صرفه‌جویی انرژی حاصل از بازآرایی شبکه مبدل‌های حرارتی در کارخانه تولید پودر شیر با استفاده از روشHSDT

آذین قائدرحمتی [۱]، فاطمه جدا[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی، تهران، azin.ghaedrahmat@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه شهید بهشتی، تهران، f_joda@sbu.ac.ir

خلاصه

امروزه باتوجه به کمیابی منابع انرژی، نگرانی‌های متعددی برای تامین امنیت انرژی وجود دارد. در صنایع لبنی در بخش تبخیر و خشک‌کن اتلاف انرژی چشم‌گیری وجود دارد که می‌توان با بازآرایی[۱] سیستم از حرارت‌های اتلافی استفاده کرد. دراین مقاله یک کارخانه لبنی مورد مطالعه قرار گرفته که با استفاده از جدول مازاد-کمبود حرارت که یک جدول عددی است، حرارت‌های کمبود یا مازاد سیستم را به صورت کمی شناسایی کرد و می‌توان با استفاده از پل‌ها بازآرایی سیستم را بگونه‌ای انجام داد که مصرف انرژی سیستم بهبود یابد. در این طرح، میزان قابل توجهی قریب به ۷۹ درصد(۴۰۶۲kw) تولید بخار را با استفاده از جدول و پل در فرایند کاهش داده شده است این درحالی است که مقدار برق مصرفی ۱۳ درصد (۲۵۵kw) افزایش داشته است. درنهایت این مقدار صرفه جویی حرارت، ۱۰۰۰۳۱۳یورو درآمد سالانه ناشی صرفه جویی انرژی را به همراه دارد.

کلمات کلیدی: بازآرایی، شبکه مبدل‌های حرارتی، پودر شیر، صرفه‌جویی انرژی، پل

۱. مقدمه

روش‌های یکپارچه‌سازی فرآیند[۲] به‌عنوان ابزارهایی بسیار مؤثر برای شناسایی فرصت‌های افزایش بهره‌وری انرژی در فرآیندهای صنعتی شناخته شده‌اند. باتوجه به مطالعات انجام شده کاهش‌های قابل‌توجهی در تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف صنعتی ازجمله صنایع غذایی [1]، صنایع شیمیایی وپتروشیمی [2]، صنعت خمیر وکاغذ [3]، قابل دستیابی است. این کاهش مصرف انرژی معمولا به‌طور مستقیم منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود، زیرا این فرآیندهای صنعتی به‌طور متداول توسط یوتیلیتی‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شوند.

با توجه به کاهش منابع انرژی، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و افزایش هزینه انرژی، انگیزه برای بهبود یکپارچه‌سازی حرارتی در واحدهای صنعتی را ضرورت می بخشد[4]. یکی از واحدهای فرآیندی که امکان بهبود قابل‌توجه در مصرف انرژی در آن وجود دارد، واحد تولید پودر شیر است، زیرا مقدار زیادی از حرارت در بخش‌های تبخیرکننده و خشک‌کن از دست می‌رود. با کاهش این تلفات، بازیابی و استفاده مجدد از انرژی در سایر بخش‌های فرآیند تولید، می‌توان مصرف انرژی (گاز طبیعی و برق) را کاهش داد.

[1] Retrofit
[2] Process Integration Methods

رویکردهای تصمیم گیری در مورد باز طراحی یک شبکه مبدل حرارتی[1] به صورت روش‌های گرافیکی و برنامه ریزی ریاضی[2] و ترکیبی می‌توان اعمال کرد. روش‌های گرافیکی مبتنی بر تحلیل پینچ[3]، نمودار انتقال انرژی[4][5]، نمودار جریان حرارتی[5][6] و نمودار اصلاح شده انتقال انرژی[6][7]را می‌توان نام برد. در یک شبکه مبدل‌های حرارتی، مصرف انرژی حرارتی را می‌توان با ایجاد "پل‌ها[7]" این منابع حرارتی و مصرف‌کنندگان یوتیلیتی گرم[8] از طریق مجموعه‌ای از اصلاحات شبکه‌ای کاهش داد.

