

بهینه‌سازی شبکه مبدل حرارتی افت پیدا کرده در اثر خوردگی لوله‌ها

محمد کارگر سندرکی

کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

چکیده

یکی از دغدغه‌های مهندسين کاهش انرژی مصرفی به تبع آن کاهش هزینه‌های عملیاتی برای سیستم‌های مختلف می‌باشد. در میان فرآیندهای مهم مورد استفاده در بخش پالایش و پتروشیمی، بحث مبدل‌های حرارتی همواره مورد توجه بوده است. زیرا این تجهیزات میزان قابل توجهی از انرژی در یک پالایشگاه را به خود اختصاص می‌دهند. از سویی وجود خوردگی در لوله‌ها یا قسمت پوسته مبدل‌های حرارتی می‌تواند راندمان آنها را تا حد زیادی کاهش دهد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، بهینه‌سازی شبکه مبدل حرارتی واحد پالایشگاهی با استفاده از آنالیز پینچ بوده که در اثر خوردگی راندمان آن کاهش یافته است. برای این منظور در ابتدا داده‌های واحد مورد نظر از بخش تحقیق و توسعه واحد پالایشگاهی گردآوری شد و سپس با استفاده از آنالیز پینچ مورد ارزیابی و تغییر در آرایش مبدل‌ها قرار گرفت. نتایج این بخش نشان داد که با استفاده از آنالیز پینچ می‌توان تا حدود ۳۵ درصد از انرژی مصرفی در بخش مبدل‌های حرارتی را کاهش داد. در ادامه با توجه به شرایط حاکم بر آنالیز اکسرژی برای سیستم بهینه شده در بخش قبل، کدنویسی مربوطه صورت گرفت و شبکه مبدل‌های حرارتی با افزودن یک مبدل جانبی پس از شبکه اصلی، آرایشی جدید به خور گرفت. نتایج این بخش نیز نشان از بهبود کاهش انرژی مصرفی برای سیستم مبدل‌های حرارتی پینچ شده، داشت. در این بخش مشخص شد که می‌توان انرژی مصرفی را تا ۴۷ درصد کاهش داد و از این حیث هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش محسوسی پیدا می‌کنند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، خوردگی، مبدل حرارتی، پینچ.

۱. مقدمه

خوردگی اصطلاحی است که به یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک عنصر، معمولاً فلز، با ترکیبات آن نسبت داده می‌شود که سبب فرسودگی عنصر می‌شود. هنگامی که این مبدل‌های حرارتی در معرض ترکیبات خورنده قرار می‌گیرند، نباید هیچ نوع خوردگی ایجاد شود [۱]. نه فولاد ضد زنگ ۳۱۶ و نه مس، به راحتی دچار خوردگی نمی‌شوند. اما اگر مبدل حرارتی با صفحه لحیم شده استاندارد در معرض ترکیبات نامطلوب قرار گیرند، هر دو فولاد ضد زنگ ۳۱۹ و لحیم مسی می‌توانند دچار خوردگی شوند [۲، ۳].

این مبدل‌ها در محیط اکسیدی نمی‌توانند در مقابل غلظت بالای یون کلرید مقاومت کنند، چرا که کلریدها با فلز مبدل حرارتی و اکسیژن پیل گالوانی تولید می‌کنند. به خصوص فولاد ضد زنگ در برابر این نوع حملات خوردگی بسیار حساس بوده و می‌تواند منجر به ایجاد خوردگی حفره‌ای و شکافی شود [۴]. همچنین دمای بالاتر سبب فعال تر شدن کلریدها در مقابل فولاد ضد زنگ خواهند شد. وجود خوردگی‌ها در لوله‌های مبدل حرارتی سبب کاهش راندمان در این مبدل‌ها خواهد شد [۵]. با این وجود خوردگی قابل جلوگیری نیست و در هر حالت اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توان مبدل‌های فرسوده و دارای خوردگی در لوله‌های آنها را با تکنیک‌هایی مانند پینچ بهبود بخشید.

در سالهای اخیر با کاهش رشد انرژی تولید شده توسط نیروگاه‌های اتمی، توجه عمده به نیروگاه‌های متداول به عنوان مطمئن‌ترین مرکز تولید انرژی در آینده معطوف شده است [۶]. با توجه به قیمت و قابلیت دسترسی به سوخت‌های فسیلی تمایل زیادی به افزایش راندمان نیروگاه‌های وجود دارد. به نحویکه به عنوان یک قاعده سر انگشتی هر یک درصد افزایش در راندمان قدیمی نیروگاه (راندمان جدید = $1/0.1$ راندمان قدیم) در یک نیروگاه معمولی باعث حدود یک میلیون دلار صرفه جویی در سال اخیر خواهد شد [۷].

همانطور که می‌دانید کارایی یک نیروگاه بطور قاطع بستگی به شرایط بخار ورودی و شمای سیکل دارد و به خوبی مشخص است که با افزایش دما و فشار بخار مورد استفاده در سیکل راندمان آن افزایش می‌یابد بنابراین در همین استدلال افزودن مراحل فوق اشباعی^۱ و گرمایش^۲ و مرحله بازیابی^۳ نیز باعث افزایش راندمان سیکل می‌شود [۸].

