

نشریه علمی (فصلنامه) پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال هفتم / شماره ۲۲ / بهار ۱۴۰۰ / صفحات ۱۶۸ - ۱۴۹

## بهبود کارایی مواد اولیه و انرژی با به‌کارگیری سیستم هزینه‌یابی نوین: مطالعه موردی شرکت تعمیرات صنعت نیروگاهی کشور

اصغر حکیمی

دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

a\_hakimi2005@yahoo.com

زهره عابدی

دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

abedi2015@yahoo.com

فاطمه داداشیان

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

dadashia@aut.ac.ir

آبتین عطایی

دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

a.ataei@srbiau.ac.ir

امروزه در اکثر سازمان‌ها و صنایع، موضوع کارایی انرژی و هزینه انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که استخراج داده‌ها درباره هدررفت‌های مواد و انرژی و هزینه‌های مرتبط در زنجیره ارزش واحدهای تولیدی به روش متعارف غالباً دشوار است، خیلی از سازمان‌ها از هزینه واقعی هدررفت‌های مواد و انرژی به طور کامل و با جزئیات کافی آگاه نیستند. به همین منظور می‌بایست از روش‌های پیشرفته هزینه‌یابی به این منظور استفاده نمود. این پژوهش در نظر دارد با استفاده از روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA) هزینه‌های مواد و تلفات و مدیریت پسماند را مشخص کند و با استفاده از داده‌های استنتاج شده به بررسی هزینه‌های ساخت پره توربین پرداخته شود. مورد مطالعه در این تحقیق، ساخت پره توربین در شرکت تعمیرات صنعت نیروگاهی کشور است. روش مرسوم ساخت پره توربین، روش ماشین‌کاری است. با استفاده از روش مذکور تلفات زیادی وجود دارد که با مطالعه بر روی روش‌های موجود و مبتنی بر روش هزینه‌یابی MEFCA روش جایگزین مناسبی پیشنهاد می‌شود که با صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه‌ها با اجتناب از زیان‌های مادی (زباله) و کاهش هزینه‌های پنهان ضایعات، سبب بهبود کارایی مواد اولیه و انرژی می‌گردد. در پایان نتایج مطالعه، کارایی روش هزینه‌یابی پیشنهادی در صنعت نیروگاهی کشور به عنوان جایگزینی مطلوب برای روش هزینه‌یابی سنتی را نشان داده است.

**واژگان کلیدی:** روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA)، ساخت پره توربین، صنعت نیروگاهی کشور، هزینه‌یابی.

## ۱. مقدمه

انرژی یکی از گران‌ترین نهاده‌های قابل دسترس برای صنایع در سطح جهان می‌باشد. اما قیمت انرژی در ایران به علت پرداخت یارانه انرژی توسط دولت تا سال ۹۳۳۳ به نسبت بسیار پایین بوده است. حال با توجه به اجرای هدفمند کردن یارانه‌ها و آزادسازی قیمت‌ها توسط دولت، پیش‌بینی می‌شود که قیمت انرژی بشدت افزایش یابد. که این افزایش در قیمت، سبب افزایش هزینه‌های تولید در صنایع، خصوصاً صنایع انرژی‌بر مانند: فولاد، خودروسازی، سیمان، پتروشیمی و... خواهد شد و به نسبت سهمی که انرژی در قیمت تمام شده کالاها دارد قیمت کالاهای تولید شده افزایش می‌یابد (گراوند و همکاران، ۱۳۹۲). در سطح دنیا مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی کارایی انرژی با استفاده از روش‌های تحلیلی مختلف صورت گرفته است؛ کاهش مصرف انرژی تلف شده (گروخ، ۲۰۰۸) و سنجش بهبود کارایی انرژی در بخش‌های مختلف (مسکونی، کشاورزی، صنعتی و تجاری) از اهمیت بالایی برخوردار است (مارتینز، ۲۰۱۱).

