

# بهینه‌سازی عملیاتی مصرف انرژی در فرآیندهای جداسازی با استفاده از انتگراسیون پمپ حرارتی

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم  
شماره ۷۷

صفحه، ۱۱۰-۱۲۲ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۴/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۱۴

فاطمه گودرزوند چگینی\* و لیلا سمیعی و رامین کرمی

پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

goodarzvandf@ripi.ir

## چکیده

امروزه تحلیل پینچ به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای انتگراسیون حرارتی، جهت هدف‌گذاری و طراحی فرآیندهای پالایشگاهی به کار برده می‌شود. امکان‌سنجی به‌کارگیری پمپ حرارتی در یک فرآیند جداسازی از جمله مواردی است که می‌توان با استفاده از این تکنولوژی به آن دست یافت. اصولاً یک پمپ حرارتی به‌عنوان دستگاهی جهت بازیافت حرارت عمل می‌کند، به طوری که با دریافت مقداری انرژی، حرارت اتلافی دما پایین فرآیند را به یک حرارت مفید با دمایی بالاتر تبدیل می‌نماید. با توجه به نیاز بسیار بالای انرژی در فرآیندهای جداسازی، استفاده از یک سیستم پمپ حرارتی جهت پمپ کردن حرارت از چگالنده به جوش‌آور برج‌ها، می‌تواند منجر به کاهش مقادیر قابل توجهی از انرژی شود. در این پژوهش با ارائه یک الگوریتم بررسی سریع، امکان‌سنجی فنی و اقتصادی نصب پمپ حرارتی در فرآیند جداسازی یک واحد صنعتی با استفاده از تحلیل پینچ و بهره‌گیری از تجربیات با ارزش عملیاتی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با به‌کارگیری پمپ حرارتی در فرآیند جداسازی تصفیه گاز مایع پالایشگاه نفت تهران، ۱۴۴ هزار دلار در سال صرفه‌جویی انرژی روی می‌دهد که زمان بازگشت سرمایه آن حدود ۴ سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انتگراسیون حرارتی، تحلیل پینچ، پمپ حرارتی، بهینه‌سازی انرژی، فرآیند جداسازی

## مقدمه

پمپ حرارتی وسیله‌ای است که توانایی جذب حرارت در یک دمای پایین و باز پس دادن آن در دمای بالاتر را دارد، به طوری که میزان حرارت بازیابی شده بیشتر از انرژی مورد نیاز جهت راه‌اندازی دستگاه می‌باشد. انرژی اعمال شده به دستگاه همان کار مکانیکی مورد نیاز جهت انتقال حرارت از دمای پایین‌تر به دمای بالاتر است.

اصول عملیاتی پمپ‌های حرارتی بر مبنای دانش مربوط به تجهیزات سردکننده بوده و هدف اولیه آن گرفتن حرارت و سردکردن یک فضای دما پایین می‌باشد [۱ و ۲]. برای شناسایی پتانسیل‌های مناسب جهت نصب و به‌کارگیری پمپ حرارتی در سیستم‌های فرآیندی، دانش ویژه‌ای مورد نیاز می‌باشد. در این راستا فناوری پینچ به‌عنوان ابزاری ترمودینامیکی در کنار تجربیات ارزشمند بهره‌برداری و عملیات فرآیند، به‌کار گرفته می‌شود [۳ و ۴].

قرار دهد. پمپ‌های حرارتی بر اساس اصل ترمودینامیکی حاکم بر سیکل کارنو<sup>۲</sup> عمل می‌کند، به گونه‌ای که با دریافت مقداری کار، حرارت اتلافی با دمای پایین را به یک حرارت مفید با دمای بالاتر تبدیل می‌نماید. مقدار کار مورد نیاز جهت راه‌اندازی پمپ حرارتی به مقدار افزایش دمای منبع حرارت اتلافی بستگی دارد. بنابراین پمپ‌های حرارتی برای افزایش دمای حرارت اتلافی نیاز به مصرف مقداری انرژی دارند. از سوی دیگر این پمپ‌ها میزان سوخت یا بخار مصرفی را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. در نتیجه، ارزش اقتصادی به‌کارگیری پمپ‌های حرارتی به هزینه‌های انواع انرژی‌هایی که در یک پمپ حرارتی مصرف و ذخیره می‌شود، بستگی دارد [۱۱].

با وجود تنوع پمپ‌های حرارتی، در همه این ادوات سه عمل اصلی و یکسان ۱- دریافت حرارت از یک منبع اتلاف حرارتی، ۲- افزایش دمای منبع حرارت اتلافی و ۳- ارائه یک حرارت مفید و قابل استفاده در دمای بالاتر اتفاق می‌افتد. یکی از معمول‌ترین انواع پمپ‌های حرارتی، پمپ حرارتی مکانیکی است. در شکل ۱ چگونگی رخداد سه عمل اصلی فوق در یک پمپ حرارتی مکانیکی به خوبی نشان داده شده است. اجزای اصلی تشکیل دهنده یک پمپ حرارتی عبارتند از: تبخیرکننده، چگالنده، کمپرسور و سیال عامل<sup>۳</sup>. منبع حرارت اتلافی وارد تبخیرکننده پمپ حرارتی شده و با در اختیار گذاشتن حرارتی به میزان  $Q_c$ ، باعث تبخیر سیال عامل در آن می‌شود. پس از آن، کمپرسور با گرفتن مقداری کار معادل  $W$ ، فشار سیال عامل را بالا می‌برد که هم‌زمان دمای چگالش نیز افزایش می‌یابد. سیال عامل در چگالنده متراکم می‌شود و حرارتی به میزان  $Q_c + W$  را با دمایی بالاتر، در اختیار جریان فرآیندی که می‌خواهد گرم شود، قرار می‌دهد. اختلاف دمای بین تبخیرکننده و چگالنده پارامتر کلیدی مؤثر بر میزان صرفه‌جویی انرژی در پمپ حرارتی می‌باشد. هر چه میزان این اختلاف دما بیشتر باشد، مقدار صرفه‌جویی انرژی قابل دستیابی بیشتر خواهد بود [۲ و ۷].

تعیین مکان مناسب قرارگیری پمپ حرارتی در متن فرآیند، تعیین حداکثر بار مجاز برای تبخیرکننده و چگالنده پمپ حرارتی و همچنین تعیین مناسب‌ترین مکان قرارگیری هر یک از ادوات در فرآیند از مهم‌ترین قابلیت‌های این فناوری است که به آسانی و با بهره‌گیری از ابزارهای آن قابل دستیابی می‌باشد. ویژگی منحصر به فرد پمپ حرارتی در انتقال حرارت از پایین به بالای پینچ است که این امر در شرایط معمول طراحی‌ها توسط تحلیل پینچ غیرممکن و غیراقتصادی می‌باشد. با توجه به فراوانی واحدهای عملیاتی در مهندسی شیمی، همه آنها جهت کاربرد پمپ‌های حرارتی مناسب نمی‌باشد. بررسی‌ها و تحقیقات نشان می‌دهد که در فرآیندهایی همچون تبخیر، تقطیر، جداسازی و خشک کردن جامدات و گازها، کاربرد پمپ‌های حرارتی می‌تواند سودمند باشد [۵-۷].

