) به صورت گرافیکی خلاصه شده است.



شکل(۴): میزان یوتیلیتی سرد مصرفی، هدف ایده‌آل و انرژی سرد قابل صرفه جویی در محدوده این تحقیق.

کل انتشار گاز دی اکسید کربن بر مبنای مقدار یوتیلیی مصرفی معادل ۴۲۸۰۰ کیلوگرم در ساعت می‌باشد. در شرایط ایده‌آل هدف، کاهش انتشار دی اکسید کربن به ۲۹۸۶۰ کیلوگرم در ساعت می‌باشد. در صورت رسیدن به هدف می‌توان تا مقدار ۱۲۹۴۰ کیلوگرم بر ساعت معادل ۳۰ درصد کل از گاز دی اکسید کربن منتشر شده را کاهش داد. مقدار انتشار گاز دی اکسیدکربن و مقدار کاهش آن بر مبنای کل یوتیلیتی مصرفی و کاهش ۲۳۲ میلیون کیلوژول بر ساعت یوتیلیتی‌های گرم و سرد توسط نرم‌افزار محاسبه شده است. انتشار گاز دی اکسید کربن به صورت حاصل‌ضرب انرژی یوتیلیتی مصرفی (واحد انرژی بر زمان) در فاکتور انرژی (کیلوگرم دی اکسید کربن بر واحد انرژی) محاسبه شده است و نتایج آن در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل(۵): میزان انتشار دی اکسید کربن، هدف ایده‌آل و انرژی سرد قابل صرفه جویی در محدوده این تحقیق.

شبکه مبدل‌های حرارتی واحد با استفاده از نرم‌افزار ASPEN HYSYS (V9) و نرم‌افزار ASPEN ENERGY ANALAYZER شبیه‌سازی شده و بار حرارتی کلیه مبدل‌ها بر مبنای تغییر در آنتالپی جریان‌های سرد و گرم در تجهیزات

تبادل حرارت محاسبه شده است. در این شبیه سازی از معادله NRTL برای تعیین خواص ترمودینامیکی و فیزیکی مواد استفاده شده است. مقدار حداقل دمای تماس جریان های گرم و سرد در این پروژه ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

پس از انجام مطالعه، تغییرات پیشنهادی در قالب سناریوهای مختلف از شماره ۱ تا ۷ تعیین گردید. آنچه به‌صورت کلی می‌توان از این سناریوهای اصلاحی برداشت کرد، تامین انرژی گرمایشی مورد نیاز در مبدل ۱۰۰۱ و ریبویلرهای ۵۰۰۱ و ۵۰۰۵ از محل انرژی جریان‌های گرم فرآیندی به جای استفاده از یوتیلیتی خارجی (بخار فشار پایین) می‌باشد. بر اساس سناریوهای اصلاحی، انرژی مورد نیاز مبدل‌های مذکور از جریان‌های فرآیندی گرم خروجی راکتورهای متانول R-4001 I/II (جریان ۴۰۰۴) تا فن هوایی AE-4001 (جریان ۴۰۰۷) و انرژی جریان گاز ریفرمر حد فاصل درام ۵۰۰۴ (جریان ۲۰۱۵/۵۰۱۳) تا درام ۲۰۰۳ (جریان ۲۰۱۶) تامین می‌شود. همچنین با انجام سناریوهای اصلاحی ضمن تامین بخشی از انرژی گرم مورد نیاز ، بخشی از یوتیلیتی (برق فن‌های هوایی) به واسطه کاهش بار حرارتی در تجهیزات تبادل حرارت سرمایشی کاهش می‌یابد. تجهیزات سرمایش مورد اشاره شامل دو فن هوایی AE-2001 و AE-4001 می‌باشد.

