

Enhancing Energy Efficiency in Shazand Petrochemical's Butadiene Unit Through Pinch Technology and a Geothermal-Based Combined Heat and Power (CHP) System

Ali Moshiri¹, Mohammad Javad Raji Asadabadi¹, Rouhollah Ahmadi^{2*} 

¹ Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² New Technologies Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: June 29, 2025

Accepted: September 09, 2025

ePublished: January 30, 2026

ABSTRACT

One of the technologies used in the field of energy efficiency improvement, with a history of fifty years, is the Pinch technology. This approach focuses on the pinch point in order to design a heat exchanger network that achieves the highest possible heat recovery with the least thermal losses. In this study, using Pinch technology, the butadiene separation unit of the Shazand Petrochemical Company was analyzed, and a network of heat exchangers was proposed to maximize heat recovery within the system. In this case, a heat exchanger network with 27 exchangers was designed, where the heating and cooling loads were 209,910 kJ/h and 194,100 kJ/h, respectively. Furthermore, the proposed network was optimized, and it was determined that in the new design, the total heating and cooling loads decreased by 54,000 kJ/h, while the number of exchangers increased by six. Subsequently, considering the unit's thermal and electrical power demands, a combined heat and power (CHP) system based on geothermal energy was designed and integrated with the heat exchanger network. This system is capable of supplying not only the required electrical power (410.625 kW) but also a significant portion of the unit's heating load (40.11 kW) through the medium-pressure steam it generates. This integration resulted in a considerable reduction in operating costs and energy consumption in the unit, while significantly enhancing the system's sustainability and efficiency.

Keywords: Pinch Technology; Process Integration; Combined Heat and Power (CHP); Geothermal Energy; Heat-Exchanger Network.

How to cite this article

Moshiri A, Raji Asadabadi M.J, Ahmadi R, Enhancing Energy Efficiency in Shazand Petrochemical's Butadiene Unit Through Pinch Technology and a Geothermal-Based Combined Heat and Power (CHP) System. *Modares Mechanical Engineering*; 2026;26(02):129-140.

*Corresponding author's email: ahmadi@iust.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-4747-505X



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



ارتقاء بهره‌وری انرژی در واحد بوتادین پتروشیمی شازند از طریق تکنولوژی پینچ و سیستم تولید همزمان حرارت و توان (CHP) مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی

علی مشیری^۱، محمدجواد راجی اسدآبادی^۱، روح‌الله احمدی^{۲*} 

^۱ گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

یکی از فناوری‌های مورد استفاده در حوزه بهبود مصرف انرژی که قدمتی پنجاه ساله دارد، تکنولوژی پینچ می‌باشد. این رویکرد با تمرکز بر روی نقطه پینچ سعی دارد شبکه مبدل حرارتی را طراحی کند که دارای بیشترین بازیافت حرارت و کمترین هدررفت گرماست. در این پژوهش، با استفاده از فناوری پینچ، واحد تفکیک بوتادین شرکت پتروشیمی شازند مورد بررسی قرار گرفت و شبکه‌ای از مبدل‌های حرارتی جهت کسب بیشترین سهم از بازیافت حرارت در آن مجموعه پیشنهاد شد. در این حالت شبکه مبدلی با ۲۷ تبادله کننده حرارت طراحی گردید که میزان بار گرمایش و سرمایش آن نیز به ترتیب مقادیر ۲۰۹۹۱۰ kJ/h و ۱۹۴۱۰۰ kJ/h را به خود اختصاص دادند. همچنین شبکه ایجاد شده مورد بهسازی نیز قرار گرفت که مشخص شد که در طراحی جدید میزان بار گرمایش و سرمایش در مجموع ۵۴۰۰۰ kJ/h کاهش یافت و تعداد مبدل‌ها ۶ عدد افزایش یافت. در ادامه، با توجه به نیاز بار حرارتی و توان الکتریکی واحد، یک سیستم تولید همزمان حرارت و توان (CHP) مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تامین این نیازها طراحی و با شبکه مبدل‌های حرارتی ادغام (Integration) شد. این سیستم قادر است علاوه بر تامین توان الکتریکی مورد نیاز $(۴۱۰/۶۲۵)$ کیلووات، بخش قابل توجهی از بار گرمایشی سیستم $(۴۰/۱۱)$ کیلووات را نیز از طریق بخار فشار متوسط تولیدی خود تامین کند. این ادغام فرآیند منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌های جاری و مصرف انرژی در واحد شد و پایداری و بهره‌وری سیستم را به شکل چشمگیری افزایش داد.

کلیدواژه‌ها: تکنولوژی پینچ، ادغام فرآیند، تولید همزمان حرارت و توان، انرژی زمین‌گرمایی، شبکه مبدل حرارتی

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

نحوه ارجاع به این مقاله

مشیری علی، راجی اسدآبادی محمدجواد، احمدی روح‌الله، ارتقاء بهره‌وری انرژی در واحد بوتادین پتروشیمی شازند از طریق تکنولوژی پینچ و سیستم تولید همزمان حرارت و توان (CHP) مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۴۰-۱۲۹: ۲۶(۰۲): ۱۴۰۴.

* پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahmadi@iust.ac.ir

* شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-4747-505X



۱- مقدمه

بازیافت انرژی، که به آن بازیابی گرمای اتلافی (waste heat recovery) نیز گفته می‌شود، یک فرآیند ارزشمند شامل جذب و استفاده مجدد از انرژی‌ای است که در صورت عدم بهره‌برداری از آن به هدر می‌رود. امروزه، این اقدام بسیار مورد توجه و علاقه صنایع قرار گرفته‌است چرا که می‌تواند مزایای بسیاری را برای ایشان به ارمغان آورد از جمله: افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه‌های عملیاتی. چنین رویکردی دارای پتانسیل بسیار زیادی جهت متحول کردن چشم‌انداز صنعت و هموار کردن مسیر برای دستیابی به آینده‌ای پایدارتر می‌باشد [۱]. با تمرکز روزافزون بر پایداری زیست محیطی، بازیافت انرژی به عنوان ابزاری حیاتی در دستیابی به دنیای سبزتر و کارآمدتر ظاهر شده است. با استفاد از قدرت و پتانسیل گرمای اتلافی قابل بازیابی، صنایع نه تنها می‌توانند از سهم خود در انتشار گازهای آلوده‌کننده محیط زیست بکاهند بلکه می‌توانند به تلاش‌های جهانی با هدف مبارزه با تغییرات آب و هوایی و حفظ سیاره زمین برای نسل‌های آینده کمک کنند [۲].

به عنوان یک نمونه واقعی، کارخانجات تولید محصولات پتروشیمی نمونه بارز صنعتی است که می‌تواند تا حد زیادی از بازیافت انرژی بهره‌بردار. فرایند تبخیر و تقطیر محصولات پالایشگاهی که مواد اولیه کارخانجات پتروشیمی را تشکیل می‌دهند در دمای‌های نسبتاً بالا صورت می‌گیرد که به ناچار منجر به تولید گرمای اتلافی قابل توجهی می‌گردد [۳]. اما این مجموعه‌ها این امکان را دارند که این با بازیابی مجدد این حرارت، از آن برای تولید برق، بخار و یا قسمت‌های دیگر مجموعه که نیاز به گرما دارند بهره‌بردارند. این رویکرد نوآورانه و هوشمندانه نه تنها به کاهش هزینه‌های انرژی برای صنعت تولید محصولات پتروشیمی کمک می‌کند، بلکه نقش مهمی در به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی مرتبط با این فرآیند ایفا می‌کند. با استفاده از پتانسیل گرمای اتلافی، کارخانه‌های تولید کننده محصولات پتروشیمی می‌توانند به آینده‌ای پایدارتر و کارآمدتر کمک کنند.