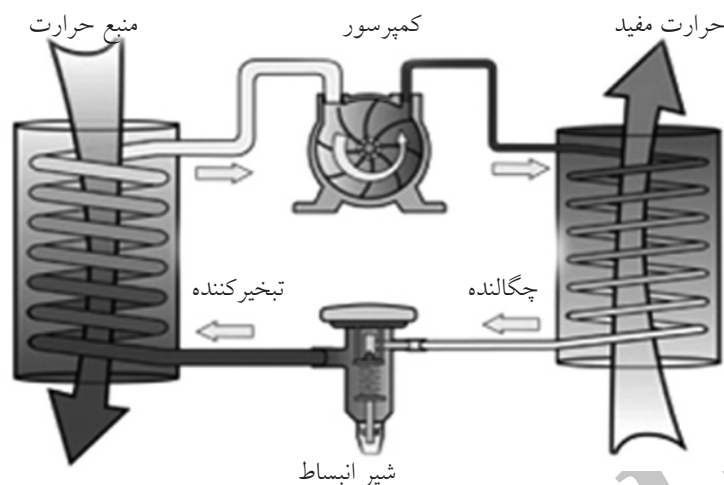
انتگراسیون پمپ حرارتی پس از طراحی شبکه مبدا-های حرارتی توسط تحلیل پینچ انجام می‌شود. علت اصلی این امر تغییر نیافتن نقطه پینچ در فرآیند اصلاح یافته است. بنابراین ابتدا با استفاده از تحلیل پینچ، شبکه تبادل حرارت بهینه به لحاظ مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی طراحی می‌شود. سپس از پمپ حرارتی جهت حذف یا کاهش واحدهای گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. این کار از طریق برقراری انتقال حرارت از منابع حرارتی پایین نقطه پینچ فرآیند به چاه‌های حرارتی در بالای نقطه پینچ فرآیند انجام می‌گیرد. بدین ترتیب با استفاده از پمپ حرارتی، گرما از سطح پایین به سطح بالاتر منتقل می‌شود [۸-۱۰].

در این پژوهش، امکان‌سنجی نصب و به‌کارگیری پمپ حرارتی در فرآیند جداسازی گاز مایع<sup>۱</sup> پالایشگاه نفت تهران با استفاده از ابزار تحلیل پینچ مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

### مکانیسم عملکرد پمپ‌های حرارتی

پمپ حرارتی به‌عنوان یک دستگاه بازایافت حرارت اتلافی، حرارت‌های غیرقابل استفاده در فرآیند را بازیابی می‌کند. بدین ترتیب می‌تواند حرارت مورد نیاز را با صرف هزینه کمتری نسبت به هزینه مستقیم سوخت در اختیار فرآیند

1. Liquid Petroleum Gas (LPG)  
2. Carnot Cycle  
3. Working Fluid



شکل ۱- نمای ساده‌ای از یک پمپ حرارتی

بین  $Q_e$  و  $W$  به صورت زیر درمی‌آید:

$$W = Q_e / (COP_{HP} - 1) \quad (۴)$$

### انتگراسیون پمپ حرارتی در فرآیندهای جداسازی

فرآیندهای جداسازی معمولاً در زمهره بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در میان سایر فرآیندهای شیمیایی به شمار می‌آیند. می‌توان انرژی مصرفی در فرآیندهای جداسازی موجود را با انجام اصلاحاتی نظیر پیش‌گرم کردن خوراک توسط جریان محصولات، کاهش میزان جریان برگشتی با افزایش تعداد سینی‌ها، اصلاح سیستم‌های کنترل، استفاده از عایق‌های مناسب و همچنین نصب برج‌های آکنده باران‌مان بالا کاهش داد. در حال حاضر اغلب روش‌های فوق در واحدهای عملیاتی استفاده می‌شود، اما با توجه به محدودیت‌های هر یک از آنها، می‌توان گفت بیشترین صرفه‌جویی انرژی تنها از طریق بازیافت حرارت خروجی در قسمت بالای برج‌های جداسازی یعنی همان چگالنده‌ها قابل دست‌یابی است. این مهم به کمک انتگراسیون پمپ حرارتی در فرآیند جداسازی امکان‌پذیر و قابل اجرا می‌باشد [۳-۵]. بدین ترتیب در بسیاری از موارد می‌توان نیاز بسیار بالای انرژی در فرآیندهای جداسازی را با استفاده از یک سیستم پمپ حرارتی جهت پمپ کردن حرارت از چگالنده به جوش آور برج جداسازی، کاهش داد.

جهت تعیین اقتصادی بودن نصب یک پمپ حرارتی، ابتدا می‌باید مقادیر خالص انرژی صرفه‌جویی شده مشخص شود. به طور کلی رابطه بین میزان کار ورودی و مقدار حرارت خروجی توسط یک پمپ حرارتی ( $COP_{HP}$ ) که ضریب عملکرد پمپ حرارتی نامیده می‌شود، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$COP_{HP} = Q / W \quad (۱)$$

$Q$  حرارت مفید قابل ارائه توسط پمپ حرارتی و  $W$  انرژی یا کار مورد نیاز جهت راه‌اندازی پمپ حرارتی است. از سوی دیگر مطابق سیکل کارنو مربوط به پمپ حرارتی،  $COP_{HP}$  به دمای حرارت خروجی و اختلاف دمای چگالنده و تبخیرکننده پمپ حرارتی نیز وابسته است:

$$COP_{HP} = T_c / (T_c - T_e) \quad (۲)$$

در رابطه بالا  $T_c$  و  $T_e$  به ترتیب درجه حرارت مربوط به تبخیرکننده و چگالنده پمپ حرارتی می‌باشد.  $T_e$  به وسیله یک دمای تقریباً بین سیال عامل پمپ حرارتی و کمترین دمای منبع حرارتی و  $T_c$  به وسیله دمای تقریباً میان سیال عامل پمپ حرارتی و گرم‌ترین دمایی که چاه حرارتی به آن می‌رسد، محاسبه می‌شود. به طور معمول اختلاف دمای  $10^\circ F$  تا  $20^\circ F$  دمای تقریباً مناسبی می‌باشد [۲ و ۱۲]. معادله موازنه انرژی در یک پمپ حرارتی در ذیل آمده است:

$$Q = Q_e + W \quad (۳)$$

$COP_{HP}$  واقعی پمپ حرارتی حدود ۶۵ الی ۷۵٪ حالت ایده‌آل است. با تنظیم مجدد روابط ریاضی فوق، رابطه

اگر سیال فرآیندی موجود در برج جداسازی دارای خواصی مشابه یک سیال سردکننده باشد، در این صورت عملکرد پمپ حرارتی با استفاده از این سیال به عنوان سیال کاری اندکی تغییر کرده و به صورت سیکل باز عمل می‌کند. البته در این حالت نیز برج جداسازی همانند حالت متداول سیکل بسته پمپ حرارتی عمل می‌کند، تنها با این تفاوت که چگالنده حذف شده و در نتیجه بخارات بالای برج یا همان سیال کاری مستقیم به کمپرسور تزریق شده و سپس از جوش‌آور برج عبور داده می‌شود. بدین ترتیب حذف یک مبدل حرارتی یا همان چگالنده از سیکل پمپ حرارتی، موجب کاهش هزینه کلی سرمایه‌گذاری اولیه خواهد شد [۷ و ۱۱].