در یک تحقیق کارایی فنی و کارایی انرژی (به عنوان یک نهاده خاص) صنعت پتروشیمی کشور طی سالهای ۱۳۷۳-۱۳۸۷ با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است (گراوند و همکاران، ۱۳۹۲). روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA<sup>۱</sup>) به عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای هزینه‌یابی برای مدیریت در مسائل محیط زیست در نظر گرفته می‌شود. این روش، یک رویکرد موثر برای رفع نیاز به افزایش بهره‌وری و کاهش تأثیرات زیست محیطی از طریق ارتقاء شفافیت استفاده از مواد و منابع است (یاگی و همکارش، ۲۰۱۹). MEFCA یک روش هزینه‌یابی است که در واحدهای فیزیکی و پولی همه جریان‌های مواد و انرژی را اندازه‌گیری می‌کند. علاوه بر این، روش مذکور هزینه‌های مرتبط با محصولات و زیان‌های مالی را نیز در بر می‌گیرد (کوکوبو و همکاران، ۲۰۱۳). کاربرد این روش مستقل از نوع سیستم تولیدی یا سازمان

است. تنها نیاز آن این است که شرکت مورد نظر مصرف‌کننده مواد و انرژی در فرایند خود باشد (دیاکس و همکارش، ۲۰۱۹). روش MEFCA تمام سیستم تولید را به مراکز کمی<sup>۲</sup> ( $QC^1$ ) تقسیم می‌کند. QC ها بخشی از سیستم تولیدی هستند که در آن ورودی‌ها و خروجی‌ها باید به صورت فیزیکی و بیشتر در واحد پولی تعیین شوند. معمولاً این مناطق مربوط به مکان‌هایی است که مواد را تغییر داده یا ذخیره می‌کنند (ایزو ۱۴۰۵۱، ۲۰۱۱، سیگولا و بیرر، ۲۰۱۴). QC نقطه شروع برای جمع آوری داده‌ها در واحدهای فیزیکی، اندازه‌گیری منابع است. برای هر QC مواد و انرژی مورد استفاده باید در واحدهای فیزیکی اندازه‌گیری شود. سپس، تمام اطلاعات مربوط به QC ها باید در یک مدل جریان جمع شوند (بهنامی و همکاران، ۲۰۱۹).

تصفیه فاضلاب فرایندی اجباری است تا اطمینان حاصل شود که کیفیت فاضلاب از الزامات قانونی برخوردار بوده و تأثیرات زیست محیطی را کاهش می‌دهد. گسترش استفاده از MEFCA به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری اولیه در انتخاب فناوری‌های تصفیه فاضلاب با حداقل هزینه تولید پسماند جریان مواد را در مقادیر فیزیکی و پولی در یک فرآیند تولید ارزیابی می‌کند (جویی و همکاران، ۲۰۲۰).

در این تحقیق بکارگیری سیستم هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی در صنعت نیروگاهی کشور پیشنهاد شده است. با استفاده از این روش نوین می‌توان به بهبود کارایی مواد و تلفات و مدیریت پسماند در این صنعت پرداخت. روش پیشنهادی به طور نمونه بر روی فرایند ساخت پره توربین در شرکت تعمیرات نیروگاهی کشور پیاده‌سازی شده و با استفاده از داده‌های بدست آمده، کارایی روش نمایش داده شده است. به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به شرح ذیل بیان نمود:

- بکارگیری سیستم ارزیابی هزینه‌یابی نوین در صنعت نیروگاهی.
- بهبود کارایی مواد اولیه و انرژی با بکارگیری روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA) در شرکت تعمیرات نیروگاهی کشور.

- صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه‌ها با اجتناب از زیان‌های مادی (زباله) و کاهش هزینه‌های پنهان ضایعات.
- استفاده از تکنیک‌های اقتصاد مهندسی و روش ارزش خالص فعلی جریان نقدی در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت.

ساختار این مقاله شامل بخش‌های زیر است؛ در ابتدا به مرور ادبیات موضوعی و بیان اهمیت و ضرورت تحقیق پرداخته شده است. سپس، به ارائه ساختار پیشنهادی برای بهبود کارایی مواد و انرژی پرداخته می‌شود. در ادامه، به تحلیل نتایج شبیه‌سازی و مطالعه موردی پرداخته شده است؛ در پایان به نتیجه‌گیری از روش پیشنهادی ارائه گردیده است.

## ۲. مرور ادبیات

در چند دهه گذشته، با توجه به مشکلات عدیده زیست محیطی بوجود آمده در پی فعالیت‌های صنعتی کشورها به منظور بهره‌برداری بیشتر از منابع با هدف ارتقا سهم تجارت جهانی خود و کسب سود بوده است، منجر به تغییر نگرش در زمینه محیط زیستی گردید. لذا روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی به عنوان مهمترین تکنیک بهره‌وری سبز، با توجه توام به ارزشیابی پولی اثرات مخرب زیست محیطی واحدهای تولیدی و خدماتی، افزایش راندمان تولید، بهره‌وری و سود، مورد استقبال جهانی قرار گرفت. زهرا عابدی و همکارش روش MEFCA در بخش احیا کارخانه آلومینیوم‌سازی ایران مورد بررسی قرار گرفته است (عابدی و همکاران، ۱۳۹۶).