در اواخر دهه هفتاد اومدا (Umeda) و همکاران [۴] در چپودا تکنولوژی مدرنی را برای بهینه‌سازی فرآیندها پایه‌گذاری نمودند. در همان ایام لینف و همکاران [۵] سنتز شبکه مبدل‌های حرارتی را به هدف کاهش مصرف انرژی مورد توجه قرار داده و مفاهیمی مانند منحنی ترکیبی را به عنوان ابزاری مهم در بازیافت انرژی حرارتی معرفی کردند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی پینچ و توانایی آن در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی این فکر مطرح گردید که چرا به جای شبکه مبدل‌های حرارتی دارای شبکه مبدل‌های جرمی نباشیم. در اوایل دهه نود ال‌هالواگی (M. El-Halwagi) و منیسوئوتاکیس (V. Manousiouthakis) [۶] در دانشگاه کالیفرنیا قدم‌های اول را در این جهت برداشتند.

تکنولوژی پینچ یک روش شناسی ساده را برای تحلیل سیستماتیک فرآیندهای شیمیایی و سیستم‌های یوتیلیتی به کمک قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک ارائه می‌دهد. قانون اول ترمودینامیک معادله انرژی را برای محاسبه تغییر آنتالپی جریان‌هایی که از مبدل‌های حرارتی عبور می‌کنند، فراهم می‌کند. قانون دوم ترمودینامیک جهت جریان انرژی را تعیین می‌کند به گونه‌ای که انرژی گرمایی فقط می‌تواند در جهت گرم به سرد انتقال یابد و پروفایل دمای جریان‌های سرد و گرم در طول مبدل یکدیگر را قطع نمی‌کنند [۷]. تحلیل پینچ برای مشخص کردن هزینه انرژی مورد نیاز و هزینه سرمایه‌گذاری برای شبکه مبدل‌ها به منظور هدف‌گذاری یک فرآیند و تشخیص نقطه پینچ مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش به گونه‌ای است که ابتدا با در نظر گرفتن جریان‌های فرآیندی که باید در یک فرآیند سرد یا گرم شوند کمترین انرژی مورد نیاز که باید از واحد یوتیلیتی تأمین گردد، سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت و تعداد مبدل‌های مورد نیاز برای فرآیند مورد نظر با توجه به نقطه پینچ تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی شبکه‌ای از مبدل‌های حرارتی که اهداف مورد نظر را تأمین کند طراحی می‌شود [۸]. در نهایت از طریق مقایسه هزینه مورد نیاز برای تأمین انرژی و هزینه مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی به گونه‌ای که کل هزینه مورد نیاز کمترین مقدار باشد شبکه طراحی شده بهینه می‌گردد. بنابراین نخستین و اصلی‌ترین هدف در تحلیل پینچ صرفه‌جویی اقتصادی از طریق یکپارچه‌سازی مصرف انرژی (بیشترین تبادل گرما و کمترین استفاده از منابع انرژی خارجی) می‌باشد [۹]. با توجه به آنچه ذکر شد و همچنین ضرورت صرفه‌جویی انرژی در کشور، ما را بر آن داشت تا نحوه مصرف انرژی واحد تولید بوتادین پتروشیمی شازند را مورد بررسی قرار دهیم. در مطالعه‌ای که مان‌زاده و همکاران انجام دادند، آن‌ها با اعمال تحلیل پینچ بر واحد تولید نفتا و ارائه سناریوهای مختلف شبکه مبدل، نشان دادند که صرف کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی به تنهایی هزینه کل را کم نمی‌کند و با بهینه‌سازی دوهدفه برای کمینه‌سازی قیمت نهایی محصول (LCOP) و بیشینه‌سازی عملکرد انرژی، طرح بازطراحی مبتنی بر MER را به عنوان راه‌حل اقتصادی-انرژیکی پیشنهاد کردند [۱۰]. در مطالعه‌ای که التمتامی (S. A. El-Temtamy) و همکاران انجام دادند، آن‌ها با شبیه‌سازی واحد Western Desert Gas Complex نرم‌افزار HYSYS و استفاده از تحلیل پینچ (همراه با الگوریتم جدول مسئله و روش برنامه‌ریزی خطی) شبکه مبدل‌های حرارتی را برای مقادیر مختلف ΔT_{min} طراحی کردند و نشان دادند که طراحی بهینه در ΔT_{min} برابر 10°C با افزودن تنها دو مبدل به شبکه موجود، می‌تواند ۴۲٪ در مصرف انرژی گرم و ۲۱٪ در مصرف انرژی سرد صرفه‌جویی کرده و دوره بازگشت سرمایه تقریباً یک سال داشته باشد [۱۱]. در مطالعه‌ای که پایکو و همکاران انجام دادند، آن‌ها با استفاده از داده‌های واقعی جریان‌های فرآیندی NHU در یک

فعلی ۱.۸۷ میلیون دلاری، کاملاً توجیه‌پذیر ارزیابی شد. علاوه بر این، این طرح منجر به کاهش چشمگیر سالانه گازهای آلاینده از جمله حدود ۳۲,۰۰۰ تن CO₂ می‌گردد [۱۶].

در این مقاله، مفاهیم بنیادی تحلیل پینچ به‌منظور بهینه‌سازی و انتگراسیون انرژی در واحد تولید بوتادین پتروشیمی شازند اراک به‌کار گرفته شده است. انتخاب این واحد به این دلیل صورت گرفته که واحد تولید بوتادین مذکور از سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده و تاکنون هیچ‌گونه آنالیز انرژی ترکیبی یا مطالعه‌ای درباره بهره‌وری حرارتی در آن انجام نشده است. از این رو، با استفاده از روش پینچ و تعیین نقطه پینچ، سعی شده است شبکه مبدل‌های حرارتی موجود مورد ارزیابی قرار گرفته و فرصت‌های بازیافت حرارت شناسایی شوند. در مراحل اولیه، داده‌های دمایی و حرارتی جریان‌های گرم و سرد واحد جمع‌آوری و منحنی‌های ترکیبی انرژی (Composite Curves) رسم گردید تا کمینه نیازهای گرمایشی و سرمایشی مشخص شود. سپس با طراحی یک شبکه مبدل بازطراحی‌شده مبتنی بر نقطه پینچ، امکان کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن ارزیابی شده است. در ادامه ادغام یک سیستم تولید توان و گرمایش مبتنی بر انرژی زمین گرمایی به منظور تامین نیازهای این واحد فرایندی انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با اعمال راهکارهای پینچ می‌توان تلفات حرارتی را به حداقل رساند و بهره‌وری انرژی را به‌طور چشمگیری در این واحد افزایش داد.

۲- توصیف مسئله

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، با توجه به تأثیر غیرقابل انکار فناوری پینچ در بازیافت هرچه بیشتر حرارت، مقرر شد تا تأثیر این تکنولوژی در یکی از صنایع انرژی‌بر کشور مورد واکاوی قرار گیرد. با توجه به گستردگی صنایع حوزه نفت و گاز، چه در بخش بالادستی و چه پایین دستی در کشور ایران، و با توجه به اهمیت بسیار زیاد این صنعت برای کشور به دلیل دارا بودن مزیت‌های نسبی گسترده در این صنعت، صنعت پتروشیمی به عنوان صنعت پایه پیشنهاد گردید و در نهایت به دلیل تنوع و گستردگی محصولات، بهره‌مندی از تجهیزات نوین و نزدیکی به مرکز، شرکت پتروشیمی شازند به عنوان مورد خاص مورد مطالعه، انتخاب شد.