نکته دیگری که از سناریوهای اصلاحی می‌توان برداشت کرد این است که سناریوهای ۲، ۳ و ۴ به لحاظ میزان صرفه جویی انرژی و کاهش هزینه یوتیلیتی یکسان بوده و تنها در محل قرارگیری مبدل‌های حرارتی اصلاح شده تفاوت دارند. شایان ذکر است که در ارائه سناریوهای اصلاحی، الزامات ایمنی و بهره برداری خاصی به جز امکان‌پذیری عملیاتی مد نظر قرار نگرفته است. در ادامه در مورد هر یک از سناریوهای منتخب به طور خلاصه توضیحاتی ارائه شده است:

در سناریوی شماره ۱ ، هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز تامین می شود.

در سناریوی شماره۲ ، ریبویلر (هیتر) ۵۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۴۰۰۵ برای تامین ۷/۶ مگاوات انرژی آن استفاده شده است. همچنین هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ برای حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز تامین می‌شود. در این سناریو می‌توان به جابه‌جایی مبدل ۴۰۰۳ نیز اشاره کرد. البته این جابه‌جایی تاثیری در صرفه‌جویی انرژی در واحد ندارد ولی می‌تواند در بررسی فرآیندی، بهره برداری و اقتصادی پروژه مورد توجه قرار گیرد.

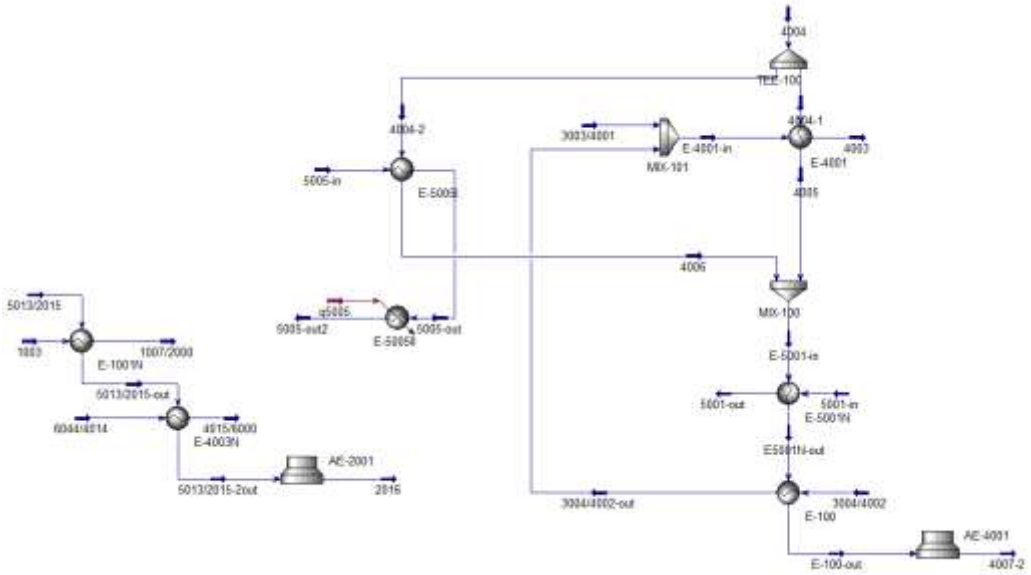
در سناریو شماره ۳، ریبویلر (هیتر) ۵۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ برای تامین ۷/۶ مگاوات انرژی آن استفاده شده است. همچنین هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۴۰۰۶ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز آن تامین می‌شود.

در سناریوی شماره ۴ ، ریبویلر (هیتر) ۵۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۴۰۰۶ برای تامین ۷/۶ مگاوات انرژی آن استفاده شده است. همچنین هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز تامین می‌شود.

در سناریو شماره ۵، هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز تامین می‌شود. در ادامه مبدل ۴۰۰۳ جابه‌جا شده و پس از مبدل ۱۰۰۱ جدید قرار می‌گیرد. این جابه‌جایی سبب می‌شود بتوان حدود ۱۲ مگاوات مازاد انرژی از جریان ۴۰۰۴ خروجی راکتورهای متانول را برای گرمایش در ریبویلر ۵۰۰۵ استفاده نمود.