اما همچنین دیده شد که انتخاب شرایط دما و فشار و درجه فوق اشباع دارای محدودیت‌های عملیاتی می‌باشد. بنابراین برای افزایش راندمان قابل حصول باید از بخارهای استخراجی از مراحل میانی توربین‌ها به نحو مطلوب‌تری برای گرم کردن آب تغذیه در گرمکن‌های میانی استفاده شود. این مسئله که بخارهای استخراج چگونه صرف گرم کردن آب تغذیه شود، بنحوی که سیکل به بالاترین راندمان خود برسد، یک مسئله پیچیده می‌باشد. به طور سنتی و متداول زیرکنش‌های بخار به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که افزایش آنتالپی آب تغذیه در تمام گرمکن‌ها بطور یکسان توزیع شود. با توجه به اینکه تکنولوژی پینچ در عرصه‌های دیگر صنعت به عنوان یک ابزار قدرتمند برای طراحی بهینه سیستم‌های حرارتی شناخته شده است باید تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد تکنولوژی پینچ در طراحی نیروگاه‌های حرارتی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد [۹].

تکنولوژی پینچ با بالا بردن میزان انتقال حرارت و افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی توانسته است که در مصرف سوخت صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای ایجاد کند و این بدین معنی است که از هزینه‌های مربوط به ایجاد حرارت کاسته شده و میزان قابل ملاحظه‌ای از نظر اقتصادی به سود کارخانه جات و نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. به گونه‌ای که از لحاظ آماری تکنولوژی پینچ توانسته است که راندمان حرارتی را به میزان ۹۸٪ افزایش دهد و این میزان افزایش می‌تواند سالانه میلیون‌ها بشکه سوخت در سال صرفه جویی ارزی به همراه داشته باشد و این مطلب تاثیر بسیار زیادی بر اقتصاد جامعه خواهد گذاشت و از

¹ superheat² reheat³ regeneration

آن جهت که تکنولوژی پینچ یک تکنولوژی است که در صناعی از قبیل نفت پتروشیمی نیروگاه‌های برق واز این قبیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این صرفه جویی به وسعت کل جامعه بازمی‌گردد و همه جامعه از آن سود خواهند برد [۱۰].

اهدافی که فناوری پینچ در سال‌های اخیر دنبال کرده و به عنوان یک ابزار تخصصی در یکپارچه کردن انرژی فرآیند به آن دست یافته رسیدن به بیشینه انرژی بازیابی شده در سیستم حرارتی فرآیند و کیمینه انرژی گرمایشی و سرمایشی مصرفی از منابع خارجی و به تبع آن کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی است. این فناوری همچنین یک روش پایه برای کاهش هزینه سرمایه‌گذاری واحدها و راهکاری برای کاهش آلوده‌کننده‌های محیط‌زیست می‌باشد [۱۱]. در واقع یکی از تعاریف اساسی یکپارچه کردن انرژی رسیدن به اهداف نهایی قبل از طراحی است که همان بیشینه انرژی بازیابی شده از سیستم حرارتی و کیمینه مصرف انرژی از منابع خارجی و کاهش هزینه کلی سیستم می‌باشد [۱۲]. هر چند در طی دهه‌های گذشته با اجرای راهکارهای گوناگون برای صرفه‌جویی انرژی و کاهش مصرف انرژی از منابع خارجی و کاهش هزینه‌های کلی سیستم مقداری مشخص در دنیا به دست آمده است ولی یکی از محاسن اصلی یکپارچه کردن انرژی تعیین مقدار نهایی است و برای رسیدن به آن روشی مشخص را پیشنهاد می‌کند. در واقع با بیان دیگر این گونه می‌توان عنوان کرد که فایده یکپارچه کردن انرژی زمانی خود را نشان می‌دهد که سایر مهندسان به یقین رسیده‌اند که کار بهتری نمی‌توانند انجام دهند [۱۳]. در شبکه مبدل-های حرارتی طراحی شده طبق یکپارچه کردن انرژی مقدار انرژی بازیابی شده سیستم حرارتی بیشینه و میزان انرژی مصرفی از منابع خارجی کیمینه خواهد بود که حاصل آن کاهش هزینه‌های مصرف انرژی و همچنین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و رسیدن به مقداری بهینه است که یکی از اهداف مهم دست‌اندرکاران صنایع و طراحان و مهندسان به خصوص در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی است. بیشترین هزینه جاری در این گونه بهینه کردن این شبکه‌ها نقشی مهم در کاهش هزینه تولید انرژی و در نتیجه کاهش چشمگیر قیمت تمام شده محصولات خواهد داشت [۱۴].

یکی از مهمترین فناوری‌هایی که در اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فناوری پینچ می‌باشد. این فناوری از مفاهیم ترمودینامیکی، جهت اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی و بهینه‌سازی استفاده می‌نماید [۱۵]. در این روش تعداد تبادل گرهای حرارتی، سطح تبادل حرارتی، تعداد پوسته‌ها، نرخ فشار جهت بهینه‌سازی در زمینه اصلی شبکه مبدل حرارتی نقش مهمی را ایفا می‌کند. اهداف مورد نظر از لحاظ مصرف انرژی را می‌توان با کمک اطلاعات حرارتی فرایند بدست آورد [۱۶].

۲. روش تحقیق

با توجه به رشد روزافزون صنایع شیمیایی و فرآیندهای نفت، گاز و پتروشیمی استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی برای شبیه‌سازی و ارزیابی واحدها گریز ناپذیر است. به کمک این نرم افزارهای شبیه ساز می‌توان واحدهای پیچیده‌ای همچون پالایشگاه‌ها را نیز مدلسازی و شبیه‌سازی کرد. از کاربردهای نرم افزار aspen plus در صنعت می‌توان به طراحی، توسعه، بهبود شرایط عملیاتی و بهینه‌سازی فرآیندهای پتروشیمیایی و پالایشگاهی اشاره کرد. یکی از مهمترین و جامع ترین نرم-افزارها در این زمینه، نرم افزار اسپن پلاس (Aspen Plus) می‌باشد که بخش عمده‌ای از نیازهای مهندسان شیمی را برطرف می‌کند. نرم افزار Aspen Plus محصول شرکت نرم‌افزاری AspenTech است که در یک مجموعه جامع و کامل تحت عنوان Aspen One ارائه شده است [۱۷].

