مدیریت انرژی و ارائه راهکارهای صرفه‌جویی در یک کارخانه شیمیایی

حسین بهرامی[1]، **احمدرضا توکلی**[2]
سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)، وزارت نیرو

چکیده

محصولات شیمیایی این کارخانه شامل فرمالین، چسب صنعتی، پودر ملامین فرمالدئید، پودر اوره و چسب خشک می‌باشد. حدود ۱/۵ میلیون مگاوات ساعت انرژی الکتریکی و ۲/٦ میلیون مترمکعب گازطبیعی سالانه در این واحد صنعتی مصرف می‌شود.

براساس مطالعه ممیزی انرژی و اندازه‌گیری واقعی مصرف برق و سوخت، مصرف انرژی به ازاء واحد محصول تولیدی (مصرف ویژه انرژی، SEC) برای واحدهای مختلف تعیین گردیده است. در این کارخانه برای تهیه یک تن از محصولات فرمالین، پودر، چسب مایع و چسب خشک به ترتیب ۲۰۸، ٦۸، ۷۱، ۱٤٤۳ کیلووات ساعت برق و ۱٤٦٤، ۳۰۱، ٦۵۱ و ۱۱۸۹۹ مگاژول انرژی حرارتی مصرف می‌شود.

تنظیم سوخت به هوا در بویلرها، عایق‌کاری، تولید بخار توسط مبدل‌های واحد فرمالین، استفاده از پیشگرم هوای خشک‌کن‌ها، مدیریت بار در بالمیل‌ها و روشنایی راهکارهای کاهش تلفات و هزینه انرژی در کارخانه می‌باشد.

با اجرای راهکارهای پیشنهادی سالیانه بیش از ٦۰۰MWh انرژی الکتریکی و GJ ۳٤۰۰۰ انرژی فسیلی صرفه‌جویی خواهد شد. در مجموع پتانسیل کاهش مصرف انرژی در این واحد صنعتی بیش از شش هزار بشکه معادل نفت‌خام در سال است.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های انرژی الکتریکی و فسیلی، مصرف ویژه انرژی (SEC)، تلفات، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

مقدمه

مصرف ویژه انرژی در بخش‌های مختلف شامل صنعت، ساختمان، کشاورزی، حمل و نقل و .... مبین وضعیت نسبی شدت انرژی کشور در جهان است. تعیین معیارها و شاخص‌های انرژی و شناسایی تلفات، از اقدامات اولیه و اجتناب‌ناپذیر در بهینه‌سازی انرژی می‌باشد. برای نمایان کردن مشخصه‌های حامل‌های انرژی در بخش صنعت کشور به منظور اعمال مدیریت در مصرف برق و سوخت، انجام ممیزی انرژی در کارخانه‌ها و بررسی دقیق و کامل فرآیندهای تولید محصول ضروری است.

این تحقیق بر مبنای انجام اندازه‌گیری‌های واقعی، توسط تجهیزات مناسب حامل‌های انرژی الکتریکی و حرارتی در بخش‌های مختلف و آمار تولید یک واحد صنعتی نسبتاً بزرگ صورت گرفته است. پس از تجزیه و تحلیل اطلاعات، تلفات انرژی بر پایه شاخص‌های واقعی حاصل از نتایج اندازه‌گیری شناسایی شده و پتانسیل صرفه‌جویی انرژی براساس ارائه راهکارهای قابل اجرا برآورد شده است. هدف دیگر این مقاله طرح نکات فنی دانش بهینه‌سازی انرژی در فرآیندهای صنعتی حاصل از ممیزی انرژی می‌باشد که در صنایع مشابه کاربرد دارد. قابل ذکر است انتخاب نمودارهای آماری مناسب، سنجش دقیق و بررسی کامل و جامع موارد در مطالعات ممیزی انرژی، موجب کاهش انحراف از معیارهای واقعی تعیین وضعیت انرژی صنعت کشور می‌شود.

شاخص‌های انرژی، تلفات، پتانسیل‌ها و راهکارهای صرفه‌جویی

الف) شاخص‌های انرژی

۱ـ شاخص‌های الکتریکی (SEC_e)

با توجه به آمار تولید و انجام اندازه‌گیری انرژی الکتریکی و محاسبه توان متوسط مصرف برای محاسبه توان متوسط مصرفی برای بخش‌های چسب خشک. چسب مایع، فرمالین و پودر میزان شاخص مصرف انرژی الکتریکی (SEC ـ مصرف ویژه انرژی) مطابق جدول شماره (۱) می‌باشد. برق مصرفی در این جدول برای مدت حداکثر یک هفته اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱ـ شاخص‌های انرژی الکتریکی

