

شناسایی شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

چکیده

این پژوهش باهدف تعیین شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده است. برای این منظور پس از مطالعات و بررسی پژوهش‌های انجام شده و مصاحبه با کارشناسان متخصص، شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه به ۵ گروه اصلی و ۲۶ زیر شاخص تقسیم شدند. اهمیت شاخص‌ها و زیر شاخص‌ها پس از اخذ آرای کارشناسان با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت چویس درجه‌بندی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص‌های اصلی در بهینه‌سازی مصرف انرژی به ترتیب اولویت اصلاح فرآیند، دانش فنی و نیروی انسانی، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند، اجرای نظام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) و بازیابی انرژی می‌باشند. شاخص اصلاح فرآیند با وزن ۰/۳۸ بالاترین اولویت را در بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد. همچنین از بین ۲۶ زیر شاخص مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه، زیر شاخص‌های بهبود فرآیند خمیرسازی، سطح تحصیلات پرسنل کارخانه، سابقه کار پرسنل، کاهش توقفات، تحقیق و توسعه، سنسور اندازه‌گیری آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ به ترتیب با ارزش وزنی ۰/۲۰۹، ۰/۱۱۹، ۰/۱۱۶، ۰/۱۱۳، ۰/۰۶۶، ۰/۰۵۱، ۰/۰۴۵ دارای بالاترین اهمیت می‌باشند. نرخ ناسازگاری کلی در این بررسی ۰/۰۱ است که نشان می‌دهد نتایج پایداری و سازگاری بالایی دارد. نتایج حاصله از این کار پژوهشی می‌تواند در تسریع اجرای فرآیند بهینه‌سازی مصرف انرژی در سایر کارخانه‌های کاغذسازی ایران نیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: انرژی مصرفی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، صنایع کاغذسازی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی.

حامد شریفی طاسکوه^۱

مجید عزیزی^{۲*}

یحیی همزه^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

mazizi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

مقدمه

کاغذسازی و مشکلات اقتصادی و محیط زیستی ناشی از آن، ضرورت مدیریت انرژی و بالا بردن بازده و بهره‌وری انرژی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. با توجه به مصرف بالا و چند برابری انرژی در کارخانه‌های کاغذسازی کشور نسبت به متوسط جهانی مصرف انرژی و بالا بودن هزینه‌های تولیدی کاغذ در کارخانه‌های کاغذسازی داخل

صنایع خمیر و کاغذ یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند و سهم قابل‌توجهی از انرژی مصرفی در بخش صنعت را به خود اختصاص می‌دهد. عدم کارایی فنی و اقتصادی مصرف انرژی و هدر رفتن مقدار زیادی از انرژی در فرآیندهای مختلف تهیه خمیر کاغذ و

صنایع مشابه در دیگر کشورها برخوردارند. با توجه به روند افزایشی قیمت‌های فرآورده‌های نفتی در کشور، محدودیت دسترسی به منابع انرژی، آلودگی محیط زیستی، رشد بالای مصرف سالانه انواع انرژی در ایران و عدم کارایی فنی و اقتصادی در مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و مدیریت مصرف انرژی در این صنایع امری ضروری است [۷]. مشکلات موجود در سر راه افزایش ظرفیت تولید انرژی، خصوصاً انرژی الکتریکی و افزایش روز افزون تقاضا برای انرژی الکتریکی موجب می‌گردد که کشورهای مختلف دنیا در پی راهکارهایی مناسب برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت سمت تقاضا باشند. انتخاب ماشین‌آلات مناسب باراندمان و کیفیت مطلوب و مطابق استانداردهای بین‌المللی با مصرف انرژی بهینه، راهگشای مشکلات بعدی در صرفه‌جویی و بهینه‌سازی انرژی می‌باشد. اما بعد از مراحل راه‌اندازی، انجام ممیزی انرژی و شناسایی دستگاه‌ها و تجهیزات و موادی که موجب هدر رفتن انرژی می‌شود، می‌تواند در مصرف بهینه انرژی مفید واقع گردند که با بکار بستن عوامل و شناخت فاکتورهای مؤثر به همراه توسعه منابع انسانی و ایجاد علاقه و انگیزه می‌تواند بیش‌ازپیش در جهت صرفه‌جویی انرژی مؤثر باشد [۱].

انتخاب ماشین‌آلات مناسب با بازدهی و کیفیت مطلوب با مصرف انرژی بهینه و مطابق با استانداردهای بین‌المللی پیشگیری‌کننده مشکلات بعدی در صرفه‌جویی و بهینه‌سازی انرژی می‌باشد [۸]. بهره‌وری بهینه انرژی، موضوعی با اهمیت در صنعت خمیر و کاغذ است. بهای انرژی در سال‌های اخیر به سرعت افزایش یافته و صرفه‌جویی در مصرف انرژی دیگر یک مسئله فرعی نیست. در مدیریت صحیح مصرف انرژی مواردی مانند بهبود بازده ترمودینامیکی، کاستن از میزان افت‌ها و اتلافات انرژی، بازیابی انرژی و اصلاح فرآیندها در جهت مصرف انرژی کمتر را باید در نظر داشت [۹]. Rezaei و همکاران تحقیقی روی مدیریت بهینه مصرف انرژی در کارخانه صنایع چوب و کاغذ مازندران انجام دادند. آنها اعلام کردند که بهینه‌سازی مصرف و کاهش شدت انرژی که امروزه یکی از نگرانی‌های اصلی مدیران سطح کلان بوده و پیوسته در جستجوی راهکارهای اجرایی برای آن

