

مدل دو گانه برای هدف یابی بازسازی فرایند، کاربرد به فرایند خمیر و کاغذ

چکیده

روش تحلیل نیازمندی های انرژی فرایند برای شناسایی روش های بازسازی فرایند در مرحله اولیه طراحی در کارخانه تلفیقی خمیر و کاغذ استفاده شده است. حداقل انرژی مورد نیاز (MER) فرایند با استفاده از مدل دو گانه محاسبه شد که نیاز ترمودینامیکی فرایند را از اجرای فناوری تفکیک می کند. فرصت های ریکاوری و بازیابی اکسرژی و انرژی برای بهبود تلفیق سیستم به یک فرایند بررسی شده است. روش هدف یابی بهینه سازی MILP برای شناسایی بهترین روش تبدیل انرژی و بهینه سازی تولید ترکیبی حرارت و برق (CHP) استفاده شده است. جایگزینی تزریقات بخار برای ترکیب مخازن با مبدل حرارت ها موجب کاهش MER تا 10 درصد و افزایش تولید ترکیب حرارت و برق با 1.7 ریب می شود. بهبود کارایی اکسرژی فناوری خشک سازی کاغذ، امری مشکل است با این حال نتایج نشان می دهد که این می تواند موجب افزایش بازدهی 12 درصدی برق بدون تغییر در MER یا حداقل انرژی مورد نیاز شود.

1-مقدمه

طراحی بهینه یک سیستم باید برای رفع نیاز های انرژی فرایند صورت بگیرد طوری که کم ترین هزینه را در پی داشته باشد. تحلیل پینچ (1)، یک فناوری بالغ است که با موفقیت برای طراحی شبکه های مبدل حرارتی (HEN) در طیف وسیعی از صنایع از جمله صنعت خمیر و کاغذ (2) به کار رفته است. در مرحله هدف یابی که قبل از طراحی HEN صورت گرفت، حداقل انرژی مورد نیاز برای گرم و سرد کردن همه جریان های فرایند همراه با خصوصیات کارکردی آن ها در ابتدا تعیین می شود. با این حال، روش پیشنهادی برای حل مسائل خاص مواجه شده هنگام تلاش برای افزایش کارایی مصرف انرژی یک فرایند فراتر از حداکثر ریکاوری حرارت داخلی که با اجرای HEN بهینه حاصل می شود مناسب نیست. به علاوه، این روش تنها به کاهش نیاز گرمایی رسیدگی می کند تا کاهش هزینه های انرژی فرایند.

قوانین اکتشافی برای اولین بار توسط توسعه دهنده گان تحلیل پینچ برای ارایه رهنمود هایی در خصوص انتخاب و تلفیق مناسب در تجهیزات تبدیل انرژی فرایند نظیر توربین ها و پمپ های حرارتی (3-4) پیشنهاد شدند در حالی که مفهوم منحنی های کامپوزیت متعادل (5-6) در این نوع کاربرد به تحلیل پینچ بسط داده شده است و جست و جوی سیستمی برای راه حل ها با توسعه الگوریتم های بهینه سازی سازگار ایجاد شده است (7). معرفی منحنی های کامپوزیت اکسرژی (8)، یک چشم انداز جدید را باری شناسایی و ارزیابی فرصت های بهبود فرایند از جمله تبدیل و ارتقای انرژی ایجاد کرده است.

بیشینه سازی سرعت جریان ارزان ترین دستگاه، منجر به خلق نقاط پینچ (5-6) شده و لزوم تحلیل هم زمان شبکه های فرایند را تاکید می کند. روش های گرافیکی در صورتی که چرخه ها یا سیکل ها مد نظر باشد غیر عملی می باشد. روش بر اساس استفاده از روش های بهینه سازی (10-12-13) و مدل های گرافیکی متناظر (9)، توسط مارشال و کالیونتزف پیشنهاد شده است.

هزینه انرژی، یک فاکتور بسیار مهم در تولید خمیر و کاغذ است (16) و صنعت تلاش های زیادی را برای کاهش آن طی چندین سال سرمایه گذاری کرده است (17). بسته شدن سیستم، برای مثال استفاده مجدد از آب فراوری مازاد، استفاده از شبیه سازی و مشاهده (20-21) یا روش های بهینه سازی (22) مستلزم کاهش معنی داری در هزینه انرژی (18-19) بوده و پیش نیاز هر گونه پروژه بهینه سازی انرژی است. برای تحلیل انرژی، تحلیل پینچ به یک ابزار رایج تبدیل شده و تلاش های زیادی برای توسعه این روش به یک سری موارد خاص نظیر کاهش دما با ترکیب جریان فرایند (23-24) و یا بهینه سازی ترن های تبخیر گر صورت گرفته است. مدل سازی کارآمد و مفاهیم بهینه سازی در طراحی روش های مربوط به سیستم های واکنشی، ترکیب کارایی انرژی و نگرانی های زیست محیطی به کار گرفته شده است (15).

هدف این مطالعه، توسعه یک ابزار جدید بر اساس روش های تحلیل پینچ و بهینه سازی برای شناسایی و ارزیابی در سطوح تولید مطالعه، فرصت هایی برای کاهش هزینه های انرژی با بهبود تبدیل انرژی در فرایند است.

