Journalof Farayandno – Vol. 19 – No.86 (2024): 67-82

Research Article

DOI: 10.22034/farayandno.2024.2033710.1966

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Modification of the Heat Exchangers Around the Reactors of the Isomerization Unit in order to Reduce Energy Consumption

Somayeh Hajghani [1*], Mohamadreza Mozdianfard [2], Abdolah Irankhah [3]

[1] PhD Student of chemical Engineering, University of Kashan, Kashan

[2,3] Associate Professor of chemical Engineering, University of Kashan, Kashan

Received: 26 May 2024 **Accepted:** 11 Aug 2024

Abstract

The efficiency of isomerization reactors can be significantly increased by modifying the design of heat exchangers, and this leads to the reduction of production costs and environmental effects. In this research, the modification of the heat exchangers around the reactor of the isomerization unit of Persian Gulf Star Oil Compani (PGSOC) using pinch technology has been studied by Aspen HYSYS V9 and Aspen Energy Analyzer V9 software. Pinch analysis in this unit showed that the cross pinch of the heat exchangers around the reactor is 50% of the total cross pinch of the unit's heat exchangers, and in order to reduce it, a retrofit case was investigated. The results of this project show that by adding two new heat exchangers, in addition to removing 7 Ton/hr of medium pressure steam in the E-13 heat exchanger, also 9 Ton/hr of low-pressure steam is produced in the E-28-R2 heat exchanger, that causes to reduction of 10.7 MW in the consumption of utility services. This case saved energy 3 million dollars per years and with the purchase of two heat exchangers, the investment return of this case is less than 1 month.

Keyword: Isomerization process, pinch technology, heat exchangers, optimization, utility services.

* irankhah@kashanu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Hajghani, S., Mozdianfard, M.R., Irankhah, A., “Modification of the Heat Exchangers Around the Reactors of the Isomerization Unit in order to Reduce Energy Consumption”, Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 86, pp. 67-82, In Persian, (2024).

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22034/farayandno.2024.2033710.1966

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

اصلاح مبدل‌های اطراف راکتورهای واحد ایزومریزاسیون به منظور کاهش مصرف انرژی

سمیه حاج‌غنی [1]، محمدرضا مزدیان‌فرد [2]، عبداله ایرانخواه [3*]

[1] دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان

[3,2] دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان

دریافت: 1403/03/06 پذیرش: 1403/05/21

چکیده

بهره‌وری راکتورهای ایزومریزاسیون می‌تواند با اصلاح طراحی مبدل‌های حرارتی، به نحو چشمگیری افزایش یابد و این امر منجر به کاهش هزینه‌های تولید و اثرات زیست‌محیطی می‌شود. در تحقیق پیش‌رو، اصلاح مبدل‌های اطراف راکتور واحد ایزومریزاسیون پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس با استفاده از فناوری پینچ به کمک نرم‌افزارهای Aspen HYSYS V9 و Aspen Energy Analyzer V9 مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل پینچ در این واحد نشان داد که حرارت عبوری از مبدل‌های اطراف راکتور ٪50 کل حرارت عبوری از مبدل‌های واحد می‌باشد، که به منظور کاهش آن طرحی اصلاحی بررسی شد. نتایج این طرح نشان می‌دهد که با اضافه کردن دو مبدل جدید، علاوه بر حذف 7 Ton/hr بخار فشار متوسط در مبدل E-13، میزان 9 Ton/hr بخار فشار پایین در مبدل E-28-R2 نیز تولید می‌شود، که سبب کاهش 10/7 MW مصرف سرویس‌های جانبی می‌شود. این طرح 3 میلیون دلار صرفه‌جویی انرژی به‌همراه دارد و با خرید دو مبدل میزان برگشت سرمایه این طرح کمتر از 1 ماه می‌باشد.

کلمات کلیدی: فرایند ایزومریزاسیون، فناوری پینچ، مبدل‌های حرارتی، بهبود عملکرد، سرویس‌های جانبی.

* irankhah@kashanu.ac.ir

استناد به مقاله:

حاج‌غنی،س.، مزدیان‌فرد،م.ر.، ایرانخواه،ع.، "اصلاح مبدل‌های اطراف راکتورهای واحد ایزومریزاسیون به منظور کاهش مصرف انرژی"، نشریه فرآیندنو، سال نوزدهم، شماره 86، صص.82-67، (تابستان 1403).

1- مقدمه

فرآیند ایزومریزاسیون با تاکید بر حذف و کاهش بنزن، ترکیبات آروماتیکی، الفینی و گوگرد و در عین حال افزایش عدد اکتان، در جهان رو به توسعه است. در این فرآیند هیدروکربن‌ها به ایزومرهای خود که فرمولی مشترک ولی ساختمان و یا ترتیب مولکولی متفاوت دارند، تبدیل می‌شوند. هیدروکربنی که یک زنجیر خطی دارند نرمال، و آن‌ها که زنجیره شاخه‌دار دارند، ایزومر می‌گویند. واکنش‌های ایزومریزاسیون از نوع تعادلی گرمازا هستند به‌طوریکه در دمای پایین، تولید بیشتر ایزومر یا تبدیل بیشتر هیدروکربن‌های خطی به ایزومر افزایش می‌یابد. دما، فشار، سرعت فضایی مایع، ترکیب خوراک، نسبت هیدروژن به هیدروکربن و بهبود دهنده کاتالیست، پارامترهای حیاتی فرآیند برای ایزومریزاسیون نفتای سبک می‌باشند [1-2]. فرآیند ایزومریزاسیون صنایع نفت به دلیل کاربردهای بسیار گسترده جهت تولید بنزین با کیفیت بالا، توسط تکنولوژی‌های تجاری که برخی از مهمترین آن‌ها GTC، Axens و UOP است تجاری‌سازی شده است [3]. فرآیند یکبارگذر[1] و فرآیند برگشتی، دو طبقه‌بندی اولیه فرآیند ایزومریزاسیون بر اساس طراحی می‌باشد. در فرآیند یکبارگذر، هیچ بازگشتی از هیدروژن، متیل پنتان‌ها و خوراک واکنش نداده به جریان تغذیه راکتور وجود ندارد و عدد اکتان بدست آمده بین 78 تا 82 است. از سوی دیگر، در فرآیند برگشتی متیل پنتان‌ها و خوراک واکنش نداده به جریان تغذیه راکتور برگشت داده می‌شوند، که تعداد اکتان محصولات را تا 88-92 افزایش می‌دهد [4-5].

به دلیل مصرف بالای انرژی، کاهش منابع تجدیدپذیر و افزایش قیمت سوخت، مدیران صنایع همواره تلاش می‌کنند با استفاده از تکنیک‌های جدید (مثل تکنولوژی پینچ)، به بهبود عملکرد انرژی دست یابند. از این رو توجه به بهبود عملکرد مصرف انرژی، بازیابی آن و ارائه راه‌کارهای مناسب، در واحدهای صنعتی رو به افزایش است. با توجه به کاربرد گسترده‌ای که این صنایع دارند، مبدل‌های حرارتی برای جلوگیری از اتلاف و بازیافت انرژی به کار گرفته می‌شود. به‌دلیل بحران انرژی و افزایش قیمت‌های حامل‌های انرژی موجود در جهان، هر طراحی فرایند صنعتی می‌بایست در جهت بیشینه کردن بازیافت گرمای فرآیند به فرآیند و کمینه کردن سرویس‌های جانبی سرمایشی و گرمایشی انجام گیرد [6]. کاهش بارحرارتی ریبویلر نیز می‌تواند در کاهش مصرف انرژی تاثیر بسزایی داشته باشد. بخش زیادی از انرژی پالایشگاه‌ها توسط ریبویلرها مصرف می‌شود. بارحرارتی ریبویلر را می‌توان با استفاده از آب خنک کننده و کاهش دمای کندانسور بالای برج، به طور قابل توجهی کاهش داد [7]. اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی با اضافه کردن سطح به قسمت پوسته یا لوله و یا هردوی آنها به منظور بهبود انتقال حرارت در مبدل توسط ونگ[2] و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. این روش بدون تغییر در مکان تجهیزات به‌دلیل عدم جایگزینی تجهیز و لوله‌کشی منجر به صرفه‌جویی انرژی شد و از افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری جلوگیری نمود [8]. در مطالعه‌ای، با استفاده از طراحی مدلی با نام مدل پیازی[3] بر مبنای گرمایش و سرمایش جریان‌های مواد، با استفاده از فناوری پینچ فرصت‌هایی برای صرفه‌جویی انرژی مشخص شد، که در آن با تعریف راکتور به‌عنوان مرکز پیاز، بار حرارتی گرمایشی و سرمایشی را با حرکت از مرکز به سمت لایه‌های بیرونی به دست می‌آورند که بازیابی حرارتی را در این مدل به همراه دارند. این