به‌طور کلی انتگراسیون پمپ حرارتی در یک فرآیند که شامل جریان‌های گرم و سرد متعددی است، توسط ابزارهایی نظیر منحنی مرکب کلی<sup>۱</sup> که تحلیل پینچ در اختیار طراح فرآیند قرار می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۸ و ۹].

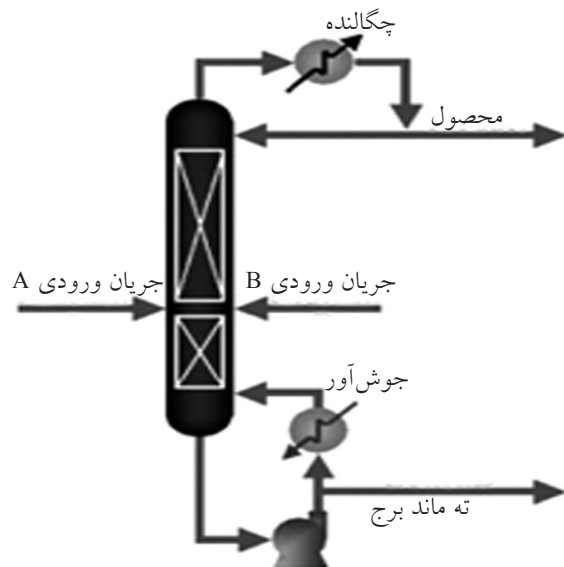
در شکل ۴ یک پمپ حرارتی نشان داده شده است که گرما را از یک بازه دمایی بالای پینچ گرفته و به بازه دمایی بالاتر ارسال می‌کند. در این حالت یک چرخه بسته ایجاد می‌شود که گرمای  $Q_{HP}$  در آن چرخش می‌کند، ضمن آنکه مقداری توان به آن وارد می‌شود که باعث تغییر گرمایش هر قسمت می‌گردد، به نحوی که معادل آن از گرمای ورودی کاسته می‌شود. بدیهی است که در این حالت هیچ‌گونه صرفه‌جویی انرژی روی نمی‌دهد.

شکل ۵ پمپ حرارتی را در پایین پینچ نشان می‌دهد. در این حالت نیز همان چرخه حرارتی  $Q_{HP}$  روی می‌دهد، با این تفاوت که کار محوری به واحد سرمایه‌گذاری اضافه شده است. به نظر می‌رسد این کار مشابه ایجاد یک سیستم گرمایش مخفی در سیستم می‌باشد. کاملاً واضح است که در این شکل پمپ حرارتی به صورت مطلوب جاگذاری نشده است.

شکل ۶ یک پمپ حرارتی را نشان می‌دهد که گرما را از پایین پینچ دریافت کرده و در بالای پینچ، آن حرارت را آزاد می‌کند. در این صورت گرمای اضافی موجود در پایین پینچ جهت تأمین گرمای مورد نیاز بالای آن به‌کار گرفته می‌شود.

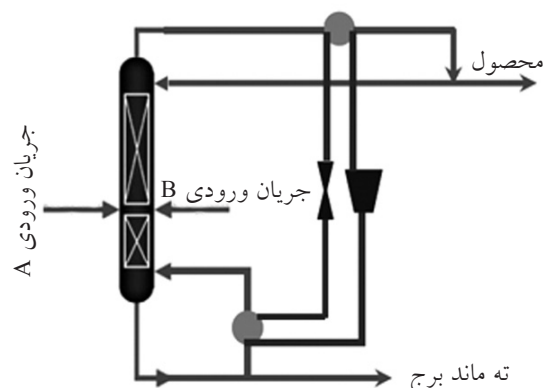
1. Grand Composite Curve

شکل ۲ یک واحد جداسازی معمولی را بدون هرگونه بازیافت حرارت نشان می‌دهد. انتگراسیون پمپ‌های حرارتی در یک فرآیند جداسازی در دو حالت سیکل بسته و سیکل باز صورت می‌گیرد.

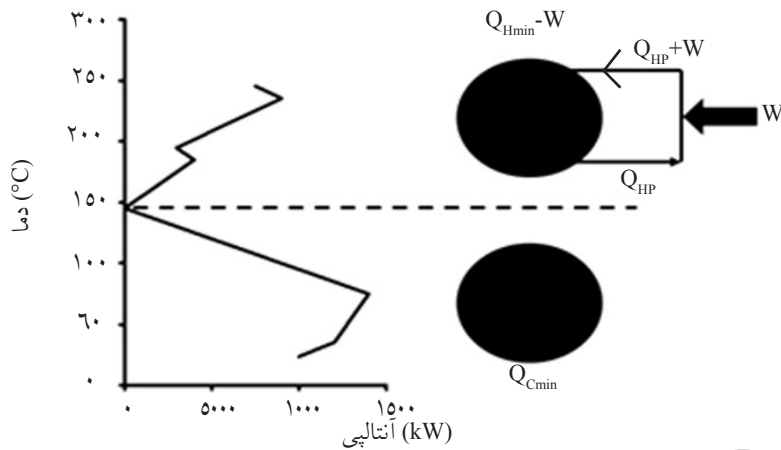


شکل ۲- یک واحد جداسازی معمولی بدون بازیافت انرژی

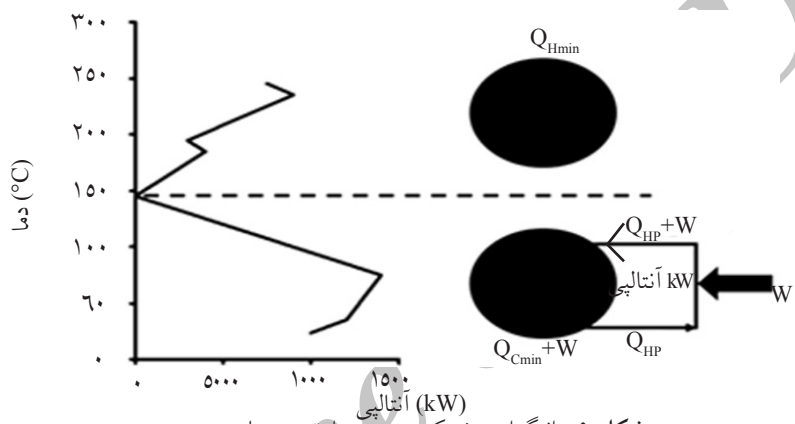
سیکل‌های بسته پمپ حرارتی به‌عنوان ساده‌ترین روش طراحی متداول در استفاده از پمپ حرارتی محسوب می‌شوند، به‌طوری‌که سیال کاری متراکم در فشار نسبتاً بالا، گرما را به بخارات پایین برج در جوش‌آور منتقل کرده و سیال کاری تبخیر شده در فشار نسبتاً پایین، گرما را از محصولات برج دریافت کند. بنابراین جوش‌آور برج به چگالنده سیستم پمپ حرارتی و چگالنده برج به تبخیر کننده سیستم پمپ حرارتی تبدیل می‌شود. این سیستم پمپ حرارتی در شکل ۳ نشان داده شده است.