بوتادین (butadiene) یک فرآورده واسطه در صنایع شیمیایی می‌باشد که قسمت اعظم آن در ساخت لاستیک‌های سنتزی مصرف می‌شود. فرایند تولید بوتادین در شرکت پتروشیمی شازند تحت لیسانس شرکت نیپون زئون با استفاده از حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید (DimethylFormamide) صورت می‌گیرد. بر اساس طراحی اولیه این واحد، خالص‌سازی ۳۱ بوتادین از برش چهارکربنه تولیدی در واحد الفین به میزان ۲۶۹۶۰ تن در سال بر مبنای ترکیب درصد خوراک عنوان شده در طراحی، تولید می‌گردد. بوتادین بازیابی شده از مراحل تقطیر استخراجی با خلوص بالاتر از

پالایشگاه نیجریه و شبیه‌سازی Aspen Plus، به طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی در نرم‌افزار Aspen Pinch پرداختند؛ به‌طوری که با بهینه‌سازی ΔT_{min} روی ۱۵ °C، شبکه‌ای شامل ۱۹ مبدل به مساحت کل $2113/6m^2$ طراحی شد که با هزینه سرمایه‌ای سالانه ۱۷,۳۰۱/۴۶ دلار، هزینه عملیاتی سالانه ۵۶۱,۹۹۴/۲۰ دلار و کل هزینه سالانه ۵۷۹,۲۹۵/۶۶ دلار، به حداقل هزینه سالانه دست یافتند [۱۲]. در مطالعه‌ای که صبری مرید و همکاران انجام دادند، آن‌ها با ارزیابی کارایی حرارتی شبکه مبدل‌های حرارتی واحد تقطیر خام موجود و به‌کارگیری تحلیل پینچ و ابزارهای Aspen HYSYS، نشان دادند که با بازطراحی شبکه می‌توان حدود ۶۷.۵ مگاوات از بارهای گرمایشی و سرمایشی را بازیابی کرد (معادل کاهش ۴۵٪ مصرف انرژی) و این امر می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۱۰۷۹ کیلوگرم در ساعت برای گزینه‌ای عملی و تا ۷۸۴۰ کیلوگرم در ساعت برای سناریوی بازطراحی بنیادین کاهش دهد [۱۳]. در مطالعه‌ای که نعمتی امیرکلاهی و همکاران انجام دادند، مروری جامع بر روش‌های مختلف پینچ، به‌ویژه پینچ آب، ارائه شد و با تمرکز بر صنعت غذا، چالش‌های عدم دسترسی به داده‌های مصرف و آلاینده‌ها در هر مرحله فرایند و نیازمندی‌های ریاضیاتی سیستم‌های چندمنبعه چندآلاینده برای کاهش مصرف و تخلیه آب بررسی گردید [۱۴].

در مطالعه‌ای دیگر کلانتر نیستانی و همکاران با هدف بهینه‌سازی سیکل‌های تبرید در واحدهای مایع‌سازی گاز، یک رویکرد سیستماتیک برای کاهش مصرف انرژی ارائه دادند. آن‌ها اشاره می‌کنند که بسیاری از مطالعات پیشین، محدودیت‌های عملکردی تجهیزات واقعی (مانند کمپرسورها و مبدل‌ها) را نادیده گرفته‌اند که این امر منجر به غیرکاربردی شدن نتایج آن‌ها در واحدهای صنعتی موجود می‌شود. برای رفع این خلاء، آن‌ها با ترکیب دیدگاه‌های ترمودینامیکی و تکنولوژی پینچ، مدلی برای کمینه‌سازی مصرف برق ارائه دادند که هم محدودیت‌های عملیاتی تجهیزات و هم برهم‌کنش میان سیکل تبرید و فرایند اصلی را لحاظ می‌کند. نتایج پیاده‌سازی این روش بر روی یک سیکل تبرید پروپان سه‌مرحله‌ای واقعی، پتانسیل کاهش مصرف برق ویژه تا ۱۵٪ را نشان داد که اهمیت در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی در بهینه‌سازی را برجسته می‌سازد [۱۵].

در تحقیقی دیگر، ابراهیمی، به بررسی پتانسیل تبدیل یک واحد توربین گاز ۲۶.۸ مگاواتی در پالایشگاه گاز ایلام به یک سیستم تولید همزمان سرمایش، گرمایش، برق و بخار فرایندی (CCHPP) پرداخت. در این مطالعه، جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی این طرح به طور جامع ارزیابی شدند. برای تحلیل فنی، علاوه بر ارزیابی ترمودینامیکی، از تکنولوژی پینچ برای بررسی و اطمینان از عملکرد بهینه مولد بخار بازیافت حرارتی (HRSG) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که اجرای طرح CCHPP می‌تواند به نسبت صرفه‌جویی در مصرف سوخت تا ۳۶٪ منجر شود. از دیدگاه اقتصادی، پروژه با دوره بازگشت سرمایه ۵.۲ ساله و ارزش خالص

جدول ۱ نوع جریان‌ها و ویژگی‌های مورد نیاز جهت انجام آنالیز پینچ در واحد بوتادین پتروشیمی شازند

Table 1 Stream types and required properties for performing a Pinch Analysis on the Shazand Petrochemical Butadiene unit

Specific Heat ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) Capacity	Mass Flow (kg/s) Rate	outlet Temperatur (°C) e	Inlet Temperatu (°C) re	Stream Type	No.
1.5945	0.8975	45	35	(↗) Cold	1
1.608	0.359	50	35	(↗) Cold	2
1.4128	0.8795	38	42	(↘) Hot	3
1.450	0.3518	112	85	(↗) Cold	4
1.4817	0.3518	163	130	(↗) Cold	5
1.4763	0.3518	145	120	(↗) Cold	6
1.794	0.14	142	160	(↘) Hot	7
2.001	0.105	40	110	(↘) Hot	8
1.7368	0.0517	40	80	(↘) Hot	9
1.3931	0.4308	125	110	(↗) Cold	10
1.4059	0.516	87	130	(↘) Hot	11
1.3949	0.155	120	110	(↗) Cold	12
2.063	0.155	160	150	(↗) Cold	13
2.031	0.232	40	132	(↘) Hot	14
1.3594	0.337	45	48	(↘) Hot	15
1.352	0.328	60	55	(↗) Cold	16
1.793	0.628	60	70	(↘) Hot	17
1.3549	0.328	53	57	(↘) Hot	18
1.350	0.164	35	42	(↘) Hot	19
1.845	0.0279	110	158	(↘) Hot	20
1.401	0.4308	117	123	(↘) Hot	21
1.998	0.155	118	163	(↘) Hot	22
1.8315	0.082	94	121	(↘) Hot	23
1.8017	0.628	85	60	(↗) Cold	24
1.7561	0.448	85	40	(↗) Cold	25

همچنین در صورت برقراری و یا برقرار شدن شرایط فوق باید ظرفیت گرمایی ویژه مربوط به جریان‌های خروجی و ورودی به پینچ مقایسه شود که در این حالت نیز باید تعداد ظرفیت گرمایی ویژه‌ی جریان‌های خروجی بیشتر از جریان‌های ورودی باشد، که در صورتی که این چنین نباشد نیاز به تقسیم جریان‌های ورودی به پینچ داریم.

۳-۱- مدل‌سازی

مدل‌سازی ریاضی فرایند حاضر بر پایه روابط ترمودینامیکی، سنتز شبکه مبدل‌های حرارتی (HEN) و معادلات سیکل رانکین برای سیستم تولید همزمان (CHP) زمین‌گرمایی انجام شد. تمامی محاسبات و نتایج ارائه شده در جداول و شکل‌های این مقاله بر اساس معادلات زیر به دست آمده‌اند [۱۷]:

$$\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) = Q \quad (1)$$

این رابطه برای محاسبه بار حرارتی هر جریان به کار می‌رود. در آن $\dot{m}$ دبی جرمی جریان، C_p ظرفیت گرمایی ویژه و T دما است. این معادله برای استخراج بارهای گرمایشی و سرمایشی جدول (۱) استفاده شد [۱۷].

$$Q_{loss} + \sum Q_{cold} = \sum Q_{hot} \quad Q_{loss} = 0 \quad (2)$$

۹۹/۵٪ بوده و همچنین میزان بازیابی بوتادین نیز بیش از ۹۹/۵٪ آن در خوراک ورودی بوده در حالی که میزان اتلاف بوتادین در جریان بوتان-بوتن رافینیت (Butane-Butene Raffinate (BBR)) کمتر از ۰/۳٪ می‌باشد. این واحد دارای چهار بخش اصلی به شرح زیر است:

- ✓ اولین مرحله تقطیر استخراجی
- ✓ دومین مرحله تقطیر استخراجی
- ✓ بخش خالص‌سازی بوتادین
- ✓ بخش خالص‌سازی حلال