نمودارهای گرافیکی که در تحلیل پینچ و بازطراحی شبکه مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شوند، با وجود اینکه ابزارهای مفیدی برای درک کلی رفتار انرژی سیستم هستند، محدودیت‌هایی نیز دارند. این روش‌ها معمولاً راه‌حل بهینه نهایی را تضمین نمی‌کنند و نتیجه تحلیل تا حد زیادی به تجربه و قضاوت مهندس وابسته است. از طرفی، بسیاری از این نمودارها در ابتدا برای طراحی واحدهای جدید توسعه داده شده‌اند و زمانی که برای بازطراحی واحدهای صنعتی موجود با محدودیت‌های عملیاتی و تجهیزاتی واقعی به کار می‌روند، جزئیات مهم شبکه فعلی به‌خوبی در آن‌ها دیده نمی‌شود. تجمیع اطلاعات در این نمودارها باعث می‌شود نقش مبدل‌های حرارتی منفرد، محدودیت‌های دمایی، افت فشار یا مسائل بهره‌برداری به‌صورت شفاف مشخص نباشد. همچنین، این ابزارها معمولاً امکان بررسی دقیق جنبه‌های اقتصادی و مقایسه سیستماتیک گزینه‌های مختلف بازطراحی را فراهم نمی‌کنند و در سیستم‌های بزرگ، با افزایش پیچیدگی، کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد.

به همین دلیل، یک رویکرد جدولی توسعه داده شد تا بازطراحی به روش پل را به‌صورت عددی و با جزئیات بیشتر بیان کند. جدول مازاد–کسری[9][7] ، آبشار حرارتی و توزیع گرما بین یوتیلیتی‌های گرم و سرد را به‌درستی نمایش می‌دهد.

در این مقاله طرح پیشنهادی از یک کارخانه صنعتی تولید پودر شیر با جدول کمبود-مازاد ارائه شده که می‌تواند هم مقدار یوتیلیتی‌های گرم را کاهش بدهد که منجر به افزایش درآمد ناشی از صرفه جویی انرژی بشود و هم قیمت برق مصرفی کارخانه را نیز ارزیابی کند و نتایج را به صورت عددی گزارش کند.

۲. روش تحقیق

در این پژوهش، جدول مازاد–کسری حرارت که توسط لال و همکاران [7] معرفی شده است، به‌عنوان ابزار اصلی برای شناسایی و کمی‌سازی پل‌های بازطراحی در شبکه مبدل‌های حرارتی به‌کار گرفته می‌شود. هدف از این رویکرد، کاهش بار یوتیلیتی‌های گرم و سرد و در نتیجه بهبود کارایی انرژی شبکه مبدل‌های حرارتی است.

ابتدا داده‌های لازم برای بازطراحی استخراج می‌شوند. شبکه مورد بررسی می‌تواند شامل گرم‌کن‌ها، سردکن‌ها، مبدل‌های فرآیند–به–فرآیند[10] و جریان‌های مختلف فرآیندی باشد. در طراحی موجود، جریان‌ها از پیش به‌گونه‌ای تطبیق داده شده‌اند که دماهای هدف آن‌ها تأمین شود. مشابه تحلیل پینچ متداول، اطلاعات مورد نیاز شامل ظرفیت گرمایی ویژه، دبی جرمی، دماهای ورودی و خروجی جریان‌ها در هر مبدل، بار حرارتی مبدل‌های موجود و ساختار کلی شبکه است. علاوه بر این، یک حداقل اختلاف دمای کلی (ΔT_{min}) یا حداقل اختلاف دمای اختصاصی هر جریان ($\Delta T_{min,cont}$) برای تعیین اهداف بازطراحی تعریف می‌شود.

