بهینه سازی سیستم بازیافت انرژی در واحد اسید سولفوریک مجتمع پتروشیمی رازی

محمد حسن پنجه شاهی - فروغ فاطمی

دانشکدهٔ فنی - دانشگاه تهران

چکیده

نظر به افزایش روز افزون ارزش انرژی و اهمیت بازیافت بهینه انرژی حرارتی در صنایع مختلف، در این مقاله چگونگی بهبود بازیافت انرژی حرارتی در واحد تولید اسید سولفوریک مجتمع پتروشیمی رازی بررسی شده است. برای این منظور، پس از آشنایی با فرآیند تولید اسید سولفوریک ، شبکه مبدلهای حرارتی موجود در واحد با استفاده از ابزارهای تکنولوژی پینچ و تحلیل اکسرژی واحد بطور کمی و کیفی بررسی شده است. سپس روشی برای بهبود بازده عمل انتقال حرارت در شبکه مبدلها پیشنهاد شده که عبارتست از افزایش دما و فشار بخار تولید شده در واحد و استفاده از آن برای تولید انرژی الکتریکی . مقایسه ارزش انرژی الکتریکی تولید شده با میزان سرمایه لازم برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی نشان می‌دهد که سرمایه مصرف شده پس ازمدت زمان ۲۶ ماه بازگشت می‌شود و پس از آن در هر سال معادل ۱/۵۶ میلیون دلار صرفه جویی در هزینه برق مجتمع به همراه خواهد داشت.

کلید واژه‌ها: *فن آوری پینچ، منحنی های مرکب، طراحی اصلاحی، آنالیز اکسرژی*

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

مقدمه

الف – آشنایی با فرآیند تولید اسید سولفوریک

واکنشهای اصلی که در طی این فرآیند انجام می شوند عبارتند از:

۱- سوختن گوگرد

$S + O_2 \rightarrow SO_2$

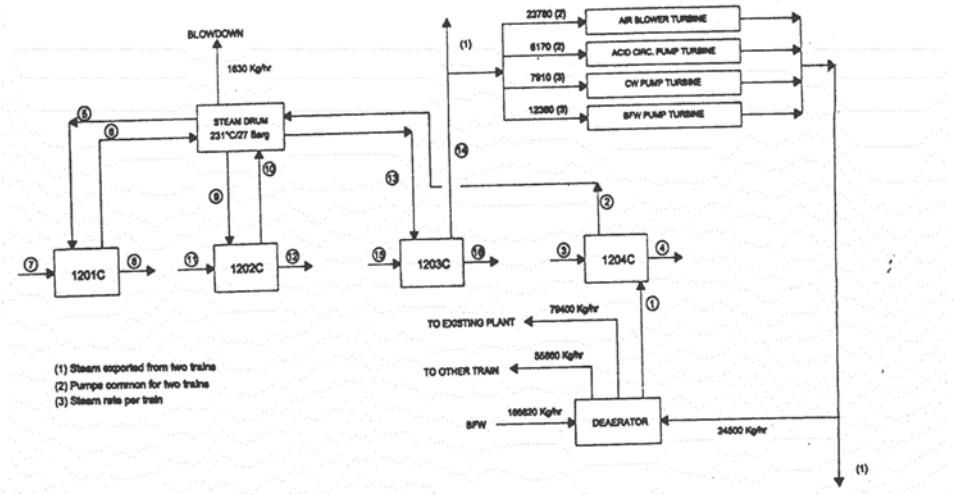
۲- اکسیداسیون SO_2

$SO2 + ½ O2 \rightarrow SO_3$

۳- تولید اسید سولفوریک

$SO3 + H2O \rightarrow H_2SO_4$

گازهای حاصل از واکنشهای فوق به علت گرمازا بودن واکنشها درجه حرارتهای بالایی دارند و برای رسیدن به دمای مناسب ورود به تجهیزات پایین دست، در یک شبکه از مبدلهای حرارتی خنک می شوند. شکل ۱ نمودار ساده شده شبکه مبدلهای حرارتی واحد اسید سولفوریک را نشان می‌دهد که مشخصات آن در جدولهای ۱ و ۲ خلاصه شده است.