نام بخش	میزان انرژی مصرفی (KWh)	میزان تولید (ton)	SEC_e
چسب خشک	۱۰۷۰٤/٦	٥۱/٥	۲۰۷/۹
چسب مایع	۱٥٦۷۲/۱	۲۳۰	٦۸/۱
فرمالین	٤۹٥٤۱/٥	۷۰۰	۷۰/۸
پودر	۹۲٦۷۹/٦	٦٤/۲٥	۱٤٤۲/٥

لازم به ذکر است سهم انرژی الکتریکی مصرفی در تولید هوای فشرده، بخار مصرفی و سیستم آب فرآیند برای بخش‌های فوق‌الذکر در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

یکی از دلایل بالا بودن شاخص‌ها عدم کارکرد تجهیزات در ظرفیت اسمی می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود جهت افزایش راندمان انرژی و کاهش مصرف ویژه انرژی که کاهش قیمت تمام شده محصول را به دنبال خواهد داشت، واحدها و ماشین‌آلات در ظرفیت نامی مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

۲ـ شاخص مصرف انرژی فسیلی (SEC_f)

برای محاسبه شاخص مصرف انرژی فسیلی ابتدا مصارف بخار و گاز بخش‌های مختلف اندازه‌گیری و محاسبه شده است. سپس تراز انرژی برای کارخانه به تفکیک بخش‌های کارخانه رسم شده است.

با محاسبه مقدار انرژی و گرفتن مقدار تولید هر بخش در مدت اندازه‌گیری شاخص مصرف انرژی فسیلی محاسبه شده است که در جدول شماره (۲) آمده است.

جدول ۲ـ شاخص‌های انرژی حرارتی

ردیف	نام بخش	تولید (Ton/day)	انرژی MJ/day	شاخص مصرف انرژی (SEC_f) (MJ/ton)
۱	فرمالین	۷۲	٤٦٨٦٢	٦٥٠/٨
۲	چسب مایع	٦٣/٤	١٩١٠١	٣٠١/٣
۳	چسب خشک	٢٠/٧	٣٠٣٠٧	١٤٦٤/١
٤	پودر	١٢/٢	١٤٥١٧٠	١١٨٩٩/٢

۳ـ مقایسه مصرف ویژه انرژی با یک نمونه خارجی

۳-۱- مصرف انرژی فسیلی برای تولید یک تن فرمالین

در کارخانه مورد مطالعه:

٦٥٠/٨ MJ/ton

در کارخانه نمونه خارجی:

تولید بخار از فرآیند - ٠/٥٥ Ton/ton

در این فرآیند نه تنها انرژی برای تولید بخار مصرف نمی‌شود بلکه ٠/٥٥ تن بخار به ازاء یک تن فرمالین تولید می‌شود.

۳-۲- مصرف برق برای تولید یک تن فرمالین:

در کارخانه مورد مطالعه:

٧٠/٨ KWh/ton = ٢٩٤ KWh در ساعت / ٤/٢ تن در ساعت تولید فرمالین

در کارخانه نمونه خارجی:

٨٥ KWh/ton

۳-۳- شاخص کل انرژی:

در کارخانه مورد مطالعه:

٦٥٠/٨ MJ/ton + ٧٠/٨ KWh/ton × ٣/٦ MJ/KWh = ٩٠٥/٧ MJ/ton

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

در کارخانه نمونه خارجی:

$$۸۵\ KWh/ton \times ۳/٦\ MJ/KWh = ۳۰٦\ \ MJ/ton$$

ملاحظه می‌شود که این کارخانه حدود سه برابر یک کارخانه تولید فرمالین در کشور سوئد انرژی مصرف می‌کند، که راهکارهای کاهش مصرف انرژی در متن مقاله تحت عنوان تولید بخار از واحد فرمالین، حذف سیستم کولینگ داخلی و کاهش مصرف انرژی کولینگ اصلی ارائه گردیده است.

قابل ذکر است عامل بالا بودن شاخص انرژی الکتریکی در نمونه خارجی، بکارگیری سیستم‌های بازیافت (که عمدتاً مصرف برق دارند) جهت جلوگیری از انتشار آلاینده‌های محیط‌زیست به محیط اطراف کارخانه می‌باشد.

ب) تعیین تلفات انرژی

۱- بررسی وضعیت بویلرها

به منظور تأمین بخار مورد نیاز جهت فرآیند، کارخانه دارای سه دستگاه بویلر با مشخصات مندرج در جدول شماره (۳) می‌باشد که معمولاً دو دستگاه در مدار می‌باشند.