کشور، مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای کاغذسازی داخل کشور از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۱]. بهینه‌سازی مصرف انرژی، از مهم‌ترین تحولات ساختار اقتصادی کشورهای صنعتی است که دستاوردهایی از جمله رشد اقتصادی و افزایش تولید ناخالص ملی همراه با کاهش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت [۲]. صرفه‌جویی مالی اساسی‌ترین منفعتی است که مصرف‌کنندگان می‌توانند از برنامه‌ای ابقای منابع انرژی بدست آورند زیرا به مصرف‌کنندگان پرهیز از هزینه‌های سرمایه‌گذاری را نوید می‌دهد [۳]. همچنین پایان‌پذیری منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش مشکلات محیط زیستی و تهدیدهایی که مصرف انرژی برای زندگی انسان‌ها در زمین به وجود می‌آورد، به‌عنوان موتور محرک ثانویه باعث افزایش اهمیت مصرف بهینه انرژی شده است [۴]. اگرچه ایران از غنی‌ترین منابع انرژی برخوردار است اما اتلاف و استفاده نادرست از آن خسارت جبران‌ناپذیری را به بودجه سالانه کشور تحمیل می‌کند. با توجه به این که متوسط شدت مصرف انرژی^۱ در جهان حدود ۰/۴ و این رقم در ایران کنونی بیش از ۰/۶ برآورد می‌گردد، لذا این نتیجه حاصل می‌شود که پتانسیل مناسبی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف به میزان حداقل تا ۳۰ درصد وجود دارد. به عبارت دقیق‌تر می‌توان با به کارگیری روش‌های مختلف و بدون کاهش تولید ناخالص ملی، بیش از ۳۳٪ از انرژی مصرفی در کشور را کاهش داد. در این راستا، این هزینه حاصل از منطقی کردن مصرف انرژی معادل تمام بودجه عمرانی کشور تخمین زده شده است [۱]. صنایع کاغذ و محصولات سلولزی جزو یکی از صنایع پرمصرف در بخش انرژی است صنعت کاغذسازی پنجمین مصرف‌کننده بزرگ انرژی می‌باشد [۵]. به طوری که در سال ۲۰۰۴، ۵/۷٪ از انرژی مصرف‌شده در صنایع کل دنیا مربوط به این صنعت بوده است [۶]. صنعت کاغذسازی یکی از صنایع رو به رشد در کشور است و یکی از بزرگ‌ترین مشکلات پیش روی این صنایع هزینه‌های متغیر و بالای انرژی است. کارخانه‌های کاغذسازی در کشور در حال حاضر از مصرف انرژی بالایی در مقایسه با

^۱ مصرف انرژی بر حسب تن معادل نفت خام به ازاء ۱۰۰۰ دلار تولید ناخالص ملی

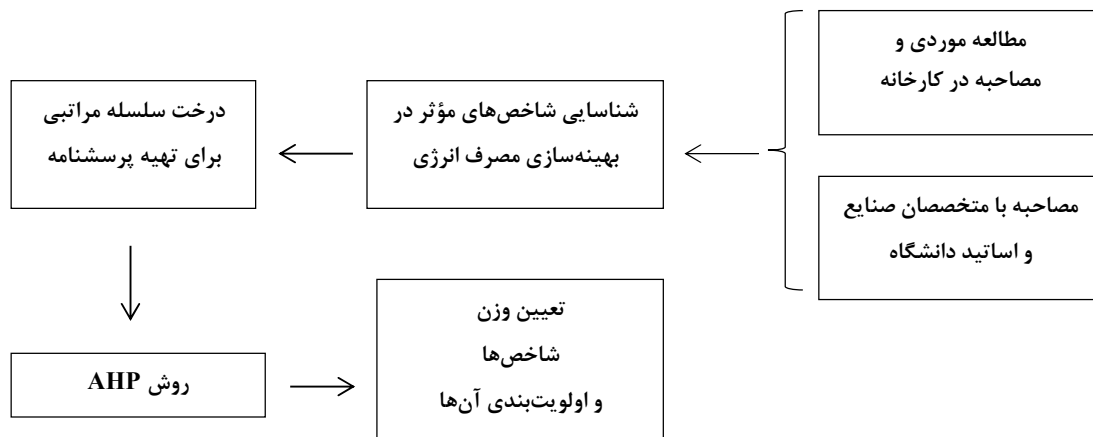
چندمنظوره است که اولین بار توسط Saaty در دهه ۱۹۸۰ ابداع گردید. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. این تکنیک، مسائل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آن‌ها مورد بررسی قرار می‌دهد و آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آن‌ها می‌پردازد. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب روبروست می‌تواند استفاده گردد. درخت سلسله‌مراتب تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات، وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. در نهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه حاصل آید. از مزایای مهم این روش این است که به‌گونه‌ای تصمیم‌های تمام اعضای گروه را باهم ترکیب می‌کند، به‌طوری که تصمیم بهینه، دربرگیرنده آراء همه اعضا باشد [۱۴]. میزان مصرف حامل‌های انرژی در شرکت‌های صنعتی و بخصوص صنایع کاغذسازی کشورمان بیشتر از الگوی مصرفی استاندارد می‌باشد. از ظرفی پایین بودن سطح تکنولوژی، بازده پایین، میزان بالای ضایعات مواد اولیه در صنایع ایران منجر به افزایش قیمت تولیدی محصول شده است. به‌کارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) روش بسیار قوی و کارا جهت مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی بوده و می‌تواند علاوه بر غلبه بر این مشکلات در صنایع داخلی، در ارتقای فناوری، کاهش بحران محیط زیستی، کاهش مصرف انرژی و رسیدن به توسعه پایدار در صنایع ایران تأثیر زیادی داشته باشد.

مواد و روش‌ها

روش و مراحل کار به‌صورت کلی در شکل ۱ نشان داده شده است. که در ادامه هر کدام از روش‌ها و فرآیندها توضیح داده شده است.

می‌باشند. این موضوع تحت تأثیر عوامل متعددی است که اصلی‌ترین آنها به ظرفیت رساندن واحدها، کاهش توقفات، اجرای صحیح و اصولی نگهداری و تعمیرات و بررسی توقفات در جهت رفع و کاهش آن می‌باشد [۲]. Rezanejad تحقیقی جهت مدیریت مصرف انرژی در کارخانه‌های کاغذسازی داشتند به این نتیجه رسیدند که رعایت توازن انرژی وسیله‌ای مؤثر برای تشخیص موارد اتلاف انرژی هست که می‌توان با استفاده از برنامه‌های نرم‌افزاری صورت گیرد. همچنین، افزایش بازده ترمودینامیکی، کاهش ضایعات، بازیابی انرژی و استفاده مجدد آن، اصلاح فرآیند، استفاده از روش‌های نوین در تولید و صرفه‌جویی انرژی سبب مدیریت بهینه انرژی و افزایش راندمان می‌شود [۷].