شکل ۱- نمودار حرارتی ساده شده واحد اسید سولفوریک

جدول ۱- مشخصات جریانهای گرم واحد

Stream NO.	Exchanger Tag NO.	T_s (°C)	T_t (°C)	M° (Kg/hr)	C_P (KJ/Kg.° C)	ΔH (MW)
۷	۱۲۰۱ C	۱۰۵۰	۴۴۰	۱۱۵،۲۰۵	۱/۰۸۳	۲۱/۱۳
۱۱	۱۲۰۲ C	۶۰۰	۳۸۷	۱۰۱،۳۴۵	۱/۰۴۱	٦/۲۷
۱۵	۱۲۰۳ C	۵۲۰	۴۵۳	۱۴۲،۴۱۸	۱/۰۴۱	۲/٦۷
۳	۱۲۰۴ C	۴۲۹	۲۰۰	۱۵۴،۷۲۱	۱/۰۱۲	۹/۹۹

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

جدول ۲- مشخصات جریانهای سرد واحد

Stream NO.	Exchanger Tag NO.	T_s (°C)	T_t (°C)	M° (Kg/hr)	C_P (KJ/Kg.° C)	ΔH (MW)
٥	١٢٠١ C	٢٣١	٢٣١	٤١,٥٣٠	∞	٢١/١٣
٩	١٢٠٢ C	٢٣١	٢٣١	١٢,٧٠٠	∞	٦/٢٧
١٣	١٢٠٣ C	٢٣١	٢٩٠	٥٤,٢٣٠	٣/٠٠٤	٢/٦٧
١	١٢٠٤ C	١٠٠	٢٣١	٥٥,٨٦٠	٤/٩١٥	٩/٩٩

مشاهده می شود که گازهای داغ فرآیندی، در چهار مبدل حرارتی توسط جریان پیوسته آب خنک می‌شوند و در این انتقال حرارت، آب ١٠٠°C به بخار ٢٥/٣Barg/ ٢٨٨°C تبدیل می‌شود قسمت اعظم بخار برای تولید کار محوری وارد توربینهای پمپهای واحد می شود و باقیمانده آن در سایر واحدهای مجتمع به مصرف می‌رسد.

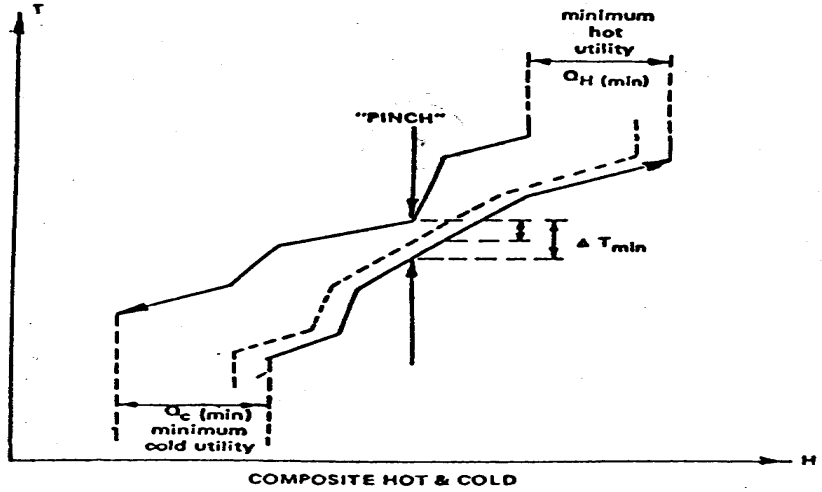
به منظور مطالعه بازده عمل انتقال حرارت در شبکه مزبور، بعضی از ابزارهای تکنولوژی پینچ بکار گرفته شده‌اند که بخش بعد به معرفی آنها می‌پردازد.

ب – آشنایی با تکنولوژی پینچ

در طی دو دهه اخیر، تکنولوژی پینچ به عنوان روشی مفید برای بررسی بازده شبکه‌های مبدلهای حرارتی شناخته شده است. استفاده از قوانین و روابط محاسباتی تکنولوژی پینچ که بر مبنای مفاهیم ترمودینامیکی بدست آمده‌اند، روش مناسبی برای طراحی شبکه‌های جدید (طراحی مبنا) و همینطور اصلاح شبکه‌های موجود (طراحی اصلاحی) می‌باشد. تکنولوژی پینچ برای انجام مراحل مختلف این طراحی‌ها، ابزارهای سودمندی دارد که یکی از آنها منحنی مرکب است.

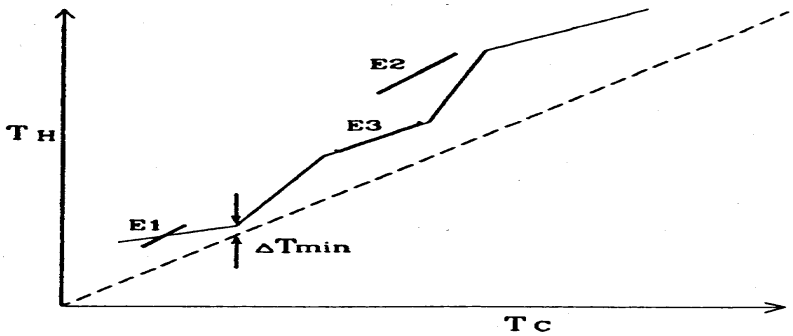
شکل ٢ نمونه یک منحنی مرکب را نشان می‌دهد. فاصله عمودی بین منحنی‌های مرکب گرم و سرد بیانگر نیروی محرکه دمایی و کمترین اختلاف دمایی بین دو منحنی مرکب (ΔT_{min})، نشان دهنده نقطه پینچ است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]