جدول ۳ـ مشخصات بویلرها

نوع بویلر: فایر تیوب	ظرفیت مشعل: ۲۹۰۰۰۰۰۰ Kcal/hr
ظرفیت اسمی: ۱۱ t/hr	مقدار سوخت: ۳۵۰۰ Nm^3/day
تعداد مشعل‌ها: یک عدد	فشار بخار تولیدی: ۱۰ bar
نوع سوخت: گازطبیعی	دمای بخار تولیدی: ۱۸۰ $^{\circ}C$
قدرت فن: ۳۰ KW	کشور سازنده: انگلستان

به منظور بررسی وضعیت احتراق از نقطه نظر نسبت سوخت به هوا و دمای گازهای خروجی اندازه‌گیری و آنالیز احتراق از دودکش انجام شد.

بویلر A:

با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری شده میزان هوای اضافی اندازه‌گیری شده برابر ۷۱۷/. می‌باشد که این میزان با توجه به گاز سوز بودن مشعل بویلر، بالا بوده و باعث اتلاف انرژی حرارتی می‌گردد. با تنظیم نسبت سوخت به هوا می‌توان میزان تلفات ناشی از هوای اضافی در دودکش را کاهش داد.

براساس شرایط استاندارد به ازای هر مترمکعب گازطبیعی به منظور احتراق کامل ۲۰٪ هوای اضافی در نظر گرفته شده که به میزان حدود ۱۳ کیلوگرم هوا نیاز است. با توجه به مصرف سوخت ۸۵۰ Nm^3/hr میزان هوای مصرفی بویلر باید برابر ۱۱۰۵۰ Kg/hr (۸٦۰۰ Nm^3/hr) باشد. در حال حاضر بویلر A با درصد هوای اضافی بسیار بالا (۷۱۷/.) به میزان ٦٤٦۰۰ Kg/hr (۵۰۰۰۰ Nm^3/hr) هوا مصرف می‌کند.

عدم تنظیم نسبت سوخت به هوا به معنی مصرف انرژی بیهوده به منظور گرم کردن ۴۱۴۰۰ Nm^3/hr = ۸٦۰۰ − ۵۰۰۰۰ هوا و رساندن آن از دمای محیط به دمای دودکش می‌باشد. که می‌توان براساس اطلاعات موجود میزان انرژی تلف شده در این حالت را حساب نمود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

همچنین وجود هوای اضافی باعث افزایش بار بر روی فن بویلر شده و توان مصرفی فن را بالا می‌برد.

محاسبه تلفات حرارتی و الکتریکی در بویلر A:

ـ محاسبه تلفات حرارتی

قبل از تنظیم مشعل:

هوای اضافی ۷۱۷ /. = λ

۳۲/۷۵٪ = تلفات دودکش

$T = ۱۱۶^{\circ}C$ ⟹

در صورت تنظیم سوخت به هوا:

هوای اضافی ۲۰٪ = λ

۱۵٪ = تلفات دودکش

$T = ۱۱۶^{\circ}C$ ⟹

۱۷/۷۵٪ = ۱۵ − ۳۲/۷۵ = میزان کاهش تلفات دودکش

یعنی با تنظیم نسبت سوخت به هوا در مشعل می‌توان به میزان ۱۷/۷۵٪ تلفات دودکش را کاهش داد.

با توجه به مصرف سوخت بویلر که حدود ۳۵۰۰ Nm^3/day می‌باشد میزان کاهش مصرف سوخت را می‌توان محاسبه نمود.

گازطبیعی میزان کاهش مصرف سوخت = ۳۵۰۰ Nm^3/day × ٪۱۷/۷۵ = ۶۲۱/۳ Nm^3/day

با توجه به اینکه بویلر سالانه حدود ۳۵۰ روز کار می‌کند پتانسیل قابل صرفه‌جویی برابر خواهد شد با:

سوخت قابل صرفه‌جویی سالانه = ۶۲۱/۳ × ۳۵۰ = ۲۱۷۴۵۵ $Nm^3/year$

ـ محاسبه تلفات الکتریکی

وجود هوای اضافه علاوه بر کاهش راندمان حرارتی بویلرها، باعث افزایش قدرت فن بویلر و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر آن می‌گردد.

براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده مصرف فن بویلر ۲۲ KW می‌باشد که این مصرف برای تأمین حدود ۵۰۰۰۰ Nm^3/hr هوا استفاده می‌شود و با توجه به کاهش هوا خواهیم داشت:

درصد کاهش هوا = (۵۰۰۰۰ − ۸۶۰۰۰) ÷ ۵۰۰۰۰ × ۱۰۰ = ٪۸۲

به عبارت دیگر با تنظیم نسبت سوخت به هوا به میزان ۸۲٪ از قدرت فن کاسته خواهد شد.