هنگامی که پدیده رسوب را در سطح مبدل حرارتی در نظر بگیریم ضریب انتقال حرارت محاسبه شده را ضریب انتقال حرارت کلی تمیز می‌نامیم. این ضریب از ترکیب ضریب انتقال حرارت در دو قسمت پوسته ولوله تشکیل شده است. برای قسمت پوسته با فرض عبور جریان گرم داریم:

$$\frac{U \times D}{k} = 0.36 Re_s^{0.55} \times Pr_3^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (1)$$

طبق تعریف عدد رینولدز^۴ داریم:

$$Re_s = \frac{D \times G_s}{\mu} \quad (2)$$

شار جرمی در قسمت پوسته برابر است با:

$$G_s = D \times \rho = \frac{M_s}{L_{bc} \times (L_{tp} - D_t) \times (D_s / L_{tp})} \quad (3)$$

عدد پرانتل^۵ عبارت است از:

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k} \quad (4)$$

همچنین فرض می‌کنیم:

$$\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1 \quad (5)$$

این معادلات را برای قسمت لوله نیز می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{U \times D}{k} = 0.023 Re_s^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (6)$$

عدد رینولدز برای قسمت لوله عبارت است از:

$$Re_t = \frac{D \times G_t}{\mu} \quad (7)$$

شار جرمی در قسمت لوله بابر است با:

$$G_t = D \times \rho = \frac{M_t}{(\pi \times D^2 / 4) \times (N_t / N_{tpass})} \quad (8)$$

که در معادلات بالا U ضریب انتقال حرارت، D قطر سطح ورودی جریان، k ضریب انتقال هدایتی، ρ چگالی، v سرعت جریان، M_s دبی جرمی جریان سمت پوسته، L_{bc} فاصله بین بافل‌ها^۶، L_{tp} گام لوله^۷، D_t قطر خارجی لوله، D_s قطر پوسته، μ ویسکوزیته، C_p ظرفیت گرمایی ویژه موثر، N_t تعداد لوله‌ها و N_{tpass} تعداد گذر لوله^۸ می‌باشند.

میزان خوردگی و رسوب موجود در یک مبدل حرارتی از تفاضل مقاومت در برابر انتقال حرارت تمیز از مقاومت مشاهده شده بدست می‌آید. این مقدار را مقاومت کثیف^۹ می‌گویند و با r_d نشان می‌دهیم.

$$r_d = \frac{1}{U_{obs}} - \frac{1}{U_{clean}} \quad (9)$$

که در این رابطه U_{obs} ضریب انتقال حرارت براساس شرایط مشاهده شده و U_{clean} ضریب انتقال حرارت براساس شرایط تمیز می‌باشند.

⁴ Reynolds Number

⁵ Prandtl Number

⁶ Baffle Spacing

⁷ Tube Pitch

⁸ The Number of Tube Passes

⁹ Dirt resistance

۳. بحث و بررسی

دیاگرام ساده شده واحد با تکیه بر شبکه مبدل حرارتی در شکل ۱، نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، جریان تقطیر شده خروجی از برج تقطیر به عنوان جریان اصلی واحد، در مبدل‌های مختلف خنک شده و در انتها وارد مرحله بعدی می‌گردد.