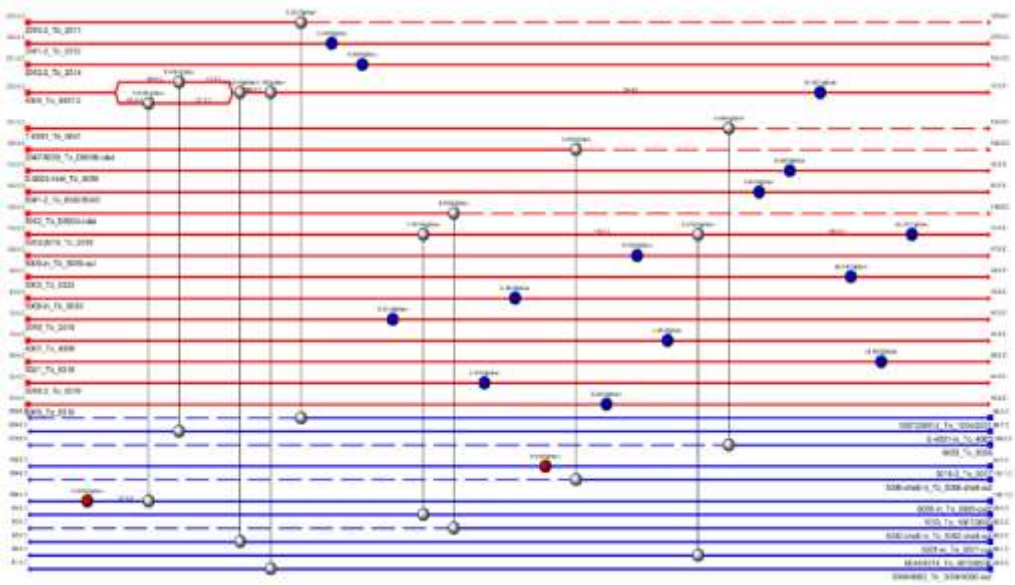
در سناریوی شماره ۶، ریبویلر (هیتر) ۵۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۴۰۰۶ برای تامین ۷/۶ مگاوات انرژی آن استفاده شده است. همچنین هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز تامین می‌شود. در ادامه، مبدل ۴۰۰۳ جابه‌جا شده و پس از مبدل ۱۰۰۱ جدید قرار می‌گیرد. این جابه‌جایی سبب می‌شود بتوان حدود ۵ مگاوات مازاد انرژی از جریان ۴۰۰۴ خروجی راکتورهای متانول را برای گرمایش در ریبویلر ۵۰۰۵ استفاده نمود.

در سناریوی شماره ۷، ریبویلر (هیتر) ۵۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۴۰۰۶ برای تامین ۷/۶ مگاوات انرژی آن استفاده شده است. همچنین هیتر ۱۰۰۱ به یک مبدل حرارتی تبدیل شده و از جریان گرم ۲۰۱۵/۵۰۱۳ حدود ۲/۵ مگاوات انرژی مورد نیاز آن تامین می‌شود. در این سناریو با اضافه شدن یک مبدل حرارتی جدید با شماره E-100 از انرژی سیال خروجی راکتورهای متانول قبل از وارد شدن به فن هوایی ۴۰۰۱ برای گرمایش یکی از دو جریان ورودی به مبدل حرارتی ۴۰۰۱ با شماره ۳۰۰۴/۴۰۰۲ استفاده می‌شود. اضافه شدن این مبدل حرارتی به همراه جابه‌جایی مبدل حرارتی ۴۰۰۳ سبب می‌شود بتوان حدود ۱۲ مگاوات مازاد انرژی از جریان ۴۰۰۴ خروجی راکتورهای متانول را برای گرمایش در ریبویلر ۵۰۰۵ استفاده نمود. شکل PFD واحد متانول بر اساس اصلاحات سناریوی ۷ در شکل (۶) نمایش داده شده است.