[1] Heat Exchanger Network
[2] Mathematical Programming (MP)
[3] Pinch Analysis (PA)
[4] Energy Transfer Diagram (ETD)
[5] Heat Flow Diagram (HFD)
[6] Modified Energy Transfer Diagram (METD)
[7] Bridges
[8] Hot utility
[9] Heat Surplus Deficit Table (HSDT)
[10] Process to Process

در گام دوم، جریان‌های فرآیندی شناسایی شده و دیاگرام شبکه[1] ترسیم می‌گردد. سپس حداقل اختلاف دمای مجاز برای هر جریان تعیین می‌شود. هر مبدل حرارتی به‌صورت مستقل با استفاده از الگوریتم جدول مسئله مبدل[2] تحلیل می‌شود. (جدول شماره۱) برخلاف تحلیل پینچ کلاسیک که کل شبکه را به‌عنوان یک مسئله واحد در نظر می‌گیرد، در این روش هر مبدل به‌صورت جداگانه بررسی می‌شود. دراین جدول معمولاً تنها یک جریان گرم و یک جریان سرد در هر بازه دمایی وجود دارد و برای مبدل‌های متعادل، مقدار آنتالپی در ابتدا و انتهای جدول صفر است. مقادیر ΔH بیانگر مازاد یا کسری حرارت در هر بازه دمایی بوده و فرصت‌های بالقوه برای بازیکپارچه‌سازی حرارت در طراحی موجود را مشخص می‌کنند. این تحلیل برای تمامی مبدل‌های شبکه تکرار می‌شود.

جدول ۱: الگوریتم جدول مسئله مبدل

T*(°C)	ΔT*(°C)	CP(KW/°C)	ΔH(KW)	H(KW)
T1				$H_1=\Delta H_{HU,E}$
	T_1-T_2	$(CPh-CPc)_{1-2}$	$(\Delta T\cdot CP_{net})_{1-2}$	
T2				$H_1+\Delta H_{1-2}$
	T_2-T_3	$(CPh-CPc)_{2-3}$	$(\Delta T\cdot CP_{net})_{2-3}$	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
T_n	$T_{n-1}-T_n$	$(CPh-CPc)_{[n-1]-n}$	$(\Delta T\cdot CP_{net})_{[n-1]-n}$	$H_{n-1}+\Delta H_{[n-1]-n}$

در گام سوم، جدول مازاد–کسری حرارت[7] طبق جدول شماره ۲ تشکیل می‌شود. این جدول با تجمیع ستون‌های ΔHحاصل از تحلیل E-PTA تمام مبدل‌ها ساخته می‌شود و اولین ابزار اصلی برای شناسایی پل‌های بازطراحی به شمار می‌رود. در این جدول، مقادیر مثبت ΔH نشان‌دهنده مازاد حرارت و مقادیر منفی بیانگر کسری حرارت هستند.

جدول ۲ : جدول مازاد–کسری حرارت

T*(°C)	$\Delta H_{(C)}$(KW)	...	$\Delta H_{(R)}$(KW)	...	$\Delta H_{(H)}$(KW)
T1					
	$\Delta H_{1-2(C)}$	...	$\Delta H_{1-2(R)}$	...	$\Delta H_{1-2(H)}$
T2					
	$\Delta H_{2-3(C)}$	...	$\Delta H_{2-3(R)}$	...	$\Delta H_{2-3(H)}$
⋮	⋮		⋮		⋮
T_n	$\Delta H_{[n-1]-n(C)}$	...	$\Delta H_{[n-1]-n(R)}$	...	$\Delta H_{[n-1]-n(H)}$

در گام چهارم، پل‌های بازآرایی با استفاده از جدول مازاد–کسری حرارت شناسایی و کمی‌سازی می‌شوند. هر پل مجموعه‌ای از تطبیق‌هاست که یک سردکن را به یک گرم‌کن متصل می‌کند و در آن، مازادهای حرارتی با کسری‌های حرارتی متناظر جفت می‌شوند. برای رعایت قانون دوم ترمودینامیک، انتقال حرارت تنها در همان بازه دمایی یا بازه‌های دمایی پایین‌تر مجاز است. مقدار انتقال حرارت هر تطبیق برابر با کوچک‌ترین مقدار بین مازاد و کسری بوده و کمترین مقدار انتقال حرارت در میان تطبیق‌های یک پل، صرفه‌جویی نهایی انرژی آن پل را تعیین می‌کند. ساختار عددی این جدول فرآیند محاسبه این صرفه‌جویی‌ها را ساده و شفاف می‌سازد.