[1] Once-through
[2] Wang
[3] Onion model

روش باعث طراحی فرآیندی جدید به همراه صرفه‌جویی در انرژی و هزینه سرمایه‌ای را در پی داشت [9]. لیو[4]و همکارانش، بهبود بازدهی انرژی آنالیز کل سایت و اثرات اهداف کمینه بار حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از روش الگوریتم آبشاری در طراحی فرآیند باعث کاهش 6/37% مصرف بخار فشار بالا، 53/31% مصرف بخار فشار پایین و 29/24% مصرف آب خنک‌کن نسبت به طراحی قبلی شد [10]. رضاییان و همکاران با استفاده از انتگراسیون حرارتی تحقیق و بررسی بر روی بخش دفع واحد تصفیه با هیدروژن نفتا پتروشیمی بوعلی به‌منظور بهبود عملکرد مصرف انرژی با استفاده از نرم افزار Aspen HYSYS انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که می‌توان از انرژی خوراک ورودی به‌جای کولر هوایی به عنوان عامل سرمایش استفاده کرد و کولر هوایی را حذف و از مصرف برق نیز جلوگیری به عمل نمود. از طرفی به دلیل تبادل حرارت با بخار بالاسری برج و افزایش دمای خوراک، سبب کاهش 38% مصرف سوخت گازی در ریبویلر شد و دمای کل برج افزایش یافت [11]. یانگ و همکارانش، به‌دلیل افزایش قیمت انرژی برای بهبود بازدهی انرژی، شبکه مبدل‌های حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند و اصلاح فرآیند به گونه‌ای انجام شد که در نمودار ترمودینامیکی دما-آنتالپی، جریان گرم به اندازه ΔT_{min} جابه‌جا شد. در این طراحی جدید میزان بار حرارتی سرمایشی از 310kW به 80kW و میزان بار حرارتی گرمایشی از 560kW به 330kW کاهش و میزان بازیابی انرژی به میزان 2520kW افزایش پیدا کرد، که این محاسبه ابتدا با توجه به ظرفیت حرارتی جریان‌های گرم و سپس با استفاده از ظرفیت حرارتی جریان‌های سرد انجام شد [12]. در مطالعه‌ای، برای نشان دادن اهمیت بهبود عملکرد مصرف انرژی، دو حالت در شبکه مبدل‌ها برای واحد تقطیر در نظر گرفتند: قبل از انجام تغییرات پایه و بعد از انجام تغییرات اصلاحی می‌باشد. تغییرات اصلاحی شامل اضافه کردن 3 مبدل حرارتی و 1 کوره، بهبود بخشیدن 2 فن هوایی و جایگزین کردن 6 مبدل حرارتی جدید به جای مبدل‌های فرسوده می‌باشد که این تغییرات سبب کاهش انتقال حرارت عبوری از پینچ به میزان 17 MW شده است. همچنین، موازنه حرارتی در حالت پایه بر قرار نمی‌باشد و برای رسیدن به تعادل به 94 MW سرویس جانبی گرم و 20 MW سرویس جانبی سرد مورد نیاز است که با توجه به تغییرات انجام شده در حالت اصلاحی، شبکه مبدل‌های حرارتی به تعادل حرارتی رسید. آن‌ها دریافتند که در حالت اصلاحی به سرویس‌های جانبی سرد و گرم کمتری در مقایسه با حالت پایه نیاز است. با به کارگیری فناوری پینچ و تغییر ΔT_{min} از 37/7°C به 12/2°C از حالت پایه به حالت اصلاحی، تغییر در آرایش شبکه مبدل‌های حرارتی و تعداد آنها به همراه بازبینی و بررسی دوباره شبکه به این نتیجه رسیدند که برای افزایش بازیافت حرارتی بین جریان‌های فرآیندی، ساختار شبکه در بهترین حالت خود قرار می‌گیرد [13]. واحدهای ایزومریزاسیون جهت بهبود عملکرد مصرف انرژی با استفاده از تکنولوژی پینچ مورد توجه قرار گرفتند. در مطالعه‌ای، واحد ایزومریزاسیون از نظر مصرف انرژی در یکی از پالایشگاه‌های ایران مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز پینچ در این فرآیند بررسی شد تا حداقل نیاز گرمایش و سرمایش فرآیند را مشخص شود. اثر پارامترهای مختلف مانند ΔT_{min}، حرارت عبوری از پینچ و جیب حرارتی بر میزان سرویس جانبی فرآیند و هزینه‌های واحد بررسی شد. نتایج نشان داد که این واحد در حال حاضر 24/6 MW عبور از پینچ وجود دارد. با مشخص شدن میزان سرویس جانبی مورد نیاز فرآیند، راهبردهای متفاوت برای تامین سرویس جانبی گرم از نظر اقتصادی و عملیاتی بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. آن‌ها گزارش کردند که با کاهش دمای ورودی و خروجی آب خنک‌کن و دمای خروجی هوای خنک‌کن باعث افزایش هزینه سرویس‌های

[4] Liew

جانبی می‌شود که باعث کاهش هزینه سرمایه‌گذاری می‌شود و در هزینه‌های واحد 1/4 میلیارد تومان در سال صرفه-جویی در پی داشت. با حذف مبدلی که عبور از پینچ داشت حرارت عبوری از پینچ و جایگزینی یک مبدل جدید 75/686 دلار در سال در هزینه‌های واحد صرفه‌جویی می‌شود و دوره بازگشت این طرح اصلاحی 16/6 ماه خواهد بود [14]. چانگ و همکارانش تجزیه و تحلیل اکسرژی و پینچ برای نشان دادن جریان حرارتی برگشتی واقعی و بهبود عملکرد انتگراسیون حرارتی انجام دادند. علاوه بر این، اکسرژی و بازیافت انرژی برای هر واحد فرآیند ارزیابی می‌شود، و نتایج نشان داد که بازده اکسرژی کل برای کلیه محصولات در فرآیند 24/92% است. انرژی به‌دست آمده از محصول هدف 40 MW است که 68 درصد انرژی تمام محصولات را تشکیل می‌دهد. پس از انتگراسیون حرارتی، نتایج نشان‌دهنده صرفه جویی در انرژی 8 MW و بهره‌وری انرژی یوتیلیتی 81/97% شده است [15]. در کار دیگری، برای بهسازی شبکه مبدل حرارتی یک الگوریتم دو سطحی تکاملی پیشنهاد شد. برای بهبود عملکرد موقعیت از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و یک الگوریتم تکامل تفاضلی، بارهای حرارتی را کنترل می‌کرد. این الگوریتم با محدودیت-های عملی مانند حداکثر تعداد مبدل‌های حرارتی در نظر گرفته شد. این الگوریتم با موفقیت در یک مطالعه موردی صنعتی اعمال شد و هزینه کل سالانه آن را تقریباً 66% کاهش داد [16].