Abbasi و همکاران به ارزیابی محیط زیستی برای کارخانه‌های کاغذ و مقوا در اردن طبق مفاهیم تولید پاک‌تر پرداخته‌اند و نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که جهت اجرای تولید پاک‌تر باید روی مؤلفه‌های تولید پاک‌تر مورد مطالعه در آن کارخانه شامل تغییر فرآیند، بازگردانی، تغییر فناوری، تغییر ماده اولیه و تعمیر و نگهداری مفید سرمایه‌گذاری لازم صورت گیرد [۱۰]. Ren ۱۹۹۸ بررسی تولید پاک‌تر در صنایع خمیر و کاغذ چین به این نتیجه رسیده است استفاده از تکنولوژی مدرن، اصلاح تجهیزات، بازیافت و استفاده مجدد از منابع بهترین اولویت اجرا تولید پاک‌تر در کارخانه کاغذسازی چین است [۱۱]. Laurijssen و همکاران ۲۰۱۰ در تحقیقی به بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی در سیلندرهای خشک‌کن‌های صنعت کاغذ پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که میزان صرفه‌جویی انرژی حرارتی به سبب اقدامات بهینه‌سازی در بخش خشک‌کن نسبت به وضعیت اولیه ۰/۳۲ می‌باشد. این صرفه‌جویی حدود ۱۵ درصد از کل انرژی اولیه استفاده‌شده در کارخانه کاغذسازی است [۱۲]. روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از مهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری در علم مدیریت است که بر پایه قضاوت دوتایی استوار است [۱۳]. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری



شکل ۱- روش و مراحل کار به صورت کلی

– اجرای نظام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه
حفظ، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه^۱ (PM) از اقدامات مهم در تمامی کارخانه‌های از جمله کارخانه‌های کاغذسازی می‌باشد این عمل به منظور جلوگیری از آسیب و خرابی دستگاه‌ها و افزایش عمر آنها صورت می‌گیرد و بدین ترتیب از توقفات احتمالی جلوگیری می‌شود و موجب کاهش بسیاری از هزینه‌های اضافی می‌گردد.

– بازبایی انرژی
شامل اقداماتی در جهت استفاده مجدد از انرژی در بخش‌های مختلف تولید در جهت مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی می‌باشد.

– استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند

نصب سیستم مانیتورینگ در واحد بویلر سبب سهولت کار و تصمیم‌گیری سریع جهت اقدامات لازم توسط اپراتور و همچنین در خط ماشین کاغذ جهت کنترل عملکرد سیلندرهای خشک‌کن و مقدار بخار موردنیاز در سیلندرها و ... می‌باشد. این ۵ شاخص اصلی همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده به ۲۶ زیرشاخه فرعی تأثیرگذار در مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی در سطوح مختلف تقسیم می‌شوند. پس از طرح سلسله‌مراتب

در گام اول با مطالعه موردی، مصاحبه با متخصصان و کارشناسان کارخانه‌های کاغذسازی، اساتید دانشگاه و همچنین اطلاعات به‌دست‌آمده از منابع مختلف، ۵ شاخص اصلی و ۲۶ زیر شاخص تأثیرگذار در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه شناسایی گردید. که در ۵ شاخص اصلی شامل دانش فنی و نیروی انسانی، اصلاح فرآیند، اجرای نظام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، بازیابی انرژی و استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند قرار می‌گیرند. در ادامه شرح مختصری این شاخص‌های اصلی ارائه می‌شود:

– دانش فنی و نیروی انسانی

در دنیای صنعتی و رقابتی امروز نیروی انسانی هر شرکتی به‌عنوان سرمایه اصلی و عامل مؤثر در افزایش تولید و ارتقاء کیفیت محصول می‌باشد. عامل انسانی یکی از شاخص‌های مهم می‌باشد زیرا آگاهی و نگرش هر فرد در هر جایگاهی نقش مهمی در پیشبرد هدف دارد.