شکل ۲- نمونه منحنی های مرکب

کمترین سطح تبادل حرارت در شبکه زمانی بدست می آید که جریانهای گرم و سرد در هر محدوده دمایی بطور عمودی تبادل حرارت کنند. برای بررسی وجود انتقال حرارت عمودی در مبدلها از منحنی رانش استفاده می‌شود که از ترسیم دمای جریانهای گرم و سرد بر حسب یکدیگر به کمک منحنی مرکب بدست می آید و مبنای اصلاح مبدلهای موجود شبکه است. شکل ۳ نمونه یک منحنی رانش را نشان می دهد.



شکل ۳- نمونه منحنی رانش (DFP)

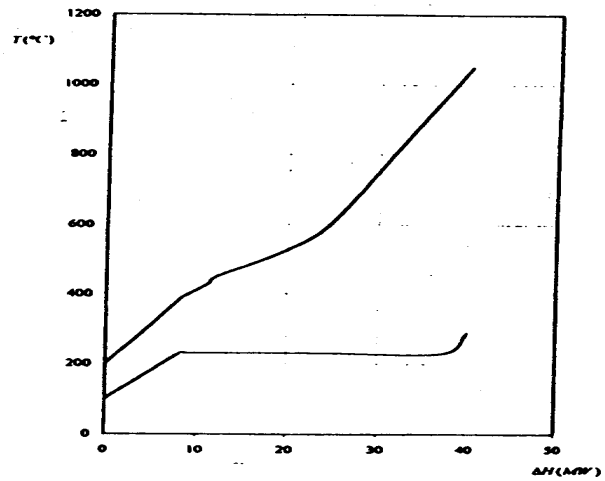
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

عملکرد هر مبدل به صورت یک خط راست بر روی این منحنی نشان داده می‌شود چنانچه خط عملکرد مبدل و منحنی رانش بر هم منطبق باشند یا انطباق خوبی داشته باشند موقعیت مبدل از نظر نیروی رانش خوب است، در غیر این صورت مبدل باید جابجا شود.

تنظیم اطلاعات واحد اسید سولفوریک

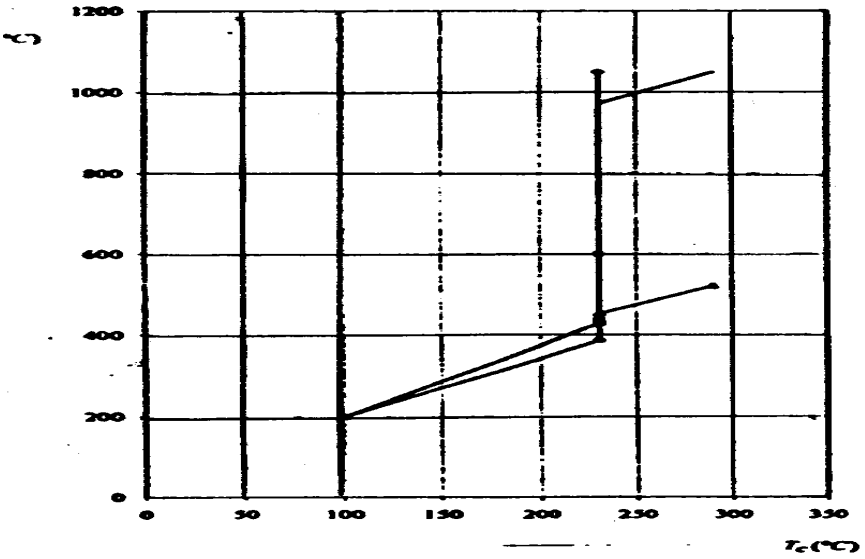
شکل ٤ منحنی‌های مرکب شبکه مبدلهای واحد اسید سولفوریک را نشان می‌دهد که بر اساس اطلاعات موجود در جدولهای ۱ و ۲ رسم شده است. مشاهده می شود که ΔT_{min} در این شبکه برابر ۱۰۰ °C است و در منتهی الیه سمت چپ قرار دارد در نتیجه جریانهای گرم و سرد در قسمت سمت راست فاصله زیادی از یکدیگر دارند که بیانگر وجود نیروی رانش بزرگی در شبکه مبدلها است.

شکل ٥ نیز منحنی نیروی رانش شبکه را نشان می‌دهد که در آن، مبدلهای ۱۲۰۱C و ۱۲۰۳C از نظر انطباق با منحنی رانش بدترین وضعیت را دارند. به منظور برآورد کمی بازده شبکه موجود در انجام عمل انتقال حرارت از روش تحلیل اکسرژی(Exergy Analysis) استفاده شده که در بخش بعد معرفی شده است.