مطالعات اخیر جنبه‌های مختلف فرایند ایزومریزاسیون از جمله بهینه‌سازی انرژی را بررسی کردند. وانگ و همکارانش فرآیند ایزومریزاسیون را به منظور بهبود عدد اکتان با بررسی اثرات واکنش و دستیابی به شرایط بهینه از طریق تنظیم پارامترها بهینه کردند [17]. لی و همکارانش یک رویکرد جدید برای پیش‌بینی عدد اکتان ترکیبات بنزین با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهاد کرد که دقت بهبود یافته‌ای در مقایسه با روش سنتی نشان داد [18]. چن زی و همکارانش اثرات ترکیبات خوراک را بر فرایند ایزومریزاسیون و تاثیر آن بر عدد اکتان و اهمیت برجسته آن را بررسی کردند [19].

تلاش برای دستیابی به فناوری ایزومریزاسیون از سال 79 در ایران آغاز شد و در سال 81 متخصصین صنعت نفت به دانش فنی آن دستیابی پیدا کردند. راه‌اندازی اولین واحد ایزومریزاسیون نفتا سال 90، در پالایشگاه شازند اراک انجام شد. پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس نخستین پالایشگاه کشور بر اساس خوراک میعانات گازی با ظرفیت 360 هزار بشکه در روز طراحی شده است و هر سه فاز آن در پایان سال 1397 به بهره‌برداری رسید و اکنون یکی از مدرن‌ترین پالایشگاه‌های خاورمیانه و بزرگ‌ترین پالایشگاه میعانات گازی در جهان است. ایران با بهره‌برداری از پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس در تولید بنزین به خودکفایی دست یافته است، لذا سعی در استفاده از طرح‌های بهبود عملکرد در جهت افزایش بازدهی و کاهش مصرف انرژی را دارد. واحد ایزومریزاسیون پالایشگاه ستاره خلیج فارس با فرآیند Penex، تحت لیسانس[5]شرکت UOP، در سال 2013 میلادی طراحی شد و در اختیار مهندسان پالایشگاه قرارگرفت. در این مطالعه بهبود عملکرد انرژی در بخش راکتورهای واحد ایزومریزاسیون به وسیله‌ی تکنولوژی پینچ و نرم‌افزار Aspen Energy Analyzer مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

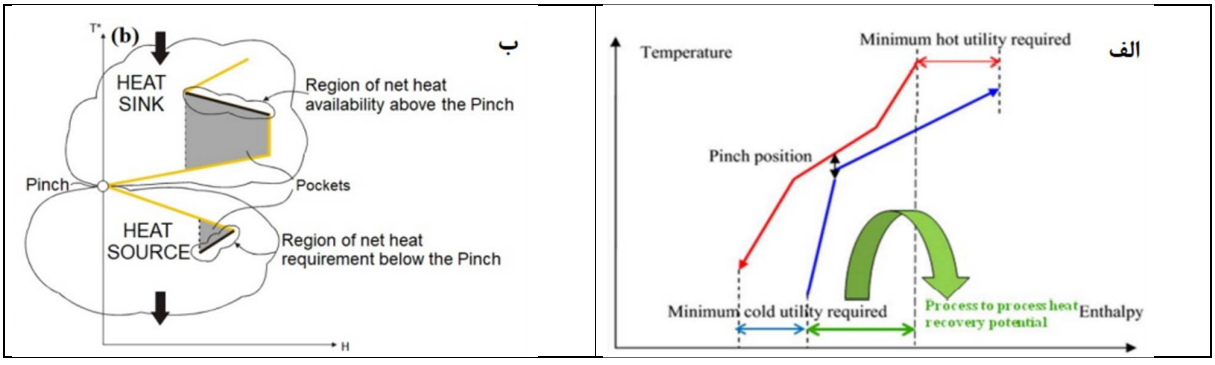
[5] Licence

2- روش تحقیق

صرفه‌جویی انرژی در طراحی فرآیند پالایشگاه‌ها اساساً یک روش آزمون و خطا بین تغییرات در ساختار و شبیه‌سازی واحد تا زمانیکه رضایت حاصل شود. صرفه‌جویی انرژی می‌تواند به‌طرق مختلف مانند کاهش مصرف سوخت یا کاهش هزینه تعمیر و نگهداری انجام شود. تکنیک پینچ یک تکنیک صرفه‌جویی انرژی تکامل یافته است که بهبود عملکرد را با روشی ساده و آسان بر اساس قوانین ترمودینامیک ارائه می‌دهد و تصویر واضحی به مهندسین فرآیند از انرژی مورد نیاز در هر فرآیندی را نشان می‌دهد که سبب کاهش هزینه‌ها شود [20].

فناوری پینچ یکی از روش‌های بهره‌وری ارزیابی فرآیند است که کاربردهای متعددی از جمله بهبود تجمیع حرارتی در واحد، انتخاب سرویس‌های جانبی مناسب و افزایش ظرفیت فرآیند دارد. در ارزیابی فرآیند به وسیله فناوری پینچ ابتدا اطلاعات موازنه جرم و انرژی از اطلاعات فرآیند استخراج و به اطلاعات حرارتی مرتبط با تحلیل پینچ منتقل می‌شود و سپس، بهبود بازیابی حرارتی که همان استفاده بهتر از سرویس‌های جانبی و تصحیحات فرایندی است، بر مبنای اهداف و انتخاب‌های اصلی تعریف شده، بررسی و تحلیل می‌گردند. پس از این مراحل، ارتباط قوی بین پینچ و فرآیند ایجاد و ایده‌های اصلی برای بهبود فرآیند و ارزیابی اثر واقعی آن‌ها بر عملکرد واحد ارائه می‌شود. با توجه به شرایط عملیاتی، تغییرات پیشنهادی بر شبکه مبدل‌های حرارتی، هزینه و سود آن‌ها نیز بررسی می‌گردد تا نقشه راه مشخص و پروژه‌ها اجرایی معرفی می‌گردد [21]. روش تحلیل پینچ، با نمودارهای گرافیکی (منحنی‌های سرد و گرم)، سامانه را به دو بخش یعنی بالا و پایین پینچ تقسیم‌بندی می‌کند که موقعیت صحیح گرم‌کننده‌ها[6]و سردکننده‌ها[7] را نشان می‌دهد تا از اتلاف انرژی جلوگیری کند [22]. از ابزارهای اصلی مورد استفاده در تحلیل پینچ، می‌توان به منحنی‌های مرکب[8](CC) و مرکب جامع[9](GCC) اشاره کرد که قدرتمند در تحلیل اما بسیار ساده در مفهوم می‌باشند (شکل 1). نمودارها توسط نرم‌افزار Aspen Energy Analyzer ایجاد و در اختیار کاربر قرار می‌گیرند [22-23].

نمودار مرکب کل که از نمودار مرکب به‌دست می‌آید (شکل 1ب)، بدین صورت است که اگر منحنی جریان‌های سرد به اندازه ½ ΔT_{min} به سمت بالا و منحنی جریان‌های گرم به اندازه ½ ΔT_{min} به سمت پایین منتقل شوند، این دو منحنی در نقطه پینچ با یکدیگر تماس برقرار می‌کنند. با ترسیم فاصله بین دو منحنی، نمودار مرکب کل حاصل می‌شود [24].