2. مطالعه موردی

این روش، به کارخانه نوسبرنت در کانادا اعمال شد. تولید ظاهری کارخانه، 1230 odt/d کاغذ با مواد خام 1060 odt/d خمیر ترمودینامیکی و 170 odt/d خمیر بدون مرکب در سایت تولید شد. نمودار جریان فرایند

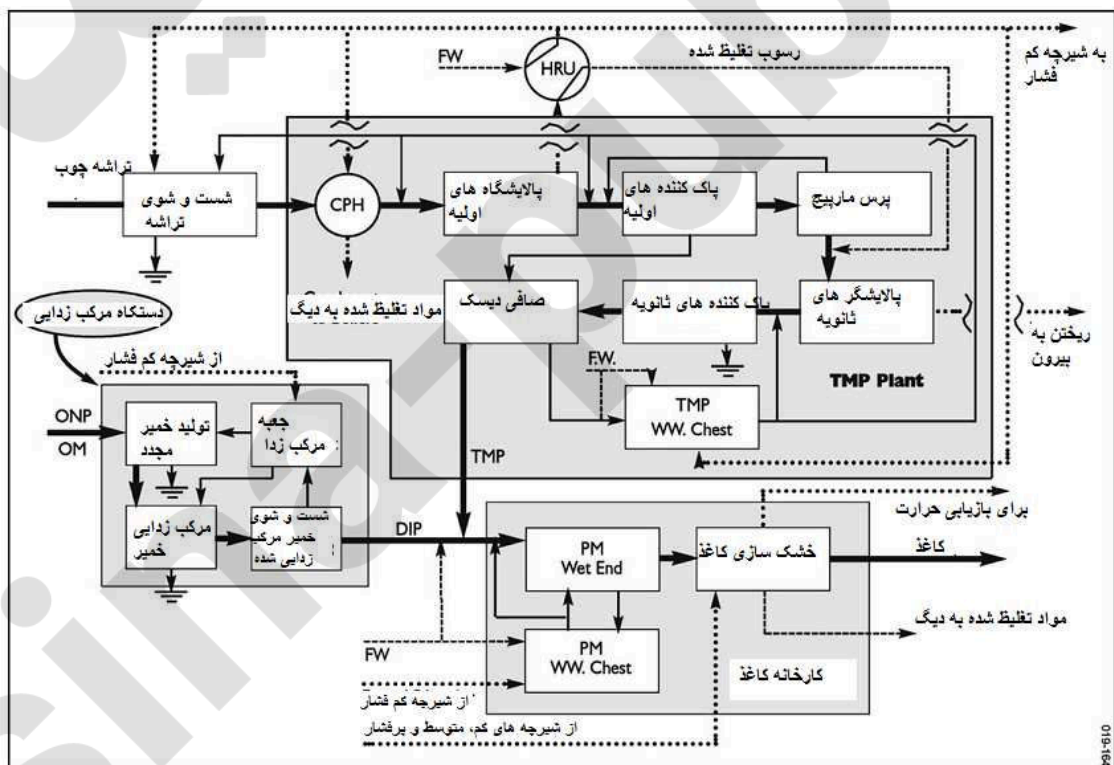
ساده در خصوص نیاز های بخار و آب شیرین در شکل 1 نشان داده شده است. حالت مرجع کارخانه بر اساس اطلاعات مربوط به منابع مختلف بود که با استفاده از نرم افزار VALI III (27) برای تولی مجموعه ای از بیلان های حرارت و جرم متعادل شد و خصوصیات جریان های فرایند گرم و سرد تعیین گردید.

بخار پر فشار (16.5 بار، 540 کلوین)، توسط توسط دیگ های جوشاننده بیوماس (بقایای چوبی) و گاز طبیعی تولید شد. این بخار به طور مستقیم برای بر طرف کردن نیاز های کارخانه استفاده شده و از طریق توربین ها و شیر چه ها به سطح کم فشار، تقسیم شد. MP (4.5 بار، 421 کلوین)، LP (3.4 بار، 415 کلوین)، و VLP (1.7 بار). همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، بخار به CPH، DIP، کارخانه تولید کاغذ و دیگر عملیات مختلف جهت دهی شد. بخار به یک کارخانه خاک اره ارسال شد. توربین ها تولید 2 مگاوات برق کردند در حالی که کارخانه 125 مگاوات خریداری کرد.

دو مورد از مهم ترین عملیات از نطقه نظر انرژی، پالایش تراشه های چوب و خشک سازی کاغذ بود.

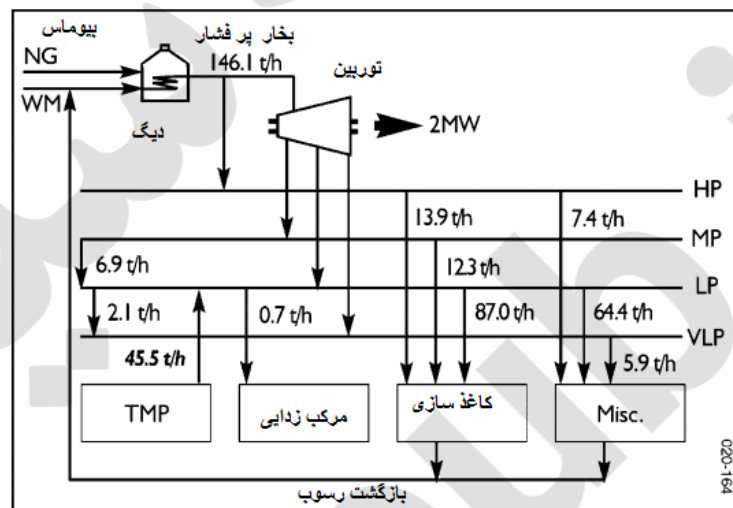
شکل 1: نمودار ساده شده جریان فرایند منبع: اختصارات: CPH: پیش گرمادهی تراشه، HRU: واحد ریکاوری

گرمایی، OM: مخازن قدیمی، ONP: نوسپرنت قدیمی PM: ماشین کاغذ



پالایش متشکل از تفکیک چوب به الیاف با قرار دادن تراشه ه بین دو دیسک با سرعت بسیار بالاست. این فرایندی است که نیاز به انرژی بالایی دارد. در کارخانه مورد مطالعه، پالایشگر هاف 83.7 مگاوات را مصرف می کنند. انرژی مکانیکی عرضه شده به پالایشگر ها به صورت گرما منتشر شده و آب سفید تزریق شده با تراشه ها را بخار می کند. در بیشتر کارخانه ها، مقدار گرمایی این بخار، از طریق مبادله حرارتی با آب شیرین در واحد ریکاوری گرما، بازیابی می شود (شکل 1)، زیرا حاوی آلاینده های چوبی بوده و به طور مستقیم نمی تواند استفاده شود. در مورد مرجع، بخار از پالایشگاه اصلی با فشار متوسط منتشر می شود ولی بعدا به LP یا کم فشار تبدیل می شود. بخار پالایشگاه ثانوی در حال حاضر ریکاوری نمی شود/

شکل 2: سیستم توزیع بخار مرجع.