شکل۴- منحنی های مرکب واحد اسید سولفوریک

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]



شکل ۵- منحنی رانش واحد اسید سولفوریک

معرفی مفهوم اکسرژی

براساس قانون اول ترمودینامیک، مجموع انواع مختلف انرژی درطی انجام یک فرآیند ثابت می ماند و انرژیها فقط از نوعی به نوع دیگر تبدیل می شوند. این در حالی است که تجربه نشان می‌دهد در تبدیل انواع مختلف انرژی به یکدیگر محدودیتهایی وجود دارد یا به عبارت دیگر، انرژیها علاوه بر مقدار، دارای کیفیت یا پتانسیل انجام کار مفید هستند که اکسرژی نامیده می‌شود. طبق تعریف، اکسرژی یک مقدار معین انرژی عبارتست از حداکثر کار مفیدی که می‌توان در یک سیستم ایده‌آل از آن انرژی تولید کرد.

در مبدلهای حرارتی، جریان گرم که با کاهش دما مواجه است اکسرژی خود را از دست می‌دهد و منبع اکسرژی نامیده می‌شود. بطور متقابل، جریان سرد که اکسرژی جریان گرم را می‌گیرد چاله اکسرژی نامیده می‌شود. با وجود انتقال کامل انرژی بین جریانها در مبدل، انتقال اکسرژی بین دو جریان هرگز کامل نیست و بخشی از اکسرژی جریان گرم که به جریان سرد منتقل نمی‌شود اتلاف اکسرژی نامیده می‌شود.

محاسبات ساده ترمودینامیکی نشان می‌دهد که اتلاف اکسرژی برابر است با حداکثر مقدار کاری که قابل تولید بوده ولی در فرآیند هدر می رود.

تغییر اکسرژی جریانها چنانچه در دمای ثابت انجام شود (تغییر فاز) از رابطه ۱ محاسبه می شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

$$\Delta Ex = \Delta H(1-\frac{T_o}{T}) \qquad (۱)$$

برای جریانهایی که تغییر دما دارند با فرض ثابت بودن ظرفیت حرارتی می‌توان از رابطه ۲ استفاده نمود:

(۲)

$$\Delta Ex = \Delta H(1-\frac{T_o}{\Delta T_{1\Delta t}}), \Delta T_{1\Delta t} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\frac{T_2}{T_1}}$$

در دو رابطه اخیر، ΔH تغییر انتالپی جریان و T_o دمای محیط است. با استفاده از روابط فوق، اتلاف اکسرژی در مبدلهای موجود واحد محاسبه شده و در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳- اتلاف اکسرژی در مبدلها

شماره مبدل	اتلاف اکسرژی (MW)
۱۲۰۱ C	٦/۲۱
۱۲۰۲ C	۱/۲۸
۱۲۰۳ C	۰/٤٥
۱۲۰٤ C	۱/٦۲
مجموع	**۹/۵۶**

با توجه به مفهوم اکسرژی، می توان با نزدیک کردن فرآیندها به حالت ایده آل بخشی از اکسرژی تلف شده را بازیابی نمود. نزدیک کردن فرآیندها به حالت ایده‌آل مستلزم کاهش نیروی رانش است و برای رسیدن به این هدف باید اصلاحاتی در شبکه مبدلها ایجاد نمود.

روش بهبود بازیافت انرژی در شبکه

همانطور که اشاره شد برای بهبود عمل انتقال حرارت در شبکه لازم است که نیروی رانش دمایی کاهش یابد یا به عبارت دیگر، منحنی های مرکب به یکدیگر نزدیک شوند. از آنجا که دمای جریانهای گرم بر اساس نیازهای فرآیند تعیین شده و قابل تغییر نمی‌باشد منحنی مرکب گرم را نمی‌توان جابجا کرد، بنابراین باید منحنی مرکب سرد به طرف بالا منتقل شود. انتقال منحنی مرکب سرد به طرف بالا باعث افزایش دما و فشار بخار تولیدی می‌شود و با توجه به اینکه مجتمع نیازی به بخار داغ ندارد شرایط جدید بخار طوری تنظیم می‌شود که بتوان از آن برای تولید انرژی الکتریکی در یک سیستم توربین بخار و ژنراتور برق استفاده نمود. این شرایط با در نظر

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

گرفتن محدوده عملکرد توربینهای بخار صنعتی و انرژی موجود در جریانهای گرم، برابر Barg ۹۹/ ۵۰۰°C در نظر گرفته شده که باعث می شود میزان جریان بخار از Kg/hr ۵٤۲۳۰ به Kg/hr ٤٤۸۲۰ کاهش یابد. توجه به شکل ۷ (منحنی‌های مرکب جدید) نشان می‌دهد که شرایط جدید بخار تغییری در ΔT_{min} شبکه ایجاد نمی‌کند. شرایط بخار خروجی توربین نیز Barg ۲۵/۳ °C/ ۲۸۸ انتخاب می شود که همچنان برای تولید کار محوری در توربینهای پمپهای موجود قابل استفاده باشد.

