



مدلسازی نقطه پینچ در دماهای مختلف با استفاده از نرم افزارهای Aspen Hysis و Aspen Energy Analyzer در یک واحد پتروشیمی

مجید وکیلی^۱، سعید دانشمند^۲، وحید منفرد^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

* زنجان، ۴۵۱۵۶-۵۸۱۴۵، vahid_monfared_57@yahoo.com

چکیده

با توجه به رشد جمعیت و از طرفی افزایش روز افزون مصرف منابع انرژی در شاخه های گوناگون خانگی و صنعتی، و همچنین با توجه به محدودیت منابع انرژی تجدیدناپذیر، ناگزیر به کاهش و اصلاح مصرف انرژی هستیم. بدین منظور در این مقاله سعی بر آن شده است که با استفاده از نرم افزارهای Aspen Hysis و Aspen Energy Analyzer در دماهای مختلف نقطه پینچ مورد بررسی قرار گیرد. تجزیه و تحلیل پینچ یک فرآیند صنعتی، جهت مشخص کردن هزینه انرژی و هزینه اصلی شبکه تبادل گرهای حرارتی و همچنین تعیین نقطه پینچ بکار می رود. هدف از این تحقیق، آنالیز مبدل های حرارتی با تکنولوژی پینچ و طراحی شبکه مبدل ها می باشد که در نهایت میزان انرژی مصرفی واحد کاهش یافته و سبب افزایش راندمان حرارتی واحد می گردد و متعاقب آن هزینه های عملیاتی آن نیز کاهش یابد. بدین منظور ابتدا فرآیند با استفاده از نرم افزار Aspen Hysis شبیه سازی شده و سپس با استفاده از نرم افزار Aspen Energy Analyzer آنالیز پینچ صورت می گیرد. محاسبات اقتصادی مربوط به هزینه های عملیاتی (انرژی) و هزینه کل انجام گردیده است. با اصلاح شبکه مبدل حرارتی فوق (طراحی رتروفیت) و با میزان سرمایه اولیه 1.7×10^4 دلار، سالانه 31492 دلار بابت صرفه جویی در مصرف انرژی، عاید سازمان مربوطه می گردد. دوره بازگشت سرمایه ۱۸۰ روز (کمتر از یک سال) به دست آمده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۳ مهر ۱۳۹۸

پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۲۰ اسفند ۱۳۹۸

کلیدواژگان

پینچ

ΔT_{min}

نمودار میله ای

Aspen Hysis

Aspen Energy Analyzer

Modeling of pinch point at various temperatures using Aspen Hysis and Aspen Energy Analyzer softwares in a petrochemistry unit

Majid Vakili¹, Saeed Daneshmand², Vahid Monfared^{3*}

1-Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2-Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

* P.O.B. 45156-58145 Zanjan, Iran, vahid_monfared_57@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper
Received 25 September
2019

Accepted 5 March 2020

Available Online 10 March
2020

Keywords

Aspen Hysis
Aspen Energy Analyzer
Bar graph
Pinch
Exergy

ABSTRACT

Recently, with reducing the energy resources and increasing the energy costs (price), the energy saving has been attracted any more. Pinch analysis of an industrial process has been employed to identify pinch point and energy price together with heat exchanger network cost. NGL project employs a complicated network of heat exchanger and needs to increase their efficiency using Pinch technology. To do so, we simulate the refinery process using Hysis software and analyze the results with Aspen Energy Analyzer. After validating the model using field data, simulated model was studied. The results showed with $1.7E04$ \$ investment, 31492 \$ will be returned annually using modified retrofit network. The payback time would be 180 days. In this paper, the Pinch Point is investigated and analyzed at various temperatures using Aspen Hysis software and Aspen Energy Analyzer software. The pinch analysis is used to determine and predict the cost of energy and the cost of the heat exchanger network as well as determination of pinch points in industrial process. For this purpose, the process is firstly simulated and modeled using Aspen Hysis software and then analyzed using Pinpoint Analyzer Aspen Energy Analyzer. In addition, economic calculations related to operating costs (energy) and total costs have been done. With the modification of the above - mentioned heat exchanger network, notable saving will be earned for the mentioned organization. So, the return period of capital will be approximately 180 days (less than one year) for the mentioned organization in this model.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Majid Vakili, Saeed Daneshmand, Vahid Monfared, Modeling of pinch point at various temperatures using Aspen Hysis and Aspen Energy Analyzer softwares in a petrochemistry unit, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp. 7-24, 2019 (In Persian)

۱- مقدمه

امروزه به علت افزایش روز افزون قیمت انرژی و کاهش منابع سوخت طبیعی و توجه بیشتر به قوانین کنترل آلودگی محیط زیست، اهمیت بازیافت بهینه انرژی حرارتی و پیشگیری از اتلاف آن در صنایع مختلف هر چه بیشتر به چشم می‌خورد. یکی از موثرترین و پر کاربردترین راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی، انتگراسیون حرارتی شبکه مبدل های حرارتی است. باتوجه به این که منابع انرژی، با سرعت فوق العاده ای مصرف می شوند و درآینده ای نه چندان دور چیزی از آنها باقی نخواهد ماند، لذا نسل فعلی وظیفه دارد به آن دسته از منابع انرژی که دارای عمر و توان زیادی می‌باشند روی آورده و دانش خود را برای بهره برداری از آنها گسترش دهد. تحلیل و طراحی این شبکه‌ها به کمک تکنولوژی پینچ بدلیل مبنای ترمودینامیکی قوی و نیز عملی بودن و سهولت کاربرد، بعنوان کارآمدترین ابزار به منظور اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی در صدها پروژه صنعتی بکار گرفته شده است. تکنولوژی پینچ یک روش مفید و کارآمد برای سنتز شبکه مبدلهای حرارتی می‌باشد.

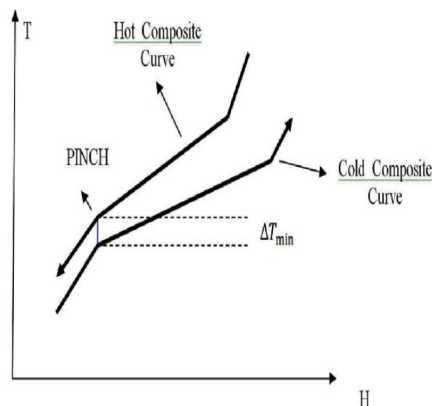
فناوری پینچ یک روش سیستمیک مبتنی بر قوانین اول و دوم ترمودینامیک بوده که برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای شیمیایی و سرویس های جانبی بکار می رود. تجزیه و تحلیل پینچ یک فرآیند صنعتی برای مشخص کردن هزینه انرژی و هزینه اصلی شبکه تبادل گرهای حرارتی و همچنین تعیین نقطه پینچ بکار می رود. تحلیل پینچ، در آغاز برای بازیافت حرارت توسعه داده شد و این از مهمترین عناصر انتگراسیون فرآیندهاست. در واقع مفهوم پینچ آغازی بود بر انتگراسیون فرآیند، کشف بازیافت حرارتی پینچ (Heat Recovery Pinch) مهمترین راه کار در توسعه تحلیل و روش های طراحی برای کاربرد موثر انرژی در فرآیندها و صنایع بود. نقطه پینچ غیر آمیختگی بنیادی از نظر انرژی گرمایی سیستم را در واحد بیان می کند [۱]. هدف اصلی تجزیه و تحلیل پینچ بهبود یکپارچه سازی حرارتی فرآیند و افزایش بازیافت حرارتی فرایند و کاهش میزان سرویس های جانبی مصرفی می باشد. با توجه به تعداد زیاد مبدل های حرارتی واحد تبرید کارخانه NGL، هدف این تحقیق آن است تا با آنالیز مبدل های حرارتی آن با تکنولوژی پینچ و طراحی شبکه مبدل ها میزان انرژی مصرفی واحد را کاهش داده و سبب افزایش راندمان حرارتی واحد گردد و متعاقب آن هزینه‌های عملیاتی آن نیز کاهش یابد. برای انجام آنالیز ابتدا با استفاده از نرم افزار Aspen Hysis فرایند شبیه سازی شده و سپس با استفاده از Aspen Energy Analyser شبکه جدید

مبدل ها را طراحی می نماییم و سپس انرژی مصرفی را با حالت قبل مقایسه می نماییم که با توجه به اتلاف حرارتی که در حال حاضر وجود دارد، پیش بینی می کنیم به میزان زیادی درصد مصرف انرژی کاهش یابد. در انتها نیز هزینه های اقتصادی را در دو حالت طراحی قدیم و طراحی جدید شبکه مبدل ها بررسی می نماییم تا میزان صرفه جویی اقتصادی مشخص گردد. پینچ در درجه اول برای طراحی استفاده می‌شود البته مشخصا موقعیت واحد و عملیات را نیز مشخص می کند، روش های آن به طور عموم برای فرآیندهای پیوسته و ناپیوسته کاربرد دارد. ارتباط بین طراحی، نقشه و عملیات به ویژه در فرآیندهای ناپیوسته زیاد است. یکی از مفصل ترین مباحث پینچ، طراحی و توصیف جداکننده‌ها (مخصوصاً سیستم های با مصرف انرژی مثل برج های تقطیر، خشک کن ها و تبخیر کننده‌ها)، شبکه مبدل ها و واحدهای پشتیبانی (بخار در فشارهای مختلف، کوره‌ها، سردسازها و غیره) است. روش های بهینه کردن واحدهای پشتیبان شامل استفاده از پمپ ها و موتورهای حرارتی (گاز، بخار یا توربین دیزل) می‌باشد. با استفاده از تشابه بین انتقال حرارت و جرم، انتگراسیون فرآیند همچنین می‌تواند برای طراحی شبکه‌های انتقال جرم شامل تجهیزات عملیاتی از قبیل جذب کننده‌ها، استخراج کننده‌ها و غیره استفاده شود [۲].