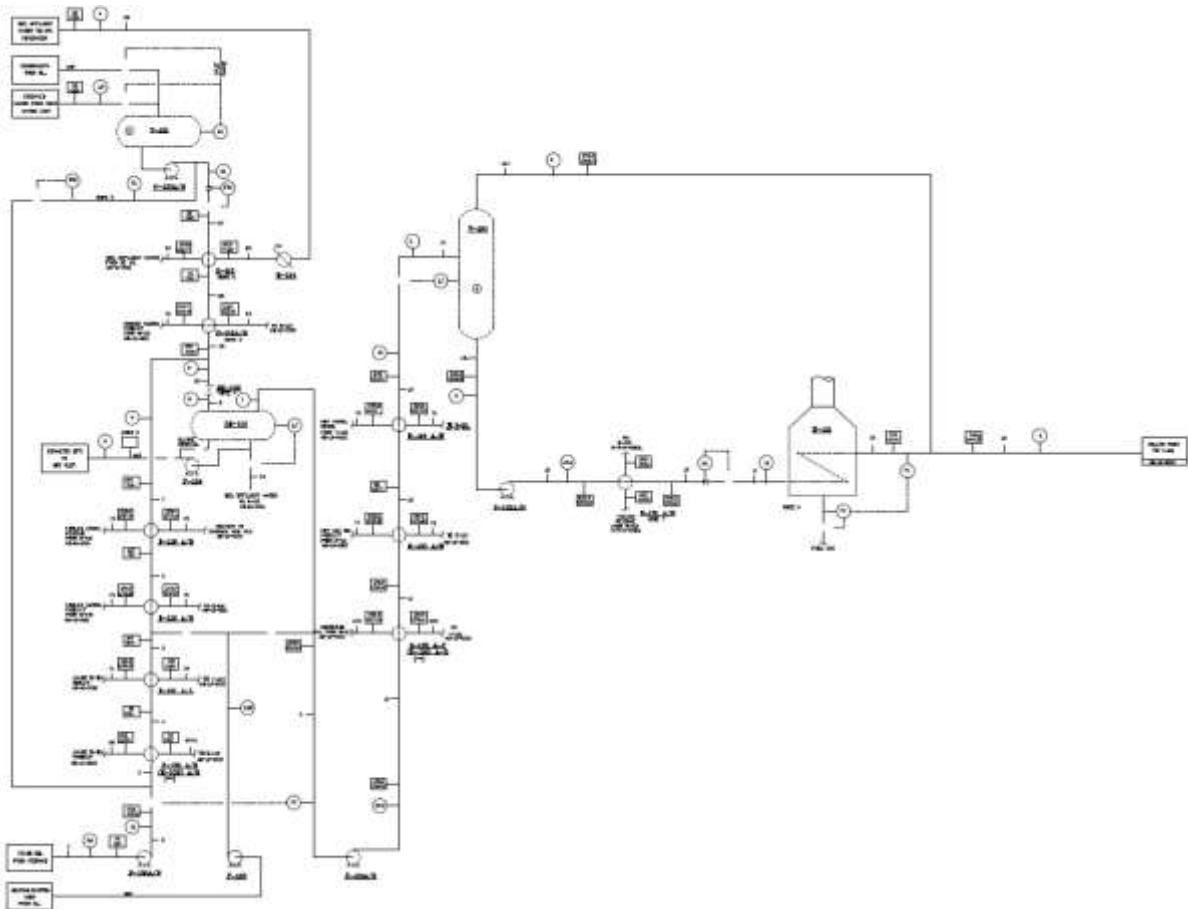
شبکه مبدل حرارتی واحد تقطیر به صورت یک شبکه ساده^{۱۰} در شکل ۲، نشان داده شده است. در این شکل علاوه بر نحوه ارتباط جریان‌ها با یکدیگر، بار حرارتی مبدل‌ها و دمای جریان‌ها در قسمت‌های مختلف و ظرفیت حرارتی جریان‌ها پیش از افزایش ظرفیت دیده می‌شود. جریان‌های گرم در بالای شکل با شماره ۱ تا ۴ و جریان‌های سرد در پایین آن با شماره ۵ تا ۸ نشان داده شده‌اند. جریان ۱ ابتدا از سمت لوله مبدل اول و سپس از سمت پوسته مبدل‌های ۱۰۱ و ۱۰۲ عبور می‌کند. جریان ۵ نیز از سمت لوله و جریان بعدی از سمت پوسته مبدل عبور می‌کند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مصرف انرژی شبکه در گرمکن^{۱۱} معادل ۱۰۴۰۰ کیلووات می‌باشد.

اطلاعات اولیه ای که برای شروع مرحله هدف گذاری مورد استفاده می‌باشند عبارتند از:

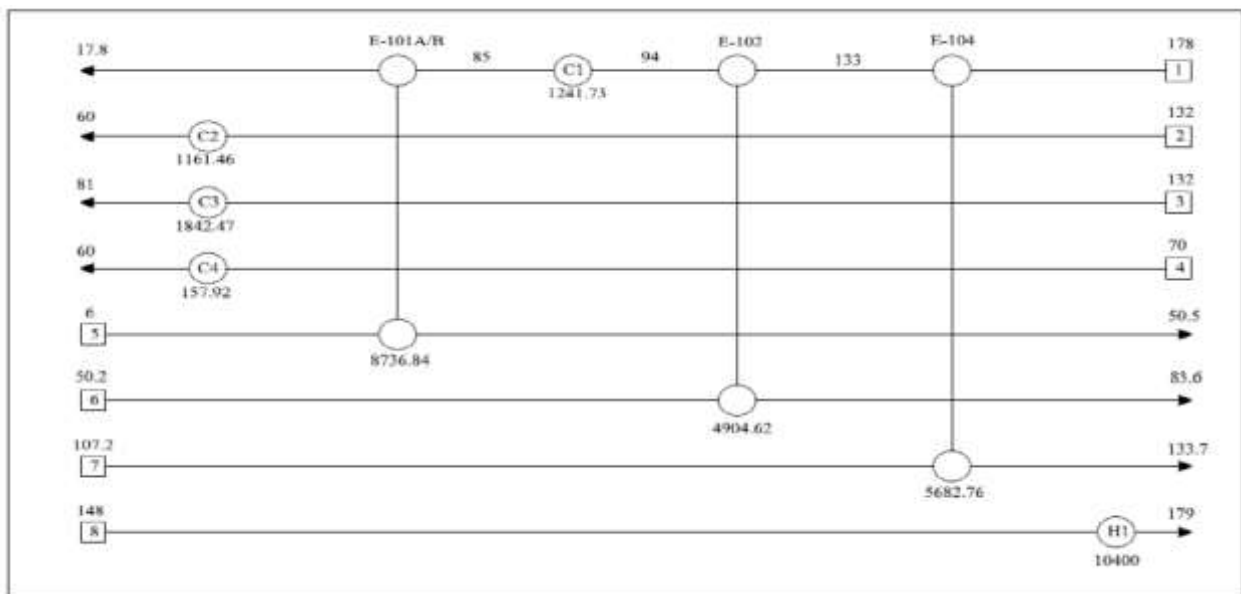
- مشخصات مبدل‌های موجود در شبکه، این اطلاعات در جدول ۱، آورده شده است.
- اطلاعات اقتصادی شامل اطلاعات مربوط به تجهیزات دینامیکی و مبدل‌ها و نیز اطلاعات کلی شبکه. این اطلاعات در جدول ۲، آورده شده است.
- اطلاعات و خواص فیزیکی جریان‌های فرآیند. این اطلاعات در جدول ۳، آورده شده است.