محاسبه انرژی الکتریکی تولید شده

میزان انرژی الکتریکی تولید شده با محاسبه تغییرات انتالپی بخار در توربین بدست می‌آید. جدول بخار، انتالپی بخار ورودی و خروجی توربین را با توجه به شرایط آن به ترتیب برابر KJ/Kg ۳۳۷۳ و KJ/Kg ۲۹۷٦ نشان می دهد. بنابراین تغییر انتالپی بخار در توربین، KJ/Kg ۳۹۷ است که با ضریب بازدهی حدود ۰/۸ به انرژی مکانیکی تبدیل شده و به ژنراتور منتقل می شود. با توجه به اینکه بخار حاصل از هر دو ردیف واحدبه یک توربین وارد می‌شود. میزان انرژی الکتریکی تولید شده با فرض ضریب بازدهی ۰/۸۷ برای ژنراتور، برابر MW ۷/۵ خواهد بود

اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی

شکل ٦ نمودار حرارتی واحد را پس از اصلاح نشان می‌دهد که مشخصات آن در جدولهای ٤ و ٥ خلاصه شده است. مشاهده می شود که مسیر جریان آب در شبکه جدید برای ایجاد انتقال حرارت عمودی تغییر کرده و سه مبدل نیز برای تأمین سطح لازم به شبکه اضافه شده اند.

منحنی مرکب جدید در شکل ۷ رسم شده و منحنی مرکب سرد قدیمی برای مقایسه به صورت نقطه چین در آن نشان داده شده است. شکل ۸ منحنی رانش جدید را نشان می‌دهد که بیانگر انطباق مطلوبتر خطوط عملکرد مبدلها با منحنی رانش است. در شکلهای ۹ و ۱۰ نیز شبکه مبدلهای حرارتی (Grid) برای قبل و بعد از اصلاح واحد رسم شده است.

مقایسه سطح تبادل حرارت مبدلهای موجود و مبدلهای جدید که در جدولهای ٦ و ۷ ارائه شده اند بیانگر ۱۹٪ افزایش در سطح تبادل حرارت شبکه است که در مقابل آن، اتلاف اکسرژی در مبدلهای شبکه جدید ۳۳٪ کاهش یافته است. نتایج محاسبه اتلاف اکسرژی در مبدلهای شبکه جدید ۳۳٪ کاهش یافته است. نتایج محاسبه اتلاف اکسرژی در مبدلهای شبکه جدید در جدول ۸ خلاصه شده است.

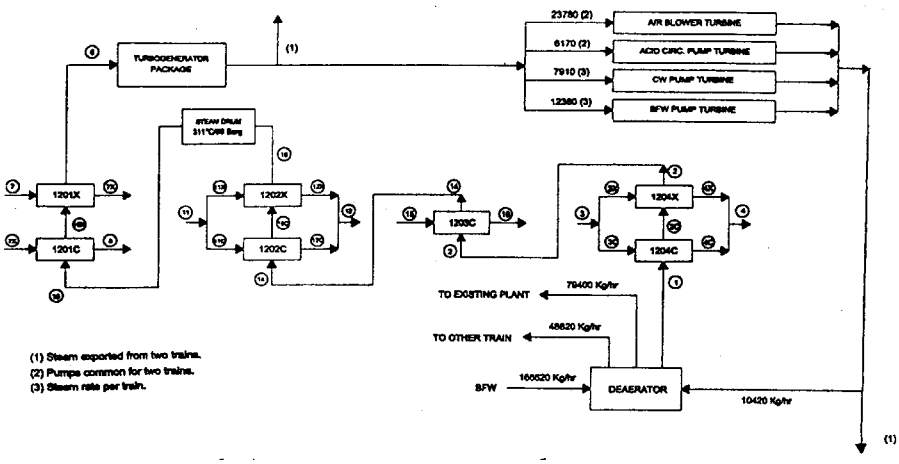
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