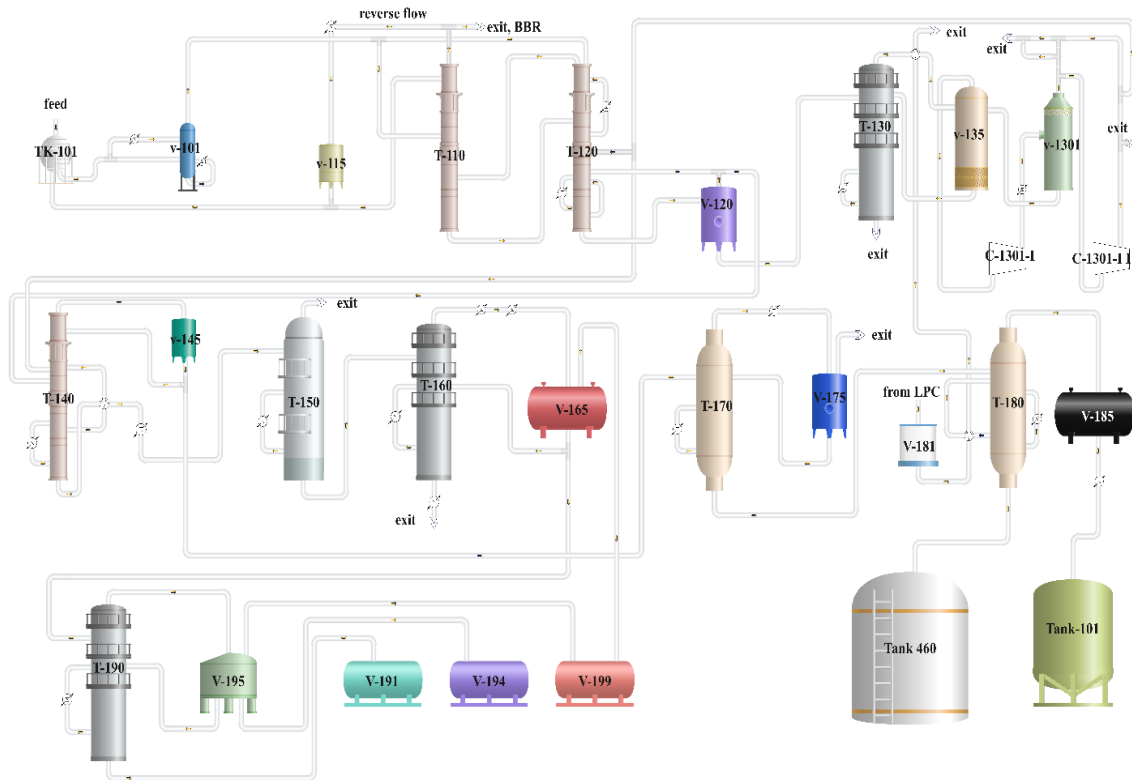
شکل شماره ۱ نمودار جریان فرآیندی واحد تولید بوتادین پتروشیمی شازند را نمایش می‌دهد.

۳- تحلیل مسئله و طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با استفاده از تکنولوژی پینچ

در این مطالعه هدف بهینه‌سازی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی واحد بوتادین شرکت پتروشیمی شازند با استفاده از تکنولوژی پینچ می‌باشد. تکنولوژی پینچ، روشی برای حداقل کردن مصرف انرژی در فرایندهای شیمیایی توسط بهبود محاسبات ترمودینامیکی در فرایند است که این مهم با بهینه‌سازی مصارف بخش بازگشت حرارتی، روش‌های توزیع انرژی و بهبود شرایط عملیاتی فرایند محقق می‌شود.

با توجه به روند فرایندی موجود در شبکه، باید خواص اصلی مورد نیاز در شبیه‌سازی پینچ استخراج شوند. این خواص عبارتند از: دمای ورودی و خروجی جریان‌ها، دبی جرمی جریان‌ها و ظرفیت گرمایی ویژه جریان‌ها. خواص مذکور برای واحد فرایندی تولید بوتادین در شرکت پتروشیمی شازند در جدول شماره ۱ آورده شده است.

بعد از انجام فرایند مربوط به مرحله تحلیل می‌رسیم که در این مرحله اقدامات متفاوتی باید صورت پذیرد که در نرم افزار Aspen Energy Analyzer از جریان آب خنک در پایین پینچ و از بخار فشار بالا در بالای پینچ به منظور تامین سرمایش و گرمایش مورد نیاز سیستم استفاده شده است. در گام بعدی به طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی پرداخته خواهد شد و نمودارهای مختلف و مهمی از جمله نمودار جریان ترکیبی (Composite curve) و نمودار ترکیبی گراند (Grand Composite curve) استخراج خواهد شد. در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی قانده‌ی مهمی که وجود دارد این است که باید تعداد جریان‌های خروجی از بالا و یا پایین پینچ همواره بزرگتر یا مساوی تعداد جریان‌های ورودی به بالا و یا پایین پینچ باشد. در صورتی که شرایط مذکور برقرار نباشد باید جریان‌های خروجی از بالا و یا پایین پینچ تقسیم (Split) شوند.



شکل ۱ نمودار ساده شده جریان فرآیندی واحد تولید بوتادین شرکت پتروشیمی شازند
Fig.1 Simplified Process Flow Diagram of the Butadiene Production Unit at Shazand Petrochemical Company

(۸) $C_{CAPEX} - C_{OPEX} = C_{total}$
رابطه محاسبه هزینه کل شبکه، که شامل هزینه عملیاتی (OPEX) وابسته به مصرف انرژی و هزینه سرمایه‌ای (CAPEX) وابسته به سطح مبدل‌ها است. این شاخص برای مقایسه حالت پایه و طراحی، بازطراحی شده (جدول ۲ و ۳) و به کارگرفته شد [۱۷].

(۹) $\dot{m}(h_{in} - h_{out}) = W_{turbine}$
کار خروجی توربین در سیکل رانکین زمین‌گرمایی، که بر اساس اختلاف آنتالپی در ورودی و خروجی محاسبه می‌شود [۱۷].

(۱۰) $\dot{m}(h_{out} - h_{in}) = W_{pump}$
این رابطه بیانگر کار مصرفی پمپ سیکل رانکین برای جبران فشار جریان سیال می‌باشد [۱۷].

(۱۱) $\frac{W_{turbine} - W_{pump}}{Q_{boiler}} = \eta$
راندمان خالص سیکل رانکین که نسبت کار خالص تولیدی به حرارت ورودی دیگ بخار را نشان می‌دهد [۱۷].

(۱۲) $\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) = Q_{CHP}$
توان حرارتی تولیدی سیستم CHP از طریق بخار فشار متوسط در این مطالعه، سیستم زمین‌گرمایی ادغامی قادر به تأمین ۴۱۰۶۲۵ کیلووات توان الکتریکی و ۴۰۸۱ کیلووات توان حرارتی بوده است. (مطابق شکل ۹ و جدول ۵).

این رابطه مربوط به بالانس انرژی کل شبکه است. در تحلیل پینچ تلفات حرارتی ناچیز در نظر گرفته می‌شود، بنابراین مجموع بارهای گرم و سرد در حالت ایده‌آل برابر است [۱۷].

(۳) $T_{hot} - T_{cold} = \Delta T_{min}$
این معادله شرط حداقل اختلاف دمایی در نقطه پینچ است. در این پژوهش مقدار $\Delta T_{min} = 20^\circ C$ در نظر گرفته شد (مطابق شکل ۲) [۱۷].

$$\sum Q_{below\ pinch} = Q_{c,above\ pinch} \quad (504)$$

$$\sum Q_{below\ pinch} = Q_{H,above\ pinch}$$

میزان بار گرمایشی Q_H و سرمایشی Q_C مورد نیاز واحد که از روی منحنی مرکب کلی (شکل ۳) به دست می‌آیند. در حالت پایه $Q_C = 194100 \text{ kJ/h}$ و $Q_H = 209910 \text{ kJ/h}$ محاسبه شد [۱۷].