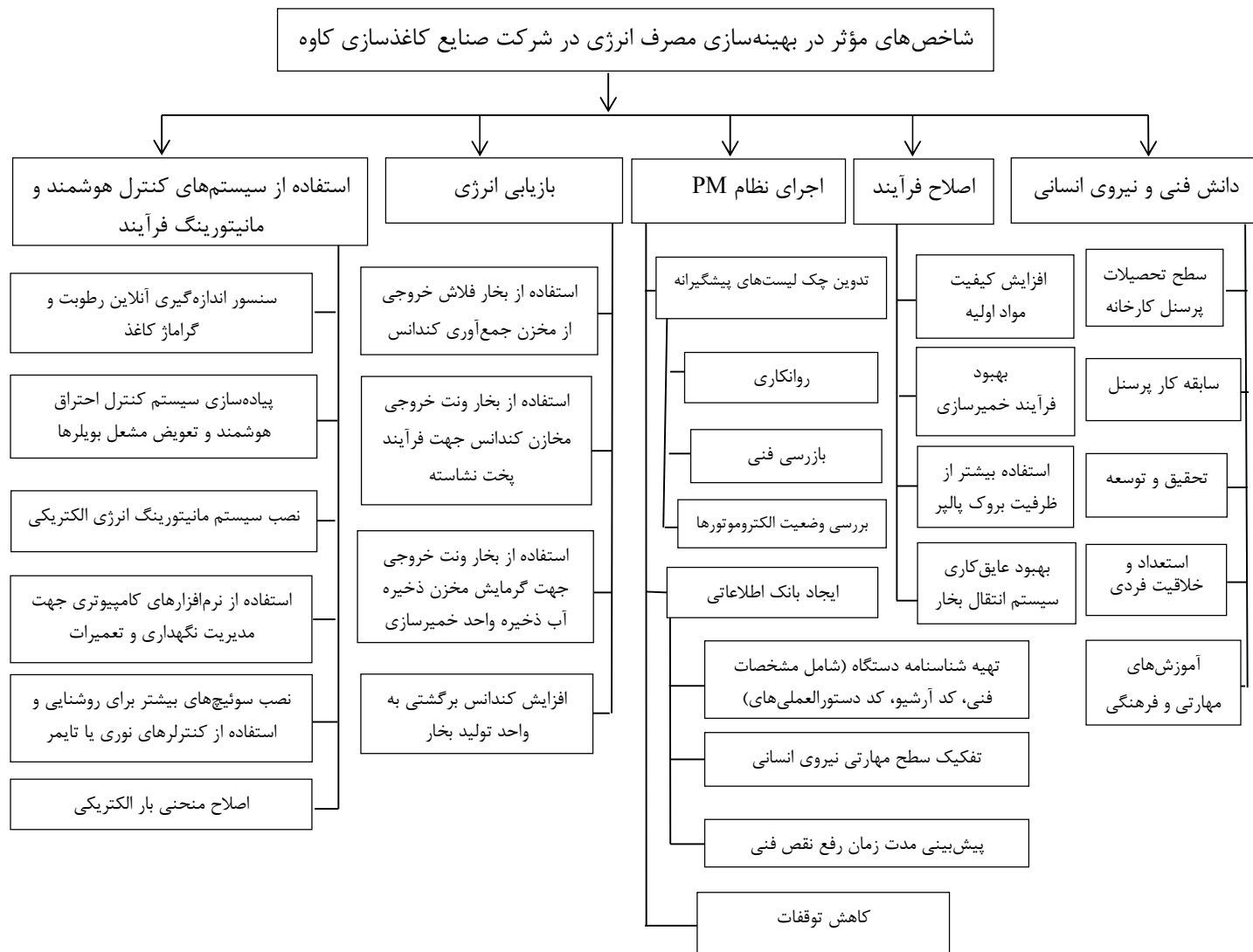
– اصلاح فرآیند

اصلاح فرآیند شامل ارتقاء، اصلاح و استفاده کارا تر از دستگاه‌ها و تجهیزات و همچنین افزایش بهبود مواد اولیه در جهت مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی می‌باشد. در اصلاح فرآیند تمرکز بر استفاده بهینه بوده و تغییر و جایگزینی دستگاه‌ها و تجهیزات کارخانه مدنظر نمی‌باشد.

² Preventive Maintenance or PM

ارائه توضیحات لازم بین جامعه آماری توزیع گردید (جامعه آماری ۲۴ نفر بوده که شامل ۸ نفر از اساتید دانشگاهی و ۱۶ نفر از پرسنل کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه شامل مدیران، مهندسان و کاردانان باتجربه) پرسشنامه‌ها پس از تکمیل جمع‌آوری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد.

شاخص‌های مذکور و مشخص شدن سطوح مختلف آن‌ها، پرسشنامه‌ای با ۳۴ جدول مقایسه زوجی (یک جدول برای مقایسه زوجی نسبت به سطح اول یا هدف اصلی، ۷ جدول برای مقایسه زوجی شاخص‌ها و ۲۶ جدول برای مقایسه گزینه‌ها نسبت به زیرشاخه‌ها) طراحی شد و برای تعیین میزان تأثیرگذاری این شاخص‌ها بر پایه وزن آن‌ها پس از



شکل ۲ - ساختار سلسله مراتبی شاخص‌ها و زیر شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه

- شرط معکوسی: اگر ترجیح عنصر A بر عنصر B برابر n باشد، ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر $\frac{1}{n}$ خواهد بود.

- اصل همگنی: عنصر A با عنصر B باید همگن و قابل مقایسه باشند. به بیان دیگر برتری عنصر A بر عنصر B نمی‌تواند بی‌نهایت یا صفر باشد.

- وابستگی: هر عنصر سلسله‌مراتبی به عنصر سطح بالاتر خود می‌تواند وابسته باشد و به صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد.

- انتظارات: هرگاه تغییری در ساختمان سلسله‌مراتبی رخ دهد پروسه ارزیابی باید مجدداً انجام گیرد. مطابق جدول ۱ اعدادی که در مقایسات زوجی مورد استفاده قرار می‌گیرند از $\frac{1}{9}$ تا ۹ هستند [۱۴].

روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای تعیین درجه اهمیت (ارزش وزنی) هر یک از معیارها

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) روشی است برای تصمیم‌گیری که با آن می‌توان بعضی از تصمیم‌های وابسته به چندین معیار یا تصمیم‌های وابسته به چندین معیار یا تصمیم‌های چند معیار را گرفت. با روش AHP، در آغاز ساختار تهیه می‌شود و سپس معیارهای مناسب تصمیم‌گیری با یکدیگر مقایسه می‌شوند و آنگاه ارزش وزنی هر یک از آن‌ها تعیین می‌شود [۱۴].

Saaty چهار اصل زیر را به عنوان اصول فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی بیان نموده و کلیه محاسبات، قوانین و مقررات را بر این اصول بنا نهاده است. این اصول عبارت‌اند از:

جدول ۱- مقیاس انجام مقایسه‌های دوتایی در اولویت‌های AHP

اهمیت	تعریف	توضیح
۱	بدون اهمیت	هر دو مورد اهمیت یکسانی دارند
۲	کم اهمیت	اهمیت یک مورد خیلی جزئی بیشتر است
۳	با اهمیت متوسط	اهمیت یک مورد کمی بیشتر است
۴	با اهمیت متوسط به بالا	اهمیت یک مورد بیشتر است
۵	کمی با اهمیت	
۶	با اهمیت	اهمیت یک مورد خیلی بیشتر است
۷	خیلی با اهمیت	
۸	خیلی با اهمیت	
۹	اهمیت فوق‌العاده	اهمیت یک مورد نهایت اهمیت ممکن است

۰/۱ باشد در غیر این صورت در مقایسه باید تجدیدنظر کرد. جهت اجرای این مراحل در روش تحلیل سلسله‌مراتبی نرم‌افزارهای مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شده است.