در گام پنجم، بر اساس پل‌های شناسایی‌شده، طرح بازطراحی شبکه مبدل‌های حرارتی توسعه داده می‌شود. این پل‌ها نشان می‌دهند در چه نقاطی می‌توان تطبیق‌های جدید ایجاد کرد تا بازیافت حرارت افزایش یافته و مصرف یوتیلیتی کاهش

[1] Grid Diagram
[2] Exchanger problem table algorithm (E-PTA)

یابد. در این مرحله، مبدل‌های جدید برای جریان‌هایی که قبلاً تطبیق نداشته‌اند اضافه شده و بار یوتیلیتی‌ها متناسب با صرفه‌جویی‌های محاسبه‌شده کاهش می‌یابد. سپس شبکه مجدداً بالانس می‌شود که این کار معمولاً نیازمند افزایش سطح انتقال حرارت در برخی مبدل‌های موجود است.

درگام ششم، محاسبات اقتصادی است که در ارزیابی اقتصادی، تنها سرمایه‌گذاری ثابت[1] در نظر گرفته می‌شود و سرمایه در گردش نادیده گرفته می‌شود. مقدار FCI از هزینه تحویل تجهیزات با استفاده از روش ضریب هند[2] محاسبه می‌شود [1]:

$$FCI = \sum_{i=1}^{N} f_i C_i \quad (1)$$

که در آن N تعداد اجزای جدید، f_i ضریب هند برای جزء i و C_i هزینه تحویل جزء i است.

مبدل های حرارتی پیشـــنهادی هزینه تحویل را شـــامل هزینه اتصـــالات جوشـــی، تکیه‌گاه‌ها، فلنج‌ها و حمل ونقل می‌باشد. این هزینه ها برحسب UA_i برازش داده شده اند و هزینه ها براساس واحد یورو درنظر گرفته شده اند به صورت زیر تعریف می‌شود [1]:

$$C_i = 227.97\left(\frac{UA_i}{0.239}\right)^{0.68} \quad (2)$$

درآمد حاصل از عدم خرید انرژی حرارتی بدست می‌آید. قیمت یوتیلیتی گرم برابر C_{UH}=0.0335 KWh/°C فرض شده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [1]:

$$R = \dot{E}_{savings} \cdot f_{operation} \cdot c_{HU} \quad (3)$$

که در آن $\dot{E}_{savings}$ مقدار گرمای صرفه جویی شده (KW) و $f_{operation} = 7350\ h/y$ است.