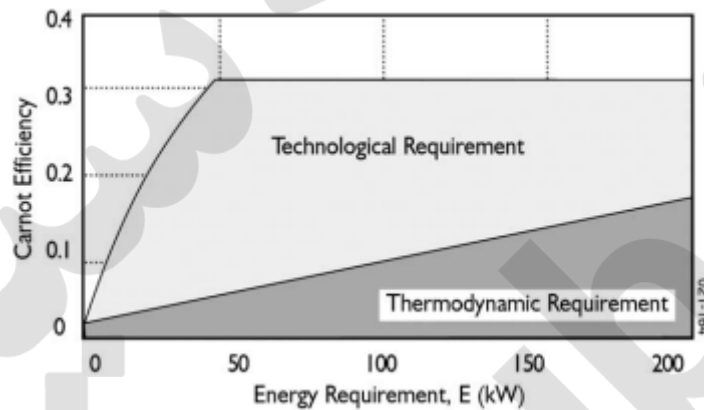
کاغذ در بخش نهایی ماشین با عبور ورقه های کاغذ در یک سری رول های فولادی تحت بخار خشک می شود. بخار پر فشار در انتهای بخش خشک کننده استفاده میشود که در آن نیروی محرک زیادی نیاز می باشد و بخار کم فشار در آغاز استفاده شده و بخار با فشار متوسط در مراحل میانی استفاده می شود.

3- مدل سازی و نمایش نیاز های فناوری و ترمودینامیکی

تعریف صحیح دما و بار های حرارتی جریان های داغ و سرد در پروژه های تلفیق فرایند اساسی است (6). به همین دلیل، اولین گام (14) تعریف عملیات مورد نیاز برای تبدیل مواد خام به محصولات مطلوب است. با توجه به شرایط کار می توان به نیاز های گرم و سرد سازی پی برد. در این رابطه، MER در دو روش مختلف محاسبه می شوند. اولین مورد متشکل از تعیین پروفیل های دمایی جریان های فرایندی است که موجب پیشینه سازی

اکسرژی عرضه شده توسط جریان داغ شده و اکسرژی مورد نیاز توسط جریان های سرد به حداقل می رسد. دومین مورد (نیاز فناوری) در نظر گرفتن تجهیزات مورد نیاز برای تبدیل جریان ها به گرمای فراوری مفید است. این دو روش، تولید یک بیلان انرژی یکسان با پروفیل دمایی متفاوت می کند. شکل منحنی کامپوزیت از یک مدل به مدل دیگر متفاوت است. مثال این مدل دو گانه در شکل 3 برای سهولت پیش حرارت دهی آب با تزریق بخار نشان داده شده است. نیاز ترمودینامیکی مربوط به پیش گرما دهی آب از حالت اولیه به حالت هدف است در حالی که نیاز فناوری مربوط به تولید جریان تزریق شده است. سطح بین دو منحنی کامپوزیت اکسرژی متناظر به کاهش اکسرژی حرارتی به دلیل اجرای فناوری عملیات است.

بخش زیر به بحث در خصوص مدل دوگانه انواع خاصی از عملیات در کارخانجات خمیر و کاغذ می پردازد.