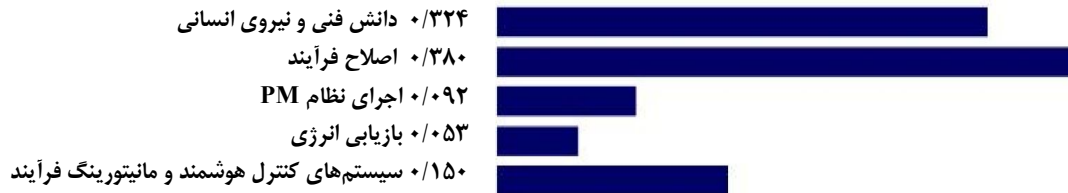
نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل پرسشنامه‌ها مطابق شکل ۳ نشان داد که اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه به ترتیب اصلاح فرآیند با وزن (۰/۳۸۰)، دانش فنی و نیروی انسانی (۰/۳۲۴)، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند (۰/۱۵۰)، اجرای نظام

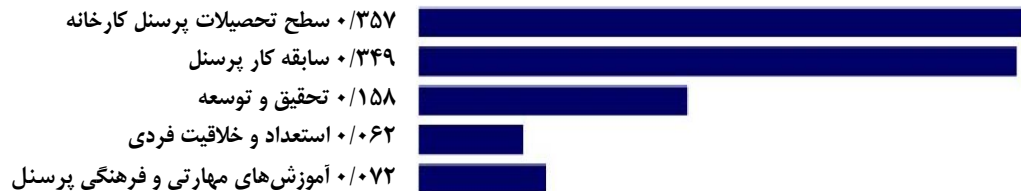
قدم بعدی در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام محاسبات لازم هر یک از عناصر تصمیم با استفاده از اطلاعات ماتریس‌های مقایسات زوجی است. خلاصه عملیات ریاضی در این مرحله به صورت زیر است. مجموع اعداد هر ستون از ماتریس مقایسات زوجی را محاسبه کرده، سپس هر عنصر ستون را بر مجموع اعداد آن ستون تقسیم می‌کنیم. ماتریس جدیدی که بدین صورت به دست می‌آید، «ماتریس مقایسات نرمال شده» نامیده می‌شود. میانگین اعداد هر سطر از ماتریس مقایسات نرمال شده را محاسبه می‌کنیم. این میانگین وزن نسبی عناصر تصمیم با سطرهای ماتریس ارائه می‌کند؛ و در نهایت میزان نرخ سازگاری را محاسبه می‌کنیم که میزان آن باید کمتر از

سطح سوم و چهارم در ادامه مطلب بیان می‌کنیم. اولویت‌بندی زیرشاخص‌های دانش فنی و نیروی انسانی در سطح سوم نشان‌دهنده این است که زیرشاخص سطح تحصیلات پرسنل کارخانه (با وزن ۰/۳۵۷) بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است (شکل ۴).

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) (۰/۰۹۲) و بازیابی انرژی (۰/۰۵۳) می‌باشد. بدین ترتیب شاخص اصلاح فرآیند با وزن ۰/۳۸ بالاترین اولویت را دارد و مهم‌ترین شاخص تأثیرگذار جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه محسوب می‌شود. همچنین برخی از اشکال اولویت‌بندی زیرشاخص‌های مهم‌تر را در



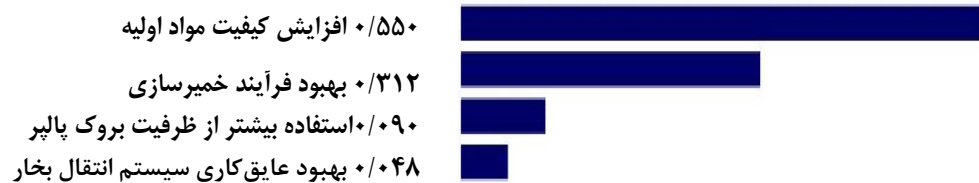
شکل ۳- اولویت‌بندی شاخص‌های اصلی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی (نرخ ناسازگاری ۰/۰۱)



شکل ۴- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های دانش فنی و نیروی انسانی (نرخ ناسازگاری ۰/۰۱)

مواد اولیه با وزن (۰/۵۵) در بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است (شکل ۵).

اولویت‌بندی زیرشاخص‌های اصلاح فرآیند در سطح سوم نشان‌دهنده این است که زیرشاخص افزایش کیفیت



شکل ۵- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های اصلاح فرآیند (نرخ ناسازگاری ۰/۰۳)

پیشگیرانه (با وزن ۰/۲۰۵) بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است.

با توجه به شکل ۶ اولویت‌بندی زیرشاخص‌های اجرای نظام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) در سطح سوم حاکی از این است که زیرشاخص تدوین چک‌لیست‌های

۰/۲۰۵ + تدوین چک لیست‌های پیشگیرانه
 ۰/۰۸۵ + ایجاد بانک اطلاعاتی
 ۰/۷۱۰ + کاهش توقفات

شکل ۶- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های اجرای نظام PM (نرخ ناسازگاری ۰/۰۲)

روانکاری، بازرسی فنی و بررسی وضعیت الکتروموتورها می‌باشد. که زیر شاخص بازرسی فنی با وزن (۰/۶۶۲) بالاترین اولویت را دارد.

شکل ۷ اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی، زیر شاخص‌های تدوین چک‌لیست‌های پیشگیرانه در سطح چهارم را نشان می‌دهد که شامل

۰/۲۵۴ + روانکاری
 ۰/۶۶۲ + بازرسی فنی
 ۰/۰۸۵ + بررسی وضعیت

شکل ۷- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های تدوین چک لیست‌های پیشگیرانه (نرخ ناسازگاری ۰/۰۲)

اولویت‌بندی زیرشاخص‌های بازبایی انرژی در سطح سوم نشان‌دهنده این است که زیرشاخص استفاده از بخار فلاش خروجی از مخزن جمع‌آوری کندانس با وزن (۰/۵۴۲) بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است (شکل ۸).