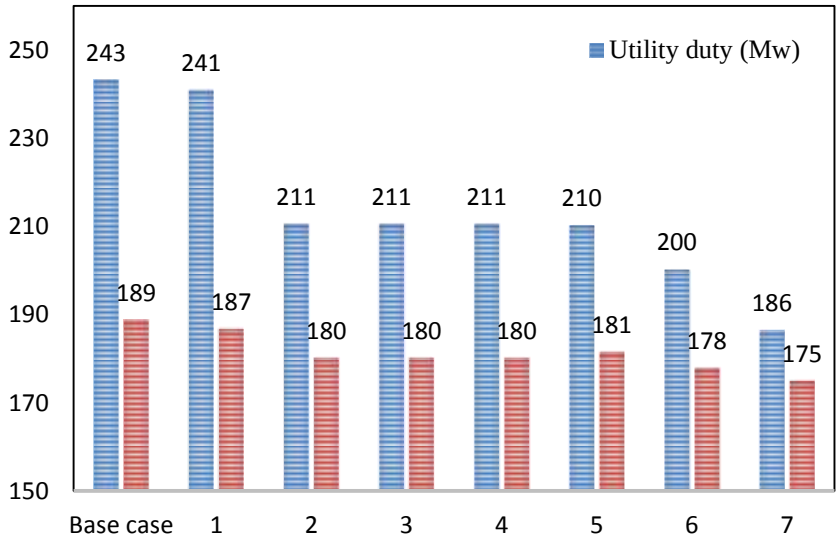
شکل(۶): سناریوی شماره ۷.

شبکه مبدل‌های حرارتی بر مبنای اجرای سناریوی ۷ به صورت شکل (۷) خواهد بود.



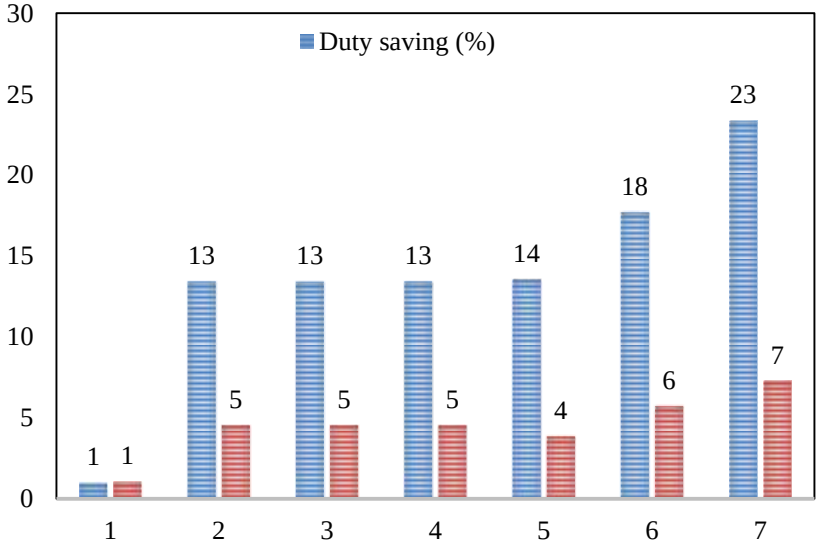
شکل(۷): شبکه مبدل‌های حرارتی بر مبنای اجرای سناریوی ۷.

مقدار یوتیلیتی مصرفی بر حسب مگاوات و هزینه آن بر حسب میلیون ریال در ساعت برای حالت پایه (Base case) و ۷ سناریوی اصلاحی پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل کاملا مشخص است که سناریو های ۲ تا ۵ امکان ایجاد صرفه جویی ۳۲ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی را دارند. این مقدار صرفه جویی انرژی باعث کاهش ۹ میلیون ریال در ساعت یا حدود ۶/۵ میلیارد تومان در سال می شود. از طرف دیگر سناریو های ۶ و ۷ به ترتیب باعث صرفه جویی انرژی ۴۳ و ۵۷ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی می شود. سناریوی هفتم که بیشترین صرفه جویی انرژی را دارد، می تواند باعث کاهش هزینه های یوتیلیتی تا حدود ۱۱ میلیارد تومان در سال شود.



شکل(۸): مقدار یوتیلیتی بر حسب مگاوات و هزینه آن بر حسب میلیون ریال در ساعت برای حالت پایه و ۷ سناریوی پیشنهادی.