شکل 1- الف) نمودار مرکب ب) نمودار مرکب کل

[6] Heater
[7] Cooler
[8] Composite Curves
[9] Grand Composite Curve

نقطه پینچ فرآیند را به دو سامانه، بالا و پایین پینچ تقسیم می‌کند. بخش بالای پینچ گرمای مورد نیاز سامانه QH_{min} را نشان می‌دهد که به آن بخش چاه گرمایی[10] گفته می‌شود و بخش پایین پینچ انرژی مازاد سامانه QC_{min} را نشان می‌دهد که به آن بخش منبع گرمایی[11] می‌گویند. بنابراین برای افزایش بازیابی حرارتی قوانین پینچ مطرح شدند که قاعدتا برای بازیابی بهتر حرارت و کاهش هزینه‌ها می‌بایستی به‌کارگرفته شوند. این قوانین شامل:

1-نباید انتقال حرارت از جریان گرم بالای پینچ به جریان سرد پایین پینچ صورت گیرد، در صورت انجام این کار حرارت عبوری و مصرف سرویس‌های جانبی سرد و گرم افزایش می‌یابد.

2-نباید از سرویس جانبی سرد در قسمت بالای پینچ استفاده شود، زیرا این کار استفاده از سرویس جانبی گرم در بخش چاه حرارتی را افزایش می‌دهد.

3-نباید از سرویس جانبی گرم در قسمت پایین پینچ استفاده شود، زیرا در بخش منبع حرارتی انرژی مازاد وجود دارد و در صورت استفاده، میزان مصرف سرویس جانبی سرد را افزایش می‌یابد.

در این پژوهش روش مشابه در تحلیل پینچ برای بررسی شبکه مبدل‌های حرارتی در واحد ایزومریزاسیون استفاده شده است.

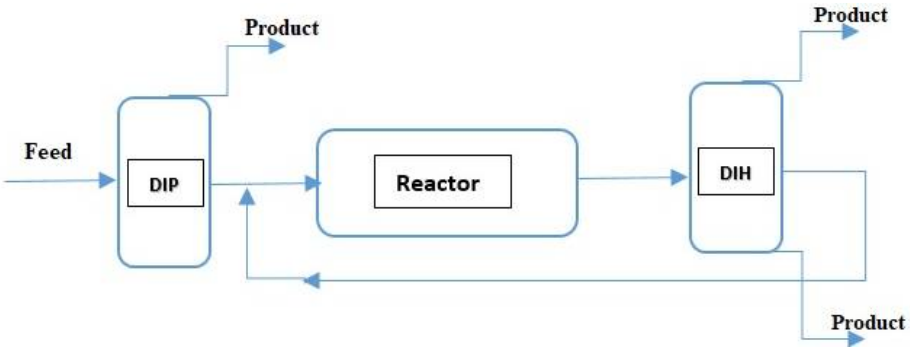
3- شرح فرآیند

واحد ایزومریزاسیون در این تحقیق تحت لیسانس شرکت UOP می‌باشد. هدف از تاسیس این واحد کاهش بنزن و گوگرد موجود در نفتای سبک می‌باشد. ابتدا نفتای سبک با عبور از مبدل E-01، دمای آن تا 84 °C افزایش می‌یابد و سپس وارد برج دی‌ایزوپنتانایزر می‌شود تا ایزوپنتان از نفتای سبک جدا شود و محصول خروجی بالای برج، پس از عبور از کولر هوایی وارد مخزن ذخیره می‌گردد. بخشی از جریان خروجی پایین برج پس از عبور از ریبولر به برج بازگردانده می‌شود و بخش دیگر نیز با برشی از برج دی‌ایزوهگزانایزر (به‌منظور بدست آوردن محصول با اکتان بالا) مخلوط شده و پس از خنک شدن در چندین مبدل، به عنوان خوراک وارد خشک کننده‌های خوراک و هیدروژن می‌شود تا مواد سمی از خوراک و هیدروژن جبرانی حذف شود و از غیرفعال شدن کاتالیست جلوگیری کند. خشک-کننده‌های خوراک که حاوی ماده HPG-250 هستند، سبب جذب مولکول‌های اکسیژن‌دار (مانند آب) و ترکیبات گوگرددار می‌شوند. برای تامین گاز هیدروژن در راکتورهای (R-01 & R-02)، گاز جبرانی و هیدروژنی که از قسمت متانیتور وارد شده، پس از افزایش فشار در کمپرسور وارد خشک‌کن می‌شوند.

جریان هیدروژن و خوراک با یکدیگر مخلوط شده و پس از عبور از مبدل‌های اطراف راکتور وارد راکتورهای سری (R-01 & R-02) می‌گردند. این مبدل‌های دمای خوراک را تا 146 °C افزایش می‌دهند. واکنش‌های هیدروژن‌دهی گرمازا می‌باشند. دمای جریان بعد از خروج از راکتور اول (Lead) در مبدل‌های اطراف راکتور تا دمای 144 °C کاهش می‌یابد و سپس وارد راکتور دوم (Lag) می‌شود. جریان خروجی از راکتور دوم سپس وارد برج تثبیت‌کننده می‌شود تا ترکیبات سبک از بالای برج جدا شود و مابقی ترکیبات وارد برج دی‌ایزوهگزانایزر می‌شود. این برج برای بازیافت ایزوهگزان و پنتان‌ها می‌باشد. محصول بالاسری برج به عنوان محصول ایزومریزاسیون که بیشتر شامل پنتان‌ها و 2-متیل بوتان است، به عنوان محصول ایزومریت به مخازن ذخیره‌سازی ارسال می‌شود. جریان میانی برج به مبدل‌های

[1] Heat sink
[1] Heat source

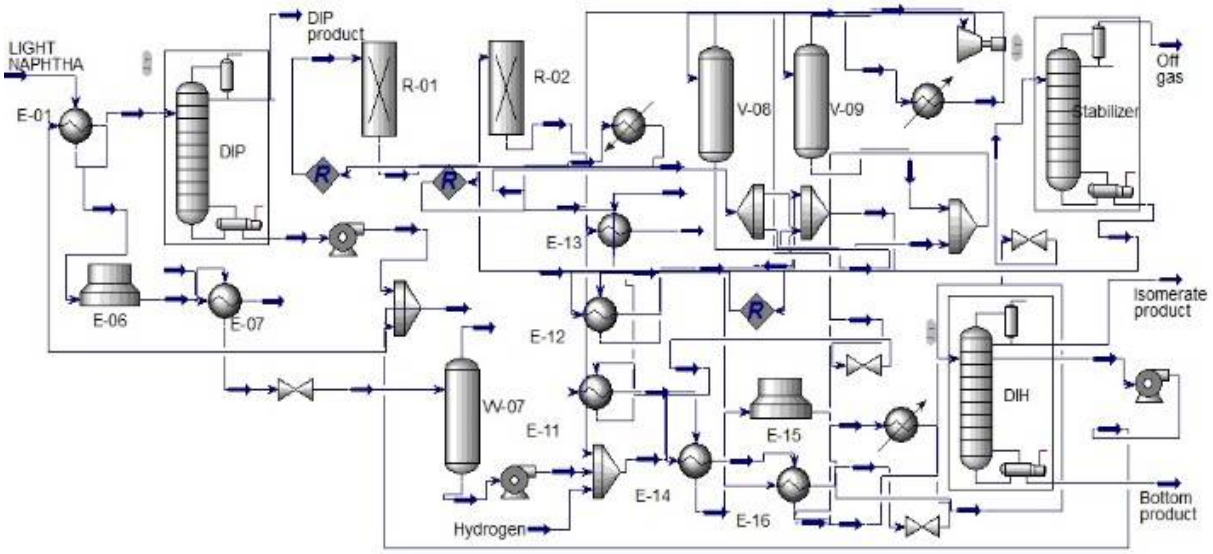
حرارتی اطراف راکتورها برگردانده می‌شود و جریان پایین برج به عنوان محصول به مخازن ارسال می‌گردد. طرحواره آن در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل2- طرحواره واحد ایزومریزاسیون

4- نتایج و بحث

در این پژوهش بهبود عملکرد انرژی بخش مبدل‌های اطراف راکتور واحد ایزومریزاسیون پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی واحد ایزومریزاسیون برای بهبود عملکرد مصرف انرژی، بعد از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Aspen HYSYS V9 (شکل 3)، تحلیل شبکه مبدل‌های حرارتی با استفاده از تکنولوژی پینچ و به کمک نرم‌افزار Aspen Energy Analyzer V9 صورت گرفت. مکان‌هایی که در آن‌ها نقض قوانین پینچ بود شناسایی شد و طرحی اصلاحی به منظور کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته شد. در ادامه مراحل مختلف این اقدامات مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد.