کاهش قدرت فن = ٪۸۲ × ۲۲ KW = ۱۸ KW

با توجه به شرایط کار کرد میزان صرفه‌جویی سالانه برابر:

صرفه‌جویی سالیانه = ۱۸ ×۲٤× ۳۵۰ × ۰/٦ = ۹۰۷۲۰ KWh/year

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

بویلر B:

با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری شده میزان هوای اضافی اندازه‌گیری شده برابر ٤٦/٧٪ و دمای دودکش حدود ١٦٠/٢ $^{\circ}C$ می‌باشد که ه این میزان بالا بوده و باعث اتلاف انرژی حرارتی می‌گردد.

با تنظیم نسبت سوخت به هوا می‌توان میزان تلفات ناشی از هوای اضافی در دودکش را کاهش داد. همانند بویلر A، بویلر B به ١١٠٥٠ Kg/hr (٨٦٠٠ Nm^3/hr) هوا نیاز دارد.

در حال حاضر بویلر B با درصد هوای اضافی ٤٦/٧٪ به میزان ١٦٢١٠ Kg/hr (١٢٥٧٠ Nm^3/hr) هوا مصرف می‌کند.

عدم تنظیم نسبت سوخت به هوا به معنی مصرف انرژی بیهوده به منظور گرم کردن ٣٩٧٠ Nm^3/hr = ٨٦٠٠ ـ ١٢٥٧٠ هوا و رساندن آن از دمای محیط به دمای دودکش می‌باشد. که می‌توان براساس اطلاعات موجود میزان انرژی تلف شده در این حالت را حساب نمود. همچنین وجود هوای اضافی باعث افزایش بار روی فن بویلر شده و توان مصرفی فن را افزایش می‌دهد.

محاسبه تلفات حرارتی و الکتریکی در بویلر B:

ـ محاسبه تلفات حرارتی

قبل از تنظیم مشعل:

هوای اضافی λ = ٤٦/٧ ٪

تلفات دودکش Loss = ١٨/١٢٪ ⟹ $T = ١٦٠^{\circ}C$

در صورت تنظیم سوخت به هوا:

هوای اضافی λ = ٢٠٪

تلفات دودکش Loss = ١٤/٩٨٪ ⟹ $T = ١٢٠^{\circ}C$

میزان کاهش تلفات دودکش = ١٨/١٢٪ – ١٤/٩٨٪ = ٣/١٤٪

یعنی با تنظیم نسبت سوخت به هوا در مشعل می‌توان به میزان ٣/١٤٪ تلفات دودکش را کاهش داد.

با توجه به مصرف سوخت بویلر که حدود ٣٥٠٠ Nm^3/day می‌باشد میزان کاهش مصرف سوخت را می‌توان محاسبه نمود.

میزان کاهش مصرف سوخت = ٣٥٠٠ Nm^3/day × ٣/١٤ ٪ = ١٠٩/٩Nm^3/day

با توجه به اینکه بویلر سالانه حدود ٣٥٠ روز کار می‌کند پتانسیل قابل صرفه‌جویی سالانه برابر خواهد بود با:

سوخت قابل صرفه‌جویی سالانه = ١٠٩/٩ Nm^3/day × ٢٤ × ٣٥٠ = ٣٨٤٦٥ $Nm^3/year$ گازطبیعی

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

ـ محاسبه تلفات الکتریکی

وجود هوای اضافی علاوه بر کاهش راندمان حرارتی بویلرها، باعث افزایش فن بویلر و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر آن می‌گردد.

درصد کاهش هوا = (۱۲۵۷۰ − ۸۶۰۰۰) / ۱۲۵۷۰ × ۱۰۰ = ٪۳۱/۶

به عبارت دیگر با تنظیم نسبت سوخت به هوا به میزان ٪۳۱/۶ از قدرت فن کاسته خواهد شد.

کاهش قدرت فن = ۲۲ KW × ۳۱/۶ ٪ = ۶/۹۵ KW

با توجه به شرایط کارکرد میزان صرفه‌جویی سالانه برابر خواهد بود با:

صرفه‌جویی سالیانه = ۶/۹۵ × ۲۴ × ۳۵۰ × ۰/۶ = ۳۵۰۲۸ KWh/year

۲ـ بررسی وضعیت عایق‌ها

اصولاً با توجه به مصارف بخار در پروسه تولید و نیاز به حرارت در مراحل مختلف، مسئله عایق و عایق‌کاری از مسائل مهم در کارخانجات می‌باشد.