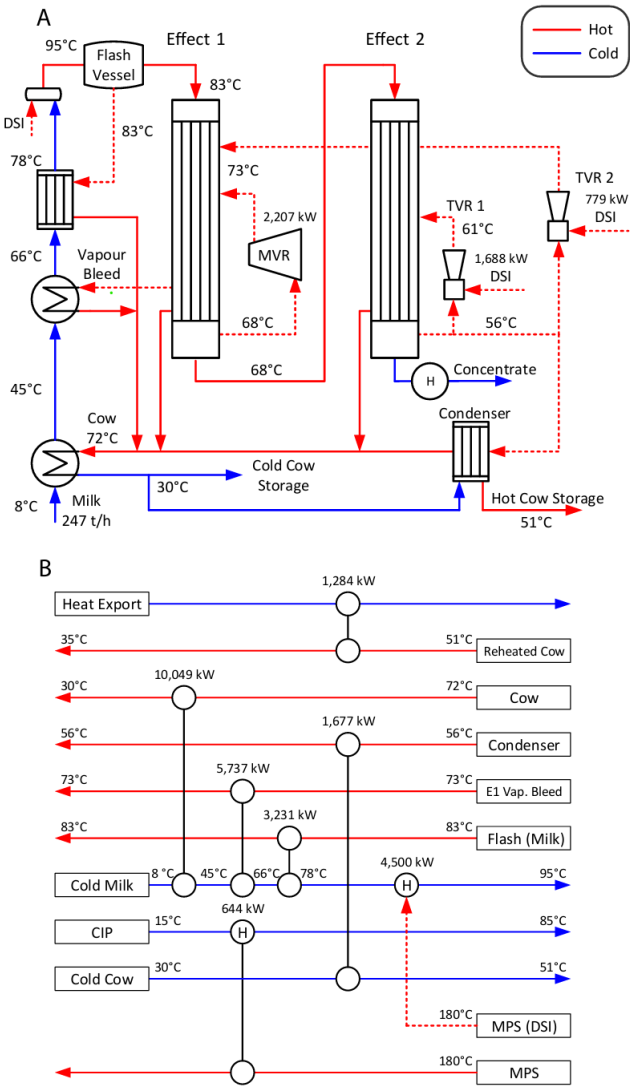
درنهایت مقدار صرفه جویی انرژی از جدول کمبود-مازاد بررسی می‌شود که باتوجه به هزینه‌ها و درآمدی که دارد ارزیابی می‌شود که آیا طرح مقرون بصرفه است و توانایی عملی کردن طرح وجود دارد یا خیر.

۳. مورد مطالعاتی

در این مطالعه موردی، یک کارخانه صنعتی تولید پودر شیر با سیستم تبخیر دواثره در [8] مورد بررسی قرار گرفته است که به فناوری بازتراکم بخار مجهز می‌باشد. اثر اول سیستم با بازتراکم بخار مکانیکی[3] و اثر دوم با بازتراکم بخار حرارتی[4] یکپارچه شده است. اثر MVR در دمای سمت شیر ۶۸ درجه سانتی‌گراد با بار حرارتی ۱۱۵ مگاوات و اثر TVR در دمای ۵۶ درجه سانتی‌گراد با بار حرارتی ۵ مگاوات کار می‌کند. حداقل اختلاف دمای تقریبی برای هر دو اثر برابر با ۵ درجه

[1] Fixed Capital Investment (FCI)
[2] Hand-factor
[3] Mechanical vapour recompression (MVR)
[4] Thermal vapour recompression (TVR)

سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. بخشی از بخار خروجی از اثر دوم، توسط یک ترموکمپرسور ثانویه ارتقا یافته و برای پیش‌گرمایش غیرمستقیم شیر در سمت پوسته اثر اول مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱:یکپارچه‌سازی تبخیرکننده صنعتی شیر در حالت پایه، که به‌وسیله نمودار جریان فرایند (A) و نمودار شبکه‌ای یا گرید (B) نمایش داده شده است[8].

سیستم تبخیر به‌طور مستقیم با فرایند حرارتی شیر یکپارچه شده است. در این فرایند، شیر استانداردشده با دمای اولیه حدود ۸ درجه سانتی‌گراد تا دمای نهایی حرارتی ۹۴،۵ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود. پس از طی زمان نگهداری کوتاه، شیر تا دمای حدود ۸۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد فلش شده و بخار کم‌فشاری تولید می‌شود که در ادامه برای بازیافت حرارت در سیستم تبخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم تبخیر، غلظت ماده خشک شیر را از حدود ۱۲ درصد به ۵۲ درصد افزایش می‌دهد و در بازه دمایی ۴۵ تا ۷۳ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کند تا از افت کیفیت محصول جلوگیری شود. هر خط تبخیر به‌صورت دوره‌ای تحت عملیات شست‌وشوی در محل (CIP) قرار می‌گیرد تا الزامات بهداشتی فرایند رعایت شود.