¹⁰ Grid Representation

¹¹ Heater



شکل ۱- نمودار جریان واحد



شکل ۲- شبکه مبدل حرارتی واحد پیش از افزایش ظرفیت

جدول ۱- مشخصات مبدل های موجود واحد تقطیر

	E-101 A/B	E-102	E-103	E-104
Shell side	Stabilized condensate	Stabilized HC condensate	Bottom	Sour HC condensate
Tube side	Raw cond. +glyc. Water	Raw HC condensate	HP steam	Stabilized condensate
Area (m ²)	1882.47	247.59	214.6	660.34
Ser*par	4x1	1x1	1x1	1x1
Shell ID (mm)	990.6	635	1244.6	1117
Baffle spacing	408	291.4	994	753
Tube count	1075	2827	1075	1810
Tube passes	2	2	2	2
Tube ID (mm)	11.63	11.63	11.63	11.63
Tube OD (mm)	19.05	19.05	19.05	19.05
Tube pitch (mm)	25.4	25.4	25.4	25.4

جدول ۲- اطلاعات عمومی و اطلاعات اقتصادی

Hot Utility Cost (£/KW.yr): 336 Cold Utility Cost (£/KW.yr): 453 Power Cost (£/KW.yr): 453	Plant Life Time (yr): 20 Interest Rate (%): 15 Max Area per Shell: 570 Number of Tube Passes: 2 X-Factor for Multiple Pass Shells: 0.8
Exchanger Capital Cost: $8600 + 670(\text{Area})^{0.83}$ Pump Capital Cost: $8600 + 7310(q \sqrt{H})^{0.2}$ Compressor Capital Cost: $8600 + 83.66(W)^{0.62}$ Compressor Efficiency (%): 70 Annualisation Factor: $i (i+1)^N / \{(i+1)^N - 1\}$	

$$\text{Exchanger Capital C: } 8600 + 670(1490.4)^{0.83} = 296947.4$$

جدول ۳- دبی و خواص فیزیکی جریان های واحد مربوطه

Stream No.	Stream name	Flow (kg/s)	ρ (kg/m ³)	C_p	μ (cp)	K (W/m.C)
1	Stabilized condensate	54	664.5	2555	2.868	0.9
2	HC	8	75	2241	0.024	0.037
3	Vapor phase HC	14	68.89	2547.5	0.016	0.043
4	Raw HC	8	13.73	2568	0.011	0.064
5	Raw cond. +glyc. Water	76	580	2357.5	0.1	0.12
6	Raw HC condensate	58	659	2333.5	0.245	0.099
7	sour HC condensate	74	154.75	2609	0.195	0.084
8	Bottom	76	532	4500	0.11	0.084

کلیه محاسبات هدف گذاری با استفاده از نرم افزار پایلوت-۱۲ انجام می پذیرد. به این منظور اطلاعات جریان ها وارد نرم افزار شده و مبدل های موجود شبکه جهت محاسبه موارد زیر مورد تحلیل^{۱۳} قرار می گیرند:

- تعیین ضریب انتقال حرارت تمیز جریان ها^{۱۴}
- تعیین ضریب کثیفی جریان ها^{۱۵}
- افت فشاری که در مبدل ها صرف انتقال حرارت می گردد (افت فشار مجاز هر کدام از جریان ها مربوط به قسمت فرآیند به فرآیند و صرفاً برای انتقال حرارت می باشد)

نتایج محاسبات مذکور در جدول های ۴ و ۵، آمده است.

نتایج این محاسبات در جداول ۶ و ۷ آمده است. در این قسمت ذکر این نکته ضروریست که با توجه به جریان داشتن بخار فشار بالا^{۱۶} در سمت لوله مبدل E-۱۰۳، این مبدل را در محاسبات آتی به عنوان گرمکن در نظر گرفته ایم.

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل مبدل ها پیش از افزایش ظرفیت

	E-101 A/B	E-102	E-103	E-104
Q_I (W/m ²)	1583.79	2030.76	3014/۲	1478.93
Q_O (W/m ²)	2335.35	2295.68	۴۱۱۵/۶۵	1247.86
ΔP_t (kPa)	162.95	11.87	۱۶۲/۳۱	6.010
ΔP_s (kPa)	96.39	114.23	۱۹۹/۳	38.94
$R_{f,i}$ (m ² .C/W)	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035
$R_{f,o}$ (m ² .C/W)	0.00052	0.00035	0.00035	0.0002

جدول ۵- اطلاعات جریان های واحد پیش از افزایش ظرفیت

St. No	Supply Temp. (°C)	Target Temp. (°C)	C _p	HTC (W/m ² .C)	ΔP (kPa)
1	178	17.8	137.97	492.2	286.63
2	132	60	17.928	477.8	70
3	132	81	35.665	439.8	70
4	70	60	20.544	470.7	70
5	6	50.5	179.17	326	162.95
6	50.2	83	135.343	365	11.87
7	107.2	133.7	193.066	343	38.94
8	148	179	342	343	----

جدول ۶- نتایج حاصل از تحلیل مبدل ها پس از افزایش ظرفیت

	E-101 A/B	E-102	E-103	E-104
Q_I (W/m ²)	714.83	1008.14	۴۸۴۶/۲	754.93
Q_O (W/m ²)	4873.112	2283.8	۵۸۱۵/۴	1496.69
ΔP_t (kPa)	362.43	17.47	۱۹۶/۶	101.17

¹² PILOT.2

¹³ Rating

¹⁴ Clean heat transfer coefficient

¹⁵ Stream fouling factor

¹⁶ High pressure steam

ΔP_s (kPa)	162.87	187.44	۲۸۸/۱۴	23.617
$R_{f,i}$ ($m^2.C/W$)	0.00035	0.00035	0.00021	0.00035
$R_{f,o}$ ($m^2.C/W$)	0.00052	0.00035	0.00018	0.0002