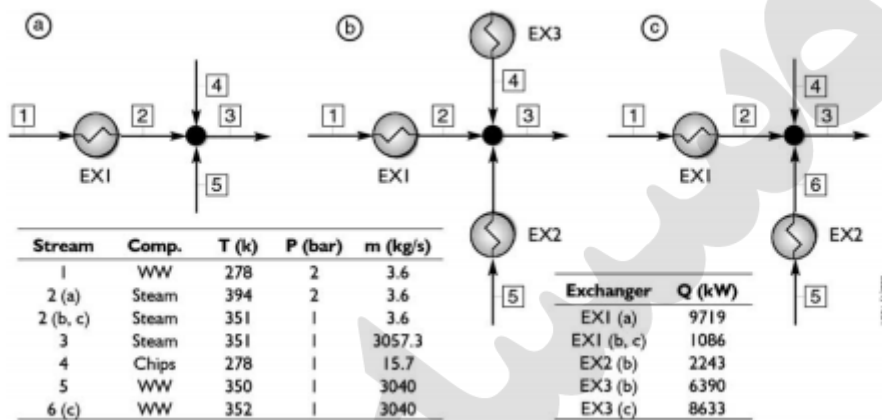


شکل 3: منحنی های کامپوزیت اکسرژی برای گرمادهی با تزریق بخار

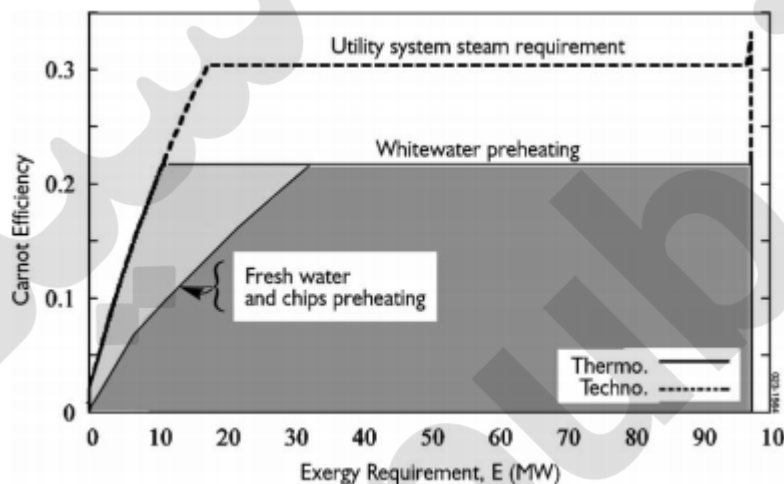
1-3 پیش گرمادهی با تزریق بخار

عملیات شست و شوی تراشه و سه مخزن اصلی آب سفید به طور مستقیم توسط تماس مستقیم با بخار گرمادهی می شوند (شکل 1). این بخار باید توسط شبکه کاهش یابد زیرا به دیگ به صورت رسوب بر نمی گردد. نیاز ترمودینامیکی توسط دو بخار سرد به منظور جدا سازی تبادل گرمایی از تبادل حرارتی تعریف می شود. اولین مدل نشان دهنده گرمای مورد نیاز برای افزایش دمای جریان فرایند به تانک دوار است. دومین جریان سرد نشان دهنده گرمای مورد نیاز برای افزایش اب جبرانی است که کامل کننده بیلان وزنی از محیط به شرایط در حال ترکیب مخزن است. نیاز فناوری یک جریان سرد متناظر با تولید بخار از دمای آب از جمله بخار آن در دمای ثابت است. داده ها در شکل 4 برای عملیات شست و شوی تراشه چوب نشان داده شده است. در مدل

ترمودینامیکی، ترکیب ایزوترمال یا هم دما فرض می شود و همه جریان های وارده به میکسر اول با دمای ترکیبی گرمادهی می شوند.



شکل 4: نیاز های فناوری و ترمودینامیکی برای شست و شوی تراشه چوب 1- فناوری 2- ترمودینامیکی



شکل 5: منحنی های کامپوزیت گرماد برای نیاز های اکسرژی فناوری و ترمودینامیکی برای شست و شوی تراشه های چوب

در این صورت، سوال امکان سنجی پیش گرمادهی هم زمان تراشه های چوب در یک مبدل حرارتی مطرح می شود. تعادل بین مدل های فناوری و ترمودینامیکی در بر گیرنده افزایش دمای آب سفید با مبادله حرارتی قبل از ترکیب آن با تراشه هاست (شکل 4). در این مدل، افت اکسرژی پایین تر بوده و نشان دهنده تغییر در راهبرد کنترل ترکیب نیست زیرا تزریق بخار برای کنترل دما حفظ می شود. منحنی های کامپوزیت اکسرژی این سه مدل در شکل 5 نشان داده شده است.

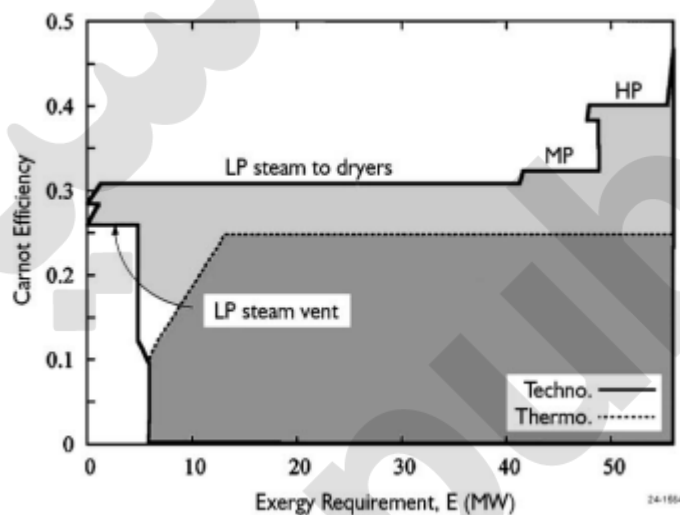
2-3 خشک سازی دستگاه کاغذی

دو نیاز ترمودینامیکی برای بخش خشک سازی ماشین تولید کاغذ وجود دارد:

پیش گرمادهی ورقه مرطوب، و تبخیر مقدار آب آن که از 58 درصد در ورودی بخش خشک کننده تا 8 درصد در کاغذ خروجی کاهش می یابد. نیاز های فناوری توسط تولید بخار از شرایط هواگیری آب به دمای بخار و سطوح فشار در غلطک های خشک کننده است. چون بخار به طور کامل در رول ها تصعید نمی شود، جریان های داغ برای نمایش امکان تصعید و خنک سازی بخار باقی مانده (حدود 15 درصد بخار وارده به رول ها) افزوده می شود. مقایسه دو مدل بر اساس منحنی کامپیوزیت اکسرژی در شکل 6 نشان داده شده است.

3-3 پالایشگاه های اولیه و ثانویه

از آن جا که بخار تولید شده توسط آب سفید در پالایشگاه ها به شبکه بخار باز نمی گردد، نیاز های ترمودینامیکی و فناوری به صورت بخار داغ تصعید شده و خنک شده با دمای محیط تعریف می شود.



شکل 6- مدل دو گانه GCC اکسرژی برای بخش خشک سازی کاغذ

4-تلفیق سیستم تبدیل انرژی

مدل دو گانه نیاز های انرژی را می توان در پروژه های باز سازی برای شناسایی عملیاتی که باید به منظور کاهش هزینه های انرژی اصلاح شود استفاده کرد. دو سطح ذخیره سازی انرژی را می توان در نظر گرفت: کاهش MER و بیشینه سازی تولید ترکیبی برق و حرارت (کاهش تلفات اکسرژی). شناسایی سود آورترین گزینه با روش های گرافیکی ناشی از ماهیت ترکیبی مسئله صورت می گیرد. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی نشان داده شده در 13 و 28، امکان تعیین تلفیق بهینه سیستم تبدیل انرژی با کمینه سازی مصرف سوخت و برق و بیشینه سازی

تولید CHP وجود دارد. سرعت جریان بهینه در سیستم تبدیل انرژی را می توان محاسبه کرد. مدل دوگانه در این رویکرد تلفیق می شود. فرض بر این است که فرایند توسط مجموعه ای از عملیات تعریف می شود و این که هر فرایند با مجموعه ای از جریان های گرم و سرد تعریف می شود. متغیر صحیح Y_{oi} نشان دهنده انتخاب گزینه i است. فرمولاسیون مسئله در پیوست الف نشان داده شده است. برای هر یک از گزینه ها، هزینه اجرای C_{oi} نیز باید معرفی شود. مقدار C_{oi} زمانی صفر است که گزینه مورد مرجع حفظ شده و یا هزینه سرمایه سالانه پیکر بندی باز سازی شده در نظر گرفته شود. با استفاده از عامل محدود کننده صحیح (14)، مجموعه ای از گزینه ها به طور سیستماتیک تولید شده و با هزینه انرژی مقایسه می شود.