در پایین‌دست فرایند تبخیر، شیر تغلیظ‌شده پیش‌گرم، هموژنیزه و سپس با استفاده از هوای داغ با دمای حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن پاششی به پودر شیر تبدیل می‌شود. هوای خروجی از خشک‌کن با دمایی در حدود ۷۵ درجه سانتی‌گراد، منبع قابل‌توجهی از حرارت کم‌درجه محسوب می‌شود. به دلیل فاصله فیزیکی این جریان از سایر تجهیزات تبخیر، هوای خروجی خشک‌کن به‌عنوان یک ناحیه مستقل در تحلیل یکپارچه‌سازی حرارت کل سایت در نظر گرفته شده است.

حداقل اختلاف دمای تقریبی برابر با ۲٫۵ درجه سانتی‌گراد برای جریان‌های مایع و بخار و ۱۲٫۵ درجه سانتی‌گراد برای جریان‌های گازی در نظر گرفته شده است تا تفاوت ضرایب انتقال حرارت منعکس شود. ضریب انتقال حرارت برای جریان‌های مایع و بخار در بازه‌ی $2\ kW/m^{2}\cdot^{\circ}C$ تا ۸ و برای جریان‌های گازی حدود $0.1 kW/m^{2}\cdot^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است.

براساس روش گفته شده به صورت گام به گام تمام مراحل را برای مثال عددی موجود انجام شد. باتوجه به شکل شماره ۱، برای گرید دیاگرام‌های موجود جدول داده را رسم شد و براساس داده های بدست آمده جدول کمبود-مازاد را مطابق جداول ۱ و۲ برای فرایند پودر شیر رسم می‌کنیم.

جدول ۳: جدول داده‌های پودر شیر

HEN	Stream	Type	T_s (°C)	T_t (°C)	C_p	H (kW)
1	heat Export (L)	cold	6	6	–	1284
2	cold milk (L)	cold	8	45	272	10049
3	cold milk (L)	cold	45	66	272	5737
4	cold milk (L)	cold	66	78	272	3231
5	cold cow (L)	cold	30	51	79.85	1677
6	cold milk (L)	cold	78	95	272	4500
7	CIP (L)	cold	15	85	9	644
2	cow (L)	hot	72	30	239.2619	-10049
1	reheated cow (L)	hot	51	35	80.25	-1284
7	MPS (S)	hot	180	180	–	-644
5	condensor (S)	hot	56	56	–	-1677
3	E1 vap (S)	hot	73	73	–	-5737
4	flash (S)	hot	83	83	–	-3231
6	MPS (S)	hot	180	180	–	-4500

از جدول کمبود-مازاد می‌توان هرکدام از مبدل‌هایی که توانایی تبادل حرارت دارد پل‌هایی مطابق قوانین جدول رسم کرد.

HSDT								
		1	2	3	4	5	6	7
T*i(°C)	ΔT(°C)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)
MPS(DSI)							4500	644
Electricity								
upgraded Vap								
97.5								
87.5	10						-2720	
80.5	7						-1904	-63
80.5	0				3231			0
70.5	10				2720			-90
70.5	0			5737	0			0
69.5	1				-272			-9
68.5	1		239.3		-272			-9
53.5	15		3589	-4080				-135
53.5	0		0	0		1677		0
48.5	5		1196	-1360		-399.25		-45
47.5	1	80.25	239.3	-272		-79.85		-9
32.5	15	1204	-491			-1197.75		-135
27.5	5		-164					-45
17.5	10		-2720					-90
10.5	7		-1904					
8.5	2							
8.5	0	-1284						

2448KW

N2=477kw

HSDT								
		2	3	4	5	6	7	
T*i(°C)	ΔT(°C)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	H(KW)	
MPS						928.4	153	
Electricity						255.6		
upgraded Vap						2812		
97.5								
87.5	10					-2720		
80.5	7					-1904	-63	
80.5	0			3231			0	
70.5	10			-2720			-90	
70.5	0		2448	0			0	
69.5	1			-272				
68.5	1			-272				
53.5	15	1914	-4080					
53.5	0	0	0		1677			
48.5	5	-360	-1360		-399.3			
47.5	1	-32.7	-272		-79.85			
32.5	15	-491			-1198			
27.5	5	-164						
17.5	10	-327						
10.5	7	-229						
8.5	2							
8.5	0							

شکل ۲: جدول کمبود-مازاد حرارت

بعد از رسم جدول و چک کردن مقدار مازادهای حرارت، طبق محاسبات مقدار بخار موجود در بخار تولید شده در اواپراتور توانایی اینکه به عنوان منبع حرارت دهنده برا سیستم باشد را دارد. در نتیجه با استفاده از یک کمپرسور می‌توان از بخار اواپراتور را با DSI[1] که از سوخت فسیلی برای تولید بخار استفاده می‌کند، جایگزین کرد.