تولد پینچ به عنوان یک فعالیت طراحی سیستم گرا، مربوط به کشف بازیافت حرارتی پینچ می باشد. روش ابداعی تجزیه و تحلیل پینچ در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ توسعه داده شد که منجر به شکل گیری عمل طراحی سنتی بر پایه گسترش و بهبود تکنولوژی های فرآیند با استفاده از بینش مهندسی (به عنوان مثال پس از یادگیری منحنی) و انتخاب بهترین طرح از مجموعه ای از مطالعات موردی می باشد [۳]. مفهوم بازیافت حرارتی پینچ به طور مستقل توسط لینهاف و احمد کشف و توسعه یافت [۴]. ایده اصلی رسم جداگانه تجهیزات سرمایشی و گرمایشی یک فرآیند در یک روش فرایند در نمودار آنتالپی-دما، که معمولاً به عنوان منحنی کامپوزیت (ترکیبی) اشاره شده است، می باشد.

پیترز و رامسون فرآیند تفکیک گاز با استفاده از سیستم توربوواکسپندر را مورد مطالعه اقتصادی و فنی قرار دادند. مطابق با تحقیقات آنها استفاده از توربوواکسپندر در حال حاضر به عنوان پرکاربردترین روش مورد استفاده قرار می گیرد چرا که میزان جداسازی گاز متان توسط آن به مراتب بیشتر از استفاده از حلال و یا شیر ژول تامسون بوده و بهره اقتصادی بالایی دارد.

تکنولوژی پینچ یک متدولوژی سیستماتیک برای ذخیره کردن انرژی در فرآیند ها را معرفی کرده است. آنالیز پینچ نشانه هایی برای حداقل سازی انرژی لازم مصرفی بدست می دهد. این نشانه های انرژی بوسیله ابزاری به نام "نمودار مرکب" مشخص می شوند. نمودار مرکب شامل پروفایل دما-آنالتی (T-H) است که هم انرژی در دسترس فرآیند (نمودار مرکب گرم) و هم انرژی مورد نیاز فرآیند (نمودار مرکب سرد) را با همدیگر نمایش می دهد. نمودار مرکب یک تصویر از انتقال حرارت متقابل از جریان های سرد و گرم می باشد که به وسیله آن حداقل انرژی مورد هدف فرآیند مشخص می شود. این مهم از روی هم افتادگی نمودار های مرکب سرد و گرم حاصل می شود. در شکل ۱ نزدیک ترین نقطه جدایی دو نمودار را می بینیم که به ΔT_{min} معروف می باشد. با توجه به این نمودار می توان بیشترین تبادل حرارتی ممکن فرآیند را مشاهده نمود و هم چنین حداقل حرارت مورد نیاز فرآیند در جریان سرد (Q_{Cmin}) و حداقل حرارت مورد نیاز فرآیند در جریان گرم (Q_{Hmin}) قابل محاسبه است [۱۶]. به نقطه ای که در آن ΔT_{min} مشخص شده است، نقطه پینچ می گویند. به وسیله نقطه پینچ می توان فرآیند را به دو بخش تقسیم کرد. یک بخش قسمت بالای نقطه پینچ و بخش دیگر قسمت پایین نقطه پینچ. در شکل ۲ این تقسیم بندی مشخص می باشد. بخش بالای نقطه پینچ نیازمند دریافت حرارت می باشد. بنابراین یک چاه گرمایی خالص است. بخش پایین نقطه پینچ آماده از دست دادن حرارت است و بنابراین یک منبع گرمایی خالص است.



شکل ۱ استفاده از نمودار های مرکب سرد و گرم برای یافتن نشانه های انرژی [۱۷]

آنها برای بررسی های خود از نرم افزار شبیه ساز HYSIS بهره گرفتند [۵].

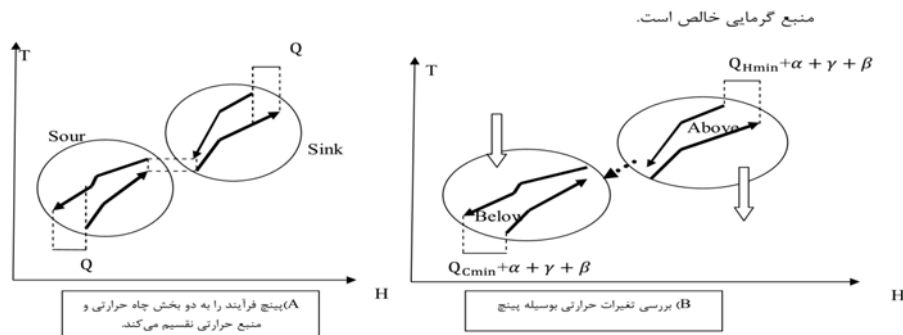
بنات و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با استفاده از آنالیز پینچ به بررسی میزان کارایی تجهیزات شیرین سازی از دیدگاه مصرف انرژی پرداختند. آنالیز پینچ این امکان را فراهم می کند که تجهیزات با بیشترین ناکارایی انرژی را در جهت بهبود آنها شناسایی کرد. نتایج آنها نشان داد که بیشترین تخریب انرژی در مبدل های برج صورت می گیرد [۶].

فواد و همکارانش در سال ۲۰۱۵ جهت کاهش انرژی واحد تبرید الفین از سیال ترکیبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سیال ترکیبی تا بیش از ۴۰٪ می تواند سبب کاهش انرژی گردد. آنها برای تحلیل نتایج خود از آنالیز همزمان پینچ - اکسرژی بهره گرفتند [۷].

مهرپویا و همکارانش [۸ و ۹] روش جدیدی را با توجه به مفهوم اکسرژی و پینچ برای جداسازی اجزای گاز طبیعی ارائه کردند. افزایش چشمگیر بازدهی مبدل های حرارتی، کاهش توان کمپرسور مورد نیاز و نیاز افزایش خلوص محصولات از جمله ویژگی های بارز روش ارائه شده بود.

جو و آن [۱۰] به بررسی استفاده از روش پینچ در صنعت پتروشیمی پرداختند. پنجه شاهی و فاطمی، به طور گسترده کاربردهای روش پینچ را در صنایع مختلف مورد مطالعه قرار دادند و برای بهبود این روش، پیشنهادهایی را ارائه نمودند. از جمله می توان به بهینه سازی سیستم بازیافت انرژی در واحد اسید سولفوریک در مجتمع پتروشیمی رازی [۱۱] و بهینه سازی شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک مجتمع پتروشیمی بندرامام [۱۲] اشاره نمود. عمیدپور و همکاران نیز مطالعات قابل توجهی در زمینه تحلیل پینچ انجام داده اند. از جمله کتاب بهینه سازی انرژی تکنولوژی پینچ توسط عمیدپور و گوگل [۱۳] نگاشته شد. پنجه شاهی و عمیدپور [۱۴] با استفاده از روش های تجزیه کلی و جزئی به یکپارچه سازی شبکه مبدل های حرارتی با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی پرداختند. پولی و عمیدپور [۱۵] به ارائه جزئیات طراحی شبکه مبدل های حرارتی پرداختند. در این مقاله به اصلاح شبکه مبدل های حرارتی به منظور صرفه جویی انرژی با استفاده از تکنولوژی پینچ روش (Retrofit)، در واحد تفکیک میعانات گاز طبیعی شرکت پتروشیمی بندرامام پرداخته شده است.