جدول ۷- اطلاعات جریان های واحد پس از افزایش ظرفیت

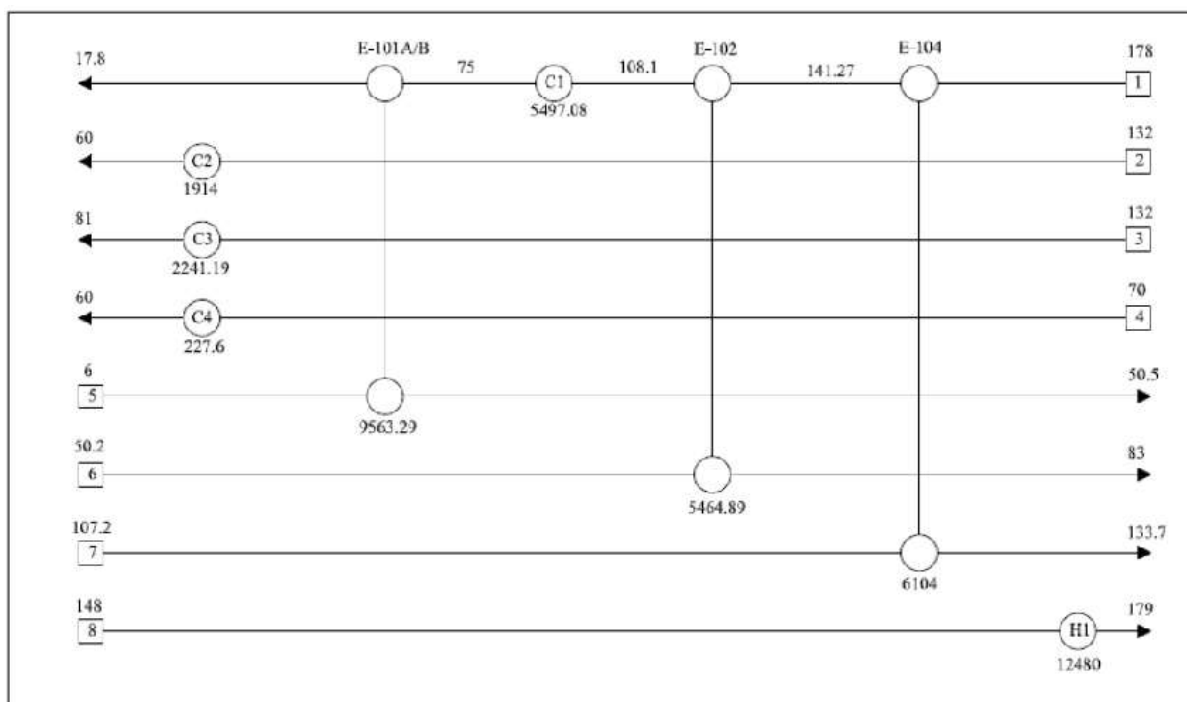
St. No	Supply Temp. ($^{\circ}C$)	Target Temp. ($^{\circ}C$)	C_p	HTC ($W/m^2.C$)	ΔP (kPa)
1	178	17.8	166.075	534.6	521.42
2	132	60	22.41	477.8	70
3	132	81	43.3075	439.8	70
4	70	60	25.68	470.7	70
5	6	50.5	214.5325	390.2	362.43
6	50.2	83	163.345	914.32	17.47
7	107.2	133.7	229.592	940.75	23.61
8	148	179	409.5	343	----

حال می توان با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل مبدل ها و همچنین با در دست داشتن دما های خروجی از مبدل ها، بار مبدل ها و افت فشار مورد نیاز برای انجام تبادل حرارت، شبکه مبدل های وضع موجود پس از افزایش ظرفیت را رسم نمود. همانگونه که در شکل ۳، دیده می شود، بار مورد نیاز مبدل ۱۰۳ که به عنوان گرمکن در نظر گرفته شده است از مقدار اولیه ۱۰۴۰۰ کیلووات بر ساعت به ۱۲۴۸۰ کیلووات بر ساعت افزایش یافته است. از سوی دیگر با مقایسه جدول های ۵ و ۷ ملاحظه می شود که پس از افزایش ظرفیت، افت فشار جریان ها نیز افزایش یافته است. ذکر این نکته ضروری است که جریان های ۲، ۳، ۴ و ۸ با توجه به عدم قرارگیری مبدل حرارتی بر روی آنها به صورت ضریب انتقال حرارت ثابت در محیط نرم افزار تعریف شده و افت فشار آنها نیز در طی افزایش ظرفیت، بدون تغییر باقی می ماند.

همچنین در جدول ۸، سطح جدید برای مبدل E-103 و همچنین سایر مبدل ها بدون تغییر آورده شده اند.