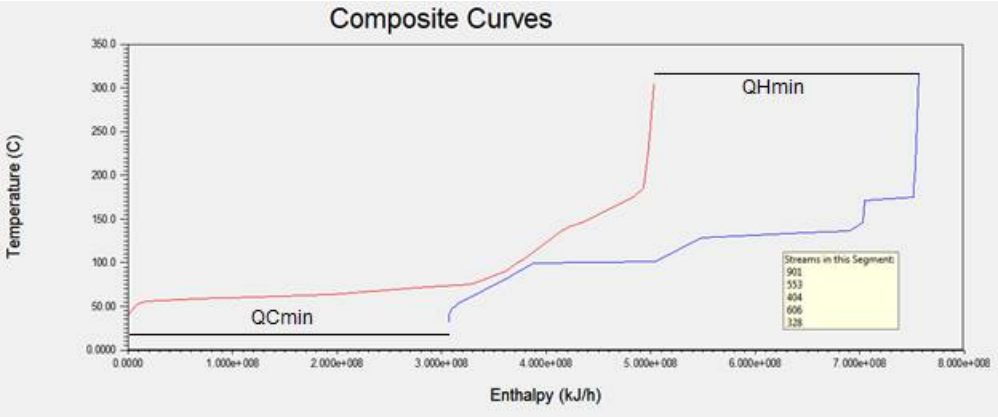


شکل3- واحد ایزومریزاسیون شبیه‌سازی شده با با نرم‌افزار Aspen HYSYS V9

به‌منظور بررسی شبکه مبدل‌های حرارتی، ابتدا داده‌های مبدل‌های حرارتی همچون بار حرارتی، دماهای ورودی و خروجی در برنامه اکسل جمع‌آوری شد و سپس این اطلاعات به نرم‌افزار Aspen Energy Analyzer منتقل شد. فرآیند ایزومریزاسیون این پالایشگاه 28 مبدل حرارتی دارد، که 6 مبدل حرارتی با جریان‌های فرآیندی تبادل حرارت

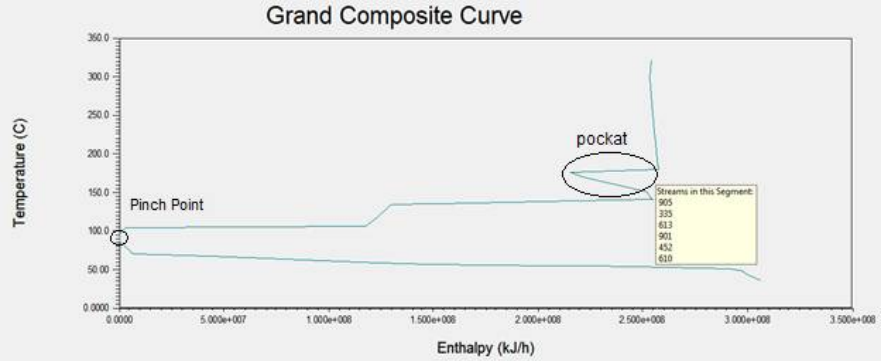
می‌کنند (اصطلاحا مبدل فرآیند-فرآیند می‌گویند) و 22 مبدل حرارتی با سرویس‌های جانبی تبادل حرارت انجام می‌دهند. از این 22 مبدل، 14 مبدل با سرویس جانبی سرد (Air Cooler & Sea water)، 7 مبدل با سرویس جانبی گرم بخار فشار بالا (HPS)، بخار فشار متوسط (MPS)، بخار فشار پایین (LPS) و یک مبدل الکتریکی با جریان برق تبادل حرارت انجام می‌دهد.

حداقل اختلاف دما یا ΔT_{min} برابر $10^{\circ}C$ در نظر گرفته شد و دمای نقطه پینچ در این فرایند برابر با $92\text{-}102^{\circ}C$ به‌دست آمد. میزان مصرف سرویس‌های جانبی سرد و گرم واحد ایزومریزاسیون به ترتیب برابر 103/6 و 89/38 مگاوات شد. میزان هدفگذاری سرویس‌های جانبی سرد و گرم واحد ایزومریزاسیون به ترتیب برابر با 85/25 و 70/73 مگاوات شد که با مقایسه بین میزان انرژی مصرفی و هدفگذاری، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی 19/17 درصد است. منحنی‌های مرکب، دما را بر حسب آنتالپی طبق شکل 4 برای جریان‌های گرم و سرد رسم می‌کند. نقطه پینچ به نقاطی از نمودار که دو منحنی به یکدیگر نزدیک شده‌اند، اشاره دارد. در این شکل میزان QH_{min} و QC_{min} را نیز ارائه می‌دهد.



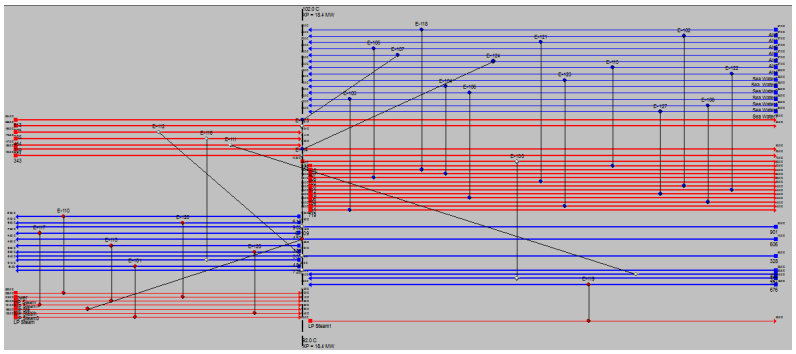
شکل 4- منحنی‌های مرکب در نرم‌افزار در ΔT_{min} برابر $10^{\circ}C$

همانطور که مشخص است، دهانه‌های اطراف این نمودار از هم فاصله دارند و هر چه این دهانه‌ها یا QH_{min} و QC_{min} کوچک‌تر یا به یکدیگر نزدیک‌تر باشند میزان مصرف انرژی در واحد کاهش می‌یابد. طرح‌های اصلاحی در مطالعات پینچ در واقع می‌بایست میزان آنتالپی واحد را به نحوی کاهش داد تا دو منحنی سرد و گرم به هم نزدیک‌شوند. از منظر گرافیکی فاصله زیاد دو منحنی آبی و قرمز نشان می‌دهد که بعد از نقطه پینچ بازیابی حرارت داخل فرایند کم است. اگر بتوان بازیابی حرارت داخل فرایند را افزایش داد، میزان صرفه‌جویی انرژی افزایش‌می‌یابد. کاهش این دو منحنی توسط طرح‌های اصلاحی فراهم خواهد شد. منحنی‌های مرکب کل (GCC) در واقع نمایشی دیگر از شکل 2 است که نقطه پینچ را واضح‌تر مشخص می‌کند (شکل 5).