۲- مواد و روش ها (تحلیل پینچ)



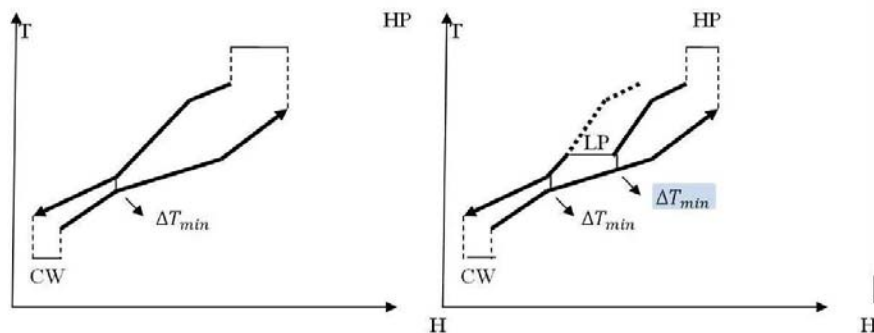
شکل ۲ نمایش مبانی پینچ [۱۸ و ۱۹]

صورت بگیرد. در بالای نقطه پینچ نباید تبادل حرارت از سیستم به محیط صورت پذیرد. در پایین نقطه پینچ نباید تبادل حرارت از محیط به سیستم صورت پذیرد [۲۲].

۳- منابع تامین انرژی

انرژی مورد نیاز یک فرآیند در سطوح مختلف انرژی تامین می شود. مثل سطح بخار، سطوح سرمایشی، گاز داغ شده از کوره، روغن داغ و غیره هدف عمومی هر واحدی کم نمودن سطوح انرژی پر هزینه و افزایش سطوح انرژی ارزان است. برای مثال در جایی که بخار با فشار پایین برای گرمایش کافی است، نباید از بخار با فشار بالا استفاده نمود و هزینه اضافی به واحد تحمیل نمود. یا از سیستم خنک سازی گاز به جای آب خنک استفاده نمود. نمودار مرکب یک هدف گذاری کلی انجام می دهد و نمی توان از آن به طور واضح میزان نیازمندی حرارتی رادر سطوح مختلف انرژی بدست آورد. این مساله را میتوان در شکل ۳ دید.

با توجه به شکل ۲ میزان حرارت منتقل شده از بالای نقطه پینچ به پایین نقطه پینچ برابر با α می باشد. قبل از این انتقال حرارت، از موازنه بالای نقطه پینچ میزان حرارت (Q_{Hmin}) را بدست آوردیم. حال با موازنه مجدد می بینیم میزان حرارت α نیز بر آن اضافه شده است. در پایین نقطه پینچ نیز میزان حرارت α بر حرارت اضافی موجود در پایین نقطه پینچ اضافه شده است. با توجه به شکل ۳ مقدار γ حرارت از دست داده شده به محیط در بالای نقطه پینچ است و مقدار β حرارت گرفته شده از محیط در پایین نقطه پینچ است. به حرارت مورد نیاز بالای نقطه پینچ میزان γ اضافه می شود. و هم چنین به میزان حرارت اضافی پایین پینچ نیز این میزان حرارت اضافه می شود. به طور مشابه حرارت خارجی گرفته شده در پایین نقطه پینچ به میزان β حرارت های مورد نیاز سرد و گرم را به همین مقدار افزایش می دهد [۲۰ و ۲۱]. با توجه به مسائل عنوان شده در مورد پینچ باید سه قانون زیر را رعایت کرد تا به حداقل انرژی مورد هدف رسید. هیچ انتقال حرارتی از نقطه پینچ نباید

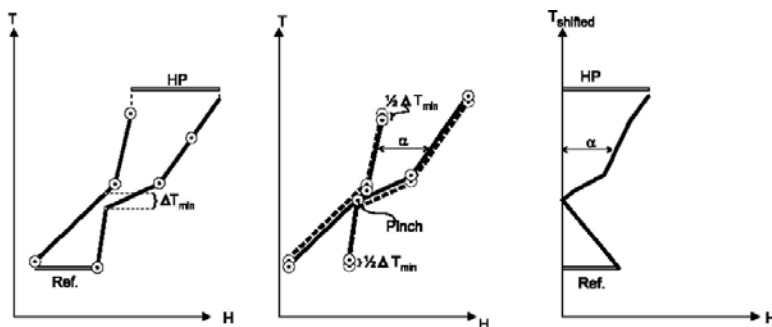


شکل ۳ استفاده از نمودار مرکب برای هدف گذاری سطوح انرژی [۲۳]

نقطه پینچ توسط بخار فشار پایین تامین شده است. در صورتی که این حرارت در نمودار اول در فشار HP تامین شده بود. بیشترین میزان استفاده از بخار LP به جای بخار HP را می توان با اختلاف دمای ΔT_{min} بدست آورد. زیرا حداقل فاصله در نمودار مرکب بین جریان سرد و گرم است. برای استفاده از

باتوجه نمودار مرکب در شکل ۲ می بینیم که در دو سطح، انرژی مورد نیاز سیستم تامین شده است، یکی بخار فشار بالا و یکی آب خنک کن. حال در شکل ۳ می بینیم که یک نمودار مرکب جدید ساخته شده است که در آن مقداری از حرارت بالای

نمودار مرکب گراند برای هدف گذاری سطوح انرژی استفاده می شود و در شکل ۴ نحوه تولید این نمودار را می بینیم. در ابتدا نمودار مرکب سرد در محور عمودی به میزان $1/2 \Delta T_{min}$ بالا می آوریم و نمودار مرکب گرم را به همین میزان پایین می آوریم. با این جابجایی دما در جریان های فرآیند و سطوح انرژی مطمئن خواهیم بود که در نمودار مرکب جمع حداقل اختلاف دما ΔT_{min} بین جریان های فرآیند و سطوح انرژی خواهد ماند. با این جابجایی دما نمودارهای مرکب به هم خواهند رسید. و نمودار مرکب جمع از اختلاف آنتالپی نمودارهای مرکب جدید بدست خواهد آمد.



شکل ۴ ایجاد نمودار مرکب گراند [۲۴]

که در دمای بخار MP یک خط از محور عمودی کشیده شده است تا نمودار مرکب جمع را قطع کند. این خط معرف میزان بخار MP مورد نیاز است. مابقی انرژی مورد نیاز باید توسط بخار HP تامین شود. به همین صورت میزان آب خنک مصرفی مشخص می شود. نقطه برخورد خط سطح MP و CW با نمودار مرکب جمع به نقاط پینچ های سرویس های جانبی (Utility Pinches) معروفند [۲۵].

۶- قوانین طراحی تکنولوژی Pinch در به دست آوردن حداکثر باز یافت انرژی

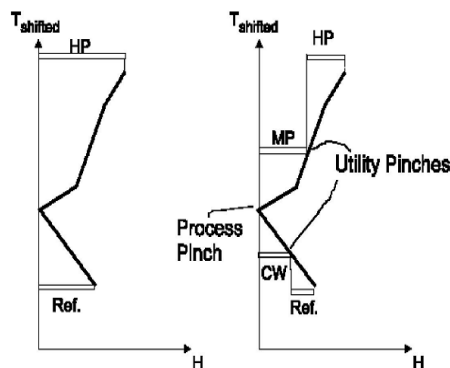
برای طراحی قبل از هر چیز نیاز به استخراج اطلاعات می باشد که در بخش قبل توضیح داده شده است. پس از مشخص کردن جریان ها و مشخصات مربوط به هر جریان (شدت ظرفیت حرارتی، ضریب انتقال حرارتی جابجایی) و مشخص شدن معادله قیمت مربوط به مبدلها و قیمت های منابع خارجی (آب خنک کن، بخار آب در سطح های دمایی مختلف و قیمت (Fluegas)) می توان $\Delta T_{min, opt}$ را به دست آورد و بعد با تعیین نقطه Pinch گرم و سرد مربوط به شبکه، جریان های زیر Pinch و بالای

سطوح مختلف انرژی باید مطابق همین روش عمل شود. بعد از استفاده از هر سطح انرژی جدید، نمودار مرکب متفاوت از قبل شده و اگر چندین پیشنهاد برای استفاده از سطوح مختلف انرژی داشته باشیم، با مساله بسیار پیچیده ای روبرو خواهیم بود. لذا استفاده از نمودار مرکب برای حل چنین مساله ای انتخاب راه حلی دشوار است [۲۳]. نمودار مرکب گراند (Grand Composite Curve) راه حل مناسبی برای حل این مساله می باشد.

۵- نمودار مرکب گراند

۴- هدف گذاری سطوح انرژی با استفاده از نمودار مرکب گراند

نمودار مرکب گراند یک ابزار مناسب برای هدف گذاری سطوح انرژی است. این مساله در شکل ۵ مشاهده می شود.