جدول ۸- سطح مفید مبدل ها پس از عملیات پینچ

Heat Exchanger	E-101	E-102	E-103	E-104
Area (m^2)	1882.47	247.59	214.6	660.34



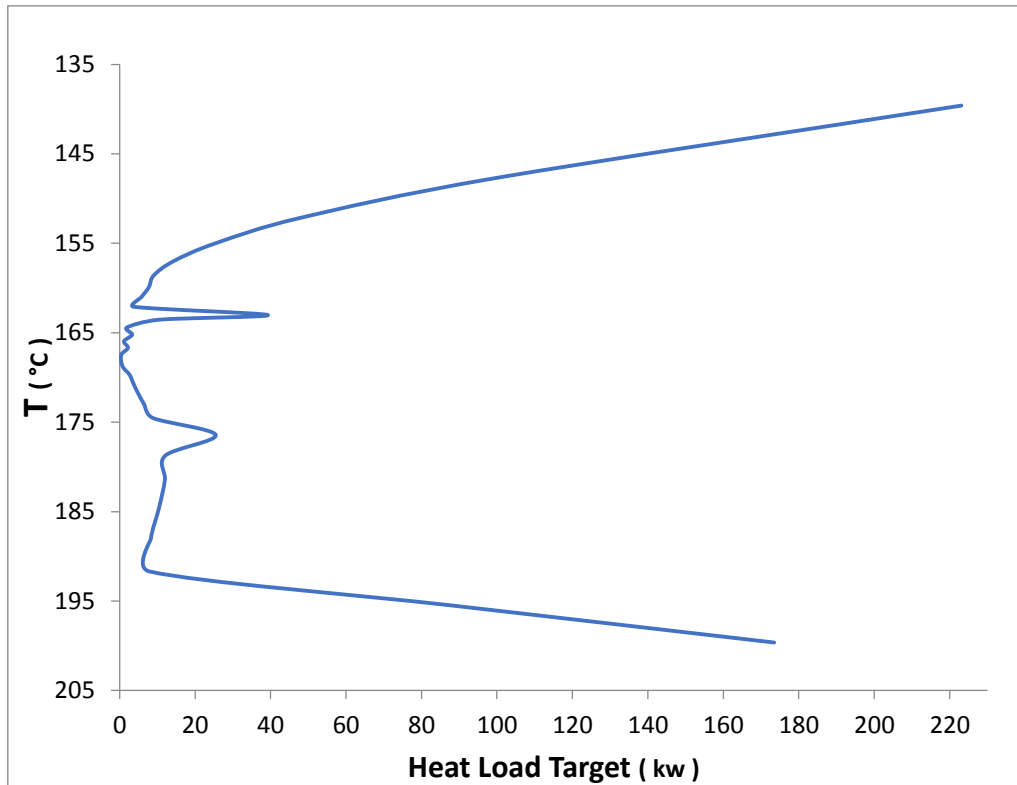
شکل ۳- شبکه مبدل حرارتی واحد پس از افزایش ظرفیت

میزان حداقل بار حرارتی هدف بر اساس حداقل نیروی محرکه با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$Ex_{loss} = Q_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) + Ex_{stream,in} - Ex_{stream,out} \quad (10)$$

که در این مبدل برگشت پذیر مقدار حداقل اتلاف اکسرژی $Ex_{loss,min} = 0.05 \text{ kW}$ محاسبه شده است.

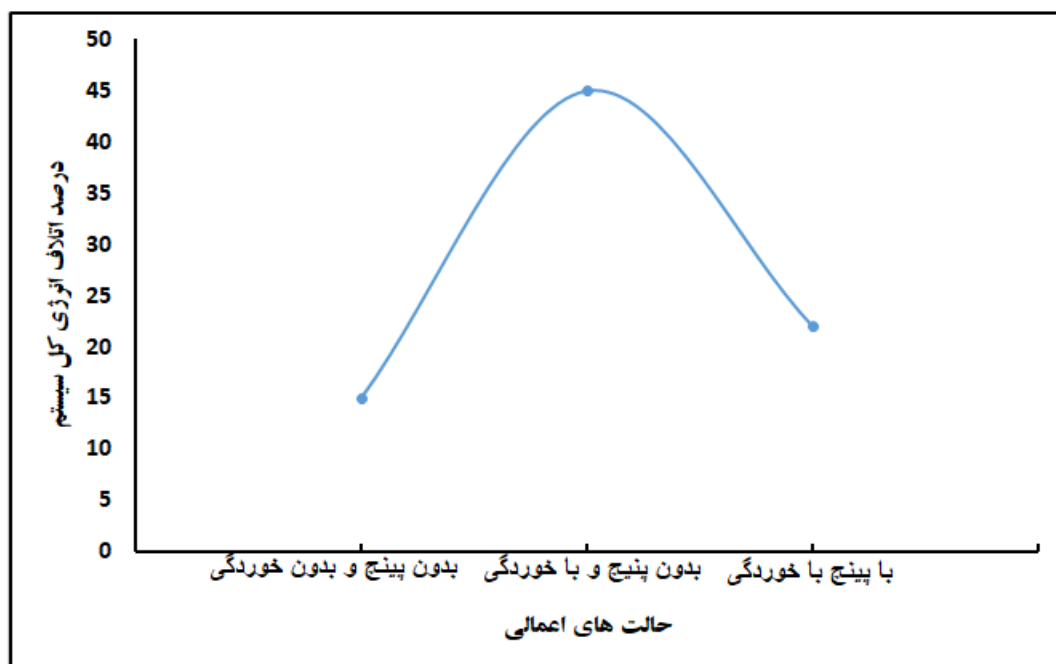
نمودار بار حرارتی با در نظر گرفتن حداقل نیروی محرکه برای هر یک از لوله‌ها در شکل ۴، نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار حداقل بار حرارتی برای $\Delta Ex_{loss,min} = 0.05 \text{ kW}$

با مشاهده شکل ۴ به این نتیجه می‌رسیم که استفاده از حداقل نیروی محرکه ($\Delta Ex_{loss,min}$) بار حرارتی هدف را کاهش می‌دهد. این کاهش در اطراف مبدل جانبی هدف بیشتر مشاهد می‌شود. با استفاده از بار حرارتی جدید که از حداقل اتلاف اکسرژی محاسبه شد نمودار اتلاف اکسرژی از فرمول (۱۰) محاسبه و رسم می‌شود.