اولویت‌بندی زیرشاخص‌های ایجاد بانک اطلاعاتی در سطح چهارم نشان‌دهنده این است که زیرشاخص پیش‌بینی مدت‌زمان رفع نقص فنی با وزن (۰/۵۲۳) بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است (شکل ۸).

۰/۱۲۵ + تهیه شناسنامه دستگاه (شامل مشخصات فنی، کد آرشیو، کد دستورالعملی‌های)
 ۰/۳۵۲ + تفکیک سطح مهارتی نیروی انسانی
 ۰/۵۲۳ + پیش‌بینی مدت زمان رفع نقص فنی

شکل ۸- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های ایجاد بانک اطلاعاتی (نرخ ناسازگاری ۰/۰۱)

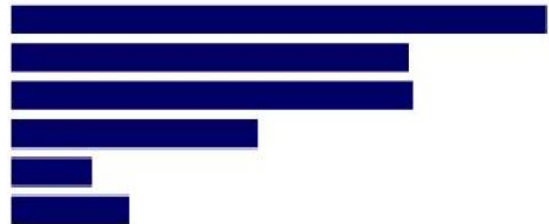
۰/۵۴۲ + استفاده از بخار فلاش خروجی از مخزن جمع‌آوری کندانس
 ۰/۰۷۷ + استفاده از بخار ونت (هواکش) خروجی مخازن کندانس جهت فرآیند بخت نشاسته
 ۰/۱۳۸ + استفاده از بخار ونت خروجی جهت گرمایش مخزن ذخیره آب واحد خمیرسازی
 ۰/۲۴۳ + افزایش کندانس برگشتی به واحد تولید بخار

شکل ۹- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های بازبایی انرژی (نرخ ناسازگاری ۰/۰۱)

آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ با وزن (۰/۳۰۲) در بالاترین اولویت قرار دارد (شکل ۱۰).

اولویت‌بندی زیرشاخص‌های استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند در سطح سوم نشان‌دهنده این است که زیرشاخص سنسور اندازه‌گیری

- ۰/۳۰۲ سنسور اندازه‌گیری آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ
- ۰/۲۲۲ پیاده‌سازی سیستم کنترل احتراق هوشمند و تعویض مشعل بویلرها
- ۰/۲۲۵ نصب سیستم مانیتورینگ انرژی الکتریکی
- ۰/۱۴۰ استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری جهت مدیریت نگهداری و تعمیرات
- ۰/۰۴۵ نصب سوئیچ‌های بیشتر برای روشنایی و استفاده از کنترلرهای نوری یا
- ۰/۰۶۶ تایمر اصلاح منحنی بار الکتریکی



شکل ۱۰- اولویت‌بندی زیر شاخص‌های استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند (نرخ ناسازگاری ۰/۰۴)

دومین زیر شاخص تأثیرگذار زیرشاخص بهبود فرآیند خمیرسازی می‌باشد. جهت این امر با تغییراتی در ساختار و شکل بدنه خمیرساز مانند تعبیه تیغه در بدنه، استفاده از پروانه‌های همزن با کارایی بالا، استفاده از آشغال‌گیرهای مناسب و بهبود جداسازی ناخالصی‌ها در مرحله خمیرسازی می‌توان سبب بهبود فرآیند خمیرسازی و کاهش انرژی مصرفی شد. همچنین با بهینه کردن شرایط خمیرسازی مانند مدت زمان خمیرسازی، استفاده از مواد شیمیایی مناسب در فرآیند خمیرسازی، افزایش دمای آب خمیرسازی، تنظیم PH مناسب و همچنین استفاده از مخزن‌های بزرگ ذخیره خمیر جهت انتقال بار مصرف انرژی الکتریکی خمیرسازی به ساعت‌های غیر پیک، می‌توان سبب بهینه‌سازی مصرف انرژی شد. زیرشاخص سوم و چهارم تأثیرگذار به ترتیب سطح تحصیلات و سابقه کار پرسنل کارخانه است. این دو شاخص نشان‌دهنده مهم بودن آگاهی، درک و نگرش هر فرد در هر جایگاهی از مجموعه در جهت پیشبرد هدف می‌باشد. زیرشاخص کاهش توقفات پنجمین زیرشاخص تأثیرگذار است. کاهش توقفات به دو شکل برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ریزی نشده می‌باشد. از آنجای که هر توقف موردی و غیر موردی با قطع تولید همراه است و از طرفی این‌گونه توقفات به‌ویژه شکل غیرموردی آن معمولاً از چند دقیقه تا چندین ساعت به طول می‌انجامد که در طی این مدت، تمام دستگاه‌ها و تجهیزات الکتریکی متوقف نمی‌شوند و فقط محرک‌های اصلی از مدار خارج می‌شوند، بنابراین درصد بالایی از دستگاه‌های الکتریکی که متوقف نشده‌اند، انرژی مصرف می‌کنند، بدون آنکه تولیدی داشته باشیم. نیز در توقفات موردی با توجه به توقف تقریبی دستگاه‌ها و تجهیزات اصلی یک واحد، بازهم تعدادی زیادی از