شکل ۵ استفاده از نمودار مرکب گراند برای هدف گذاری سطوح انرژی [۲۳]

در شکل ۵ موقعیت بخار HP مورد نیاز برای گرمایش و سیستم خنک کن برای سرمایش فرآیند نشان داده شده است. برای اینکه هزینه انرژی کاهش پیدا کند، از بخار MP (بخار در فشار متوسط) و آب خنک کن استفاده می کنیم. در شکل ۵ می بینیم

انتخاب روش ترمودینامیکی مناسب یکی از مهمترین پارامترها در موفقیت شبیه سازی فرآیند است. روش های ترمودینامیکی موجود در Aspen Hysis، امکان تعیین خواص مخلوط هایی از محدوده هیدروکربن های سبک تا سیستم های مخلوط های پیچیده برش های نفتی و سیستم های شیمیایی به شدت غیر ایده آل را فراهم می کنند.

معادلات ترمودینامیکی، باید قادر باشند تا خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیستم را محاسبه کنند. خواص ترمودینامیکی عبارتند از: ضریب فوگاسیته، آنتالپی، آنتروپی، انرژی آزاد گیبس، حجم و خواص انتقالی عبارتند از: ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی، ضریب نفوذ و کشش سطحی می باشد.

۸- محاسبات پینچ واحد (جریان های فرایند)

پس از تعیین جریان های اصلی فرآیند و تغییر دماهایی که باید در مورد این جریان ها اعمال شود باید مشخصات این جریان ها را تعیین کنیم. در طراحی اولیه برای تغییر دمایی این جریان ها از یک سری مبدل حرارتی استفاده شده که می توان با استفاده از آنها، انرژی حرارتی که لازم است تا این تغییر دماها انجام بگیرد را تعیین نمود.

$$Q = FC_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$FC_p = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2)$$

و شدت ظرفیت حرارتی مربوط به هر جریان را با استفاده از معادله (۳) به دست آورد.

$$CP_f = F * \Delta H_{vap} \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به هر جریان، با استفاده از طراحی جزئی مبدل هایی که در طراحی اولیه شبکه استفاده شده اند، به دست آمده است. اطلاعات مربوط به این طراحی ها که برای تک مبدلهایی که بر روی این جریان های اصلی برای اعمال تغییر های لازم انجام گرفته است در قیل موجود می باشد با استفاده از این طراحی های جزئی می توان ضریب انتقال حرارت کلی هر کدام از این مبدلها را به دست آورد و با استفاده از معادله (۴) و حل معادلات به دست آمده برای تک تک مبدلها، ضریب انتقال حرارت مربوط به هر جریان را محاسبه کرد.

$$A_{min} = \sum_i^{interval} \frac{1}{\Delta T_{im}} \left[\sum_j^{stream} \left(\frac{q_i}{h_j} \right) \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{h_{hot}} + \frac{1}{h_{cold}} = \frac{1}{U} \quad (5)$$

Pinch را تعیین نمود. رعایت قوانین زیر در هنگام طراحی، از موارد مهم تکنولوژی Pinch می باشد.

هیچ انرژی را نمی توان از بالا به پایین Pinch عبور داد زیرا دو بار جریمه پرداخت خواهد شد. بالای نقطه Pinch نمی توان از منابع خارجی سرد استفاده نمود. پایین نقطه Pinch نمی توان از منابع خارجی گرم استفاده نمود. در زیر نقطه Pinch، مجموع انرژی منابع سرد استفاده شده نباید از Q_{Cmin} بیشتر باشد و در بالای نقطه Pinch، مجموع انرژی منابع گرم مورد استفاده نباید از Q_{Hmin} بیشتر باشد. قواعد طراحی (Design Rules) به شکل زیر است:

۱. طراحی را از نقطه Pinch شروع می کنیم و پیش می رویم و یک جریان گرم و سرد را مقابل هم قرار می دهیم و داخل یک مبدل می فرستیم.

۲. برای هر Pinch match ای که انجام می دهیم باید شدت ظرفیت حرارتی جریان خروجی از نقطه Pinch، بزرگتر یا مساوی شدت ظرفیت حرارتی جریان ورودی به نقطه Pinch باشد ($F_{epout} \geq F_{cpin}$).

۳. با هر مبدلی که بین یک جریان سرد و گرم می بندیم، انرژی لازم برای تغییر دمای یکی از جریان-ها باید تأمین شود و از جریان های شبکه مبدل ها حذف شود تا به حداقل تعداد مبدل ها برسیم.

با استفاده از این قواعد می توان شبکه مبدل های زیر Pinch و بالای Pinch را به طور جداگانه طراحی نمود و شبکه مبدل های کلی را به دست آورد.

۷- نتایج و بحث (شبیه سازی فرآیند)

امروزه با استفاده از نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی فرآیندها، پیش بینی وقایع و بهینه سازی فرآیند بدون صرف هزینه و زمان، ممکن شده است. در این میان نرم افزار Hysis Aspen به دلیل بهره گیری از بانک اطلاعاتی قوی، مدل های ترمودینامیکی و مدل های گوناگون برای تجهیزات، جایگاه بسیار ویژه ای در صنعت امروز یافته است. قابلیت های کلیدی نرم افزار Aspen plus عبارت است از:

قدرتمندترین نرم افزار در زمینه طراحی و شبیه سازی واحدهای فرآیندی، نیروگاهی و مخازن طبیعی نفت و گاز تأمین محدوده وسیعی از نیازمندی های متخصصان در شرکت های مشاور، صنایع و نیز دانشگاه ها، پوشش اکثر فرآیندهای نفت، گاز و پتروشیمی است.

جدول (۱)، جریان های اصلی فرآیند، تغییر دماهای لازم اعمال جریان و ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده مربوط به شده، تغییر آنتالپی ها، شدت ظرفیت حرارتی مربوط به هر هر جریان را نمایش می دهد.

جدول ۱ مشخصات جریان ها در سیکل پروپان

St.		inlet T	Outlet T	Flow Rate
923_To_924	H	-18.812	-37.46	4410.18
900_To_900.2	H	77.2	49	154088.9
903_To_904	H	49	21.1	4042.823
927_To_929	H	49	24.1	11726.59
901_To_902	H	49	18.8	8096.825
905_To_906	H	49	16.7	1500.087
914_To_915	H	20.51	-17.7	5585.678
916_To_917	H	20.51	-18.8	3631.915
912_To_913	H	20.51	-19.2	26225.78
222.11_To_223	H	55	25.14	5619.983
212.11_To_213	H	55	-39.6	22635.5
133_To_133.1	H	-3.291	-15	61592.04
217.11_To_218	H	55	-10.29	13704.17
16-H-101	H	-37.49	-37.76	

جدول ۲ مشخصات یوتلیتی ها

Name		inlet T	Outlet T	Cost index	HTC
Air	C	30	35	1.00E-09	399.6
Refrigerant 3	C	-65	-64	5.88E-06	4680

جریانات دمایی را می توان به صورت زیر نشان داد:



شکل ۶ اطلاعات دمایی جریان ها

بر مبنای ۱ می نویسیم. الگوریتم جدولی برای $\Delta T_{min}/2=10$ تهیه شد. سپس اختلاف دما در هر بازه و خالص ظرفیت حرارتی جریان های موجود در هر بازه محاسبه شدند. در نهایت هر بازه کمبود یا مازاد انرژی داشته باشد معرفی می گردد.