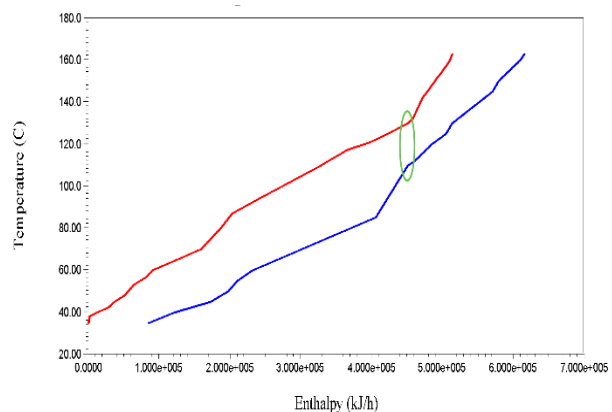
(۶) $\frac{Q}{U_{lm}\Delta T_{lm}} = A$
رابطه بالا مربوط به محاسبه سطح مورد نیاز مبدل حرارتی است که در آن U ضریب کلی انتقال حرارت و ΔT_{lm} اختلاف دمای میانگین لگاریتمی است [۱۷].

(۷) $\frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} = \Delta T_{lm}$
رابطه اختلاف دمای میانگین لگاریتمی (LMTD) که برای محاسبه سطح تبادل حرارتی مبدل‌ها ضروری است [۱۷].

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج اصلی مربوط به شبیه سازی صورت گرفته‌ی سیستم در نرم افزار Aspen energy analyzer آورده شده است که ادامه در مورد هر یک بحث خواهد شد.

نمودار مرکب: آنالیز پینچ نشانه‌هایی برای حداقل سازی انرژی لازم مصرفی بدست می‌دهد. این نشانه‌های انرژی بوسیله ابزاری به نام نمودار مرکب مشخص می‌شوند. نمودار مرکب شامل پروفایل دما - آنتالپی است که هم در دسترس فرایند (نمودار مرکب گرم) و هم انرژی مورد نیاز فرایند (نمودار مرکب سرد) را با یکدیگر نمایش می‌دهد. نمودار مرکب یک تصویر از انتقال حرارت متقابل از جریان‌های سرد و گرم می‌باشد که وسیله آن حداقل انرژی مورد هدف فرایند مشخص می‌شود. این مهم از روی هم افتادگی نمودارهای مرکب سرد و گرم حاصل می‌شود. با توجه به این نمودار می‌توان بیشترین تبادل حرارتی ممکن فرایند را مشاهده نمود و همچنین حداقل حرارت مورد نیاز فرایند در جریان سرد ($Q_{c,min}$) و حداقل حرارت مورد نیاز فرایند در جریان گرم ($Q_{h,min}$) قابل مشاهده است. در شکل شماره ۲ نزدیک ترین نقطه جدایی دو نمودار مشاهده می‌شود که به ΔT_{min} معروف می‌باشد. به نقطه‌ای که در آن ΔT_{min} مشخص شده است، نقطه پینچ می‌گویند. ΔT_{min} حداقل نیروی محرکه دمایی است که می‌تواند یک حد برای حداقل هزینه‌های انرژی و سرمایه گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی تعیین کند. برای رسم منحنی‌های مرکب ابتدا باید بازه‌های دمایی را معین کرد. در هر بازه هر تعداد جریان گرم و یا سرد وجود داشته باشد می‌توان آن را جمع ترمودینامیکی کرد. به عبارتی یک ضریب گرمایی (شیب خط در نمودار دما - آنتالپی) ثابت از مجموع جریان‌های گرم یا سرد محاسبه می‌شود.



شکل ۲ نمودار مرکب جریان‌های گرم و سرد و نقطه پینچ با اختلاف ۲۰

خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Fig.2 Hot and Cold Composite Curves and Pinch Point Diagram with a ΔT_{min} of 20, Output from Aspen Energy Analyzer Software

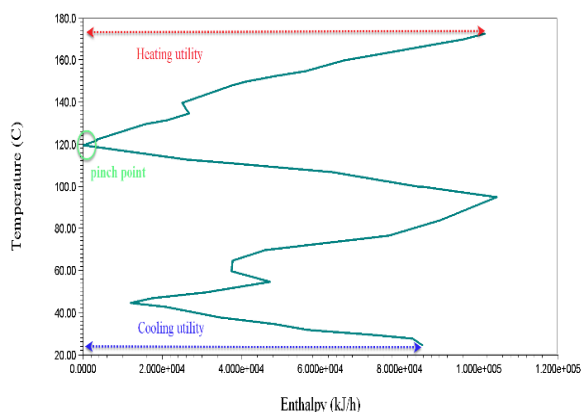
در شکل شماره ۲ نمودار مرکب مربوط به مبدل‌های حرارتی واحد بوتادین پتروشیمی شازند آورده شده است. مطابق این نمودار با در نظر گرفتن $\Delta T_{min} = 20$ نقطه پینچ در جریان گرم و سرد ۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف دارند.

نمودار مرکب کلی: نمودار مرکب کلی برای هدف‌گذاری سطوح انرژی نامیده می‌شود. برای رسم این نمودار ابتدا نمودار مرکب سرد در محور عمودی به میزان $1/2\Delta T_{min}$ بالا می‌رود و نمودار مرکب گرم به همین میزان پایین می‌رود. با این جابجایی دما نمودارهای مرکب به هم خواهند رسید و نمودار مرکب جمع از اختلاف آنتالپی نمودارهای مرکب جدید بدست خواهد آمد. نقطه‌ای که در آن نمودار مرکب کل محور عمودی را قطع می‌کند نقطه پینچ می‌باشد که آنتالپی آن صفر است. در شکل شماره ۳ نمودار مرکب کلی خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer آورده شده است. مطابق شکل شماره ۳ میزان بار گرمایشی مورد نیاز 209910 kJ/h و بار سرمایشی مورد نیاز 194100 kJ/h می‌باشد.

نتایج شبکه مبدل حرارتی: در نمودار شکل شماره ۴ شبکه‌ی مبدل حرارتی سیستم در حالت پایه نشان داده شده است. از طرفی در جدول شماره ۲ خلاصه‌ای از شاخص‌های هزینه‌ای و عملکردی شبکه مبدل طراحی شده در حالت پایه آورده شده است.