شکل 5- منحنی‌های مرکب کل در نرم‌افزار در ΔT_{min} برابر $10^{\circ}C$

با وصل کردن جریان‌های یک مبدل در نرم‌افزار Aspen energy analyzer V9، شبکه مبدل‌های حرارتی واحد یا نمودار شبکه‌ای آن رسم می‌شود (شکل 6). میزان حرارت عبوری از مبدل‌ها 18/35 MW است و مبدل‌هایی که بیشترین میزان حرارت عبور از پینچ را دارند در جدول 1 مشخص شده‌اند. طبق قوانین پینچ، مبدل‌هایی که قوانین پینچ در آن‌ها رعایت نشده است حرارت عبوری از مرز پینچ را افزایش می‌دهند. بعبارتی این مبدل‌ها مصرف سرویس‌های جانبی سرد و گرم را افزایش می‌دهند که قابل بازیافت توسط روش پینچ است و بهتر است مورد اصلاح قرار گیرند. ضوابط اصلاحی ایجاب می‌کند که در تصحیح مبدل‌های مزبور دمای جریانی از مبدل که حرارت عبوری از مرز پینچ دارد تغییر کند و مبدلی که جریان‌های آن در دو طرف نقطه پینچ قرار دارند، کل مبدل جابه‌جا شود.



شکل 6- عبور از پینچ مبدل‌ها در طرح پایه

جدول 1- مبدل‌هایی که حرارت عبوری از پینچ دارند

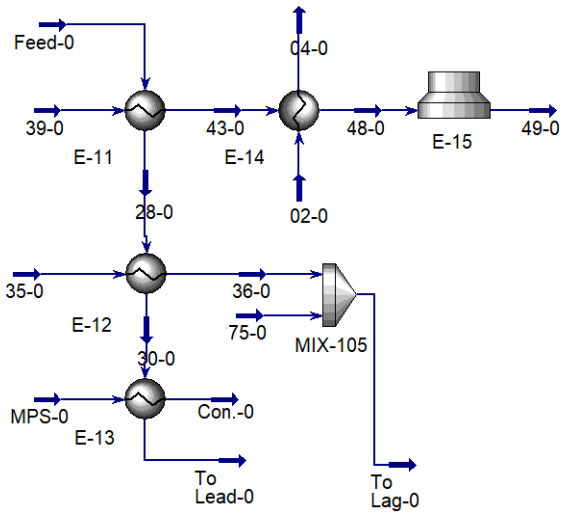
ITEM	Shell Side (Cold)			Tube Side (Hot)			Duty
EX-Name	line no.	T (in)	T (out)	line no.	T (in)	T (out)	MW
E-08	AIR3	37	50	13-15	304	60	4.33
E-10	06-10	40	146	MPS-Cond.	191	173	1.86
E-11	27-28	49	89	39-43	147	122	19.75
E-12	28-30	89	135	35-36	186	138	11.38
E-14	43-48	122	99	02-04	53	98	6.34
E-19	LPS1	100	99	76-80	48	49	0.64
E-24	AIR7	37	50	61-62	130	60	0.38
E-25	01-02	32	186	05-06	T (in)	60	0.994

مبدل‌های اطراف راکتور 9 مگاوات حرارت عبور از پینچ دارند که بیشترین میزان حرارت عبور از پینچ در واحد ایزومریزاسیون در این بخش قرار دارد، لذا در این مطالعه طرح اصلاحی بر روی مبدل‌های اطراف راکتور مورد بررسی قرار گرفت. راکتورهای واحد ایزومریزاسیون قلب فرآیند می‌باشند و اهمیت بالایی در افزایش عدد اکتان نهایی محصول و کاهش معظلات زیست محیطی دارند. مبدل‌های راکتور شامل مبدل خوراک ترکیبی سرد (E-11)، مبدل خوراک ترکیبی گرم (E-12) و مبدل گرم‌کن خوراک راکتور (E-13) می‌باشند (شکل 7 الف). قبل از ورود هیدروکربن مایع به مبدل، خوراک ترکیبی سرد با جریان هیدروژن برگشتی و جبرانی ترکیب می‌شود. پس از ترکیب، جریان هیدروکربن-هیدروژن به ترتیب قبلی از مدار مبدل‌ها عبور می‌کند. سیستم Penex از دو راکتور سری در یک فرآیند استفاده می‌کند و با کاتالیست از نوع کلرید آلومینا حاوی پلاتین پر شده است. خوراک ترکیبی در مبدل گرم‌کن خوراک راکتور E-13 با دمای C˚ 146 وارد راکتور اول یا Lead می‌گردد. واکنش‌های ایزومریزاسیون و هیدروژناسیون بنزن هر دو گرمازا هستند و دما در سراسر راکتور افزایش می‌یابد. پس از خروج از راکتور Lead، جریان به مبدل خوراک ترکیبی گرم (E-12) ارسال می‌شود تا گرمای واکنش از راکتور اول تا دمای C˚ 138 کاهش یابد. جریان سرد شده سپس به راکتور دوم (R-02) که اصطلاحا به آن Lag می‌گویند، هدایت می‌شود تا در آنجا واکنش‌های نهایی فرآیند تکمیل‌گردند. خوراک پس از خروج از راکتور دوم، به مبدل خوراک ترکیبی سرد (E-11) می‌رود تا گرمای واکنش را انتقال دهد. جریان خروجی از راکتورها حاوی هیدروژن محلول است که باید بازیابی شود، که پس از سرد شدن تا دمای C˚ 53 از طریق E-14 و E-15 وارد جداکننده[1](VV-08) می‌شود تا هیدروژن و خوراک را جدا کند.

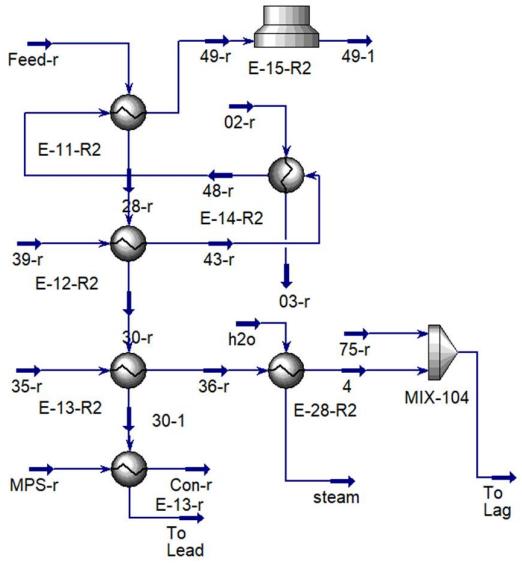
دمای جریان در مبدل‌های اطراف راکتور به این صورت می‌باشد: مبدل E-11 جریان سرد از C˚ 49 به C˚ 89 و جریان گرم از C˚ 147 به C˚ 122 می‌رسد. همانطور که مشخص است جریان سرد و گرم در دو طرف نقطه پینچ قرار گرفته‌اند و برای کاهش و حذف عبور از پینچ لازم است مبدل جابه‌جا شود، یا بعبارتی یکی از جریان‌ها با جریان دیگری جابه‌جا شود به‌طوری‌که مبدل در یک طرف پینچ قرارگیرد. مبدل E-12 که دومین مبدل گرم‌کننده جریان خوراک است، جریان سرد از C˚ 89 به C˚ 135 و جریان گرم از C˚ 186 به C˚ 138 می‌رسد. همانطور که مشخص است دمای ورودی و خروجی جریان سرد در دو طرف دمای پینچ قرار دارد. از سویی، دمای ورودی جریان گرم به مبدل E-12 نیروی محرکه زیادی نسبت به دمای ورودی جریان سرد دارد، از این رو بهتر است تدابیری اندیشیده شود تا علاوه بر حذف عبور از پینچ، نیروی محرکه این مبدل نیز کاهش یابد. قاعدتاً وقتی نیروی محرکه مبدل بالاست، علاوه‌بر شوک‌های مکانیکی، کنترل دما نیز مشکل‌تر می‌شود، در عین حال ممکن‌است هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری کاهش یابد و این می‌توانسته انگیزه‌ای در ذهن طراحان UOP برای کاهش سرمایه کل بوده باشد. مبدل E-14 سومین مبدلی است که در این بخش عبور از پینچ دارد، که در آن، جریان گرم از C˚ 122 به C˚ 99 می‌رسد و جریان سرد از دمای C˚ 53 به C˚ 98 می‌رسد. در این مبدل، دمای ورودی و خروجی جریان‌های گرم و سرد در دو طرف نقطه پینچ قرار دارند. درعین‌حال، این مبدل نیز عبور از پینچ دارد. برای کاهش میزان عبور از پینچ این مبدل لازم است مبدل جابه‌جا شود یا به عبارتی یکی از جریان‌ها تغییر یابد. همچنین باید در نظر داشت که در این بخش مبدل‌های E-13 و E-15 از سرویس‌های جانبی به ترتیب از بخار فشار متوسط و برق جهت رسیدن به دمای مطلوب استفاده می‌کنند و در تغییرات پیشنهادی حذف و یا کاهش میزان مصرف انرژی سرویس‌های جانبی مد نظر