با توجه به اینکه سطوح داغ (مبدل‌ها، لوله‌های بخار و ...) در محدوده دمایی ۱۰۰-۲۰۰°C می‌باشند میزان تلفات ناشی از تشعشع و جابجایی آزاد برای این رنج دمایی تقریباً برابر ۲ KW/m^2 یا به عبارت دیگر ۵ $Nm^3/daym^2$ گازطبیعی می‌باشد.

با بازدید از کارخانه و اندازه‌گیری دمای لوله‌های بدون عایق که حدوداً ۲۰ مترمربع می‌باشد با عایق‌کاری میزان سوخت قابل صرفه‌جویی را می‌توان محاسبه نمود.

تلفات ناشی از عدم عایق‌کاری ۰/۸ = $\frac{۲۰\times۵\times۳۳۰}{}$ = ۴۱۲۵۰ $Nm^3/year$

ج) پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی و راهکارهای کاهش تلفات

۱ـ واحد فرمالین

در حال حاضر در بخش فرمالین مقدار ۲۲۴۰ Kg/hr بخار با فشار ۲/۵ بار و دمای ۱۴۰°C مصرف می‌گردد و همچنین از حرارت واکنش انجام شده در رآکتور فرمالین استفاده می‌شود. در صورت بهبود سیستم و استفاده بیشتر از حرارت خروجی رآکتور می‌توان بخار مصرفی را به میزان ۴۳۷ KG/hr کاهش داد. این مقدار صرفه‌جویی با استفاده از مبدل با راندمان بالا و نصب تله‌های بخار بعد از مبدل‌های ۲ و ۱۱ (این دو مبدل واحد فرمالین مجموعاً مبدل Vapor cooler را تشکیل می‌دهند) شکل شماره (۱) و استفاده از حداکثر انرژی بخار به دست می‌آید. جدول شماره (۴) مقادیر دما و جرم مواد ورودی و خروجی به این مبدل‌ها نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

جدول ۴ـ مقادیر دما و جرم

ردیف	مواد ورودی		In	مواد خروجی		Out	شماره مبدل
	نوع	مقدار Kg/h	T°C	نوع	مقدار Kg/h	T°C	
۱	آب	۷۵۰	۲۵	آب + بخار	۷۵۰	٦۷	شماره ۲
۲	متانول	۱٤۵۰	۲۵	مایع+ بخار	۱٤۵۰	٦۷	شماره ۲
۳	اکسیژن	٦۳۷/۲	۲۵	گازی	٦۳۷/۲	٦۷	شماره ۱۱
٤	نیتروژن	۲۰۹۷	۲۵	گازی	۲۰۹۷	٦۷	شماره ۱۱
۵	بخار	۱۳۷	۱۳۹	آب کندانس	۱۳۷	۱۰۰	شماره ۲
٦	بخار	۱٦٦٦	۱۳۹	آب کندانس	۱٦٦٦	۱۰۰	شماره ۱۱
مجموع	بخار	۱۸۰۳	۱۳۹	آب کندانس	۱۸۰۳	۱۰۰	شماره ۲ و ۱۱
	خوراک	٤۹۳٤	۲۵	مخلوط	٤۹۳٤	٦۷	شماره ۲ و ۱۱

براساس اطلاعات به دست آمده و طراحی این سیستم، مقدار زیادی انرژی در کندانسور بعد از Vaper Cooler توسط آب سرد از برج‌ها خنک می‌گردد. در حالی که می‌توان از حرارت این مبدل جهت گرمایش مخلوط آب و متانول استفاده نمود.

اجرای این طرح مستلزم تغییر در خطوط انتقال خوراک ورودی بعد یا قبل از میکسر می‌باشد و یا می‌توان از گرمای این مبدل جهت تولید بخار استفاده نمود. در صورت ورود آب کندانس ۱۰۰°C به این مبدل می‌توان معادل ۷۵۰ Kg/hr بخار ۲/۵ بار (۱۳۹°C) را تولید نمود. ولی بهتر است آن را جهت گرمایش خوراک (مخلوط آب و متانول) استفاده نمود زیرا دمای خروجی محصولات بعد از کندانسور می‌بایستی ۵۰°C گردد.