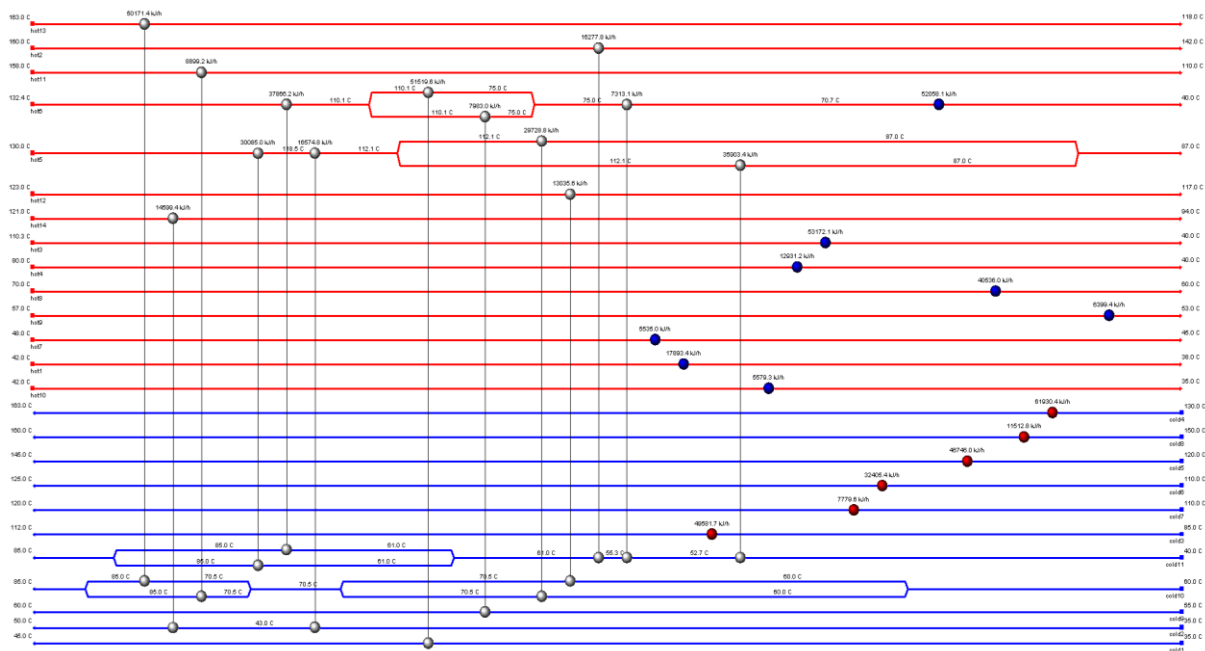
۴-۱- طراحی بهسازی

به طور کلی طراحی مبدل‌های حرارتی برای بهسازی (Retrofit design) حالتی است که در آن به دنبال اصلاح سیستم‌های موجود و بهبود بخشیدن شبکه هستیم. شکل شماره ۵ یک مفهوم کلی در مورد فرایند مربوط به بهسازی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی را نشان می‌دهد. در این نمودار محور عمودی بیانگر سطح مبدل‌ها و محور افقی بیانگر انرژی مصرفی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود یک جبهه در نمودار نشان داده شده است که تمامی نقاط آن بر اساس مفاهیم پینچ طراحی شده‌اند.



شکل ۳ نمودار مرکب کلی خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Fig.3 Grand Composite Curve, Output from Aspen Energy Analyzer Software



شکل ۴ شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی واحد بوتادین پتروشیمی شازند خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Fig.4 Heat Exchanger Network for the Shazand Petrochemical Butadiene Unit, Output from Aspen Energy Analyzer

در این جبهه، طبق شکل هرچقدر سطح بیشتری را استفاده کنیم منجر به مصرف کمتر انرژی خواهد شد و در واقع در مصرف انرژی صرفه جویی خواهیم داشت.

همانطور که در شکل نشان داده شده است، ممکن است شبکه‌ی موجود ما در شرایطی بیرون از خط مربوط به طراحی پینچ باشد که بدین منظور باید با مفهومی تحت عنوان بازدهی سطح روبرو شد که اطلاعات مورد نیاز در مورد روند بهسازی شبکه را در اختیار می‌گذارد [۱۸].

به منظور طراحی شبکه‌ها بر اساس مفهوم بهسازی باید به یک مفهوم جدید تحت عنوان بازدهی سطح اشاره کنیم.

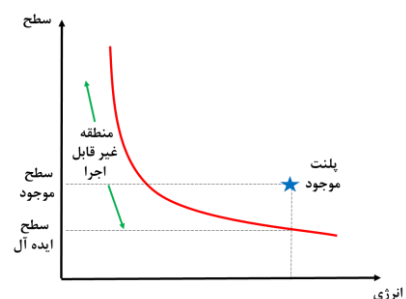
بدین منظور یک پارامتر جدید تحت عنوان α تعریف می‌شود که نسبت سطح ایده‌آل به سطح موجود است. مطابق شکل شماره ۶ روند مربوط به تغییرات قابل اعمال بر روی شبکه در طراحی بهسازی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای بهینه نمودن مصرف انرژی بر اساس مفهوم پینچ باید سطح جدیدی به پلنت افزوده شود. به عبارتی نمی‌توان از شرایط موجود به سمت پایین حرکت نمود زیرا در واقع در این حالت سطحی که پیشتر برای آن هزینه پرداخت شده را از بین برده‌ایم. پس در واقع بهینه ترین حالت شرایطی است که با شیب کمتری به سمت بالا و چپ حرکت کنیم که در این حالت به ازای یک افزایش سطح یکسان انرژی بیشتری را ذخیره نموده‌ایم [۱۹].

جدول ۲ خلاصه‌ای از شاخص‌های عملکردی و هزینه‌ای شبکه مبدل در

حالت پایه خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Table 2 Summary of Performance and Cost Indicators for the Base Case Heat Exchanger Network, Output from Aspen Energy Analyzer

Network Cost Index		
Target Achievement %	Cost Index	
206.4	1.325×10^{-4}	Heating [Cost/s]
226.1	1.146×10^{-5}	Cooling [Cost/s]
207.8	1.439×10^{-4}	OPEX [Cost/s]
87.92	2.954×10^5	CAPEX [Cost]
90.80	2.615×10^{-3}	Total Cost [Cost/s]
Network Efficiency		
Target Achievement %	Heat Exchanger Network (HEN)	
206.4	2.1×10^5	Heating [KJ/h]
226.1	1.941×10^5	Cooling [KJ/h]
90.00	27	Number of Units
93.10	27	Number of Shells
69.23	34.73	Total Area [m ²]



شکل ۵ نمودار انرژی بر حسب سطح برای بهسازی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی

Fig.5 Energy vs. Area Plot for the Heat Exchanger Network Retrofit

بهسازی بر روی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی سیستم اضافه شده است و مبدل‌های با رنگ طوسی مبدل‌های فرایند به فرایند در شبکه می‌باشند. علاوه بر این مبدل‌های قرمز رنگ نشان دهنده تجهیزات گرمایشی و مبدل‌های آبی نشان دهنده تجهیزات سرمایشی موجود در شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی می‌باشند. خلاصه‌ای از شاخص‌های عملکردی و هزینه‌ای سیستم در حالت پایه و پس از اعمال فرایند بهسازی در جدول شماره ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان بارگرمایشی و سرمایشی سیستم به میزان تقریباً 54000 kJ/h کاهش یافته است. از طرفی مطابق آنچه در جدول نشان داده شده است تعداد مبدل‌ها از ۲۷ به ۳۳ افزایش یافته و سطح آنها نیز به میزان $19/64 \text{ m}^2$ افزایش یافته است. از طرفی با انجام محاسباتی برای هزینه از اعداد داده شده می‌توان به صرفه جویی $3/619 \times 10^{-5} \text{ \$/s}$ در هزینه‌های جاری شبکه رسید.

۴-۲- ادغام فرآیند

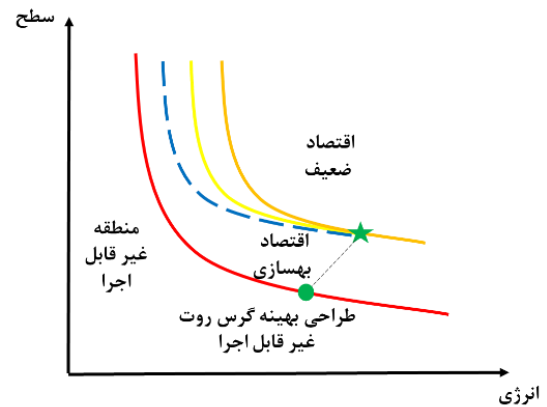
با توجه به نیاز بار سرمایشی و گرمایشی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی طراحی شده واحد بوتادین پتروشیمی شازند لزوم استفاده از یک سیستم کوپل شده با شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی فوق به منظور تامین این نیازها ضروری می‌باشد. با توجه به تماس‌های صورت گرفته با مسئول فنی واحد بوتادین پتروشیمی شازند مصرف برق این قسمت ۹ مگاوات ساعت در روز ذکر شده است که به منظور طراحی سیستم تولید توان مناسب باید مصرف این واحد بر حسب کیلووات محاسبه شود:

$$\text{Electricity consumption} = 9000 \frac{\text{kWh}}{\text{day}} \times \frac{365 (\text{day})}{8000 (\text{h})} \quad (13)$$

$$= 410.625 \text{ kW}$$

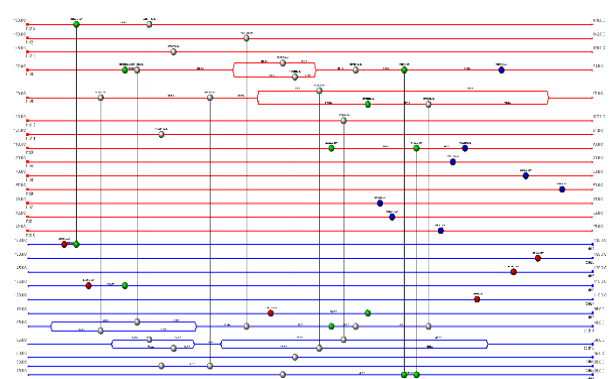
مطابق آن چیزی که پیش تر ذکر شد، از جریان بخار فشار متوسط و روغن داغ به منظور تامین Heating utility و از آب خنک کننده به منظور تامین cooling utility در شبکه‌ی مبدل حرارتی موجود بهره برده خواهد شد. میزان بار سرمایشی و گرمایشی مورد نیاز شبکه‌ی مذکور در هر یک از حالت‌های پایه و طراحی retrofit در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. از طرفی نمودار مرکب کلی نیز در این حالت در شکل شماره ۸ نشان داده شده است.