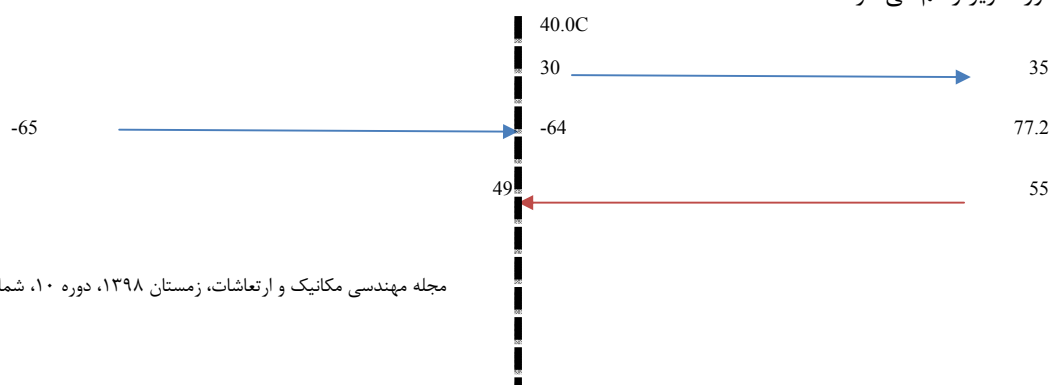
جدول ۳ الگوریتم جدولی

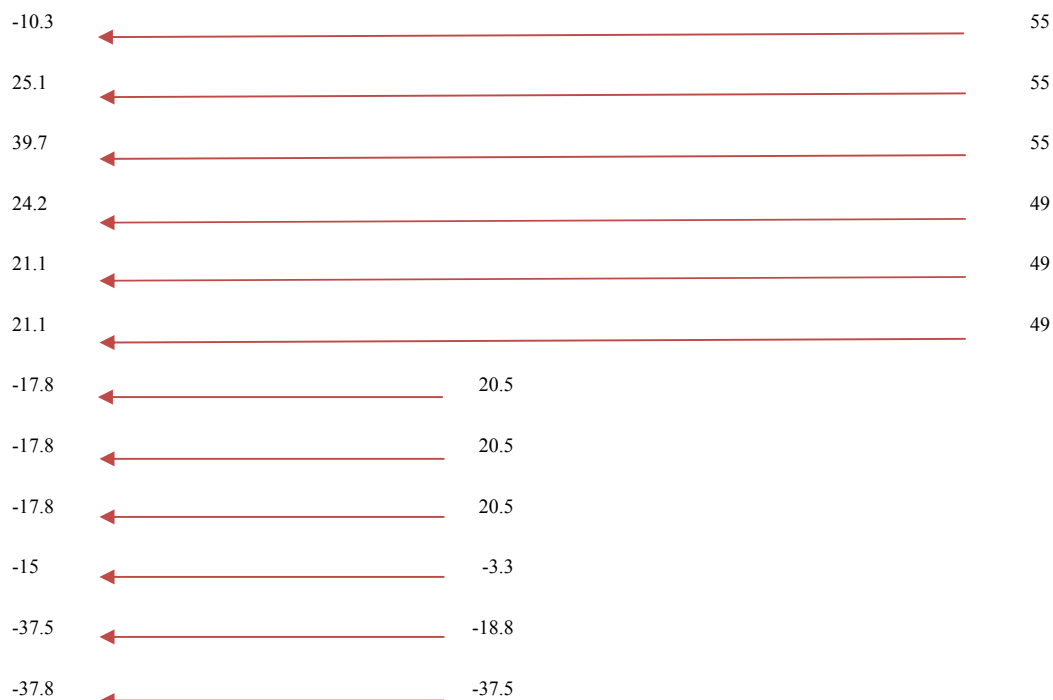
۹- الگوریتم جدولی و نمودار آبشاری

الگوریتم جدولی بر مبنای انتقال گرما از دمای بالا به دمای پایین بنا می گردد. در این روش فرض می شود دمای همه جریان های گرم به اندازه $\Delta T_{min}/2$ کاهش و دمای جریان های سرد به اندازه $\Delta T_{min}/2$ افزایش می یابد. سپس موازنه انرژی را

C		Cp	M	H
72.2				
	12.2	44294.47	540392.6	6592789
50		155.9	154088.9	
	1			24022460
49		175	4042.823	
	0.7			495245.8
48.3		155	11726.59	
	3.3			5998151
45		146	8096.825	
	1			1182136
44		146	1500.087	
	1			219012.7
43		146	5585.678	
	2			815509
41		146	3631.915	
	6			1060519
35		146	3200	
	0			0
35		156	1541	
	19.5			1442376
15.5		122.7	2622.78	
	0.4			6275395
15.1		122	5619.983	
	0.8			274255.2
14.3		121	22635.5	
	23			2191116
-8.3		64	61592.04	
	15.5			90663483
-23.8		108	13704.17	
	-19.2			-2.3E+07
-42.5		343	5428	
	-16.5			-3.9E+07
-59		155	4419	
				-1.1E+07

با توجه به جدول نقطه پینچ گرم ۴۰ و پینچ سرد ۳۰ درجه سانتی گراد بدست آمد. میزان بار سرمایشی مورد نیاز kJ/h ۶۸۴۵۰۷۳۱،۷۸ بدست آمد. نمودار میله با بدست آوردن نقاط پینچ به صورت زیر رسم می گردد:





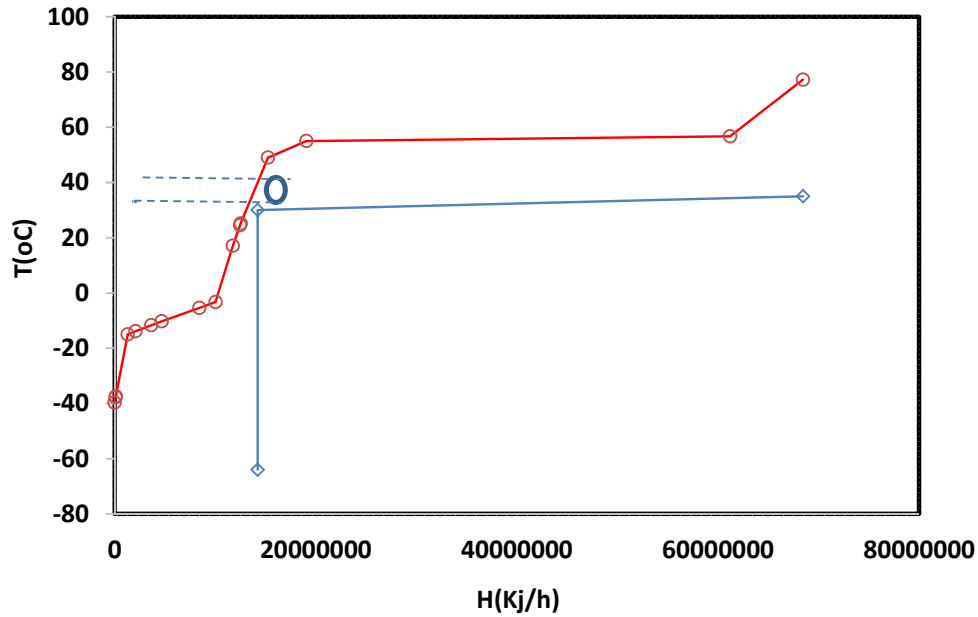
30.0C

شکل ۷ جریان موجود در فرایند با در نظر گرفتن مفهوم پینچ

حال می توان Composite Curve را برای سیستم مورد مطالعه رسم نمود. محاسبات مربوط به این نمودار در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است:

جدول ۴ مقادیر محاسبه شده برای Composite Curve

H (oC)	Enthalpy (kj/h)	C (oC)	Enthalpy (kj/h)
77.2	68447498.98	35	68447498.98
56.71	61212095.37	30	14225259.17
55	19072871.06	-64	14225259.17
49	15246733.22	-65	0
25.1	12539758.9		
24.5	12474625.18		
17.08	11755927.24		
-3.2	10043125.98		
-5.41	8427953.526		
-10.29	4683067.769		
-11.72	3631295.75		
-13.89	2080015.38		
-15	1303545.662		
-37.5	118927.443		
-37.7	100898.347		
-39.6	0		



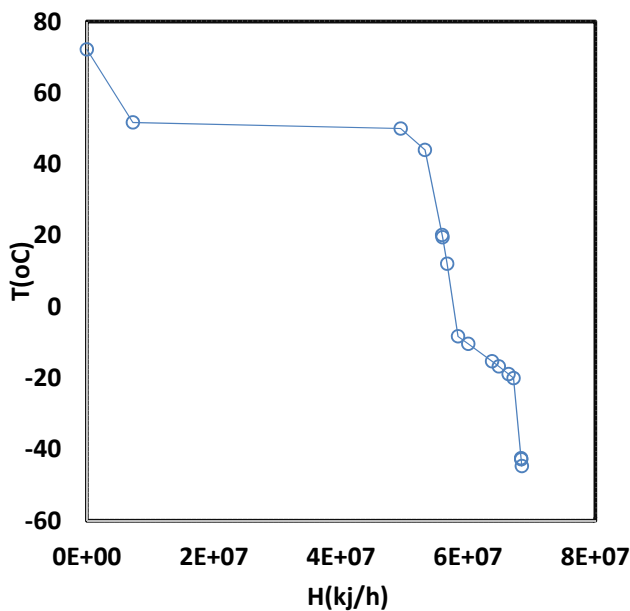
شکل ۸ نمودار Composite Curve

با توجه به نمودار composite curve میزان هدف برای ترکیبی GCC و نمودار میله ای را برای $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ نشان می دهند (جدول ۵).
 برابر با 68450731.78 kJ/h می باشد. شکل ۹ نمودار