۱-۱- محاسبه انرژی قابل صرفه‌جویی در این بخش

ـ تولید معادل ۷۵۰ Kg/hr بخار با دمای ۱۳۹°C و فشار ۲/۵ bar از مبدل ۲ و ۱۱ از دمای ۱۰۰°C

مقدار سوخت معادل برای تولید این مقدار بخار با راندمان ۸۰٪ بویلر برابر ٦٤ m^3/hr گازطبیعی می‌باشد که ارزش ریالی آن برای ۳۰۰ روز بهره‌برداری سالیانه و قیمت ۱۳۰ ریال برای هر مترمکعب گاز معادل است با:

ریال در سال ۵۹۹۰٤۰۰۰ = ۳۰۰ × ۲٤ × ۱۳۰ × ٦٤

ـ صرفه‌جویی حاصل از حذف پمپ‌های آب سیرکولاسیون و Cooling

توان هر دو پمپ به ترتیب ۳۹ KW و ۱۲ KW می‌باشد که مجموعاً معادل ۵۱ KW می‌شود، که در این محاسبه قیمت هر کیلووات ساعت الکتریسیته ۱۵۰ ریال و بهره‌برداری سالیانه ۳۰۰ روز در نظر گرفته شده است.

ریال در سال ۵۵۰۸۰۰۰۰ = ۱۵۰ × ۳۰۰ × ۲٤ × ۵۱

ـ کاهش مصرف بخار به میزان ٤۳۷ Kg/hr برای کل واحد فرمالین

میزان این صرفه‌جویی با فرضیات بالا معادل ۳۷/۷ m^3/hr گازطبیعی می‌باشد که صرفه‌جویی سالیانه آن برابر است با:

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

ریال در سال ۳۵۲۸۷۲۰۰ = ۱۳۰×۳۰۰×۲٤×۳۷/۷

۲ـ واحد چسب خشک

در این واحد با استفاده از حرارت هوای داغ ورودی، رطوبت چسب‌تر گرفته شده و چسب خشک تولید می‌گردد. در جدول شماره (۵) خلاصه‌ای از مقادیر جریان‌ها ارائه شده است.

جدول ۵ ـ مقادیر جرم و دما

ردیف	نوع مواد	IN		Out		توضیحات
		مقدار (Kg)	دما (T°C)	مقدار Kg/h	دما T°C	
۱	هوا	۳٤۸۳۰	۱۸	۳٤۸۳	۱۷۰	ورودی و خروجی به Air Heater
۲	خوراک (گلیزر)	۱۷٦۰	٤۵	–	–	ورودی به Drying Chamber
۳	هوا	۱۷۵۰	۱۸	۱۷۵۰	۷۲	مقدار این هوا شامل هوای ورودی به بالا و پائین Drying Chamber می‌باشد
٤	هوا	٤۷۱۷	۱۸	٤۷۱۷	۱۲	ورودی به چیلر و خروجی از هیتر
۵	بخار	۵٦	۱۳۹	۵٦	۱۳۷	آب کندانس به فاضلاب ریخته می‌شود
٦	آب Cooling	٦۰۰۰۰	۲۵	٦۰۰۰۰	۳۱	خنک کاری کندانسور چیلر

۲-۱- راهکارهای صرفه‌جویی واحد چسب خشک

ـ استفاده از آب کندانس خروجی از مبدل آبگرم

با برگشت آب کندانس به سیستم می‌توان به میزان Kg/hr ۵٦ آب کندانس را بازیافت نمود که خود باعث صرفه‌جویی هزینه در قسمت تصفیه‌خانه و همچنین صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌گردد که مقدار این صرفه‌جویی معادل $Nm^3/year$ ۱۲۲۰ گازطبیعی می‌باشد که صرفه‌جویی ریالی آن سالانه برابر ۱۵۸۹۰۰ ریال می‌باشد.

ـ استفاده از هوای خروجی Bag Filter جهت گرمایش هوای ورودی Air Heater

همانطور که از اطلاعات پیوست مشخص است دمای خروجی هوای Bag Filter حدوداً $77\ ^{\circ}C$ می‌باشد. این مقدار هوا شامل مقدار زیادی انرژی قابل بازیافت است که به وسیله نصب یک مبدل حرارتی بر سر راه این مبدل می‌توان دمای هوای ورودی Air Heater را از $20\ ^{\circ}C$ به $45\ ^{\circ}C$ رساند که محاسبات مربوطه و صرفه‌جویی آن در ذیل محاسبه شده است.