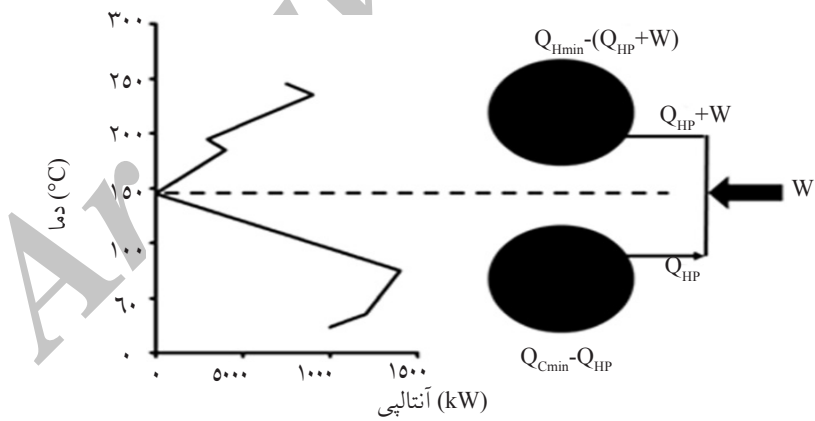
شکل ۳- یک واحد جداسازی همراه با سیکل پمپ حرارتی



شکل ۴- انتگراسیون یک پمپ حرارتی در بالای پینچ



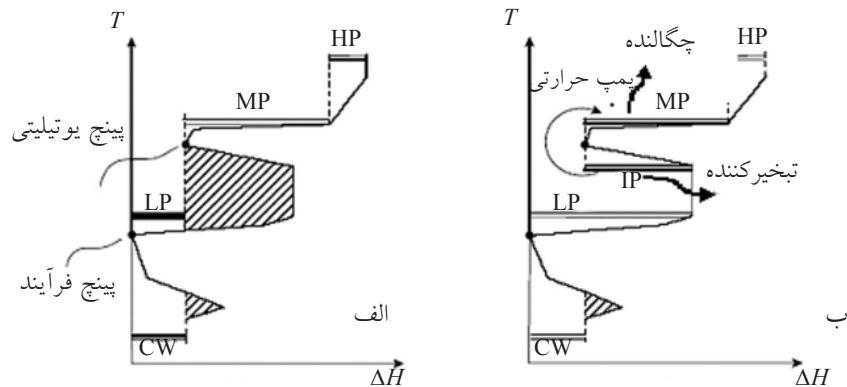
شکل ۵- انتگراسیون یک پمپ حرارتی در پایین پینچ



شکل ۶- انتگراسیون یک پمپ حرارتی در بالا و پایین پینچ

بر منحنی مرکب کلی، از طریق نزدیک کردن منحنی مرکب در بالا و پایین به واحدهای گرمایش و سرمایش و استفاده از واحدهای جدید در دماهای پایین تر از آنچه مورد نیاز است، انجام می گیرد. این مسأله به وضوح در شکل (۷-ب) مشاهده می شود. بدین ترتیب با قرار دادن یک پمپ حرارتی در واحد فرآیندی، واحدهای گرمایش و سرمایش مورد نیاز فرآیند کاهش یافته و در نتیجه منحنی های مرکب گرم و سرد نیز به یکدیگر نزدیک تر می شوند.

نتیجه کلی آن است که با گرفتن کاری معادل  $W$ ، میزان گرمایش  $(Q_{Hmin})$  و سرمایش  $(Q_{Cmin})$  هر یک به مقدار  $Q_{HP}$  کاهش می یابد. حال اگر  $W$  ورودی به پمپ حرارتی توسط جریان های گرم واحد تأمین شود، انرژی گرمایشی مورد نیاز به میزان  $Q_{HP} + W$  کاهش می یابد که دقیقاً همان مزیتی است که از به کارگیری یک پمپ حرارتی انتظار می رود. شکل (۷-الف) منحنی مرکب کلی در حالت بدون پمپ حرارتی را نشان می دهد. تأثیر پمپ حرارتی



شکل ۷- قرارگیری مناسب یک پمپ حرارتی در بالا و پایین پینچ الف- منحنی مرکب کلی بدون پمپ حرارتی و ب- منحنی مرکب کلی با پمپ حرارتی [۱]

به سرخ آن می‌روند. بهای بالای هر واحد انرژی مصرفی در مقایسه با بهای کار مورد نیاز (جهت راه اندازی پمپ حرارتی)، یکی از مهم‌ترین نکات در انتخاب پمپ حرارتی به‌عنوان روشی جذاب برای بازیافت انرژی به شمار می‌رود. شکل ۸ الگوریتم مربوط به استراتژی کلی جهت طراحی پمپ حرارتی در یک فرآیند را نمایش می‌دهد. طبق الگوریتم ارائه شده ابتدا شبکه مبدل‌های حرارتی فرآیند مورد نظر در حداقل اختلاف دمای بهینه<sup>۱</sup> طراحی و نمودار شبکه<sup>۲</sup> تبادل حرارت ترسیم می‌شود. هرچه میزان  $\Delta T_{min}$  فرآیند کمتر باشد، حداقل گرمایش و سرمایش مورد نیاز فرآیند کاهش و به تبع آن هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز سیستم افزایش می‌یابد. پس از رسم منحنی‌های مرکب مربوط به واحد فرآیندی، نوع مناسب پمپ حرارتی و به‌ویژه دماهای سیال‌کاری پمپ حرارتی در هر یک از دستگاه‌های وابسته نظیر چگالنده و تبخیرکننده مشخص می‌شود. در مرحله بعد، مناسب‌ترین مکان جهت قرارگیری تبخیرکننده و چگالنده پمپ حرارتی تعیین می‌گردد. سپس مقدار صرفه‌جویی قابل دستیابی در میزان مصرف هر یک از واحدهای گرمایش و سرمایش مورد نیاز و همچنین ارزش نقدی آنها تعیین می‌شود. در مرحله آخر، هزینه سرمایه‌گذاری لازم جهت نصب پمپ حرارتی اعم از چگالنده، تبخیرکننده، کمپرسور و نیز برق مصرفی برآورد می‌گردد. جهت بررسی اقتصادی بودن پمپ حرارتی از پارامترهای دیگری مانند ضریب عملکرد<sup>۳</sup> و زمان بازگشت سرمایه استفاده می‌شود.