[1] Separator [2]

قرار گیرند. طبق قوانین پینچ، طرح اصلاحی باید به گونه‌ای پیاده‌سازی شود که یا مصرف سرویس‌های جانبی در مبدل E-13 و E-15 کاهش یافته و در صورت امکان حذف شوند و یا میزان عبور از پینچ مبدل‌های فرآیند در فرآیند کاهش یابد. در این مرحله تصمیم گرفته شد که بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های اصلاحی در جانمایی مبدل‌ها و لوله‌کشی‌ها ترتیب‌های مختلف در شبیه‌سازی با نرم‌افزار Aspen HYSYS V9 ارزیابی شود. پس از بررسی چندین ترتیب مختلف منطقی‌ترین روش به شرح زیر ابداع شد (شکل7 ب). در این طرح اصلاحی، شماره مبدل‌ها با نام‌های E-12-R2، E-13-R2 و E-14-R2 خوانده می‌شود.



الف



ب

شکل 7- الف) طرح پایه، ب) بعد از طرح اصلاحی دوم

با یک تغییر مسیر جریان با توجه به نزدیکی دما و حذف عبور از پینچ طرح اصلاحی به این‌صورت پیاده سازی شد: جریان 39 خروجی از راکتور Lag به مبدل E-12-R2 ارسال می‌شود و دمای آن از ˚C 147 به ˚C 117 می‌رسد، سپس این جریان به مبدل E-14-R2 ارسال می‌شود و دمای آن از ˚C 117 به ˚C 99 می‌رسد. در نهایت این جریان

برای گرم‌کردن خوراک ورودی به مبدل E-11-R2 ارسال می‌شود و دمای آن را از ˚C 99 به ˚C 53 کاهش می‌هد. جریان مبدل E-13 در طرح پایه بخار فشار متوسط مصرف می‌کند. در این طرح یک مبدل جدید با شماره E-13-R2 به صورت سری به مبدل قبل همانند شکل 7 ب نصب می‌گردد و در این مبدل جریان 30 با جریان 35 خروجی از راکتور Lead تبادل حرارت انجام می‌دهد و سپس جریان 30 به E-13 ارسال می‌شود و در صورت رسیدن به دمای جریان ورودی به راکتور Lead به دمای ˚C 146 جریان بخار فشار متوسط در مبدل E-13 از سرویس خارج می‌گردد (این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که از رسیدن دمای ورودی به راکتور Lead به دمای مطلوب اطمینان حاصل شود). با توجه به بالا بودن دمای جریان 36 خروجی مبدل E-13-R2 این جریان ابتدا به مبدل جدید دیگری E-28-R2 ارسال می‌شود تا از حرارت مازاد آن بخار فشار پایین با دمای ˚C 130 تولید کند و سپس برای ارسال این جریان به راکتور Lag با جریان 75 ترکیب می‌شود تا به دمای ˚C 144 برسد.

با خرید دو مبدل جدید در این طرح اصلاحی تغییرات زیر ایجاد شد:

الف) مقدار برق مصرفی مبدل E-15، 82 درصد کاهش یافت.

ب) با نصب مبدل جدید E-13-R2 به صورت سری با مبدل E-13 میزان Ton/hr 7 بخار فشار متوسط حذف شد.

ج) با نصب مبدل جدید E-28-R2 میزان Ton/hr 9 بخار فشار پایین تولید شد.

مبدل‌های راکتور ایزومریزاسیون طرح پایه E-11 و E-12 مجموعا مقدار MW 8/2 عبور از پینچ داشتند. در طرح اصلاحی عبور از پینچ از آن‌ها حذف می‌شود. این مطالعه نشان داد که طرح اصلاحی قابلیت اصلاح عبور از پینچ واحد ایزومریزاسیون از MW 18/35 به MW 9 را فراهم می‌کند، به‌عبارتی 51% کاهش یافت. میزان مصرف سرویس‌های جانبی گرم و سرد به ترتیب به میزان MW 7/7 و MW 3 کاهش یافت. به‌عبارتی قابلیت صرف‌جویی انرژی به میزان 7/5% در مصرف سرویس‌های جانبی سرد و گرم هم دیده می‌شود. در جدول 2 مقایسه حالت پایه با حالت اصلاحی است که در آن دمای‌های ورودی و خروجی بخش پوسته و لوله و بار حرارتی مبدل‌ها آورده شده است. در این طرح اصلاحی دو مبدل جدید E-13-R2 و E-28-R2 اضافه شدند. همانطور که واضح است میزان بار حرارتی مبدل‌های E-15 و E-14 کاهش یافته است.

جدول 2- مقایسه مبدل‌ها در حالت پایه و اصلاحی

حالت اصلاحی				حالت اولیه			
بار حرارتی MW	دماهای سمت لوله ˚C	دماهای سمت پوسته ˚C	مبدل‌ها	بار حرارتی MW	دماهای سمت لوله ˚C	دماهای سمت پوسته ˚C	مبدل‌ها
7/716	99-62	49-89	E-11	7/699	147-123	49-89	E-11
9/639	147-117	89-127	E-12	12/87	186-138	89-135	E-12
6/352	186-158	127-146	E-13-R2	3/114	MPS-CON.	135-146	E-13
4/624	117-99	53-89	E-14	6/569	123-99	53-103	E-14
1/731	62-53	AIR	E-15	9/452	99-53	AIR	E-15
6/319	157-138	H_2O-LPS	E-28-R2				

در حالت عملیاتی بخش مبدل‌های اطراف راکتور واحد ایزومریزاسیون، میزان بخار فشار متوسط مصرفی در مبدل E-13 حدود 7 Ton/hr است، که با در نظر گرفتن هر تن بخار برابر با 21/40 دلار (نرخ مصوب فروش هر تن بخار پالایشگاه بدون در نظر گرفتن هزینه بالاسری)، میزان 1/3 میلیون دلار در سال صرفه‌جویی انرژی با از سرویس خارج شدن آن به همراه دارد می‌شود. با اضافه شدن مبدل E-28-R2 و تولید میزان 9 Ton/hr بخار فشار پایین، میزان 1/68 میلیون دلار صرفه‌جویی انرژی (به دلیل کم شدن تولید بخار از بویلرها) به همراه دارد. همچنین مبدل E-15 میزان مبدل 177/36 kW برق مصرف می‌کند که در این طرح اصلاحی میزان ٪80 مصرف برق آن کاهش می‌یابد. این با در نظر گرفتن هر 1 MW-hr برق برابر با 94/03 دلار (نرخ مصوب فروش هر کیلووات-ساعت برق پالایشگاه بدون در نظر گرفتن هزینه بالاسری)، به میزان 93 هزار دلار در سال صرفه‌جویی می‌شود (جدول 3). این طرح جمعاً به میزان 3 میلیون دلار در سال صرفه‌جویی انرژی به همراه دارد. با در نظر گرفتن خرید مبدل و تجهیزات مربوطه به میزان 240 هزار دلار برگشت سرمایه این طرح 1 ماهه می‌باشد.