$\dot{m}_1$ = ٤۲۰۰۰ Kg/hr دبی هوای خروجی Bag Filter

$\theta_1 = 77\ ^{\circ}C$ دمای هوای خروجی Bag Filter

$\dot{m}_2$ = ۳٤۰۰۰ Kg/hr دبی هوای ورودی Air Heater

$\theta_2 = 20\ ^{\circ}C$ دمای هوای ورودی Air Heater

$^{\circ}C/r\ (\theta_2 - \theta) = {}^{\circ}C/r\ (\theta - \theta_1)$

$42000\ (77 - \theta) = 34000\ (\theta - 20)$

$\theta = 51/5\ ^{\circ}C$ ⟵

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

محاسبات فوق ایده‌آل در نظر گرفته شده ولی با راندمان ۸۵٪ می‌توان دمای هوا را تا $45^{\circ}C$ افزایش داد.

$$\dot{Q} = \dot{m} C \Delta \theta = ۳٤۰۰۰ \times ۱/۱ (٤٥ - ۲۰) = ۹۳٥۰۰۰ \text{ KJ/hr}$$

$۲٥/٦ \text{ Nm}^3/\text{hr}$ = مقدار سوخت معادل آن

که برای ۱۰۰ روز کاری در سال صرفه‌جویی ریالی آن معادل

ریال در سال ۵۳۲۰۰۰۰ = ۱۳۰× ۱۰۰× ۱٦× ۲٥/٦ صرفه‌جویی ریالی سالانه

قابل ذکر است که هزینه تجهیزات و دستگاه‌ها برای این طرح حدوداً معادل ۵۰ میلیون ریال در نظر گرفته شده است که بازگشت سرمایه برابر ۹/۵ سال می‌باشد. البته لازم به ذکر است در صورتی که این واحد ۳۰۰ روز کاری در سال تولید داشته باشد صرفه‌جویی سالیانه آن معادل ۲۳۹۷۷۰۰۰ ریال خواهد بود که برگشت سرمایه آن به حدود ۲ سال کاهش می‌یابد.

۳ـ واحد پودر

واحد پودر پرمصرف‌ترین واحد چه از نظر انرژی الکتریکی و چه از نظر انرژی فسیلی می‌باشد. مصرف‌کننده‌های عمده الکتریکی این واحد در بخش الکتریکی گزارش مشخص و به راهکارهای مربوطه در آن قسمت اشاره شده است. این بخش بیشترین مقدار مصرف بخار را به خود اختصاص داده است. براساس محاسبات در زمان اندازه‌گیری مقدار ۱٤٤۰ Kg/h برای هر Dryer بخار ۲/۵ بار با دمای $139^{\circ}C$ مصرف می‌شود. بخار کندانس نیز از دمای $139^{\circ}C$ به $100^{\circ}C$ در سایر قسمت‌ها کاهش دما داده و مصرف می‌گردد و به طور معمول دو Dryer همیشه در مدار می‌باشند یعنی مقدار ۲۸۸۰ Kg/h بخار برای این دو Dryer نیاز می‌باشد. شرایط ورودی و خروجی مواد و انرژی‌های مربوطه در قسمت Dryer در جدول شماره (٦) مشخص شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

جدول ۶ـ شرایط مواد ورودی و خروجی

ردیف	نوع مواد	IN		Out		محل استفاده	توضیحات
		مقدار (Kg/h)	دما (T°C)	مقدار Kg/h	دما T°C		
۱	هوا	۳۰۷۰۰	۲۰	۳۰۷۰۰	۱۲۰	در هر درایر	این مقدار مجموع هوای اولیه و ثانویه می‌باشد مقادیر بخار ۱۰۰٪ به آب کندانس تبدیل می‌شود هوای خروجی شامل مقداری رطوبت می‌باشد.
۲	بخار	۱٤٤۰	۱۳۹	۱٤٤۰	۱۳۹	مبدل جهت گرمایش هوا	
۳	هوا	۳۰۷۰۰	۱۲۰	۳۱۰۰۰	۷۵	ورودی و خروجی درایر	
٤	خوراک Dryer	۷۲۰	۲۰-۲۵	٥٤۰	۷۰-۵۰	-	

همانطور که مشاهده می‌گردد مقدار تقریبی ۳۱۰۰۰ Kg/h (حدوداً ۲۸۰۰۰ m^3/h) هوا با دمای محیط وارد شده و با دمای حدود ۷۵ $^{\circ}C$ از سیکلون خارج می‌شود (دمای این هوا گاهی به ۱۰۰ $^{\circ}C$ هم می‌رسد). این مقدار هوا حاوی مقدار زیادی انرژی می‌باشد که قابل بازیافت است. بازیافت این حرارت توسط نصب یک مبدل هوا قبل از سیکلون قابل اجرا است.

راهکارهای صرفه‌جویی سوخت فسیلی در واحد پودر

۳-۱- راهکارهای صرفه‌جویی سوخت فسیلی در واحد پودر

ـ نصب مبدل پیشگرم کن هوای Dryer ها

برای نصب این مبدل دو سناریو برای محاسبات در نظر گرفته شده است که در ذیل به تفصیل در مورد آنها توضیح داده شده است.