جدول ۵ مقادیر محاسبه شده

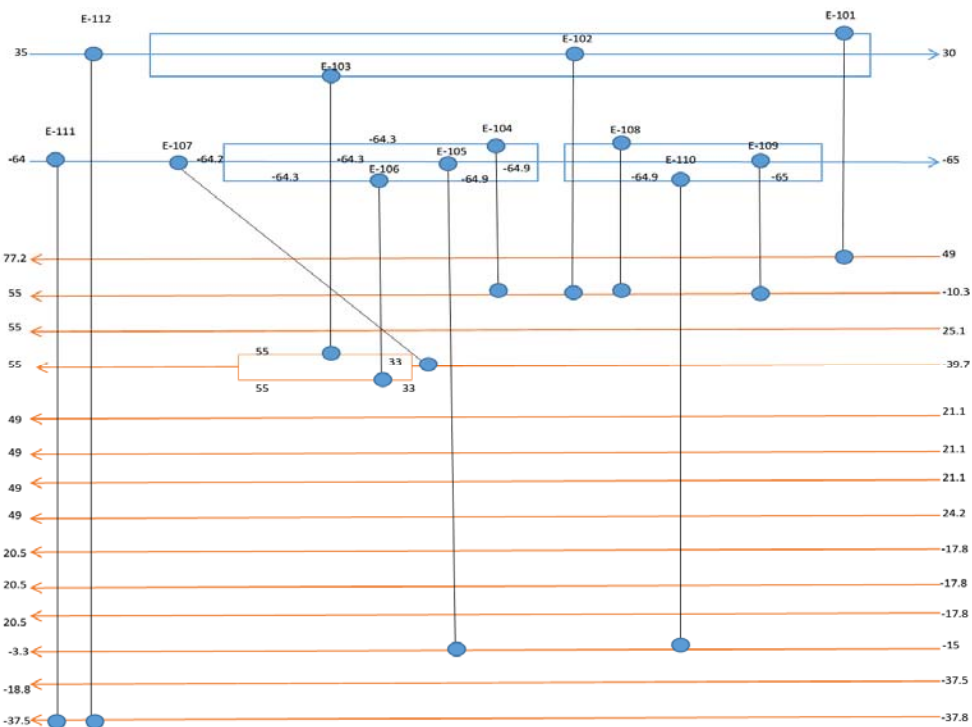
برای GCC

T	H
72.2	0
51.71	7235404
50	49374628
44	53200766
20.1	55907740
19.5	55972874
12.08	56691572
-8.291	58404373
-10.41	60019545
-15.29	63764431
-16.72	64816203
-18.89	66367484
-20	67143953
-42.5	68328572
-42.76	68346601
-44.68	68447499



شکل ۹ نمودار GCC برای $\Delta T_{min} = 10^\circ C$

با در نظر گرفتن الگوریتم شکل ۱۰ می توان شبکه مبدل ها را با انجام محاسبات برای $\Delta T_{min} = 10^\circ C$ به صورت شکل انجام داد.



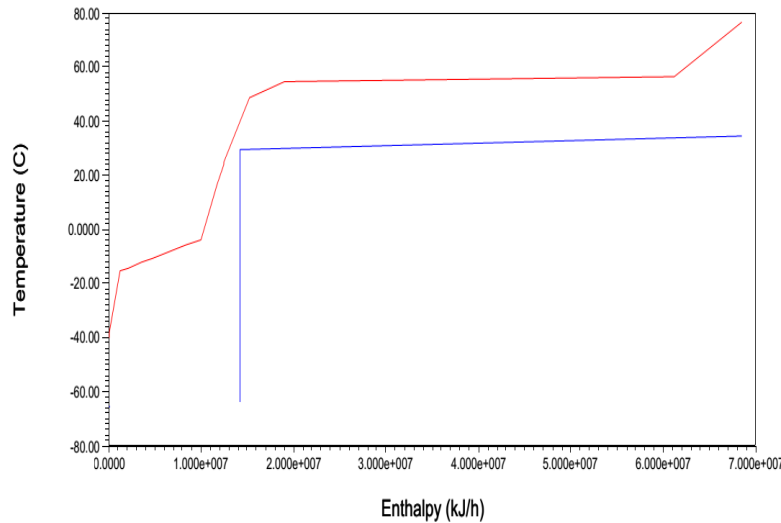
شکل ۱۰ نمودار آبشاری برای $\Delta T_{min} = 10^\circ C$

در ابتدا قبل از بررسی ΔT_{min} مختلف، نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از نرم افزار Aspen Energy Analyser مورد بررسی

۱۰- بررسی نتایج نرم افزار برای آنالیز پینچ (بررسی صحت نتایج محاسبه شده با نرم افزار)

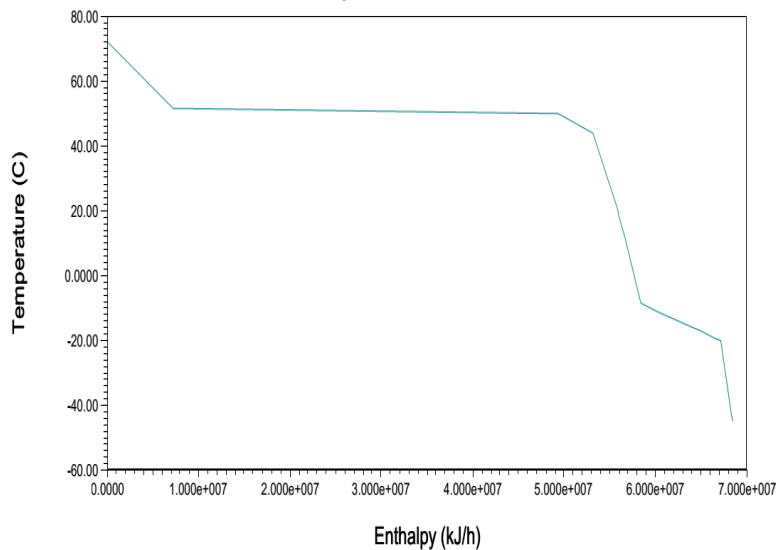
مقایسه ای قرار گرفت. برای $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ نمودار مرکب و مرکب نمودار ها می توان گفت که داده های محاسبه شده دستی با نرم افزار از انطباق خوبی برخوردار می باشد.

Composite Curves



شکل ۱۱ نمودار مرکب برای $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ محاسبه شده توسط نرم افزار

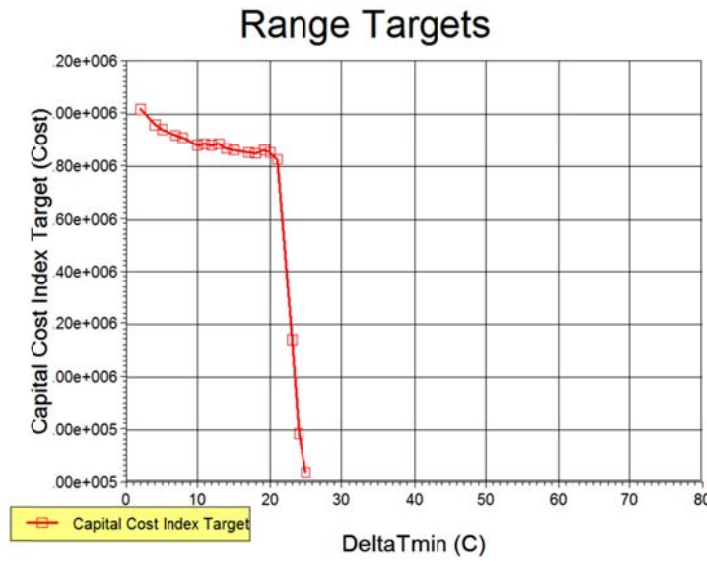
Grand Composite Curve



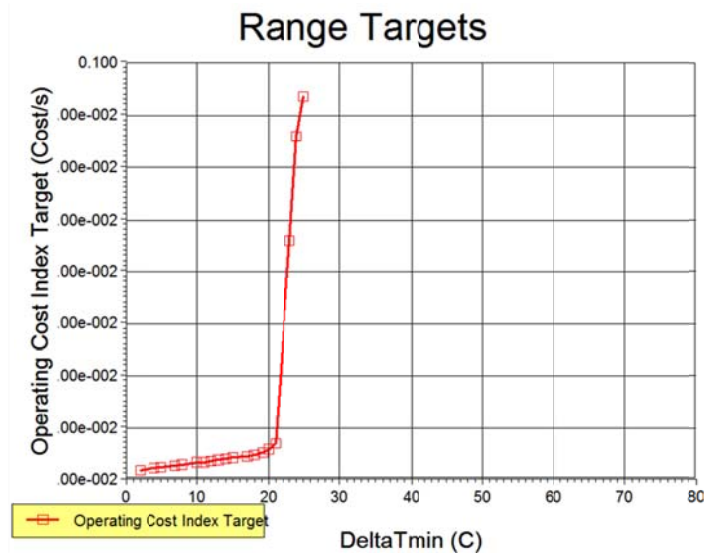
شکل ۱۲ نمودار مرکب کل محاسبه شده توسط نرم افزار

ثابت، متغیر و اندیس هزینه کلی نشان می دهد. همانطور که از نمودار مشخص است افزایش ΔT_{\min} سبب افزایش هزینه عملیاتی و کلی و در مقابل کاهش هزینه ثابت می گردد. با توجه به این نمودار ها می توان گفت که برای فرآیند $\Delta T_{\min}=2.5-15$ بازه بهینه می باشد.