جدول ۴- مشخصات جریانهای گرم واحد پس از اصلاح

Stream NO.	Exchanger Tag NO.	T_s (ºC)	T_t (ºC)	m^o (Kg/hr)	C_P (KJ/Kg.º C)	ΔH (MW)
۳ C	۱۲۰٤ C	٤۲۹	۱۸۳	۱۰۸،۳۰۵	۱/۰۱٤	۷/٤۹٦
۳ X	۱۲۰٤ X	٤۲۹	۲٤۰	٤٦،٤۱٦	۱/۰۱۹	۲/٤۸٤
۱۵	۱۲۰۳ C	۵۲۰	٤۵۳	۱٤۲،٤۱۸	۱/۰٤۲	۲/۷٦۳
۱۱ C	۱۲۰۲ C	٦۰۰	۳۹۰	۵۰،٦۷۳	۱/۰٤۳	۳/۰۸۳
۱۱ X	۱۲۰۲ X	٦۰۰	۳۹۰	۵۰،٦۷۳	۱/۰٤٤	۳/۰۹۱
۷ C	۱۲۰۱ C	۷۵۰	٤٤۰	۱۱۵،۲۰۵	۱/۰٦۵	۱۰/۵۵٤
۷	۱۲۰۱ X	۱۰۵۰	۷۵۰	۱۱۵،۲۰۵	۱/۱۱۵	۱۰/۷۰۸

جدول ۵- مشخصات جریانهای سرد واحد پس از اصلاح

Stream NO.	Exchanger Tag NO.	T_s (ºC)	T_t (ºC)	M^o (Kg/hr)	C_P (KJ/Kg.º C)	ΔH (MW)
۱	۱۲۰٤ C	۱۰۰	۲۲۸	٤۸،۸۲۰	٤/۳۲۹	۷/٤۹٦
۲ C	۱۲۰٤ X	۲۲۸	۲٦۲	٤۸،۸۲۰	۵/۲۹٤	۲/٤۸٤
۲	۱۲۰۳ C	۲٦۲	۲۹۵	٤۸،۸۲۰	٦/۱۹۳	۲/۷٦۳
۱٤	۱۲۰۲ C	۲۹۵	۳۱۱	٤۸،۸۲۰	۷/۵۰۵	۳/۰۸۳
۱۰ C	۱۲۰۲ X	۳۱۱	۳۱۱	٤۸،۸۲۰	∞	۳/۰۹۱
۱۰	۱۲۰۱ C	۳۱۱	۳۱۱	٤۸،۸۲۰	∞	۱۰/۵۵٤
۱۰ C	۱۲۰۱ X	۳۱۱	۵۰۰	٤۸،۸۲۰	٤/۱٦۹	۱۰/۷۰۸



شکل ۶- نمودار حرارتی جدید واحد اسید سولفوریک

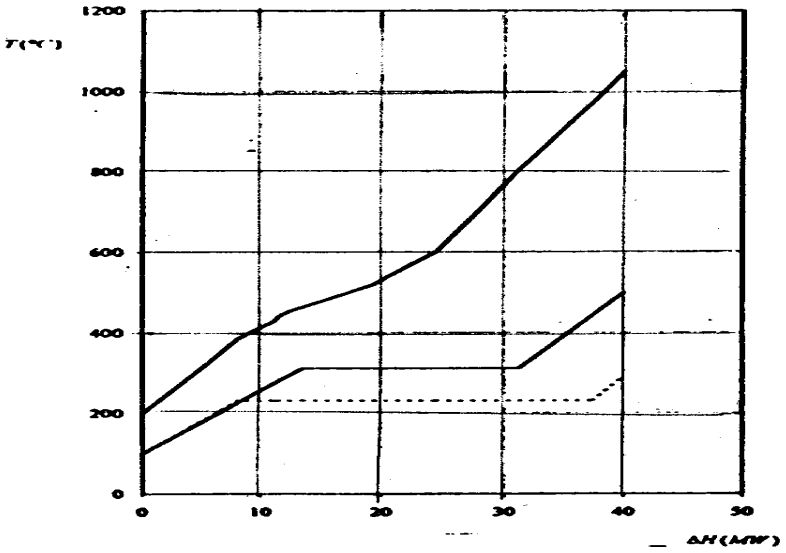
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

جدول ۶- سطح تبادل حرارت مبدلهای موجود

شماره مبدل	سطح تبادل حرارت (m^2)
۱۲۰۱ C	٥٤١
۱۲۰۲ C	۲۱۲
۱۲۰۳ C	٤١٤
۱۲۰٤ C	٤١١١

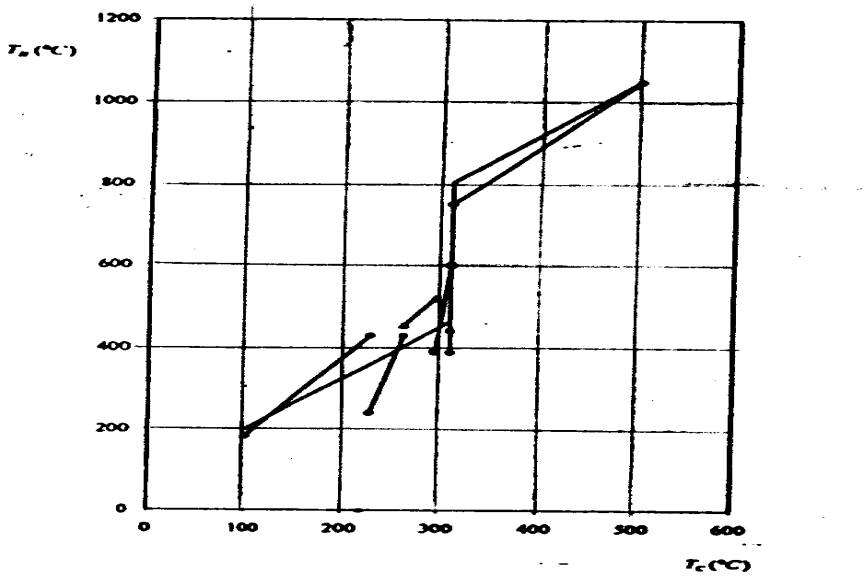
جدول ۷- سطح تبادل حرارت مبدلهای اضافه شده