مطابق شکل ۱۱ اولویت‌بندی تمامی زیرشاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی بیانگر این موضوع است که زیرشاخص افزایش کیفیت مواد اولیه (با وزن ۰/۲۰۹) بیشترین اهمیت را در اجرای راهبردی بهینه‌سازی مصرف انرژی با بالاترین اولویت به خود اختصاص داده است. زیرشاخص‌های بهبود فرآیند خمیرسازی، سطح تحصیلات پرسنل کارخانه، سابقه کار پرسنل، کاهش توقفات، تحقیق و توسعه، سنسور اندازه‌گیری آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ، نصب سیستم مانیتورینگ انرژی الکتریکی، استفاده بیشتر از ظرفیت بروک پالپر، با توجه به وزن شاخص‌ها در اولویت‌های بعدی قرار دارند. تأثیرگذارترین زیرشاخص افزایش کیفیت مواد اولیه در کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه است. این زیرشاخص با توجه به اینکه فرآیند تولید کاغذ یک فرآیند پیوسته بوده به‌طور جامع روی تمامی فرآیند و کارکرد دستگاه‌ها و تجهیزات تولید از ابتدا شامل خمیرسازی تا آماده‌سازی، آبیگری، خشک‌کردن و در انتهای کار شامل پیچاندن کاغذ تأثیرگذار می‌باشد و سبب مصرف بهینه و افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود. کاهش کیفیت مواد اولیه به دلایلی مانند کمبود منابع چوبی و خمیر بکر، تعداد بالای چرخه بازیافت، عدم تفکیک از مبدأ و سیستم جمع‌آوری نامناسب و به دنبال آن وجود ناخالصی زیاد در آخال، عدم استفاده از دستگاه‌های مدرن و با کارایی بالا به‌طوری کلی کارخانه‌های کاغذسازی ایران و بخصوص کارخانه کاغذسازی کاوه سبب کاهش میزان راندمان تولید، افزایش میزان ضایعات (در کارخانه کاغذسازی کاوه و کارخانه‌های ایران حدود ۲۵ درصد بوده ولی میزان استاندارد آن ۱۰ درصد می‌باشد)، کاهش میزان مقاومت‌های کاغذ، افزایش میزان توقفات تولید و در نهایت منجر به افزایش میزان مصرف انرژی شده است.

اشکال مختلف و آماده نبودن لوازم‌یدکی و تجهیزات و ابزار موردنیاز جهت رفع عیب و غیره در نهایت موجب افزایش توقف و مصرف انرژی بیهوده می‌شوند، در حالیکه در توقفات برنامه‌ریزی‌شده، معمولاً سعی می‌شود اکثر دستگاه‌های غیرضروری متوقف تا مصرف انرژی کاهش یابد. بنابراین کاهش توقفات، به‌ویژه توقفات برنامه‌ریزی نشده، می‌تواند در کاهش مصرف انرژی بیهوده مؤثر باشد و در نهایت موجب کاهش KWH/T شود.

دستگاه‌ها را به علت ضرورت و نیاز پروسه تولید، نمی‌توان توقف داد مانند سیستم چرخه آب و غیره. اما توقفات برنامه‌ریزی نشده دارای عوارض و مشکلات بیشتری نسبت به توقفات برنامه‌ریزی‌شده کوتاه مدت هستند که افزایش KWH/T (میزان مصرف انرژی به ازای هر تن محصول تولیدی) یک عامل مستقیم و کم‌هزینه می‌باشد، زیرا خسارت غیرمستقیم توقفات این‌چنینی خیلی بیشتر از خسارات مستقیم آن است. استهلاک زودرس، امکان خرابی، بروز عیب در اجزا یک تجهیز به



شکل ۱۱- اولویت‌بندی نهایی ۲۶ زیر شاخص تأثیرگذار در بهینه‌سازی مصرف انرژی (نرخ ناسازگاری ۰/۰۱)

خواسته‌های مدیریت است. آنگیبری در بخش پرس ماشین کاغذ با افزایش فشار یکنواخت در سطح مقطع حاصل می‌شود، به‌طوری‌که ۱٪ کاهش در رطوبت کاغذ خروجی از پرس باعث ۴٪ صرفه‌جویی بخار خشک‌کن می‌شود یعنی چیزی در حدود ۰/۵ تن بر ساعت در مصرف بخار ماشین کاغذ صرفه‌جویی خواهد شد. بنابراین اندازه‌گیری آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ حائز اهمیت می‌باشد. از روش تحلیل سلسله‌مراتبی در تعیین شاخص‌های مؤثر در

زیرشاخص‌های تأثیرگذار بعدی به ترتیب زیرشاخص تحقیق و توسعه و سنسور اندازه‌گیری آنلاین رطوبت و گراماژ کاغذ است. تحقیق و توسعه تأثیر مستقیمی بر نوآوری، ارائه راهکار جهت ارتقای سطح استانداردهای شرکت و همچنین ارائه راهکار جهت بهره‌وری از نیروها و تجهیزات شرکت دارد. واحد تحقیق و توسعه، قلب یک شرکت یا سازمان است و نقش آن تغذیه تکنولوژیکی شرکت در همگامی با روند پیشرفت علم و دانش و

است. نتایج بدست آمده از مفاهیم مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی نشان داد که شاخص‌های اصلی مطالعه شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قوی و مفید جهت بهینه‌سازی مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی در سایر کارخانه‌های کاغذسازی ایران نیز بکار گرفته شود. با توجه به هزینه بالا در اجرای راهبردی مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی، روش AHP روشی بسیار قوی و کارا جهت اجرای این مهم است. شاخص‌های اصلی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه به ترتیب اولویت اصلاح فرآیند، دانش فنی و نیروی انسانی، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و مانیتورینگ فرآیند، اجرای نظام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) و بازیابی انرژی می‌باشد. که شاخص اصلاح فرآیند با وزن ۰/۳۸ بالاترین اولویت را دارد. همچنین با توجه به زیرشاخص‌های مورد مطالعه در این تحقیق، زیرشاخص افزایش کیفیت مواد اولیه که از زیرشاخص‌های اصلاح فرآیند است بیشترین تأثیر را در ارزیابی راهبردی مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری انرژی در این کارخانه دارد. افزایش کیفیت مواد اولیه سبب افزایش مقاومت‌های کاغذ، کاهش توقفات، سهولت آماده‌سازی خمیر و در نهایت سبب کاهش مصرف انرژی در کارخانه صنایع کاغذسازی کاوه می‌شود.