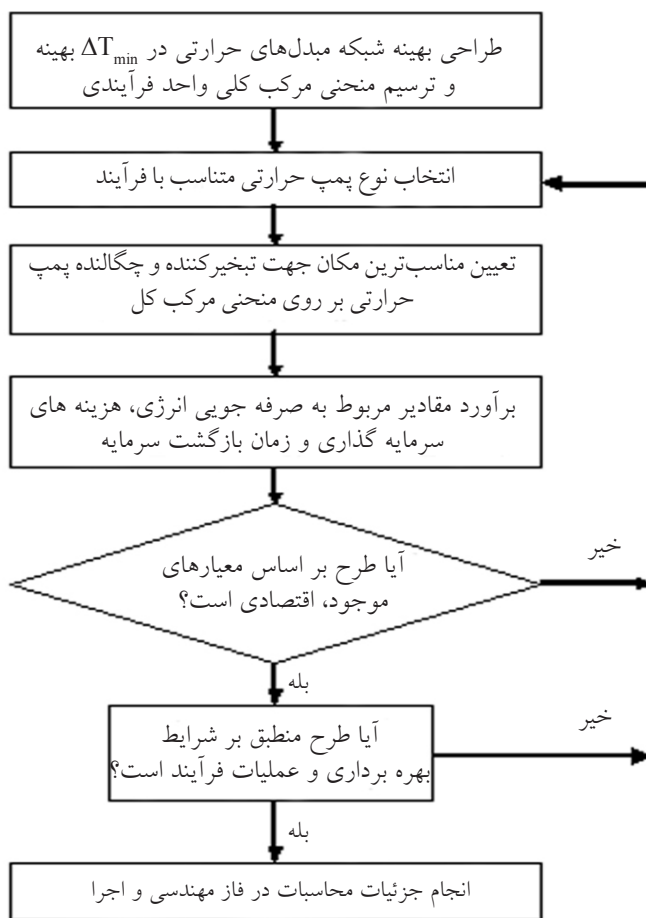
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، چگالنده پمپ حرارتی در بالای پینچ قرار گرفته و منحنی مرکب گرم را (در دمای آن قسمت از فرآیند) به اندازه بار خود به سمت منحنی مرکب سرد انتقال داده است. بهبود وضعیت شکل منحنی مرکب کلی با پمپ حرارتی منجر به بهبود وضعیت در طرف دیگر فرآیند می‌گردد.

به همین ترتیب تبخیرکننده مربوط به پمپ حرارتی، در پایین نقطه پینچ قرار می‌گیرد و در دمای آن قسمت از فرآیند، منحنی مرکب سرد را به اندازه بار خود به سمت منحنی مرکب گرم انتقال می‌دهد. در نتیجه پمپ حرارتی گرما را از پایین پینچ (منبع حرارت)، به بالای پینچ (چاه حرارت) منتقل می‌کند و این بزرگ‌ترین مزیت نصب پمپ حرارتی است که نیاز واحد فرآیندی به منبع گرمایش از طریق یک منبع گرمایشی با دمای پایین‌تر تأمین می‌شود [۱].

### استراتژی کلی جهت طراحی پمپ حرارتی در فرآیندهای جداسازی

از آنچه که تا کنون در مورد پمپ حرارتی گفته شد، می‌توان دریافت که هدف از به‌کارگیری پمپ حرارتی در واحدهای فرآیندی، صرفه‌جویی بیشتر انرژی می‌باشد. بدین ترتیب با جایگزینی چگالنده پمپ حرارتی به جای یک واحد گرمایشی و نیز جایگزینی تبخیرکننده پمپ حرارتی به جای یک واحد سرمایشی مورد نیاز فرآیند، می‌توان به مقادیر قابل توجهی از صرفه‌جویی انرژی دست یافت. اما همواره باید توجه داشت که پمپ حرارتی یکی از گران‌ترین روش‌های بازیافت حرارت اتلافی است. لذا طراحی پس از انجام کلیه اصلاحات مقرون به صرفه‌تر در فرآیند،

1. Optimum Minimum Temperature Difference ( $\Delta T_{min}$ )  
2. Grid Diagram  
3. Coefficient of Performance (COP)



شکل ۸- الگوریتم طراحی سریع پمپ حرارتی در فرآیندهای جداسازی

فرآیند، گازها و مایعات سبک تولیدی واحدهای تقطیر در جو، تبدیل کاتالیستی و آیزوماکس که شامل مخلوطی از هیدروکربن‌های متان، اتان، پروپان، بوتان و پنتان است، جمع‌آوری شده و سپس به اجزاء تشکیل دهنده آن تفکیک می‌گردد.

گازهای سبک گوگردار نیز به منظور تصفیه نهایی به واحد تصفیه گاز ترش فرستاده می‌شود. گاز مایع مخلوطی از پروپان و بوتان است که متناسب با فصول مختلف سال، تحت فشار و به صورت مایع نگهداری می‌شود.

در جدول ۱ اطلاعات حرارتی مربوط به جریان‌های فرآیندی واحد شامل محصولات بالا و پایین برج‌های جداسازی که از مدارک عملیاتی موجود در پالایشگاه تهران استخراج شده‌است، ارائه شده است.

اگر پارامترهای اقتصادی فوق مورد قبول کارفرما واقع شده و محدودیت‌های عملیاتی موجود به‌ویژه فضای فیزیکی محدود نیز منطبق با شرایط بهره‌برداری واحد باشد، پروژه جهت انجام فاز مهندسی و اجرا تحویل داده می‌شود، در غیر این صورت به مرحله انتخاب نوع پمپ حرارتی در الگوریتم بازگشته و مجدداً مراحل بعدی تکرار می‌شود. در این پژوهش، فرآیند جداسازی LPG مربوط به بخش جنوبی شرکت پالایش نفت تهران جهت مطالعه انتخاب شده و نحوه انجام امکان‌سنجی نصب پمپ حرارتی در آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

#### امکان‌سنجی فنی و اقتصادی نصب پمپ حرارتی در فرآیند LPG

فرآیند تصفیه گاز مایع از سه برج جداکننده دی بوتانایزر، دی اتانایزر و دی پروپانایزر تشکیل شده است. در این