شماره مبدل	سطح تبادل حرارت (m^2)
۱۲۰۱ X	٤٥٩
۱۲۰۲X	۲۱۲
۱۲۰٤X	۳۳۷

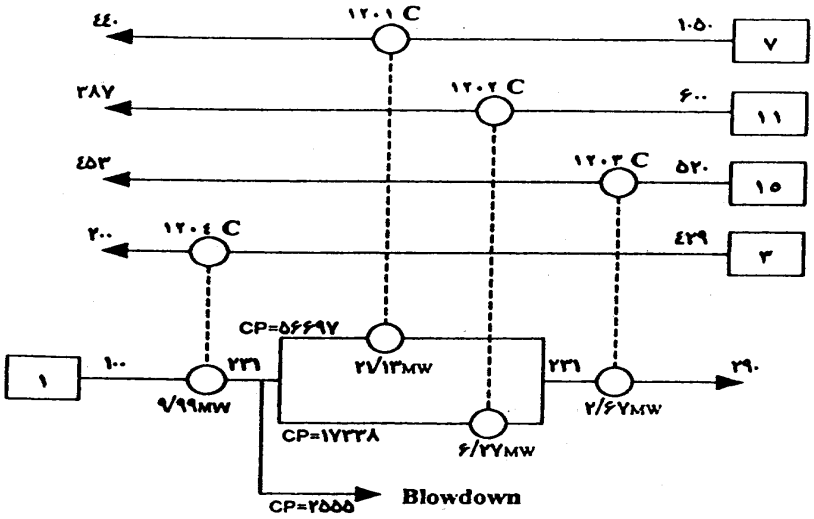


شکل ۷- منحنی های مرکب شبکه مبدلها پس از اصلاح

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

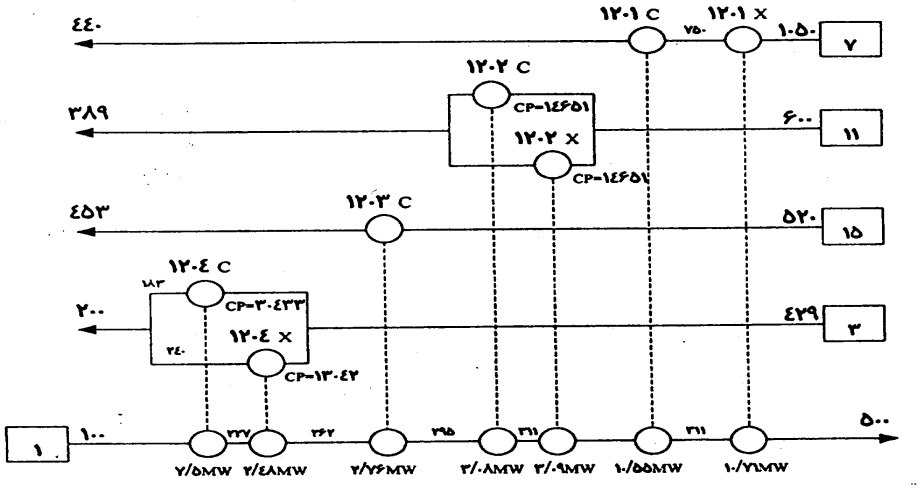


شکل ۸- منحنی رانش شبکه مبدلها پس از اصلاح



شکل ۹- شبکه مبدلهای حرارتی قبل از اصلاح

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]



شکل ۱۰- شبکه مبدلهای حرارتی بعد از اصلاح

جدول ۸- اتلاف اکسرژی در شبکه مبدلهای جدید

شماره مبدل	اتلاف اکسرژی (MW)
۱۲۰۱C	۱/۷۶
۱۲۰۱X	۲/۰۲
۱۲۰۲C	۰/٤
۱۲۰۲X	۰/۳۷
۱۲۰۳C	۰/٤۲
۱۲۰٤C	۱/۲٦
۱۲۰٤X	۰/۲
مجموع	**۶/۴۳**