۱ـ سناریوی اول: سناریوی اول با فرض کارکرد دو درایر به طور دائم در مدت ۳۰۰ روز در سال می‌باشد. با این فرض محاسبات صرفه‌جویی برای این دو درایر بقرار زیر می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار که در صفحه بعد به همراه شکل مربوطه ملاحظه می‌فرمائید مقدار انرژی تبادل شده بین هوای خروجی از درایر (جریان شماره ۲) و هوای ورودی بـه پیشـگرم کن (جـریان شماره ۱۲) برابر با ۹۳۵۹۸۲ KJ/h می‌باشد این مقدار انرژی معادل ۳۲/٤ m^3/h گازطبیعی است که در یک بویلر با راندمان ۸۵٪ تبدیل به بخار می‌شود. این مقدار بازیافت انرژی نیازمند سرمایه‌گذاری در حدود ۱۳۰۰۰۰۰۰ (سیزده میلیون ریال) برای هر مبدل می‌باشد.

و مقدار صرفه‌جویی و سود حاصل از این راه‌کار برای دو Dryer عبارت است از:

ریال در سال ٦۰٦٥۲۸۰۰ = ۲ × ۱۳۰ ×۳۰۰ × ۲٤ × ۳۲/٤

که بازگشت سرمایه آن (Simple payback time) برابر ۰/٤ سال می‌باشد (حدود ۵/۲ ماه)

۲ـ سناریوی دوم: سناریوی دوم با فرض کارکرد دو درایر به طور دائم در مدت ۳۰۰ روز در سال و یک درایر در مدت ۱۵۰ روز می‌باشد. با این فرض مقدار صرفه‌جویی کل معادل است با صرفه‌جویی دو درایر فوق به علاوه درایر سوم که مجموعاً برابر است با:

ریال در سال ۱٥۱٦۳۲۰۰ = ۱۳۰× ۱۵۰× ۲٤ × ۳۲/٤

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

ریال در سال ۷۵۸۱۶۰۰۰ = ۶۰۶۵۲۸۰۰ + ۱۵۱۶۳۲۰۰

و زمان بازگشت سرمایه برای هر سه مبدل پیشگرم هوا برابر است با:

۶ ماه ≈ ۰/۵۱۶۷ = ۷۵۸۱۶۰۰۰ ÷ ۳۹۰۰۰۰۰۰

نتیجه‌گیری

براساس مطالعات این تحقیق پتانسیل صرفه‌جویی انرژی الکتریکی و فسیلی سالیانه از طریق اجرای راهکارهای پیشنهادی به صورت خلاصه در جدول ذیل آمده است.

راهکارهای پیشنهادی	صرفه‌جویی انرژی الکتریکی (MWh)	صرفه‌جویی انرژی فسیلی (m^3 گازطبیعی)	ارزش ریالی صرفه‌جویی (میلیون ریال)
تنظیم نسبت سوخت به هوا در بویلرها	۱۲۵/۷	۲۵۵۹۲۰	۵۲/۱
عایق‌کاری	–	۴۱۰۰۰	۵/۴
تولید بخار توسط مبدل ۲ و ۱۱ واحد فرمالین	–	۴۶۰۸۰۰	۵۹/۹
حذف پمپ‌های آب سیرکولاسیون و Cooling واحد فرمالین	۳۶۷	–	۵۵
کاهش مصرف بخار واحد فرمالین	–	۲۷۱۴۰۰	۳۵/۳
استفاده از آب کندانس خروجی مبدل آب گرم واحد چسب	–	۱۲۲۰	۰/۱۶
استفاده از هوای گرم خروجی Bag Filter	–	۴۰۹۶۰	۵/۳
نصب مبدل پیشگرم هوای Dryer	–	۴۶۶۵۰۰	۶۰/۷
کاهش دیماند و تعویض کنتور برق	–	–	۱۱۰
مدیریت بار در بخش بالمیل‌ها	–	–	۶۴
مدیریت مصرف در بخش روشنایی	۲۰۶	–	۳۰

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]

منابع

۱ـ قبوض برق مصرفی دوسال کارخانه

۲ـ قبوض گاز مصرفی دو سال کارخانه

۳ـ اطلاعات حاصل از دستگاه‌های اندازه گیری برق وحرارت نصب شده در زمان انجام تحقیق

٤ـ گزارشات ممیزی انرژی سابا

٥ـ اطلاعات تجهیزات و ماشین‌آلات کارخانه

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-16]