جدول ۱- اطلاعات جریان‌های فرآیندی در واحد LPG

No.	T <sub>s</sub> [°F]	T <sub>t</sub> [°F]	ΔH [MMBtu/h]	MCP [MMBtu/h °F]
۱	۱۵۱/۵۲	۱۲۱/۶۴	۴/۰	۰/۱۳۳
۲	۲۲۹/۴۶	۲۴۱/۷۰	۶/۰	۰/۴۹۰
۳	۱۰۰/۴۰	۱۶۰/۷۰	۱/۴	۰/۰۲۳
۴	۱۴۷/۷۴	۱۳۵/۸۶	۷/۰	۰/۵۸۹
۵	۱۳۵/۸۶	۱۲۸/۸۴	۲/۷	۰/۳۸۳
۶	۲۴۵/۴۸	۲۵۰/۵۲	۹/۶	۱/۹۰۱
۷	۲۵۰/۵۲	۱۰۰/۰۴	۰/۸	۰/۰۰۵
۸	۱۸۷/۵۲	۱۹۲/۹۲	۴/۸	۰/۸۸۲
۹	۱۱۲/۶۴	۱۰۸/۶۸	۳/۷	۰/۹۳۴
۱۰	۱۹۲/۹۲	۱۰۰/۰۴	۱/۵	۰/۰۱۶
۱۱	۲۴۱/۷۰	۱۹۰/۵۸	۱/۴	۰/۰۲۷
۱۲	۱۹۰/۵۸	۱۰۰/۰۴	۲/۱	۰/۰۲۳

نزدیکی دما به نقطه پینچ جریان‌ها و قابلیت عبور حرارت از پینچ، از جمله مهم‌ترین دلایل این انتخاب به‌شمار می‌رود. بدین ترتیب چگالنده برج به عنوان تبخیرکننده پمپ حرارتی و جوش‌آور برج نیز به‌عنوان چگالنده پمپ حرارتی عمل می‌نماید. شکل ۱۱ نمایشی از پمپ حرارتی نمونه را نشان می‌دهد.  $Q$  مقدار حرارت دریافت شده از پایین پینچ و  $Q+W$  مقدار حرارت تحویلی در بالای پینچ می‌باشد. جدول ۲ خلاصه نتایج حاصل از انجام محاسبات و بررسی‌های انجام شده در خصوص امکانسنجی نصب این پمپ حرارتی را به‌عنوان پیشنهاد اول ارائه می‌کند. ملاحظه می‌شود انرژی مورد نیاز کمپرسور پمپ حرارتی مورد بررسی، حدود  $1/08$  MMBtu/hr می‌باشد. اما با توجه به صرفه جویی قابل توجهی که در مصرف بخار و آب خنک‌کننده ایجاد می‌شود، در کل، سود خالص سالیانه‌ای حدود ۱۴۴ هزار دلار در طول ۸۷۶۰ ساعت عملکرد واحد به‌دست می‌آید. مطابق مدارک اخذ شده از کارفرما، قیمت برق مصرفی  $0/045$  دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت و هزینه تولید بخار نیز ۵ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو بر ساعت فرض شده است. به‌طور کلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت نصب یک پمپ حرارتی مکانیکی سیکل بسته، منطبق با شرایط فوق حدود ۳۹۳ هزار دلار به‌ازای هر MMBtu انرژی مورد نیاز توسط کمپرسور مربوطه می‌باشد [۱۳]. بدین ترتیب با اعمال شاخص هزینه<sup>۱</sup> سالیانه، میزان کل هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت نصب و راه‌اندازی این سیستم معادل ۵۸۵ هزار دلار برآورد شده است که تقریباً در طول ۴ سال قابل برگشت می‌باشد.

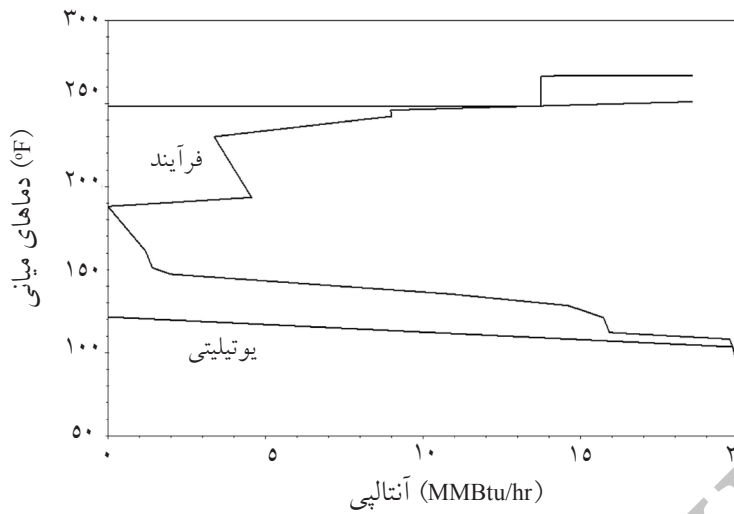
در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار شبکه تبادل حرارت و منحنی مرکب کلی مربوط به فرآیند LPG جنوبی پالایشگاه تهران که توسط نرم‌افزار SuperTarget7 استخراج گردیده، در حداقل اختلاف دمای بهینه ( $10^\circ\text{F}$ ) رسم شده است. لازم به‌ذکر است دمای نقطه پینچ فرآیند  $188^\circ\text{F}$  می‌باشد. حال پس از دست‌یابی به بهترین شبکه تبادل حرارت واحد و ترسیم منحنی مرکب کلی در  $\Delta T_{\min}$  بهینه، ابتدا نوع مناسبی از انواع مختلف پمپ‌های حرارتی موجود که قرار است در واحد LPG مورد ارزیابی واقع شود، انتخاب می‌گردد. انتخاب هر یک از محصولات بالا و پایین برج‌های جداکننده به‌عنوان سیال کاری در یک پمپ حرارتی باز، منجر به ایجاد تغییراتی در شرایط عملیاتی از جمله تغییر دما و فشار جریان‌های برگشتی و در نتیجه تغییر در میزان محصولات نهایی می‌شود. بنابراین به منظور ثابت نگهداشتن کلیه شرایط حاکم بر فرآیند، پمپ حرارتی از نوع سیکل بسته در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نقطه پینچ فرآیند و اصول حاکم بر نحوه جاگذاری پمپ حرارتی در منحنی مرکب کلی، دو پتانسیل جهت به‌کارگیری پمپ حرارتی در این فرآیند شناسایی شد که در ادامه به تشریح آنها می‌پردازیم.