مطابق شکل و جدول داده شده $1/444 \times 10^5$ کیلوژول بر ساعت یا به عبارتی ۴۰/۱۱ کیلووات از بارگرمایشی مورد نیاز سیستم از یک بخار فشار متوسط تامین خواهد شد. بدین منظور یک سیکل رانکین زمین گرمایی طراحی خواهد شد تا بتواند به ترتیب ۴۱۰/۶۲۵ و ۴۰/۱۱ کیلووات برق و بار گرمایشی تولید کند. از طرفی مشخص است که بخشی از حرارت مورد نیاز سیستم نیز توسط یک روغن داغ تامین می‌شود.



شکل ۶ مفهوم طراحی بهسازی

Fig.6 concept of Retrofit Design



شکل ۷ شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی واحد بوتادین پتروشیمی شازند پس

از اعمال بهسازی خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Fig.7 The Retrofitted Heat Exchanger Network of the Shazand Petrochemical Butadiene Unit, Output from Aspen Energy Analyzer

در شکل شماره ۶ خط چین نشان داده شده بهینه ترین شرایط مربوط به بهسازی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی را نشان می‌دهد که به ازای یک افزایش سطح مشخص ذخیره‌ی انرژی بیشتری حاصل شده است. پس از شناسایی نقاط بحرانی در شبکه پایه و محاسبه بارهای حرارتی، طرح‌های جایگزین با افزودن یا جابه‌جایی مبدل‌ها و تغییر ترتیبات جریان‌ها ارائه شد تا اتلاف حرارت به حداقل برسد. شبکه‌ی نهایی مبدل‌های طراحی شده پس از اعمال بهسازی، شامل مبدل‌هایی است که با استفاده از اصل پینچ در نزدیک‌ترین نقاط دمایی ممکن قرار گرفته‌اند و در نتیجه توانسته‌اند بار گرمایشی و سرمایشی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند.

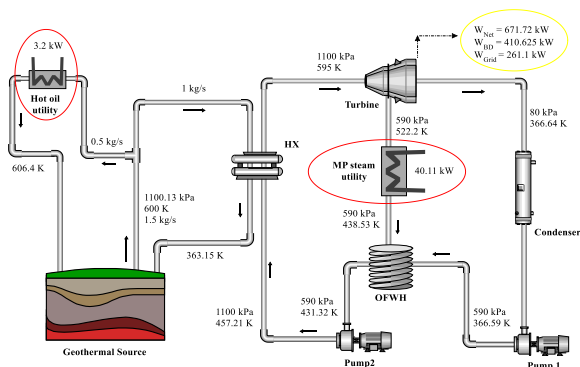
شکل شماره ۷ نمای کلی این شبکه‌ی مبدل‌های بازطراحی شده را نشان می‌دهد؛ جایی که جریان‌های گرم و سرد با کم‌ترین اختلاف دما به هم متصل شده‌اند تا بهینه‌ترین حالت بازایافت حرارتی و به دنبال آن صرفه‌جویی در هزینه‌ها محقق گردد.

همانطور که مشاهده می‌شود مبدل‌هایی که ابتدا و انتهای آنها با رنگ سبز مشخص شده مبدل‌هایی می‌باشد که پس از اعمال

جدول ۵ اطلاعات جریان‌های utility شبکه مبدل حاضر و خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Table 5 Information on the utility streams of the current heat exchanger network, obtained from Aspen Energy Analyzer software.

Utility name	MP steam	Cooling water	Hot oil
Inlet T (°C)	175	20	280
Outlet T (°C)	174	25	250
Cost index [Cost/kJ]	2.2×10^{-6}	2.125×10^{-7}	3.5×10^{-6}
HTC [$\frac{\text{kJ}}{\text{h.m}^2.\text{°C}}$]	21600	13500	836.22
Target load [kJ/h]	9.608×10^4	8.586×10^4	5630
Effective Cp [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg.°C}}$]	1981	4.183	3
Target flow rate [kg/h]	48.49	4105.33	62.56



شکل ۹ سیستم مبتنی بر انرژی زمین گرمایی به منظور تامین توان و پاسخگویی به نیازهای گرمایشی شبکه

Fig. 9 A geothermal-based system for power generation and satisfying the network's heating demands.

اطلاعات و خواص فیزیکی و ترمودینامیکی هر مرحله در شکل آورده شده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، با استفاده از فناوری پینچ، واحد تفکیک بوتادین در شرکت پتروشیمی شازند مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفت. هدف اصلی این بررسی، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق طراحی بهینه شبکه مبدل‌های حرارتی بود. برای دستیابی به این هدف، ابتدا شرایط موجود در واحد تفکیک بوتادین مطالعه و تحلیل گردید و شبکه‌ای متشکل از ۲۷ مبدل حرارتی طراحی شد. این طراحی اولیه به نحوی انجام شد که میزان بار گرمایشی و سرمایشی شبکه به ترتیب به مقادیر ۲۰۹۹۱۰ kJ/h و ۱۹۴۱۰۰ kJ/h رسید.

پس از طراحی اولیه، با استفاده از اصول فناوری پینچ و ابزارهای مهندسی مرتبط، فرآیند بهسازی و بازطراحی شبکه انجام شد.

جدول ۳ خلاصه‌ای از شاخص‌های عملکردی و هزینه‌ای شبکه مبدل در حالت پایه و پس از بهسازی و خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

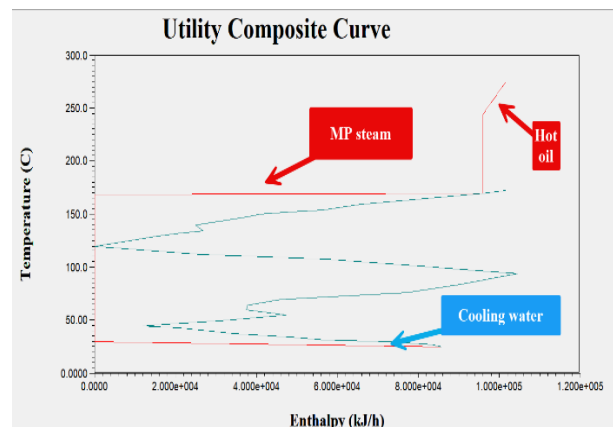
Table 3 Summary of Performance and Cost Indicators for the Heat Exchanger Network in the Base Case and After Retrofitting, Output from Aspen Energy Analyzer

Target	Base Case	Design	
1.325×10^{-4}	1.325×10^{-4}	9.946×10^{-5}	Heating Cost Index [Cost/s]
1.325×10^{-4}	1.325×10^{-4}	1.560×10^5	Heating Duty [kJ/h]
1.325×10^{-4}	1.325×10^{-4}	8.268×10^{-6}	Cooling Cost Index [Cost/s]
1.325×10^{-4}	1.325×10^{-4}	1.401×10^5	Cooling Duty [kJ/h]
50.16	34.73	46.90	Area [m^2]
-	-	19.64	New Area [m^2]
29	27	33	Shell
-	-	6	New Shell

جدول ۴ مقادیر بار سرمایشی و گرمایشی شبکه‌ی مبدل حرارتی حاضر در حالت پایه و پس از Retrofit و خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Table 4 Cooling and heating loads of the heat exchanger network in the base case and after retrofit, obtained from Aspen Energy Analyzer

Utility name		Design [KJ/h]	Base case [KJ/h]	Saving [KJ/h]	Targets [KJ/h]
MP steam	✓	1.444×10^5	1.984×10^5	5.4×10^4	9.608×10^4
Cooling water	✓	1.401×10^5	1.941×10^5	5.4×10^4	8.586×10^4
Hot oil	✓	1.151×10^4	1.151×10^4	0	5630



شکل ۸ نمودار مرکب کلی به همراه utility ها و خروجی از نرم افزار Aspen energy analyzer

Fig. 8 Grand Composite Curve with utilities obtained from Aspen Energy Analyzer software.