در شکل(۹) درصد صرفه جویی انرژی و درصد کاهش هزینه‌های یوتیلیتی در سناریوهای مختلف به‌صورت گرافیکی جمع‌بندی شده است. همانطور که از شکل برآورد می‌شود اجرای سناریوهای اصلاحی بین ۱ تا ۲۳ درصد در انرژی مصرفی واحد صرفه‌جویی ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، این صرفه‌جویی انرژی باعث کاهش ۱ تا ۷ درصدی در هزینه‌ها خواهد شد. لازم به ذکر است سناریوهای ارائه شده در ادامه می‌بایست از نقطه نظر بهره برداری و امکان‌پذیری در اجرا مورد مطالعه قرار گیرد. پس از این مرحله و تعیین سناریو و یا سناریوهای منتخب برآورد اقتصادی اجرای پروژه انجام خواهد شد.



شکل(۹): درصد صرفه‌جویی انرژی و درصد کاهش هزینه‌های یوتیلیتی در سناریوهای مختلف پیشنهادی.

از بین کلیه سناریوهای پیشنهادی، پس از بررسی عملیاتی سناریوهای ۱، ۵ و ۷ جهت بررسی اقتصادی پروژه انتخاب شدند. در مرحله اول جهت محاسبه تغییرات قیمت در سناریوهای مختلف، مبدل‌های حرارتی جدید با شرایط عملیاتی موجود طراحی و قیمت آنها تعیین گردید. با توجه به شرایط فرآیندی واحد، مهم‌ترین و گران‌ترین مبدل در کلیه سناریوهای منتخب، مبدل ۴۰۰۱ است که تاثیر بسزایی بر شرایط اقتصادی سناریوهای پنجم و هفتم دارد. طراحی جدید مبدل ۴۰۰۱ در سناریوهای یاد شده به گونه‌ای است که دبی جریان ورودی به پوسته مبدل از ۳۴۵۲۷۲ به ۲۷۸۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت کاهش می‌یابد. از آنجا که میزان ۶۴/۷ مگاوات انرژی لازم در سمت تیوب مبدل جهت ایجاد دمای ۲۲۵ درجه سانتی‌گراد برای ورودی راکتورها می‌بایست تامین شود فلذا سطح انتقال حرارت مبدل می‌بایست افزایش یابد. از مقایسه طراحی جدید و داده‌های دیتا شیت اصلی مبدل ۴۰۰۱ قابل مشاهده است که سطح انتقال حرارت از حدود ۵۰۰۰ به ۳۰۰۰۰ متر مربع افزایش یافته است و به جای یک مبدل در عمل می‌بایست از ده مبدل به‌صورت سری استفاده نمود تا بتواند انرژی مورد نظر را بین دو سیال انتقال دهد. لذا سناریوهایی که منجر به تغییر فلوی جریان ورودی به مبدل ۴۰۰۱ می‌شوند اگر چه به لحاظ صرفه انرژی جذاب به نظرمی‌رسند، ولی با توجه به افزایش چندین برابری هزینه ساخت مبدل جدید، به لحاظ بازگشت سرمایه مطلوب به نظر نمی‌رسند.

لذا تنها سناریوی باقی مانده سناریوی شماره ۱ بود که با ارزیابی قیمت جدید و قدیم مبدل ۱۰۰۱ قیمت مبدل چیزی حدود ۳۴ هزار دلار بوده و تغییرات در مبدل ۱۰۰۱ باعث افزایش قیمت حدود ۵۰۰ دلاری مبدل می‌شود. بنابراین اجرای سناریوی اول باعث کاهش هزینه یوتیلیتی از ۱۸۹ به ۱۸۷ میلیون ریال در ساعت می‌شود که حدودا معادل ۱/۵ میلیارد تومان در سال خواهد بود. بنابراین سناریوی شماره ۱ را به یک سناریوی مقبول تبدیل می‌کند.