5- تشریح فرایند خمیر و وکاغذ

جدول 1، خصوصیات جریان های گرم و سرد را برای نیاز های ترمودینامیکی و فناوری هر یک از عملیات مصرف انرژی اصلی را در فرایند نشان می دهد که همین موضوع در شکل 1 نیز نشان داده شده است. مصرف بخار برای دمیدن و حرارت دهی کلی به نیاز های فرایند استفاده شده و مصرف هوا زدا به صورت بخشی از مدل شبکه بخار استفاده می شود. بخار پالایشگاه ثانویه ریکاوری خواهد شد.

Table 1
Thermodynamic and technological requirements

| Dual representation | Stream type | T_{in} (K) | T_{out} (K) | $m \cdot C_p$ (kW/K) | Q (MW) | P (bar) |
|--|-------------|--------------|---------------|----------------------|----------|-----------|
| <i>Wood chip washing</i> | | | | | | |
| Thermo. (chips) | Cold | 278 | 351 | 31 | 2.2 | — |
| Thermo. (WW) | Cold | 350 | 351 | 13,595 | 6.4 | — |
| Thermo. (makeup) | Cold | 278 | 351 | 15 | 1.1 | — |
| Techno. | Cold | 278 | 394 | Water | 9.7 | 2.05 |
| <i>Preheat before primary refiners</i> | | | | | | |
| Thermo. | | 351 | 388 | 251 | 9.4 | — |
| Techno. | | 394 | 408 | Water | 9.4 | 2.05 |
| <i>Preheat before secondary refiners</i> | | | | | | |
| Thermo. (makeup) | Cold | 278 | 362 | 116 | 9.8 | — |
| Thermo. (pulp) | Cold | 324 | 362 | 60 | 2.3 | — |
| Techno. | Cold | 278 | 382 | Water | 12.1 | 1.40 |
| <i>TMP whitewater tank</i> | | | | | | |
| Thermo. (FW) | Cold | 278 | 321 | 591 | 25.7 | — |
| Thermo. (makeup) | Cold | 278 | 321 | 32 | 1.4 | — |
| Thermo. (WW) | Hot | 324 | 321 | 2576 | 6.5 | — |
| Techno. | Cold | 278 | 373 | Water | 20.6 | 1 |
| <i>Drinking whitewater tank</i> | | | | | | |
| Thermo. (FW) | Cold | 308 | 313 | 70 | 0.3 | — |
| Thermo. (WW) | Cold | 313 | 313 | 950 | 0.2 | — |
| Thermo. (makeup) | Cold | 278 | 313 | 1 | 0.03 | — |
| Techno. | Cold | 278 | 417 | Water | 0.5 | 3.43 |
| <i>Paper machine whitewater tank</i> | | | | | | |
| Thermo. (FW) | Cold | 288 | 308 | 1004 | 20.2 | — |
| Thermo. (makeup) | Cold | 278 | 308 | 23 | 0.7 | — |
| Thermo. (WW) | Hot | 309 | 308 | 4768 | 5.8 | — |
| Techno. | Cold | 278 | 417 | Water | 15.1 | 3.43 |
| <i>Drying section</i> | | | | | | |
| Thermo. (heating) | Cold | 309 | 363 | 42 | 2.2 | — |
| Thermo. (drying) | Cold | 309 | 373 | Water | 48.8 | 1.01 |
| Techno. | | | | | | |
| LP level | Cold | 323 | 417 | Water | 47.6 | 3.43 |
| MP level | Cold | 323 | 421 | Water | 8.7 | 4.46 |
| HP level | Cold | 323 | 540 | Water | 10.7 | 16.52 |
| LP level | Hot | 394 | 323 | Water | 10.2 | 2.03 |
| MP level | Hot | 407 | 323 | Water | 2.3 | 3.06 |
| HP level | Hot | 472 | 323 | Water | 3.5 | 15.12 |
| <i>Conventional representation</i> | | | | | | |
| Primary refiners | Hot | 421 | 298 | Water | 73.7 | 4.46 |
| Secondary refiners | Hot | 373 | 298 | Water | 14.3 | 1.00 |
| Secondary refiners | Hot | 388 | 298 | Water | 7.5 | 1.70 |
| Heating | Cold | 323 | 417 | Water | 30.1 | 3.43 |
| Soot blowing | Cold | 278 | 540 | Water | 6.0 | 16.52 |

جدول 1 نیاز های ترمودینامیکی و فناوری

1-5 هدف حداقل نیاز انرژی

شکل 7 به مقایسه منحنی های کامپوزیت اصلی GCC نیاز های ترمودینامیکی و فناوری می پردازد. نیاز های ترمودینامیکی، یک شیوه کارایی اکسرژی بهینه برای انتقال حرارت است. این نشان می دهد ک تجهیزات فراوری را می توان طوری تغییر داد که پروفیل دمای حداقل برای همه عملیات با مدل دو گانه تغییر می یابد. GCC شکل 7 الف نشان می دهد که این خود متناظر با مسئله آستانه است که در آن فرایند نیاز به حرارت دارد. MER حرارت دهی حدود 78.9 MW می باشد. بر عکس، نیاز های فناوری ممکن است حداقل نیاز به تغییرات تجهیزات فرایند نداشته باشد. شکل 7 ب نشان می دهد که نقطه پینچ در 370 کلوین قرار دارد (نیاز خنک کنندگی بخار پالایشگاه ثانویه). این خود متناظر با افت انرژی 4.2 MW است زیرا اجرای فناوری، تولید انتقال