مقدار بار گرمایشی این روغن داغ نیز برابر $۳/۲$ کیلووات است. اطلاعات کامل جریان‌های utility شبکه‌ی طراحی شده در جدول ۵ آورده شده است. از طرفی در شکل ۹ سیستم تولید توان و حرارت طراحی شده به منظور تامین نیازهای گرمایشی و تامین برق مصرفی واحد بوتادین که ۹ مگاوات ساعت در روز است را تامین کند.

منابع

- [1] A. Moshiri and M. J. Raji Asadabadi, "Numerical Study of a System Based on Phase Change Materials for Energy Storage in Buildings Considering the Geometric Characteristics of Integrated Fins," *Modares Mech. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 163–174, 2025. doi: 10.48311/mme.2025.11470
- [2] B. Linnhoff, G. Polley, and V. Sahdev, "General process improvements through pinch technology," *Chem Eng Prog United States*, vol. 84, no. 6, 1988. doi: 10.1016/0098-1354(79)80049-6
- [3] M. J. R. Asadabadi, S. H. Rad, M. Taraghi, M. Moghimi, and R. Ahmadi, "ANN-boosted optimization and performance evaluation of a hybrid solar-geothermal high temperature cascaded ORC for electricity, liquid hydrogen, freshwater, and cooling purposes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 262, p. 125251, 2025. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125251
- [4] T. Umeda, "Heat exchange system synthesis," *CEP*, vol. 74, pp. 70–76, 1978. CRID: 1571698601416032000
- [5] B. Linnhoff and J. R. Flower, "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks," *AIChE J.*, vol. 24, no. 4, pp. 633–642, 1978. doi: 10.1002/aic.690240411
- [6] M. M. El-Halwagi and V. Manousiouthakis, "Synthesis of mass exchange networks," *AIChE J.*, vol. 35, no. 8, pp. 1233–1244, 1989. doi: 10.1002/aic.690350802
- [7] T. Yuan and Y. Mao, "A review of pinch analysis techniques and extended application in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 202, p. 114684, 2024. doi: 10.1016/j.rser.2024.114684
- [8] J. M. John, S. R. W. Alwi, P. Y. Liew, D. I. Omoregbe, and U. Narsingh, "A comprehensive carbon dioxide reduction framework for industrial site using pinch analysis tools with a fuel cell configuration," *J. Clean. Prod.*, vol. 362, p. 132497, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132497
- [9] R. Smith and T. Kudra, "Chemical Process Design," *Dry. Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 2617–2618, 1997. doi: 10.1002/0471238961
- [10] A. Manizadeh, A. Entezari, and R. Ahmadi, "The energy and economic target optimization of a naphtha production unit by implementing energy pinch technology," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 12, pp. 396–404, 2018. doi: 10.1016/j.csite.2018.05.005
- [11] S. El-Temtamy, I. Hamid, E. Gabr, and A. E.-R. Sayed, "The Use of Pinch Technology to Reduce Utility Consumption in a Natural Gas Processing Plant," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 13, pp. 1316–1330, 2010. doi: 10.1080/10916460902839248
- [12] I. Paiko, O. Azeez, N. Makwashi, and D. Zhao, "Pinch Analysis in Optimizing Energy Consumption on a Naphtha Hydrotreating Unit in a Refinery," 2017. doi: 10.23880/PPEJ-16000126
- [13] S. Mrayed, M. B. Shams, M. Al-Khayyat, and N. Alnoaimi, "Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 4, p. 100168, 2021. doi: 10.1016/j.clet.2021.100168

هدف از این مرحله، کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی سیستم بود. نتایج بهسازی نشان داد که طراحی جدید توانست مجموع بارهای گرمایشی و سرمایشی را به میزان kJ/h ۵۴۰۰۰ کاهش دهد. این کاهش بارهای حرارتی منجر به کاهش قابل توجه مصرف سوخت و انرژی در واحد شد، که به صورت مستقیم در کاهش هزینه‌های عملیاتی اثرگذار بود.

علاوه بر این، در یک رویکرد جامع‌تر، برای پاسخگویی به نیازهای حرارتی و توان واحد، یک سیستم تولید همزمان (CHP) مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی طراحی و با شبکه موجود ادغام گردید. این سیستم، با تولید همزمان برق ($۴۱۰/۶۲۵$ کیلووات) و حرارت ($۴۰/۱۱$ کیلووات)، وابستگی واحد به منابع بیرونی را کاهش داده و به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی کمک کرد. افزایش تعداد مبدل‌ها از ۲۷ به ۳۳ واحد، هرچند هزینه اولیه را بالا برد، اما با توجه به صرفه‌جویی بلندمدت حاصل از کاهش مصرف انرژی و تولید همزمان برق و حرارت، از نظر اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است.

در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی با استفاده از فناوری پینچ، علاوه بر کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط، می‌تواند به بهبود پایداری و بهره‌وری در صنایع پتروشیمی کمک کند. این یافته‌ها می‌توانند راهنمایی کاربردی برای سایر صنایع مشابه باشند که به دنبال ارتقای عملکرد حرارتی و کاهش هزینه‌های عملیاتی خود هستند.

تشکر و قدردانی

با سپاس و تشکر فروان از آقایان مهندس الله وردی زاده، از کارکنان شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران که در به هم رسانی و معرفی افراد در مجموعه شازند جهت اخذ اطلاعات کمک کردند؛ مهندس زکیان که در ارائه اطلاعات واحد فرایندی از جمله نقشه فرایندی و دماها همکاری نمودند؛ مهندس سلیمانی که در ارائه اطلاعات مربوط به مصارف برق و دبی‌های جرمی کمک کردند؛ مهندس مومنی زاده که امکان دسترسی به اطلاعات آن واحد فرایندی را تسهیل کردند؛ و مهندس جیریایی که هماهنگی‌های لازم جهت بازدید از مجموعه پتروشیمی شازند و واحد بوتادین را فراهم نمودند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

- [14] K. Nemati-Amirkolaii, H. Romdhana, and M.-L. Lameloise, "Pinch methods for efficient use of water in food industry: a survey review," *Sustainability*, vol. 11, no. 16, p. 4492, 2019. doi: 10.3390/su11164492
- [15] H. Kalantar-Neyestanaki, M. Mafi, and A. Ashrafizadeh, "Operational Minimization of Multi-Stage Refrigeration Cycles' Power Consumption in Gas Refineries Based on the Combination of Thermodynamics Analysis and Pinch Technology," *mdrsjrns*, vol. 17, no. 6, pp. 1-12, Aug. 2017. doi: 10.1038/s41598-024-84765-7
- [16] M. Ebrahimi, "Potentials of the gas turbine of Ilam Gas Refinery Company for large scale combined cooling, heating, power and process (CCHPP)," *mdrsjrns*, vol. 16, no. 10, pp. 115-126, Jan. 2017.
- [17] T. G. Walmsley, B. J. Lincoln, R. Padullés, and D. J. Cleland, "Advancing Industrial Process Electrification and Heat Pump Integration with New Exergy Pinch Analysis Targeting Techniques," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2838, June 2024, doi: 10.3390/en17122838.
- [18] I. H. Alhajri, M. A. Gadalla, O. Y. Abdelaziz, and F. H. Ashour, "Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis-A case study of a crude oil refinery in Kuwait," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, p. 101030, 2021. doi: 10.1016/j.csite.2021.101030
- [19] K. Zhi et al., "Graphical pinch analysis-based method for heat exchanger networks retrofit of a residuum hydrogenation process," *Energy*, vol. 299, p. 131538, 2024. doi: 10.1016/j.energy.2024.131538