### بررسی نصب پمپ حرارتی در برج دی پروپانایزر

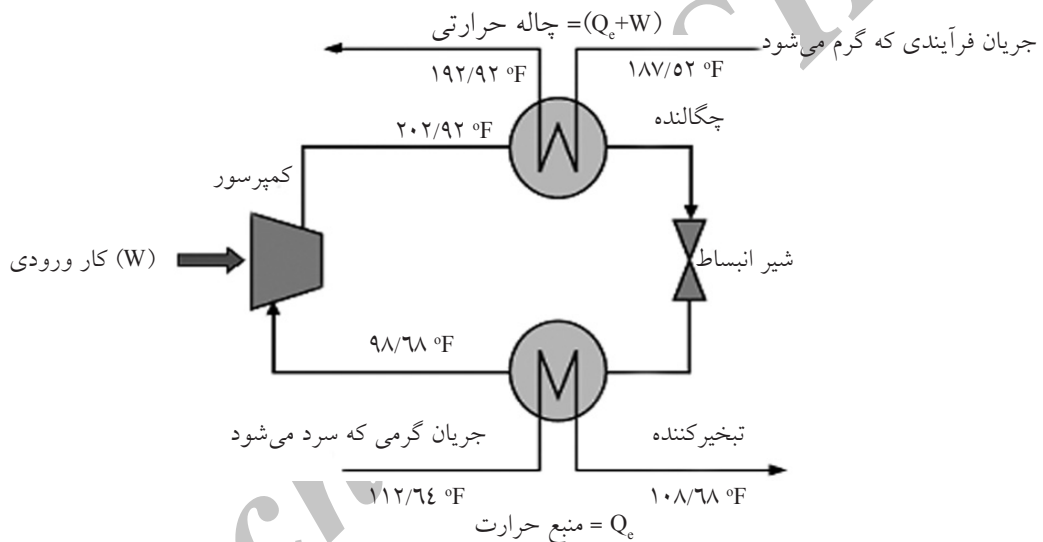
در این بررسی کولر آبی برج دی پروپانایزر (E-608) به‌عنوان تبخیرکننده پمپ حرارتی در پایین نقطه پینچ و جوش‌آور برج (E-609) به‌عنوان چگالنده پمپ حرارتی در بالای نقطه پینچ انتخاب گردید. ظرفیت حرارتی نسبتاً بالای این مبدل‌ها،







شکل ۱۰- منحنی مرکب کلی فرآیند LPG در حداقل اختلاف دمای بهینه



شکل ۱۱- نمایی از پمپ حرارتی مربوط به پیشنهاد اول: برج دی پروپانایزر

جدول ۲- نتایج حاصل از انجام محاسبات در خصوص امکان‌سنجی نصب پمپ حرارتی پیشنهاد اول

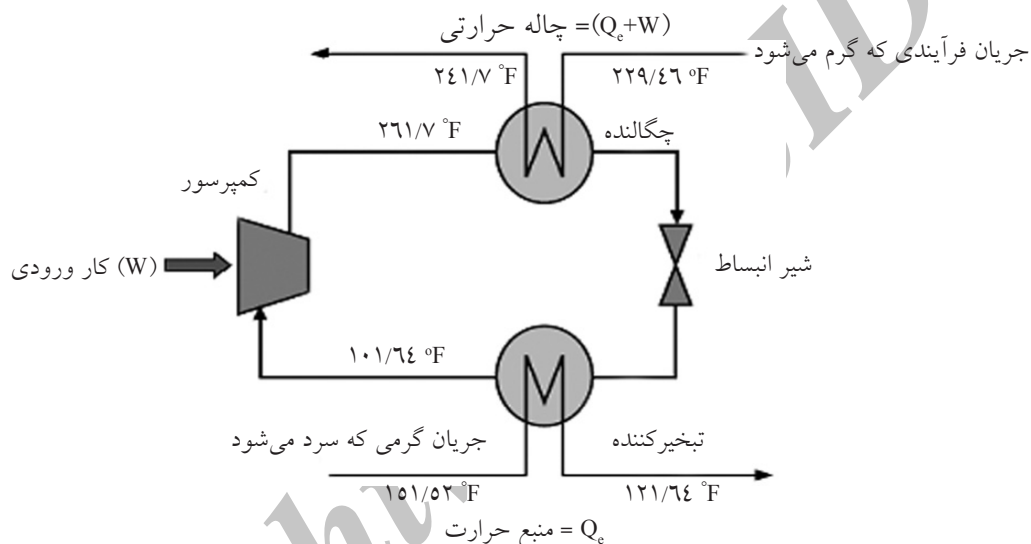
	Tin (°F)	Tout (°F)
چگالنده	۱۸۷/۵۲	۱۹۲/۹۲
تبخیرکننده	۱۱۲/۶۴	۱۰۸/۶۸
سیال عامل	Compressor Inlet	Compressor Outlet
	۹۸/۶۸	۲۰۲/۹۲
COP <sub>HP</sub> , Actual COP <sub>HP</sub>	۶/۳۶ و ۴/۴۵	
Q <sub>c</sub> , (MMBtu/hr)	۳/۷۲	
W, (MMBtu/hr)	۱/۰۸	
هزینه توان مصرفی (\$/Yr)	۱۲۴۵۹۲/۴۶	
Q <sub>c</sub> +W, (MMBtu/hr)	۴/۸۰	
میزان بخار و آب صرفه جویی شده (\$/Yr)	۲۶۸۶۴۲/۳۱	
میزان صرفه جویی خالص (\$/Yr)	۱۴۴۰۴۹/۸۵	
\$ سرمایه‌گذاری	۵۸۵۳۰۵/۶۱	
زمان بازگشت سرمایه (سال)	۴/۰۶	

و آب خنک کننده برابر ۳۳۰ هزار دلار در سال است. کمپرسور پمپ حرارتی مورد بررسی، نیاز به حدود  $1/89 \text{ MM Btu/hr}$  انرژی دارد. لذا با توجه به هزینه عملیاتی مصرف برق در پمپ حرارتی، در کل سود خالص سالیانه‌ای معادل ۱۱۳ هزار دلار قابل دستیابی است. پس از اعمال شاخص هزینه سالانه، میزان کل هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت نصب و راه اندازی این سیستم معادل ۸۱۹ هزار دلار برآورد شده است که زمان بازگشت سرمایه آن حدود ۷ سال محاسبه می‌شود.

### بررسی نصب پمپ حرارتی در برج دی اتانایزر

در پیشنهاد دوم، کولر آبی E-601 مربوط به برج دی اتانایزر به‌عنوان تبخیر کننده پمپ حرارتی و جوش‌آور (E-602) مربوط به برج هم به‌عنوان چگالنده پمپ حرارتی مورد بررسی انتخاب شده است. شکل ۱۲ نمایی از پمپ حرارتی نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۳ خلاصه نتایج حاصل از انجام محاسبات و بررسی‌های انجام شده در خصوص این پیشنهاد را ارائه می‌کند. میزان صرفه‌جویی حاصل از کاهش مصرف بخار



شکل ۱۲- نمایی از پمپ حرارتی مربوط به پیشنهاد دوم: برج دی اتانایزر

جدول ۳- نتایج حاصل از انجام محاسبات در خصوص امکان‌سنجی نصب پمپ حرارتی پیشنهاد دوم

	$T_{in}$ (°F)	$T_{out}$ (°F)
چگالنده	۲۲۹/۴۶	۲۴۱/۷
تبخیرکننده	۱۵۱/۵۲	۱۲۱/۶۴
سیال عامل	Compressor Inlet	Compressor Outlet
	۱۰۱/۶۴	۲۶۱/۷
$COP_{HP}$ , Actual $COP_{HP}$	۴/۵۱ و ۳/۱۶	
$Q_c$ (MMBtu/hr)	۴/۰۷۶	
$W_c$ (MMBtu/hr)	۱/۸۹	
هزینه توان مصرفی (\$/Yr)	۲۱۸۰۹۱/۷۰	
$Q_c+W_c$ (MMBtu/hr)	۵/۹۶	
میزان بخار و آب صرفه‌جویی شده (\$/Yr)	۳۳۰۹۹۶/۴۸	
میزان صرفه‌جویی خالص (\$/Yr)	۱۱۲۹۰۴/۷۸	
\$ سرمایه‌گذاری	۸۱۸۹۷۵/۸۸	
زمان بازگشت سرمایه (سال)	۷/۲۵	

## نتیجه‌گیری

به‌کارگیری پمپ حرارتی در کنار برج دی‌پروپانایزر مقرون به صرفه‌تر بوده و به لحاظ بهره‌برداری نیز مورد تأیید کارشناسان عملیات واقع شده است. در کل این پیشنهاد حدود ۲۲٪ صرفه‌جویی انرژی به همراه خواهد داشت.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاران محترم پژوهش، فناوری و بهره‌برداری شرکت پالایش نفت تهران به دلیل همکاری‌های صمیمانه و حمایت ایشان از اجرای این پروژه پژوهشی تشکر و سپاسگزاری می‌نمایند.