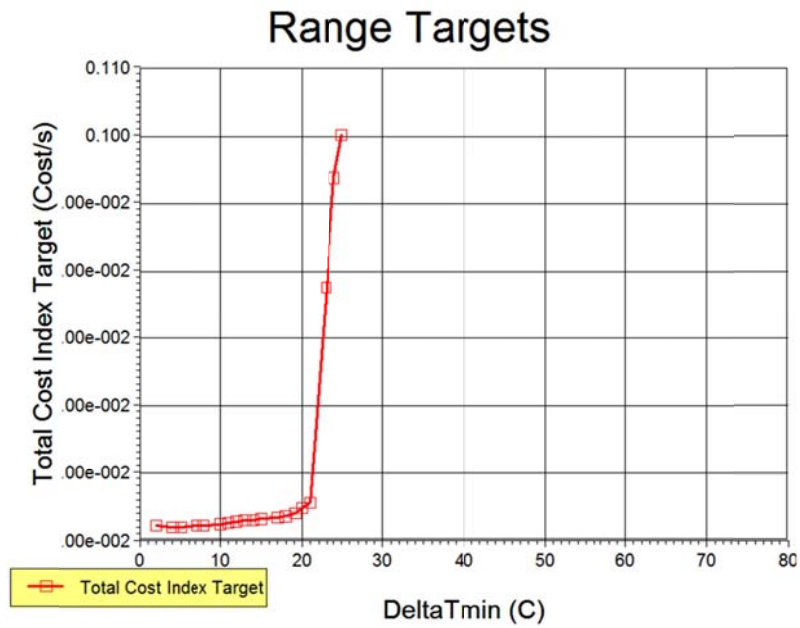
۱۱- بررسی تاثیر تغییرات ΔT_{\min} بر روی نتایج پینچ با استفاده از نرم افزار Aspen Energy Analyser وابستگی فرآیند به ΔT_{\min} مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج در جدول ۶ و شکل های ۱۳ تا ۱۵ تاثیر ΔT_{\min} بر روی هزینه



شکل ۱۳ رابطه میان ΔT_{min} و ضریب هزینه های ثابت



شکل ۱۴ رابطه میان ΔT_{min} و ضریب هزینه های عملیاتی

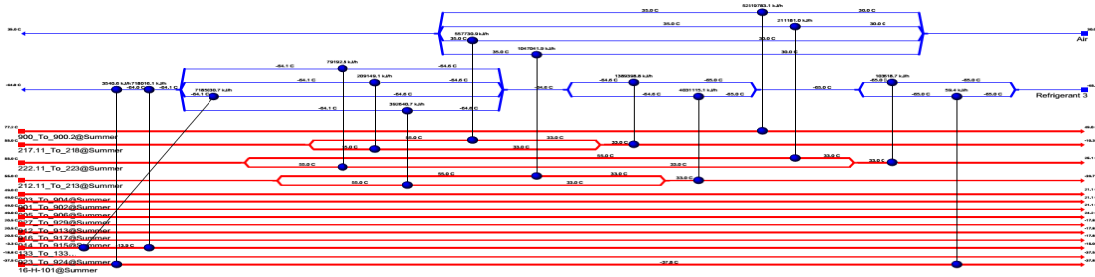


شکل ۱۵ رابطه میان ΔT_{min} و ضریب هزینه های کل

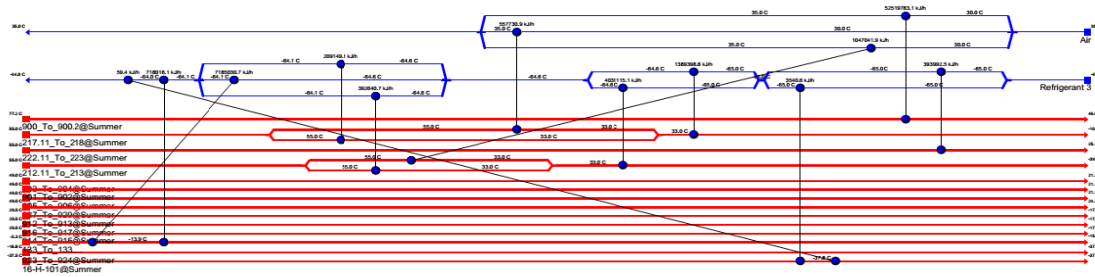
پس از بدست آوردن شرایط بهینه آنالیز پینچ در چهار ΔT_{min} مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۶ تاثیر $\Delta T \text{ min}$ بر پینچ

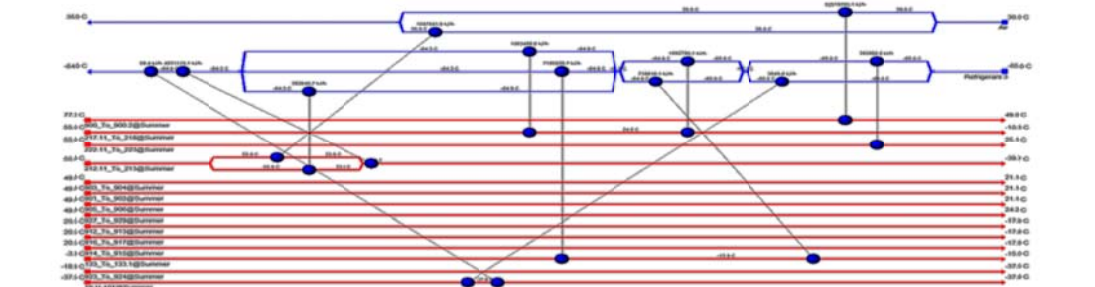
DTmin	Heating	Cooling	Area-1	Area-2	Unit	Shell	Cap.Cost Index	Op.Cost Index	Total Cost Index [Cost/s]
2.0001	0	68447499	6935.10135	6952.60415	9	35	2020285.724	2.18E-02	4.24E-02
4	0	68447499	6715.78704	6730.05889	9	34	1959824.569	2.21E-02	4.21E-02
5	0	68447499	6644.95192	6658.32244	9	34	1943862.964	2.23E-02	4.22E-02
7	0	68447499	6537.812	6550.3657	9	34	1919777.185	2.27E-02	4.23E-02
8	0	68447499	6495.14942	6507.51598	9	34	1910195.202	2.29E-02	4.24E-02
10	0	68447499	6423.61756	6435.80014	9	33	1883390.29	2.32E-02	4.25E-02
11	0	68447499	6392.95526	6405.09887	9	34	1887241.509	2.34E-02	4.27E-02
12	0	68447499	6363.46084	6375.58495	9	34	1880613.274	2.36E-02	4.28E-02
13	0	68447499	6339.01959	6351.13889	9	34	1885497.829	2.38E-02	4.30E-02
14	0	68447499	6315.00239	6327.12546	9	34	1869716.911	2.40E-02	4.31E-02
15	0	68447499	6292.58598	6304.71894	9	34	1864673.054	2.42E-02	4.32E-02
17	0	68447499	6251.76192	6263.92521	9	33	1855480.891	2.45E-02	4.35E-02
18	0	68447499	6233.04342	6245.22457	9	34	1851263.026	2.47E-02	4.36E-02
19	0	68447499	6192.64847	6204.82516	10	35	1862330.002	2.51E-02	4.42E-02
20	0	68447499	6120.50929	6132.64218	10	35	1855773.896	2.59E-02	4.49E-02
21	0	68447499	6030.19478	6042.32868	10	35	1825309.734	2.70E-02	4.56E-02
23	0	68447499	3335.47877	3341.48016	8	32	1141558.382	6.60E-02	7.76E-02
24	0	68447499	2012.79936	2019.81736	8	32	785293.1456	8.59E-02	9.40E-02
25	0	68447499	1501.78581	1511.07567	8	32	639176.5525	9.38E-02	1.00E-01
27	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-
28	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-
30	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-
31	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-
49	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-
77.2	0	68447499	-	-	-	-	-	-	-



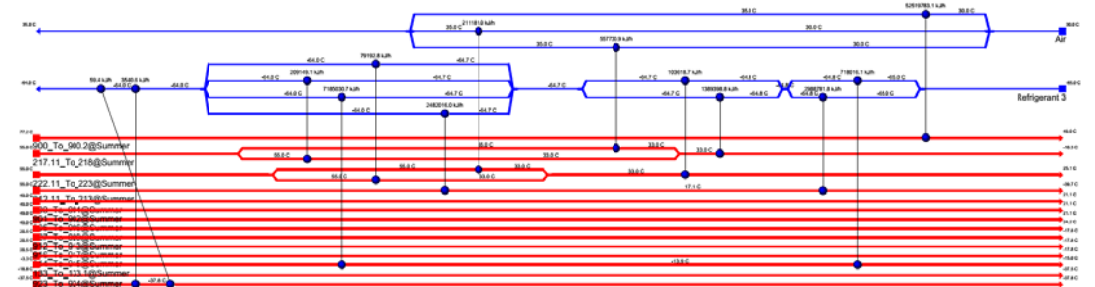
شکل ۱۶ نمودار میله ای اصلاح شده برای $\Delta T_{min} = 2.5^{\circ}C$



شکل ۱۷ نمودار میله ای اصلاح شده برای $\Delta T_{min} = 5^{\circ}C$



شکل ۱۸ نمودار میله ای اصلاح شده برای $\Delta T_{min} = 8.5^{\circ}C$



شکل ۱۹ نمودار میله ای اصلاح شده برای $\Delta T_{min} = 15^{\circ}C$

جدول ۷ نشان دهنده عملکرد نمودارهای اصلاح شده می باشد.