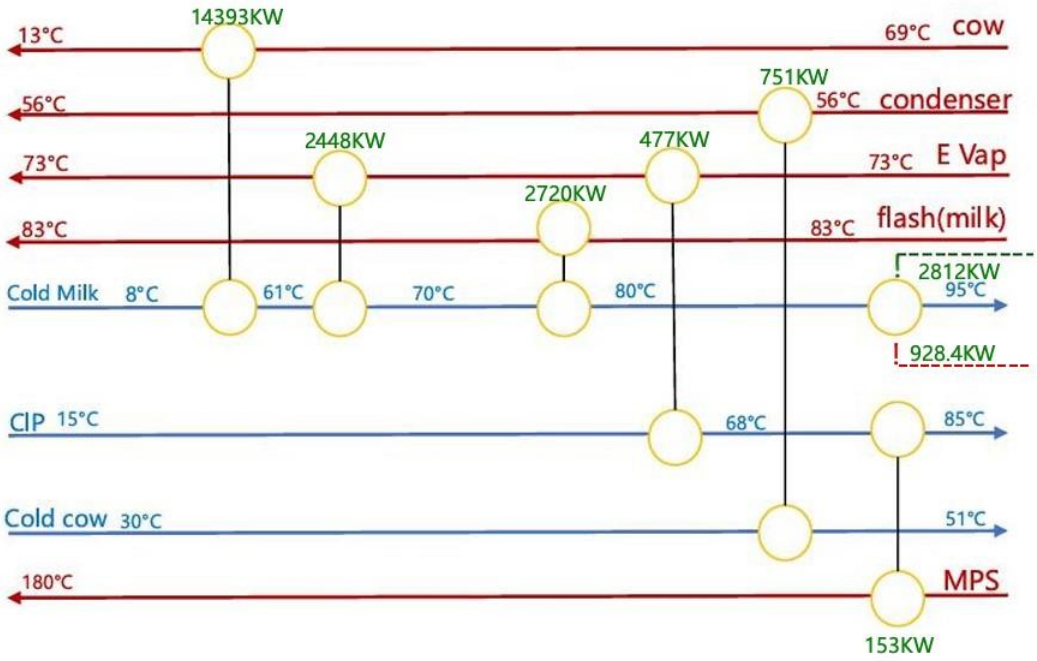
با توجه به محدودیت های حداقل دلتای دمایی و قوانین جدول کمبود مازاد، می‌توان مقدار ۲۸۱۲ KW از طریق یک MVR از بخار اواپراتور استفاده کرد و برای این بخار، کمپرسور مقدار ۲۵۵.۶ KW برق نیاز دارد. پل N_2 توانست مقدار ۴۷۷KW مقدار یوتیلیتی گرم را به ۱۵۳ KW برساند.

مقدار هزینه تحویل برای این طرح که باتوجه به فرمول های داده شده در بخش قبل محاسبه شده اند ۳۷۲۴۳۲ یورو محاسبه شده است که این مقدار برای تمام تغییراتی که در طراحی مبدل‌ها اعمال می‌شود لحاظ می‌شود. مقدار سرمایه‌گذاری بدست آمده ۱۳۰۳۵۲۸ یورو می‌باشد که در برابر درآمد سالانه ناشی از صرفه جویی انرژی عدد منطقی می‌باشد.