## علائم و نشانه‌ها

- $Q_e$  یا  $Q_{HP}$ : حرارت دریافتی توسط پمپ حرارتی (MMBtu/hr)  
 $W$ : کار مورد نیاز جهت راه‌اندازی پمپ حرارتی (MMBtu/hr)  
 $COP_{HP}$ : ضریب عملکرد پمپ حرارتی  
 $Q$ : حرارت تولیدی توسط پمپ حرارتی (MMBtu)  
 $T_e$ : درجه حرارت مربوط به تبخیرکننده ( $^{\circ}F$ )  
 $T_c$ : درجه حرارت مربوط به چگالنده ( $^{\circ}F$ )  
 $LPG$ : فرآیند تصفیه گاز مایع  
 $\Delta T_{min}$ : حداقل اختلاف دما ( $^{\circ}F$ )  
 $T_s$ : دمای ابتدای جریان (موجود) ( $^{\circ}F$ )  
 $T_r$ : دمای انتهای جریان (هدف) ( $^{\circ}F$ )  
 $\Delta H$ : اختلاف آنتالپی (MMBtu)  
 $MCP$ : میزان ظرفیت حرارتی (MMBtu/hrF)  
 $Q_{Hmin}$ : حداقل گرمایش مورد نیاز (MMBtu)  
 $Q_{Cmin}$ : حداقل سرمایش مورد نیاز (MMBtu)  
 $T_{in}$ : دمای ورودی به دستگاه ( $^{\circ}F$ )  
 $T_{out}$ : دمای خروجی از دستگاه ( $^{\circ}F$ )

پمپ حرارتی با برقراری انتقال حرارت از منابع حرارت در پایین نقطه پینچ فرآیند به چاه‌های حرارتی در بالای نقطه پینچ، نیازهای گرمایشی و سرمایشی واحد فرآیندی را کاهش می‌دهد. بنابراین با جایگزینی چگالنده و تبخیرکننده پمپ حرارتی به جای یک منبع تأمین کننده گرمایش و سرمایش مورد نیاز فرآیند، می‌توان به صرفه‌جویی قابل توجهی از انرژی دست یافت.

از آنجا که پمپ حرارتی یکی از گران‌ترین روش‌های بازیافت حرارت اتلافی است و طراحی آن پس از انجام کلیه اصلاحات مقرون به صرفه‌تر به لحاظ اقتصادی در فرآیند به سراغ آن می‌روند، لذا شرط سودمندی جهت انتخاب پمپ حرارتی به عنوان روشی جذاب برای بازیافت انرژی، بهای بالای هر واحد انرژی بازیافتی در مقایسه با بهای انرژی مورد نیاز جهت راه‌اندازی پمپ حرارتی می‌باشد. در این پژوهش، فرآیند جداسازی LPG مربوط به بخش جنوبی شرکت پالایش نفت تهران جهت مطالعه فوق انتخاب و امکان‌سنجی نصب پمپ حرارتی در آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور در ابتدا با استفاده از ابزار فناوری پینچ، شبکه مبدل‌های حرارتی در حداقل اختلاف دمای بهینه، طراحی و مصارف بهینه انرژی‌های گرمایشی و سرمایشی واحد نیز تعیین می‌شود. سپس بر اساس الگوریتم ارائه شده، نوع مناسب پمپ حرارتی انتخاب و محاسبات مربوط به بررسی اقتصادی و صرفه‌جویی‌های قابل دستیابی و بررسی مجددیت‌های عملیاتی انجام شده است. در این پژوهش دو مورد پیشنهادی جهت نصب و به‌کارگیری پمپ حرارتی در برج‌های جداسازی دی‌پروپانایزر و دی‌تانایزر ارزیابی گردید. نتایج حاصل از بررسی و ارزیابی این پیشنهادات حاکی از آن است که

## مراجع

- [1]. Smith R., *Chemical process design and integration*, McGraw Hill Inc., 1995.
- [2]. *Industrial heat pumps for steam and fuel savings*, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, DOE/GO-102003-1735, June 2003.
- [3]. Rivera-Ortega P., Picoñ n-Nuñez M., Torres-Reyes E., Gallegos-Munoz A., "Thermal integration of heat pumping systems in distillation columns", *Applied Thermal Engineering* 19, pp. 819-829, 1999.

- [4]. Benstead R., Sharman F.W., "Heat pumps and pinch technology", Heat Recovery Systems and CHP, Vol. 10, Issue 4, pp. 387-398, 1990.
- [5]. Eduardo Diez, Paul Langston, Gabriel Ovejero, Dolores Romero M., "Economic feasibility of heat pumps in distillation to reduce energy use", Applied Thermal Engineering 29, pp. 1216–1223, 2009.
- [6]. Fonyo Z., Mizsey P., "Economic applications of heat pumps in integrated distillation systems", Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 14, No. 3, pp. 249–263, 1994.
- [7]. Fonyo Z. and Benko N., "Comparison of various heat pump assisted distillation configurations", Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Vol. 76, Part A, pp. 348–360, March 1998.
- [8]. Nilsson K., Sunden B., "Optimizing a refinery using the pinch technology and the mind method", Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 14, No. 2, pp. 211–220, 1994.
- [9]. Gadalla M., Jobson M., Smith R., "Optimization existing heat-integrated refinery distillation systems", Trans IChemE, Vol. 81, Part A, pp. 147-152, Jan. 2003.
- [10]. Fonyo Z., Benkő N., "Enhancement of process integration by heat pumping", Computers Chem. Engng., Vol. 20, pp. 85-S90, 1996.
- [11]. Laue H.J., "Advanced materials and technologies: heat pumps", New Series VIII/3C, Springer, pp. 605-625, (DOI: 10.1007/10858992-21), Jan. 2006.
- [12]. Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M., "Advances in heat pump systems: A review", Applied Energy 87, pp. 3611–3624, 2010.
- [13]. *New industrial heat pump application to a petrochemical plant*, Phase II, Final Report, Tensa Services, Inc., Houston, Texas, DOE/ID/12860, Mar., 1999.

Archive of SID