جدول ۷ عملکرد شبکه های اصلاح شده

DT	Hot Pinch	Cold Pinch	Cooling	of Target%
2.5	32.5	30	68447499	100
5	35.5	30	67078549	99
8.5	38.5	30	6473079978	97
15	45	30	52523383.1	94

۱۲- نتیجه گیری

پینچ یک فعالیت اولیه و پیشرو بوده و هنوز هم بخش مهمی از گروه هایی که امروزه به عنوان انتگراسیون فرآیند به آن اشاره شده است، می باشد. مهمترین ویژگی جدید در تجزیه و تحلیل پینچ، توانایی ایجاد اهداف اجرایی پیش از طراحی تنها براساس اطلاعات مربوط به تغییر در حالت ترمودینامیکی جریانهای فرآیند و پس از آن داده های جریان می باشد. این اهداف برای

- 5- D. Piterz, L. Ramson, Simulation and energy consumption analysis of a propane plus recovery plant from natural gas using turbo-expander, *Fuel Processing Technology*, Vol. 92, No. 3, pp.656-662, 2011.
- 6- L. Banat, I. Dincer, S.M. Zubair, Pinch analysis of gas sweetening units, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 125, No. 9, pp. 199-207, 2014.
- 7- A. Foad, B. Tirandazi, M. Mehrpooya, A novel process refrigerant for co-production of NGL and LNG with low energy requirement, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 63, pp. 16- 24, 2015.
- 8- M. Mehrpooya, A. Vatani, S.A. Mousavian, Introducing a novel integrated NGL recovery process configuration (with a self-refrigeration system (open-closed cycle)) with minimum energy requirement, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 49, pp.376-388, 2014.
- 9- A. Mehrpooya, R.X. Thery-Hetreux, General methodology for exergy - pinch balance in ProSimPlus process simulator, *Energy*, Vol. 44 , pp.38-59, 2015.
- 10- T.N. Joe, B. Alen, Using new Pinch Technology for oil Process Retrofit, *Oil & Gas Journal*, 2014.
- 11- M.H. Panjeh Shahi, F. Fatemi, Optimization of Energy Recovery System in Sulfuric Acid Unit of RAZI Petrochemical Complex, *Journal of Energy in Iran*, Vol. 4, pp. 3-16, 1378 (In Persian).
- 12- M.H. Panjeh Shahi, F. Kavaki, Evaluation and Optimization of Heat Exchangers Network of Aromatic Petrochemical in Unit of Bandar Imam, *Scientific Information Center*, Vol. 1, No. 1, pp.17-29, 1393 (In Persian).
- 13- M. Amidpour, M. Gougel, Technology: Pinch: Energy Optimization, Tehran Jahad Publishing Institute, 1st Ed.,1380 (In Persian).
- 14- M.H. Panjeh Shahi, M. Amidpour, H. Ahmadi Danesh, Application of Total and Partial Decomposition Methods in Integrating Complex Heat Exchangers Network Considering Economic Factors, *College of Engineering publication*, Vol. 39, No. 2, pp. 167-181 , 2005 (In Persian).
- 15- M. Amidpour, G.T Polley, Application of problem decomposition in process integration. *Trans. ICheme*, Vol. 75, Part A, pp. 53- 63, 2015.
- 16- B. Linhoff, D.W. Townsend, D. Boland, G.F. Hewitt, B.E.A. Thomas, A.R. Guy, and R.H. Marsland, User on Process Integration for the Use of Energy". *ICheme Rugby*, U.K., 1982.
- 17- M. Mafi, S.M. Mousavi Naeynian, M. Amidpour, Exergy analysis of multistage distillation columns in NGL plants, *International journal of refrigeration*, Vol. 32, pp. 279 - 294, 2013.
- 18- B. Linhoff, Introduction to Pinch Technology, Linhoff March Northwich, cheshire .CW9 7UZ, England, pp. 7-12, 1998.
- 19- I.C. Kemp, Pinch analysis and process integration, 2nd edition, Elsevier, 2007.
- 20- B. Linhoff, SuperTarget; pinch analysis software suite, available from Linhoff March Ltd. UK, 1998.
- 21- R. Smit, P.S. Jones, The Optimal Design of Integration Evaporation Systems, *Heat Recov. Sys. CHP*, Vol. 10, No. 4, pp. 341-368, 1990.
- 22- B. Linhoff, B.H. Dunford, R. Smith, Heat Integration of Distillation Columns into Overall Processes, *Chem. Eng. Sci*, Vol. 38, No. 8, pp. 1175-1188, 1993.

اولین بار جهت انرژی حرارتی (گرمایش و سرمایش خارجی) توسعه داده شد و پس از آن برای انرژی مکانیکی، تعدادی از مبدل های حرارتی و سطح انتقال حرارت کل توسعه یافت. در این مطالعه سعی نمودیم تا با استفاده از شبیه سازی توسط نرم افزار Aspen Hysis و آنالیز انتگرالیون حرارتی توسط نرم افزار Aspen Energy Analyser به بررسی واحد مذکور بپردازیم. پس از شبیه سازی فرآیند و وارد نمودن آن به نرم افزار آنالیز انرژی، آنالیز پینچ انجام شد. ابتدا محاسبات برای $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ به صورت دستی انجام گرفت. سپس با استفاده از نرم افزار، بازه بهینه برای سیکل محاسبه گردید. بازه بهینه برابر با $\Delta T_{\min}=2.5-15$ بدست آمد. پس از اصلاح شبکه و با افزودن سطح به شبکه موجود، میزان بار گرمایشی و سرمایشی کاهش یافت و به 100% حالت ایده آل (هدف گذاری انرژی) رسید و همچنین نقاط پینچ نیز محاسبه گردید. سپس تحلیل پینچ روش طراحی اصلاحی (Retrofit) به ازای حداقل اختلاف دمایی $\Delta T_{\min}=2.5,5,8.5,15^{\circ}\text{C}$ انجام شد. همچنین محاسبات اقتصادی مربوط به هزینه های عملیاتی (انرژی) و هزینه کل انجام گردید. با اصلاح شبکه مبدل حرارتی فوق (طراحی رتروفیت) و با میزان سرمایه اولیه 1.7×10^4 دلار، سالانه 31492 دلار بابت صرفه جویی در مصرف انرژی، عاید سازمان مربوطه می گردد. دوره بازگشت سرمایه 180 روز (کمتر از یک سال) به دست آمد. در صورت مقدور نبودن سرمایه اولیه مذکور، می توان طرح اصلاحی را با سرمایه گذاری کمتر و البته با میزان صرفه جویی انرژی کمتر، به انجام رساند. بنابراین با استفاده از تکنولوژی پینچ و با سرمایه گذاری اولیه، می توان با کاهش بار یوتیلیتی گرم و سرد در شبکه مبدل های حرارتی و بدون تغییر در اصل فرآیند، به میزان صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی رسید دست یافت.

۱۳- مراجع

- 1- R.J. Smith, E.A. Petela, Waste Minimisation in the Process Industries. I: The Problem, *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 24-25, 1991.
- 2- K.J. Brown, Process Integration Initiative (review of the process integration initiatives funded under the Energy Efficiency R&D Programme), Energy Technology Support Unit, Harwell Laboratory, Didcot, U.K., 2010.
- 3- G.D. Wu, Design and retrofit of integrated refrigeration systems, PhD Thesis. UMIST, UK, 2014.
- 4- B. Linhoff, S. Ahmad, Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 729-750, 1990.

- 23- B.A. Al-Riyami, J. Klemes, S. Perry, Heat Integration Retrofi Analysis of a Heat Exchanger Network of a Fluid Catalytic cracking Plant, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 2, pp. 487, 2015.
- 24- E. Kotjabasakis, B. Linnhoff, Better System Design Reduces Heat Exchanger Fouling Costs, *Oil & Gas J*, pp. 49-56, 1987.
- 25- M. Nakaiwa, K. Huang, K. Naito, A. Endo, T. Akiya , T. Nakane, T. Takamatsu, Parameter analysis and optimization of ideal heat-integrated distillation columns, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 25, pp. 737-744, 2001.