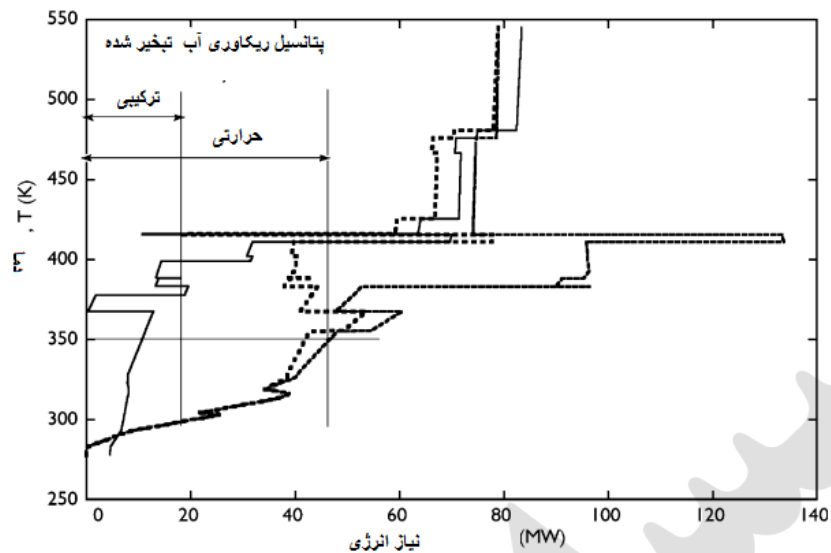
انرژی از طریق نقطه پینچ می کند. برای اجتناب از افت، تجهیزات فراوری باید اصلاح شوند. شکل 9، منحنی های کامپوزیت سرد و گرم نیاز های فناوری و ترمودینامیکی را نشان می دهد. مساحت بین منحنی کامپوزیت و محور های افقی، نشان دهنده اکسرژی مورد نیاز توسط جریان های فراوری است. منحنی های کامپوزیت اکسرژی در قطب دمای تصحیح شده نشان داده شده است و این نشان می دهد که افت اکسرژی ناشی از تعریف $\Delta T_{min}/2$ ، قابل قبول است.

شکل 7: GCC الف: نیاز های ترمودینامیکی و ب: نیاز های فناوری کارخانه کاغذ سازی. ا: شست و شوی تراشه، cPH، مخازن WW، ا: مخازن WW، تصفیه فاضلاب، کارخانه خاک اره، حرارت دهی کلی جدول 2، MER، مصرف سوخت، کارایی حاشیه ای تولید برق

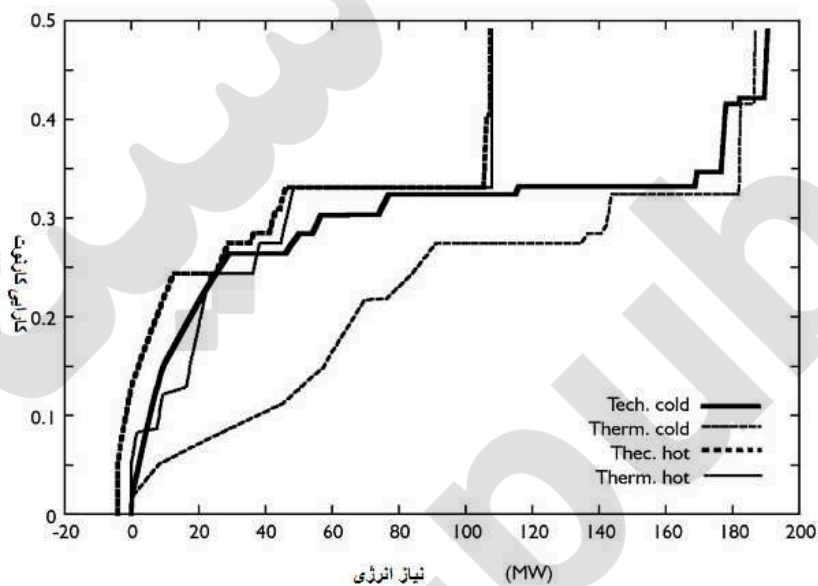
| ترکیبی | حرارتی | فناوری | t جریان | واحد ها |
|--------|--------|--------|---------|-----------|
| 78.9 | 78.9 | 83.0 | - | MW |
| 0 | 0 | 4.2 | - | MW |
| 10.11 | 10.11 | 10.65 | - | CHP |
| 0 | 0 | 0 | - | بیوماس |
| 0 | 0 | 0 | - | گاز طبیعی |
| 12.216 | 12.216 | 12.216 | 12.216 | kg/s |
| 0.1432 | 0.2256 | 0.0182 | 0.7870 | kg/s |
| 95.3 | 95.3 | 95.3 | 95.3 | MW |
| 6.4 | 10.1 | 0.8 | 35.4 | MW |
| 101.7 | 105.4 | 96.1 | 130.7 | MW |
| 21.9 | 24.8 | 12.7 | 2.4 | MW |
| 95.9 | 93.4 | 96.9 | - | % |

وقتی منحنی های کامپوزیت سرد و گرم هم پوشانی داشته باشند مساحت بین آن ها، نشان دهنده پتانسیل تولید تلفیقی حرارت و برق است. از این تحلیل، روش هدف برای باز سازی فرایند، موسوم به پیکر بندی ترکیبی است. این خود شامل جایگزینی تزریقات بخار توسط مبدل های حرارتی بدون اصلاح بخش خشک سازی کاغذ است. در مقایسه با نیاز های ترمودینامیکی، GCC شیوه ترکیبی نشان می دهد که این روش مستلزم افت انرژی نیست. تفاوت اصلی بین دو پیکر بندی، اکسرژی مورد نیاز برای تولید CHP است.