بهینه‌سازی مصرف انرژی، تحقیقات مشابهی به‌صورت تخصصی انجام نگرفته است ولی با این روش تحقیقات متعددی برای تعیین اولویت‌های شاخص‌های تولید پاک‌تر انجام شده است. قابل ذکر است که در فرآیند تولید پاک‌تر فاکتورهایی مانند آلاینده‌های زیست‌محیطی، میزان ضایعات، مصرف انرژی و ... مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج تحقیقاتی که در مورد تولید پاک‌تر در کارخانه‌های کاغذسازی لطیف و کاوه انجام شده بود نشان داد شاخص تغییر فرآیند بالاترین اولویت را در شاخص‌های اصلی داشت و همچنین زیر شاخص‌های تغییر فرآیند بیشترین تأثیر را در ارزیابی راهبردی تولید پاک‌تر در این کارخانه‌ها داشت. در تحقیق Azizi و همکاران که در کارخانه لطیف انجام گرفت زیر شاخص وجود اتوماسیون صنعتی و سطح تکنولوژی آن و در تحقیق Ghorbannezhad و همکاران که در کاخانه کاوه انجام گرفت زیرشاخص تعمیر و نگهداری مفید بالاترین اولویت را در بین زیر شاخص‌ها داشتند [۱۵، ۱۶].

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف تعیین شاخص‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شرکت صنایع کاغذسازی کاوه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شده

منابع

- [1]. Saba, 2011. Documents and reports of Iran energy productivity organization, <http://www.saba.org.ir>, (In Persian).
- [2]. Rezaei, A., Yazdani, A., Nahavandy, H., 2010. Management of optimum energy consumption and the productivity development (case study: Mazandaran wood & paper industries), in national conference on energy management and conservation. Tehran, Iran (In Persian).
- [3]. Mootamedhashemi, M., 2006. Optimizing energy efficiencies in industry. Nashr zarah publication ordered by Iranian fuel conservation company, 446 p. (In Persian).
- [4]. Rajan G.G., 2003. Optimizing energy efficiencies in industry. McGraw-Hill Professional, London. ISBN 978-0071396929.
- [5]. Conti, J. J., Holtberg, P. D., Beamon, J. A., Schaal, A. M., Ayoub, J. C., & Turnure, J. T. 2011. Annual energy outlook 2011 with projections to 2035. United States of America Department of Energy Information. Office of Integrated and International Energy Analysis.
- [6]. Mandil, C., 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions, international energy agency (IEA), 34, 1-12.

- [7]. Rezanejad, sh., 2011. Energy consumption and management in paper mills, international conference Emerging Trends in Energy Conservation – ETEC 2011. Tehran, Iran (In Persian).
- [8]. Holik, H. 2006. Handbook of paper and board. Wiley-VCH verlag GmbH& CO. KGaA, Weinheim. Chapter 12, Testing of paper.P.467-474.
- [9]. Mannisto, H. 1981. Mill energy audit can point out opportunities for conservation. Pulp and paper.
- [10]. Abbasi, G., Abbasi, Y. and Bassim, E., 2004. Environmental assessment for paper and cardboard industry in Jordan, a cleaner production concept. Journal of Cleaner Production, 12(4): 321-326.
- [11]. Ren, x., 1998, cleaner production in china's pulp and paper industry , journal of cleaner production , 6,349,355.
- [12]. Laurijssen, J., Frans, J., Worrell, E., & Faaij, A. 2010. Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry. Energy, 35(9), 3738-3750.
- [13]. Norman, Ma. J. R., Stephen, D., Arthur, J., 2005. Siting analysis of from – based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. Biomass and Bioenergy, 28: 591-600.
- [14]. Saaty, T.L., 2000. Fundamentals of Decision Making with Analytic Hierarchy Process. RWS publications, Pittsburgh, 478 p.
- [15]. Azizi, M., Asadizadeh, Y., Ray, C., & Hamzeh, Y. 2018. Cleaner production solution selection for paper making—a case study of Latif paper products Co. Iran. International Journal of Sustainable Engineering, 11(5), 342-352.
- [16]. Ghorbannezhad, P., Azizi, M., Ting, S., Layeghi, M. and Ramezani, O., 2011. Cleaner production: a case study of Kaveh paper mill. International journal of sustainable engineering, Taylor & Francis publication, 4(1): 68-74.

Determination of effective criteria in optimizing energy consumption in Kaveh paper industry company using analytic Hierarchy process

Abstract

The aim of this study was to determine effective criteria in optimizing energy consumption in Kaveh paper industry company by using the analytic hierarchy process (AHP). For these purposes, after a review of previous studies and some interviews with experts, effective criteria in optimizing energy consumption in Kaveh paper industry company were divided into 5 main categories and 26 subcategories. The degree of importance of the main categories and subcategories was determined after obtaining expert opinions using Expert Choice software. The results of this study showed that the main criteria in optimizing energy consumption are: process modification, technical knowledge, and manpower, implementation of preventive maintenance (PM) system, use of intelligent control systems and process monitoring, and energy recovery. Process modification criterion with a weight of 0.38 has the highest priority in optimizing energy consumption. In addition, among 26 sub-criteria effective in optimizing energy consumption in Kaveh paper industry company, sub-criteria improving stock pulp preparation, the level of education of factory personnel, work experience of personnel, reduction of stops, research and development, online moisture and basis weight paper measurement sensor, respectively, had the highest importance with the weight values of 0.209, 0.119, 0.116, 0.113, 0.066, 0.051 and 0.087. The inconsistency ratio of the research was 0.01 which shows the results have stability and compatibility. The results can be used to accelerate the implementation of the process of optimizing energy consumption in other paper mills in Iran.

Keywords: Energy consumption, optimizing energy consumption, paper industries, Analytical Hierarchy Process (AHP).

H. Sharifi Taskouh¹

M. Azizi^{2*}

Y. Hamzeh³

¹ PhD student., Faculty of Natural Resources, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

² Professor, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

³ Professor, Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

Corresponding author:

mazizi@ut.ac.ir

Received: 2021/09/10

Accepted: 2021/11/14