برآوردهای اقتصادی

جدول ۹ هزینه اصلاح شبکه را به تفکیک قیمت تجهیزات خریداری شده نشان می‌دهد:

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

جدول ۹- قیمت تجهیزات خریداری شده

دستگاه	قیمت به دلار
مبدل X ۱۲۰۱	۱۰۱،۵۰۰
مبدل X ۱۲۰۲	۵۸،۲۰۰
مبدل X ۱۲۰٤	۸۰،۹۰۰
پوسته مبدل C ۱۲۰۱	٤،۰۰۰
پوسته مبدل C ۱۲۰۲	۲،٤۵۰
پمپ آب	۱۲۳،٦٤۰
مخزن بخار	۱۵۵،٦۰۰
بسته توربوژنراتور	$۲/۳ \times ۱۰^{٦}$

با توجه به این که واحد مورد مطالعه از دو ردیف مشابه تشکیل شده،تمام قیمتها غیر از هزینه بسته توربوژنراتور که برای دو ردیف مشترک است دو برابر می شود. به این ترتیب کل سرمایه لازم برای اصلاح واحد اسید سولفوریک معادل ۳/۳٦ میلیون دلار برآورد می شود که در مقابل آن، مقدار ۷/۵MW انرژی الکتریکی در مجتمع تولید می‌شود. با توجه به اینکه مجتمع پتروشیمی رازی برق را به قیمت ۷۸ ریال به ازای هر کیلووات ساعت از شبکه سراسری خریداری می‌کند ارزش انرژی الکتریکی تولید شده با فرض نرخ تسعیر ۳۰۰۰ ریال معادل ۱/۵٦ میلیون دلار در سال است که تعیین کننده میزان صرفه جویی درسال می‌باشد. براین‌اساس، سرمایه‌ای که برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی صرف می شود پس از ۲٦ ماه برگشت می‌شود و پس از آن در هر سال معادل ۱/۵٦ میلیون دلار صرفه جویی برای مجتمع به همراه خواهد داشت.

نتیجه گیری

در این مقاله، سیستم بازیافت انرژی در واحد اسید سولفوریک مجتمع پتروشیمی رازی به منظور یافتن روشی برای بهبود بازیافت حرارتی و کاهش هزینه‌ها مطالعه شد. استفاده‌از ابزارهای تکنولوژی پینچ و انجام آنالیز اکسرژی در

شبکه مبدلها نشان داد که گازهای داغ ناشی از واکنشهای گرمازای تولید اسید سولفوریک، توانایی تولید بخار را در شرایطی بهتر از آنچه که در حال حاضر تولید می شود دارند. شرایط جدید بخار طوری تنظیم شده است که بتوان با استفاده از یک سیستم توربین بخار و مولد برق، انرژی الکتریکی تولید نمود.

اصلاح شبکه مبدلها باعث شد با ۱۹٪ افزایش سطح تبادل حرارت، اتلاف

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

اکسرژی ۳۳٪ کاهش یابد و امکان تولید ۷/۵ مگاوات انرژی الکتریکی فراهم شود. برآوردهای اقتصادی نشان داد که سرمایه لازم برای اصلاح شبکه پس از حدود ۲۶ ماه برگشت می شود و پس از آن در هر سال معادل ۱/۵۶ میلیون دلار صرفه جویی به همراه خواهد داشت.

مراجع

1- Borges R.J. & Boillat R.E. "New H2SO4 Impacts". Abu Dhabi, October 1995
2- Engineering Data Book by the Gas Processors Suppliers Association (NGPA), 10 th Ed., 1987.
3- Goldstick R. & Thumann A., "Principles of Waste Heat Recovery", 1986
4- GTW Handbook (Gas Turbine World) , 1998-99
5- Linnhof B., "User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy" ,Institute of Chemical Engineers, England, 3rd Ed., 1984.
6- Linnhoff B. & Witherell W.D., "Pinch Technology and Guide Retrofit", Oil & Gas Journal, April 7, 1986.
7- Ludwing E.E., "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants", 2 nd Ed., Vol.3
8- Megyesy E.F., "Pressure Vessel Handnook", 6th Ed., 1983.
9- Peters M.S., & Timmerhaus K.D., "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", 3rd Ed., 1980.
10- Poelly G.T., Panjeh Shahi M.H. & Jegede F.O., "Pressure Drop Consideration in the Retrofit of HEN", Trans 1 Chem E, Vol. 68, Part A, May 1990.
11- Saunders E.A.D., "Heat Exchangers, Selection, Design and Construction", 1st Ed., 1988.
12- Siemens., "Power Engineering Guide", 1986.
13- Smith J.M.& Van Ness H.C., "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 4th Ed.
14- Tjoe T.N. & Linnhoff B., "Using Pinch Technology for Process Retrofit", Oil & Gas Journal, April & 1986.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]