شکل 8-GCC برای سه مدل نیاز انرژی فرایند



شکل 9: منحنی های کامپوزیت اکسرژی گرم و سرد برای نمایش دو گانه نیاز فرایند



2.5. یابی تلفیق فناوری های تبدیل انرژی

یک سیستم تولیدی شامل دیگ های بیوماس و گاز طبیعی بوده و دارای یک سری توربین ها برای تولید بخار در سطوح فشار مختلف و تولید ترکیبی برق مکانیکی است. هزینه ها، مقادیر حرارت پایین LHV و قابلیت دسترسی به سوخت (بیوماس و گاز طبیعی) و نیز قیمت های فروش و خرید برق در جدول 3 نشان داده شده است. برای بهبود تولید CHP، دو سطوح فشاری جدیدی پیشنهاد می شود: هدر کم فشار 0.15 بار و هدر

پر فشار فوق حرارت دهی شده 62 بار. با این طرح (جدول 4)، تولید برق مکانیکی می تواند به حداکثر برسد در حالی که بخار اشباع شده را می توان برای رفع نیاز های حرارتی پایین دمای استفاده کرد.

جدول 3: هزینه های سوخت و برق

| منبع | مقدار حرارت پایین | قابلیت دسترسی | هزینه |
|-----------------|-------------------|---------------|-------|
| گاز طبیعی | 44,945 | No limit | 4.32 |
| بیوماس | 7801 | 43.9 | - |
| هزینه خرید بره، | - | No limit | 15 |
| هزینه فروش برقی | - | No limit | 11.4 |

جدول 4 تعریف شبکه بخار

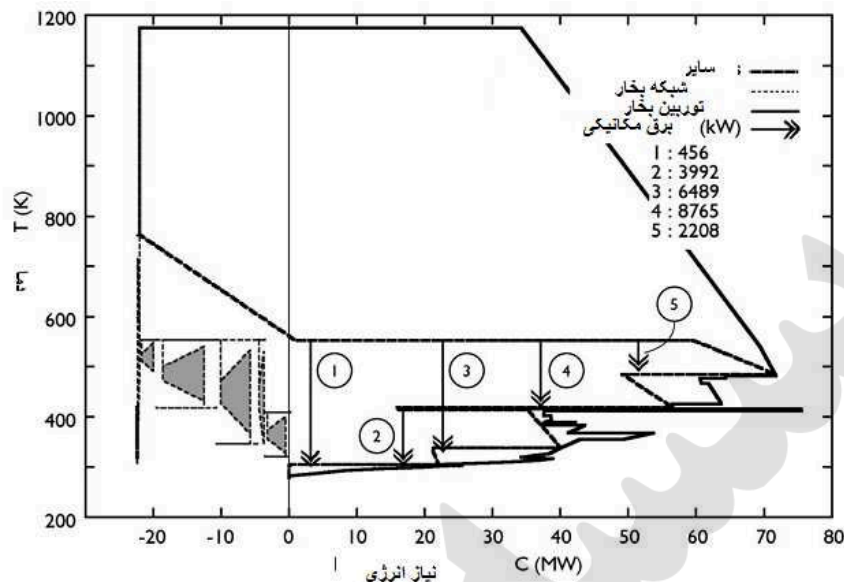
| سطح (K) | فشار (bar) | دما (K) | Vfrac. | وضعیت |
|----------|------------|---------|--------|-------|
| VHP | 62.05 | 761 | 1 | جدید |
| HP | 16.53 | 540 | 1 | موجود |
| MP | 4.46 | 421 | 1 | موجود |
| LP | 3.43 | 418 | 1 | موجود |
| VLP | 1.7 | 408 | 1 | موجود |
| Extrac. | 0.15 | 323 | 0.9 | جدید |
| Condens. | 0.05 | 306 | 0 | جدید |

جدول 2 به مقایسه وضعیت فعلی کارخانه با MER محاسبه شده برای همه سه مدل می پردازد. در هر مورد، بیوماس موجود به طور کامل استفاده شده و گاز طبیعی به عنوان مکمل استفاده می شود. نتایج تلفیق سیستم تبدیل اکسرژی نیز نشان داده شده است. مصرف سوخت مورد نیاز برای تولید MER و CHP با شبکه بخار. کارایی حاشیه ای متناظر (η_{CHP}) تولید CHP به صورت نسبت خروجی برق مکانیکی خالص (W_{CHP}) به انرژی مازاد LHV تعریف می شود که نیاز مند زیر است

$$\eta_{CHP} = \frac{W_{CHP}}{Q_F - Q_F^0}$$

با Q_F^0 : مصرف سوخت بدون تولید CHP، (kW_{LHV}) ، Q_F : مصرف سوخت با تولید CHP،

(kW_{LHV})