نتایج

در این تحقیق، بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد تولید متانول یکی از شرکت‌های پتروشیمی کشور با استفاده از نرم‌افزار و معادله حالت منتخب NRTL انجام شد. سناریوهای مختلفی بر اساس آنالیز پینچ تدوین شد و تاثیر هر کدام از این تغییرات بر میزان مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های ثابت این واحد مورد بررسی قرار گرفت. در نتایج این بررسی مشخص گردید که سناریوهای ۲ تا ۵ امکان ایجاد صرفه جویی ۳۲ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی را دارند. از طرف دیگر سناریوهای ۶ و ۷ به ترتیب باعث صرفه‌جویی انرژی ۴۳ و ۵۷ مگاواتی در یوتیلیتی مصرفی می‌شوند. در سناریوی منتخب این تحقیق که سناریوی ۱ می‌باشد با افزایش قیمت حدود ۵۰۰ دلاری در هزینه‌های ساخت مبدل حرارتی ۱۰۰۱ می‌توان باعث کاهش هزینه یوتیلیتی از ۱۸۹ به ۱۸۷ میلیون ریال در ساعت شد که معادل حدودا معادل ۱/۵ میلیارد تومان در سال خواهد بود. این تغییر می‌تواند تاثیر شگرفی بر اقتصاد طرح ایجاد نماید.

منابع

[1] Rao Manohar, P., Energy Conservation and Alternative Sources of Energy in Sugar Factories and Distilleries. (2001), ISPCK Publishers and Distributors, New Delhi.
[2] Westphalen, D., Maciel, M., (2000). Pinch analysis of evaporation systems. Brazilian Journal of Chemical Engineering 17. pp. 1-17.
[3] Smith, R., Chemical Process Design and Integration, John Wiley & Sons. 2005: Ltd.
[4] Kralj, A.K., Glavič, P., (2007). Optimization of a gas turbine in the methanol process, using the NLP model. Applied Thermal Engineering 27(11). pp. 1799-1805.
[5] Greeff, I.L., Visser, J.A., Ptasinski, K.J., Janssenet, F.J.J.G., (2002) Utilisation of reactor heat in methanol synthesis to reduce compressor duty—application of power cycle principles and simulation tools. Applied Thermal Engineering. 22(14). pp. 1549-1558.
[6] Puerari, F., Bosio, B., Heyen, G. (2014). Energy efficiency optimisation in different plant solutions for methanol production from biomass gasification. Chemical Engineering Transactions 37. pp. 301-306.

[7] Kijevčanin, M. L., Đorđević, B., Ocić, O., Crnomarković, M., Marić, M., &Šerbanović, S. P. (2004). Energy and economy savings in the process of methanol synthesis unsig Pinch technology. Journal of the Serbian Chemical Society 69(10). pp. 827-837.
[8] Jafari Nasr, M.R.N., Abrishami, A. (2012). Energy Management and Process Improvement of Methanol Production. Journal of Petroleum Science and Technology 2(2), pp. 33-39.
[9] Liu, J., Zhang, P., Xie, Q., Liang, D., Bai, L. (2021). Flexibility analysis and design of heat exchanger network for syngas-to-methanol process. International Journal of Coal Science & Technology pp. 1-11.
[10] Philia, J., &Prameswari, J. (2020). Pinch Analysis of Methane Derived Methanol Plant Using HINT Software. In E3S Web of Conferences (Vol. 202, pp. 11004). EDP Sciences.
[11] Liu, J., Zhang, P., Xie, Q., Liang, D., Bai, L., (2021). Flexibility analysis and design of heat exchanger network for syngas-to-methanol process, Int J Coal Sci Technol 8(6). pp.1468–1478.
[12] Nayana, V.T., Gigi, S., (2021), Methanol Synthesis - Dynamic Simulation and Heat Integration, The International Conference on Emerging Trends in Engineering, Yukthi.
[13] Puhar, J., Vujanovic, A., Awad, P., ˇCucˇek, L., (2021). Reduction of Cost, Energy and Emissions of the Formalin Production Process via Methane Steam Reforming. Systems 9, 5.