نمودار موجود در شکل ۵، نشان دهنده تغییرات اتلاف انرژی کل سیستم در اثر ایجاد خوردگی در لوله مبدل و سپس بهبود شبکه مبدل حرارتی در اثر پینچ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات اتلاف انرژی کل سیستم

۴. نتیجه گیری

کشورهای دارای منابع انرژی طبیعی همواره به دنبال راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری در زمینه تولید و استخراج این نعمت خدادادی هستند. کشور ایران نیز با داشتن منابع فراوان نفتی، گازی و سایر مشتقات، به تبع دارای واحدهای مختلف پالایشگاهی می‌باشد. از این رو برای کاهش هزینه‌های تولید و پالایش مواد نفتی، محققین همواره به دنبال راهکارهای مختلفی هستند. یکی از بخش‌های پرمصرف انرژی در این حوزه، مبدل‌های حرارتی می‌باشند که انرژی بسیار زیادی مصرف کرده و باعث می‌شوند تا هزینه‌های تولید و پالایش بسیار بالا برود. از این رو، تاکنون روش‌های متعددی برای کاهش انرژی مصرفی برای مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها استفاده از آنالیز پینچ می‌باشد که با انجام آن می‌توان تا مقدار قابل توجهی از انرژی و به تبع آن هزینه را کاهش داد.

برای آنالیز پینچ، در ابتدا داده‌های مربوط به واحد مورد نظر از بخش تحقیق و توسعه گردآوری و سپس دسته‌بندی شد. این دسته‌بندی شامل، ایجاد جداولی برای شرایط سیال گرم و سرد (شامل رژیم جریان و غیره) و شبکه مبدل‌ها پیش از پینچ، هزینه عملیاتی سیستم، مقدار انرژی مصرفی و شرایط خوراک واحد بوده است. سپس با استفاده از معادلات حاکم بر سیستم و کدنویسی مربوطه آنالیز پینچ بر روی داده‌های مورد نظر انجام شد. نتایج این بخش نشان از بهبود عملکرد شبکه مبدل‌های حرارتی تا میزان حدود ۳۵ درصد کاهش انرژی بوده است.

در ادامه با توجه به شرایط حاکم بر آنالیز اکسرژی برای سیستم بهینه شده در بخش قبل، کدنویسی مربوطه صورت گرفت و شبکه مبدل‌های حرارتی با افزودن یک مبدل جانبی پس از شبکه اصلی، آرایشی جدید به خور گرفت. نتایج این بخش نیز نشان از بهبود کاهش انرژی مصرفی برای سیستم مبدل‌های حرارتی پینچ شده، داشت. در این بخش مشخص شد که می‌توان انرژی مصرفی را تا ۴۷ درصد کاهش داد و از این حیث هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش محسوسی پیدا می‌کنند.

منابع

1. Ghayad, I., Z. Abdel Hamid, and N. Gomaa, *A Case Study: Corrosion Failure of Tube Heat Exchanger*. Journal of Metallurgical Engineering, 2015. **4**: p. 57.
2. Faes, W., et al., *Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers*. Corrosion Reviews, 2019. **37**.
3. Ali, M., et al., *Corrosion-related failures in heat exchangers*. CORROSION REVIEWS, 2021. **39**: p. 28.
4. Panahi, H., et al., *An investigation on corrosion failure of a shell-and-tube heat exchanger in a natural gas treating plant*. Engineering Failure Analysis, 2020. **118**: p. 104918.
5. Rahman, M.M. and S. Ahmed, *Corrosion Behavior of Copper Based Heat Exchanger Tube in Waters of Bangladesh Region at Varied Temperature and Flow Velocity*. MIST Journal GALAXY (DHAKA), 2020. **8**: p. 15-23.
6. Bonhivers, J.-C., et al., *Linking pinch analysis and bridge analysis to save energy by heat-exchanger network retrofit*. Applied Thermal Engineering, 2016. **106**.
7. Bonhivers, J.-C., et al., *Improving the network pinch approach for heat exchanger network retrofit with bridge analysis*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018. **97**.
8. Kaviani, A., et al., *A new approach for energy optimization in dairy industry-pinch analysis*. Cleaner Engineering and Technology, 2022. **8**.
9. Sørensen, N., H. Yu, and G. Sin, *Energy integration through retrofitting of heat exchanger network at Equinor Kalundborg Oil Refinery*. 2022. p. 301-306.
10. Fard, M., et al., *Improving Energy Efficiency in a Complex Natural Gas Refinery using Combined Pinch and Advanced Exergy Analyses*. Applied Thermal Engineering, 2018. **137**.
11. Zhao, Y.-j., et al., *Pinch Combined with Exergy Analysis for Heat Exchange Network and Techno-economic Evaluation of Coal Chemical Looping Combustion Power Plant with CO₂ Capture*. Energy, 2021. **238**: p. 121720.
12. Zhao, Q., et al., *The New Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks*. Advanced Materials Research, 2012. **512**: p. 1253-1257.
13. Mrayed, S., et al., *Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit*. Cleaner Engineering and Technology, 2021. **4**: p. 100168.
14. Alhajri, I.H., et al., *Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait*. Case Studies in Thermal Engineering, 2021. **26**: p. 101030.
15. Gadalla, M., *A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration*. Energy, 2015. **81**.
16. Zhang, D., et al., *Combined pinch and mathematical programming method for coupling integration of reactor and threshold heat exchanger network*. Energy, 2020. **205**: p. 118070.
17. Al-Malah, K., *Aspen Plus: Chemical Engineering Applications*. 2016.
18. Maréchal, F. and D. Favrat, *Combined Exergy and Pinch Analysis for Optimal Energy Conversion Technologies Integration*. 2006.