شکل 10: منحنی کامپوزیت ترکیبی مدل هیبرید اهداف فراوری و دستگاهی

چون مدل ترمودینامیکی، بهترین فرصت برای ریکاوری اکسرژی در اختیار می گذارد، امکان تولید بیشترین مقدار ترکیبی برق، یا دو برابر مدل فناوری وجود دارد. با در نظر گرفتن هزینه برق و گاز طبیعی، اختلاف $MWe\ 12.1$ برابر با صرفه جویی $MWe\ 44.1$ (55 درصد MER) می باشد در حالی که انرژی مورد نیاز از مقدار اضافی سوخت مصرف شده حدود $9.3\ MW_{LHV}$ است. از سه گزینه، مدل ترمودینامیکی، دارای بیشترین کارایی و بازدهی حاشیه ایست. مدل ترکیبی نشان می دهد که در تغییر شرایط خشک سازی کاغذ محرک کمی وجود دارد. از این روی این خود دارای یک محرک اقتصادی پایین بوه و باید به عنوان هدف نهایی برای باز سازی فرایند و طراحی HEN در نظر گرفته شود. در عین حال با یک سری چالش های تکنولوژیکی نیز همراه خواهد بود. با این حال نیاز فناوری بخش خشک کننده نشان می دهد که تحلیل دقیق سطوح فشار بخار مورد استفاده در بخش خشک کننده، موجب پیشینه شدن تولید CHP می شود. جایگزین حرارت با تماس مستقیم با بخار با شبکه مبدل حرارتی بسیار واقع گرایانه بده و برای حذف افت انرژی کافی است. با این حال، امکان سنجی و پتانسیل استفاده از این روش را باید از طریق طراحی شبکه مبدل حرارتی و به صرفه بودن از نظر اقتصادی سنجید. منحنی های کامپوزیت ترکیبی شبکه بخار که توسط (9) تعریف شده است در شکل 10 دیده می شود.

مدل دوگانه نیاز انرژی فناوری و ترمودینامیکی ابزاری ارزشمند برای مراحل اولیه تحلیل انرژی فرایند است. با استفاده از روش بهینه سازی، فرصت های صرفه جویی در انرژی را می توان از حیث هزینه های برق و سوخت و با توجه به تولید CHP کمی سازی کرد/ این خود یک گام مهم در روش باز سازی برای شناسایی و ارزیابی گزینه ها قبل از تحلیل بیشتر است. تحلیل پینچ، آنالیز اکسرژی و روش بهینه سازی برای تعریف اهداف انرژی در سطح سیستم ترکیب شده و از حیث هزینه انرژی بیان می شوند تا نیاز انرژی. حداقل انرژی مورد نیاز (MER) فرایند با استفاده از مدل دوگانه محاسبه شد که نیاز ترمودینامیکی فرایند را از اجرای فناوری تفکیک می کند. فرصت های ریکاوری و بازیابی اکسرژی و انرژی برای بهبود تلفیق سیستم به یک فرایند بررسی شده است. روش هدف یابی بهینه سازی MILP برای شناسایی بهترین روش تبدیل انرژی و بهینه سازی تولید ترکیبی حرارت و برق (CHP) استفاده شده است. جایگزینی تزریق بخار برای ترکیب مخازن با مبدل حرارت ها موجب کاهش MER تا 10 درصد و افزایش تولید ترکیب حرارت و برق با 1.7 ریب می شود. بهبود کارایی اکسرژی فناوری خشک سازی کاغذ، امری مشکل است با این حال نتایج نشان می دهد که این می تواند موجب افزایش بازدهی 12 درصدی برق بدون تغییر در MER یا حداقل انرژی مورد نیاز شود.

پیوست a: فرمولاسیون مسئله بهینه سازی

فرمولاسیون برنامه نویسی خطی صحیح ترکیبی برای هدف یابی هزینه حداقل نیاز انرژی با مدل های مختلف عملیات فرایند به شکل زیر است:

$$\text{Min}_{R_k, y_w, f_w} \sum_{w=1}^{n_w} (y_w C_{1w} + f_w C_{2w}) + \sum_{o=1}^{n_o} \sum_{i=1}^{n_{oi}} y_{oi} C_{oi} + EL_i C_{eli} - EL_o C_{elo} \quad (1)$$

و این تحت : تعادل حرارتی بازه های حرارتی K:

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w q_{wk} + \sum_{o=1}^{n_o} \sum_{i=1}^{n_{oi}} y_{oi} Q_{oik} + R_{k+1} - R_k = 0 \quad \forall k = 1, \dots, n_k \quad (1.1)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{oi}} y_{oi} = 1 \quad \forall o = 1, \dots, n_o \quad (1.2)$$

تولید برق:

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w w_w + \eta_i EL_i - \frac{EL_o}{\eta_o} = 0 \quad (1.3)$$

مصرف برق:

$$\sum_{w=1}^{n_w} f_w w_w + \eta_i EL_i \geq 0 \quad (1.4)$$

با

$$R_k \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, n_k + 1 \quad (1.5)$$

$$R_1 = 0 \quad (1.6)$$

$$R_{n_k+1} = 0 \quad (1.7)$$

$$f \min_w y_w \leq f_w \leq f \max_w y_w \quad \forall w = 1, \dots, n_w \quad (1.8)$$

$$y_w, y_{oi} \in \{0, 1\}$$

و

 η_1 : کارایی تبدیل برق به انرژی مکانیکی η_0 : کارایی تبدیل انرژی مکانیکی به برق C_{1w} : هزینه ثابت تبدیل انرژی W C_{2w} : هزینه متناسب تبدیل انرژی W C_{oi} : هزینه اجرای گزینه i عملیات 0 EL_i : برق وارد شده به سیستم EL_o : برق خارج شده از سیستم C_{eli} : هزینه برق وارده C_{elo} : هزینه برق وارد شده f_w : ضریب سرعت جریان منبع سیستم W در شرایط بهینه f_{min_w} : حداقل مقدار ضریب FW از سیستم W f_{max_w} : حداکثر مقدار ضریب fw n_o : تعداد عملیاتی که نشان دهنده نیازهای فرایند است n_k : تعداد بازه های دمایی

n_w : تعداد جریان های سیستم

n_w : تعداد گزینه های استفاده شده در مدل سازی عملیات 0

Q_{oik} : بار گرمایی تجمع یافته جریان های فرایند مدل 0 از گزینه i در بازه دمایی $k, Q_{oik} > 0$

برای عرضه دمایی تجمعی

y_{oi} : متغیر صحیح مربوط به مدل i عملیات 0

y_{r} : متغیر صحیح مربوط به استفاده از چرخه r

y_w : متغیر صحیح مربوط به استفاده از جریان w

معادله 1-2 نشان می دهد که برای هر عملیات، تنها یکی از مدل ها در نهایت انتخاب می شود.