جدول3- محاسبات اقتصادی

صرفه‌جویی	کاهش/تولید بخار	مبدل‌ها
1/3 میلیون دلار	7 Ton/hr کاهش بخار	E-13
93 هزار دلار	177/36 kW کاهش برق	E-15
1/68 میلیون دلار	9Ton/hr تولید بخار	E-28-R2

5- نتیجه‌گیری

راکتورهای واحد ایزومریزاسیون قلب فرآیند می‌باشند و اهمیت بالایی در افزایش عدد اکتان محصول و کاهش معظلات زیست‌محیطی دارند. در این پژوهش مبدل‌های اطراف راکتور به منظور افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا واحد ایزومریزاسیون توسط تکنولوژی پینچ مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد مبدل‌های اطراف راکتور بر روی پینچ قرار گرفته‌اند که به منظور کاهش مقدار حرارت عبوری از مبدل‌ها طرحی اصلاحی در این بخش پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد با اضافه کردن دو مبدل جدید در این بخش، علاوه براینکه میزان 7 تن بر ساعت بخار فشار متوسط در مبدل E-13 از سرویس خارج شد، همچنین میزان 9 تن بر ساعت بخار فشار پایین در مبدل E-28-R2 نیز تولید می‌شود. در این طرح اصلاحی میزان مصرف سرویس‌های جانبی سرد و گرم به ترتیب 7/7 MW و 3 MW کاهش یافتند. همچنین نتایج اقتصادی نشان می‌دهد این طرح 3 میلیون دلار صرفه‌جویی انرژی به‌همراه دارد که با خرید دو مبدل جدید میزان برگشت سرمایه این طرح 1 ماهه می‌باشد.

6- تشکر و قدردانی

نویسندگان سپاس قلبی خود را از مرحوم جناب آقای دکتر مزدیان فرد که تا آخرین لحظات زحمات زیادی برای این پژوهش کشیدند، دارند. همچنین از پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس (www.PGSOC.ir) که اطلاعات فنی خود را در اختیار قرار دادند کمال تشکر را داریم.

7-منابع

[1] Hanif MA, Nisar S, Rashid U. "Supported solid and heteropoly acid catalysts for production of biodiesel". *Catal. Rev.* 59 (2): pp. 165–188, 2017.
[2] De Barros SDT, Senra JD, Lachter ER, Malta LFB. "Metal-catalyzed cross coupling reactions with supported nanoparticles: recent developments and future directions". *Catal. Rev.* 58 (4): pp. 439–496, 2016.
[3] Naqvi, S.R., Bibi1, A., Naqvi, M., Tayyaba, N., Nizami A.S., Rehan, M., Ayoub, M., "New Trends in Improving Gasoline Quality and Octane through Naphtha Isomerization". *Applied Petrochemical Research*. 8: pp. 131–139, 2018.
[4] Speight JG, Ozum B. *Petroleum refining processes*. Marcel Dekker, New York, 2002.
[5] Meyers RA. *Handbook of petroleum refining processes*. McGraw-Hill, New York, Chapter 5.2, 1986.
[6] Mohamed, M.F., Shehata, W.M., Abdel Halim, A. A., "Improving Gasoline Quality Produced from MIDOR Light Naphtha Isomerization Unit" *Egyptian Journal of Petroleum*, 26: pp.111–124 (2017).
[7] Petrick M., Pellegrino J., "The Potential for Reducing Energy Utilization in the Refining Industry". *Report nr. ANL/ESD/TM-158, Argonne National Laboratory*, 1999.
[8] Wang Y. R., Smith R., Kim J.K., "Heat Exchanger Network Retrofit Optimization Involving Heat Transfer Enhancement". *Applied Thermal Engineering*. 43: pp.7–13, 2012.
[9] Rikhtegar F. S., Sadighi S., "Applying Pinch Technology to Energy Recovery". *Petroleum Technololgy Quarterly*, 18, 2013.
[10] Liew P., Alwi S.W., Kleme J., "Total Site Heat Integration Targeting Algorithm Incorporating Plant Layout Issues". *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, pp. 1801–1806, 2014.
[11] رضاییان، سحر، علی آبادی، مجید، شهریاری، نیلوفر. "توسعه کاربرد نرم افزار Aspen Hysys برای بهینه‌سازی انرژی در برج های دفع"، *چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی*، تهران، 1-7، 1393.
[12] Yong, J, Y., varbanova, Y.P.S., Kleme, J.J., "Heat Exchanger Network Modification for Waste Heat Utilisation under Varying Feed Conditions". *Chemical Engineering Transanctions*, 43: pp. 1279–1284, 2015.
[13] استواری طلب، محمدعلی؛" *مطالعه پینچ حرارتی در واحد تقطیر به منظور صرفه جویی انرژی برای پیش گرمایش نفت خام*"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، 1395.
[14] یگانگی، حسین؛ "*شبیه‌سازی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد ایزومریزاسیون*"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، 1397.
[15] Yu-Hsuan Chang, Hsin-Wei Hsu, Wei-Cheng Wang. "Exergy analysis of renewable jet fuel production through hydro-conversion of glyceride-based oil". *Applied Thermal Engineering*, 182 115934, 2021.
[16] Jan A. Stampfli, Benjamin H.Y. Ong, Donald G. Olsen, Beat Wellig, Rene Hofmann. "Applied heat exchanger network retrofit for multi-period processes in industry: A hybrid evolutionary algorithm". *Computers and Chemical Engineering*. V (161), pp. 107771, 2022.
[17] Wang, X., et al. Optimization of Light Naphtha Isomerization Process for Improved Research Octane Number. Fuel, 331, 123456, 2023.
[18] Li, Y., et al. "Novel Zeolite-based Catalysts for Light Naphtha Isomerization: A Review." Journal of Catalysis 373, pp. 123-145, 2023.
[19] Chen, Z., et al. Experimental Investigation of Light Naphtha Isomerization Process using a Novel Zeolite-based Catalyst. Energy & Fuels 37, pp. 1234-1245, 2023.

[20] Mubarak E., Al- Kawari A., "Pinch technology: an effcient tool for chemicalplant energy and capital-cost saving". *Applied Energy*. pp. 45–49, 2000.
[21] Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., Hewitt G.F., Thomas B.E.A., Guy A.R., Marsland R.H., "Auser Guide on process integration for the efficient use of energy". *Institution of Chemical Engineering*, 1982.
[22] Linnhof B, Flower J. "A thermodynamic combinatorial approach to the design of optimum heat exchanger networks". *AIChE Journal*. 20, 1980.
[23] Natural Resources Canada, *Pinch Analysis: For the efficient use of energy, water & hydrogen, Catalogue*, pp. 39-96, 2003.
[24] Ghazizahedi, Z. and Hayati-Ashtiani M.,"Investigation the Application of Heat Pump in Isomerization Unit to Decrese the Energy Consumption by Means of Pinch Technology", Iranian Chemical Engineering Journal, 20: pp. 53-63, 2022.