[1] Direct Steam Injection

مقدار بخار صرفه جویی شده در این طرح ۴۰۶۲.۶KW است. در واقع قبل از اینکه بازآرایی روی مبدل‌های فرایند زده شود مقدار کل حرارت لازم برای سیستم ۵۱۴۴KW گزارش شد ، درحالی که وقتی با استفاده از پل های جدید سیستم مبدل‌ها را تغییر داده شد مقدار بخار مورد نیاز به ۱۰۸۱.۴ KW رسید. این بهبود انرژی درحالی است که مقدار برق مصرفی سیستم ۲۵۵.۶ KW بیشتر از قبل مصرف شد.

شکل ۳ گرید دیاگرام فرایند را بعد از بازآرایی نشان می‌دهد. تعداد مبدل‌ها و مقدار حرارت آنها اصلاح شده و یا مبدل جدید اضافه شده تا اتلاف حرارت سیستم بهبود پیدا کند.



شکل ۳: گرید دیاگرام بعد از بازآرایی

۴. نتیجه گیری

استفاده از روش‌های عددی و ساختاریافته مانند جدول مازاد–کسری حرارت و الگوریتم E-PTA امکان شناسایی دقیق‌تر پل‌های بهسازی و ارزیابی کمی صرفه‌جویی‌های انرژی را فراهم کرد و ضعف‌های ابزارهای گرافیکی را تا حد زیادی برطرف نمود.در این مقاله طرح پیشنهادی با جدول کمبود-مازاد مقدار یوتیلیتی‌های گرم را تا ۷۹ درصد کاهش می‌دهد که منجر به افزایش درآمد سالانه ۱۰۰۰۳۱۳.۶۸۵یورو ناشی از صرفه جویی انرژی می‌شود که این کاهش چشم‌گیر در تولید بخار نشان‌دهنده کاهش قابل توجهی در مصرف سوخت فسیلی(گاز طبیعی) است. مقدار برق مصرفی بعداز بازآرایی در روش جدول کمبود-مازاد ۲۵۵.۶ KW افزایش یافت. برای طرح‌های پیشنهادی آینده می‌توان استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تامین برق شبکه را لحاظ کرد و طرح را از نظر محیط زیستی و اقتصادی و اگزرژی مورد بررسی قرار داد.

۵. مراجع

[1] R. Bergamini *et al.*, “Analysis of energy integration opportunities in the retrofit of a milk powder production plant using the Bridge framework,” *J. Clean. Prod.*, vol. 328, no. January, p. 129402, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129402.

[2] S. Y. Teng, Á. Orosz, B. S. How, J. J. Jansen, and F. Friedler, “Retrofit heat exchanger network optimization via graph-theoretical approach: Pinch-bounded N-best solutions allows positional swapping,” *Energy*, vol. 283, no. January, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129029.

[3] J.-C. Bonhivers, E. Svensson, M. V Sorin, T. S. Berntsson, and P. R. Stuart, “Energy transfer diagram for site-wide analysis and application to a kraft pulp mill,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 547–560, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.045.

[4] F. Sadeghian Jahromi and M. Beheshti, “An extended energy saving method for modification of MTP process heat exchanger network,” *Energy*, vol. 140, pp. 1059–1073, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.09.032.

[5] J. C. Bonhivers, M. Korbel, M. Sorin, L. Savulescu, and P. R. Stuart, “Energy transfer diagram for improving integration of industrial systems,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 468–479, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.046.

[6] A. Mosadeghkhah and M. Beheshti, “Heat flow diagram as an extension of bridge retrofit method to save energy in heat exchanger networks,” *Appl. Energy*, vol. 267, no. October 2019, p. 114971, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114971.

[7] N. S. Lal, T. G. Walmsley, M. R. W. Walmsley, M. J. Atkins, and J. R. Neale, “A novel Heat Exchanger Network Bridge Retrofit method using the Modified Energy Transfer Diagram,” *Energy*, vol. 155, pp. 190–204, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.019.

[8] T. G. Walmsley, M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley, and J. R. Neale, “Appropriate placement of vapour recompression in ultra-low energy industrial milk evaporation systems using Pinch Analysis,” *Energy*, vol. 116, pp. 1269–1281, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.026.