در آلمان، MEFCA سال‌ها پیش برای مقابله با محدودیت در منابع مورد نیاز توسعه داده شد. MEFCA برای اولین بار به صورت عملی و کاربردی در مقیاس بزرگ در ژاپن استفاده شده است (اسمیت، ۲۰۱۳). با توجه به شرکت‌های چینی، هزینه‌های استاندارد، برای محاسبه هزینه‌های تولید جهت تصمیم‌گیری و به عنوان کمک به بودجه‌بندی استفاده می‌شود (نظرخان و همکاران، ۲۰۱۶). هزینه‌یابی جریان مواد را به عنوان یک رویکرد بالقوه برای نشان دادن اثرات کمی و پولی در زمینه مدیریت جریان می‌توان مواد مورد بحث قرار داد (سیگولا، ۲۰۱۱). یک کاربرد از MEFCA را در بزرگترین کارخانه تولید کننده کاشی‌های سرامیکی در جمهوری چک - شرکت لاسبرگر

می‌توان یافت. این پژوهش اهمیت داده‌های به دست آمده از سیستم MEFCA و همچنین کاربرد آنها برای بهینه‌سازی فرایندهای تولید برای شرایط خاص یک فرایند تولید از شرکت را نشان می‌دهد (هیرسلوا و همکاران، ۲۰۱۳). با استفاده از مفهوم MEFCA، یک مدل شبیه‌سازی برای زنجیره تامین شامل یک شرکت تولید کننده دنده ژاپنی و مشتری‌های آن، برای تجسم مقدار زیادی از ضایعات تولید شده توسط فرآیند تولید ساخته شد که مزایای زیست محیطی و اقتصادی را برای کل زنجیره تامین فراهم می‌کند (تانگ، ۲۰۱۲). سیستم هزینه‌یابی جریان مواد از جمله ابزارهایی است که با دنبال نمودن سه اصل کاهش، استفاده مجدد و بازیافت در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و پایداری تولید و مصرف اهمیت بسزایی دارد (عابدی و دیگران، ۲۰۱۴).

اثربخشی روش MEFCA در یک شرکت تولید کاغذ در کوازولو ناتال<sup>۱</sup> (دوراسامی، ۲۰۱۵)، شرکت تولید سویا (برمکی و همکارش، ۲۰۱۹)، شرکت تولید لاستیک (دانویلا و همکاران، ۲۰۲۰) و زنجیره تولید غذا (می و همکارش، ۲۰۲۰) نیز بررسی شده است که با توجه به شواهد و نتایج حاصل مدیران به این نتیجه رسیدند که این شرکت‌ها باید MEFCA را با سیستم فعلی ادغام نمایند تا اطمینان حاصل شود که در آینده پایدار باشند.

از دلایل اینکه شرکت‌های تولیدی به دنبال منابع پایدار هستند میتوان به کمبود منابع، آگاهی محیط زیست و پتانسیل صرفه‌جویی در هزینه اشاره نمود. برای رسیدگی به این مسائل، MEFCA به عنوان یک ابزار مدیریت زیست محیطی به کار گرفته شده است (سان و همکارانش، ۲۰۱۴). حیدری و همکارش (۱۳۸۴) کارایی نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور را بررسی داده‌اند و سوخت و نیروی انسانی و سرمایه را در مدلسازی خود در نظر گرفته‌اند. همچنین در ادامه به ارزیابی کارایی انرژی صنایع پتروشیمی کشور پرداخته‌اند (پورکاظمی، ۱۳۸۵) و (گراوند و همکاران، ۱۳۹۲). بر اساس MEFCA، در مطالعه تولید PCB<sup>۲</sup> به طور سیستماتیک، چندین مدل محاسبه هزینه خطی را در طول فرایند تولید برای ضبط جریان‌های واقعی پساب و همچنین انجام تجزیه و تحلیل هزینه-

1. KwaZulu-Natal

2. Printed Circuit Board

سود به وجود آورد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷). شرکت‌های کوچک و متوسط در سراسر جهان اغلب به چالش مباحث مربوط به افزایش بهره‌وری استفاده از مواد و انرژی، مدیریت پسماند و پایداری، مواجهه هستند. روش هزینه‌یابی MECCA به عنوان ابزاری برای بهره‌وری بهینه جهت غلبه بر این چالش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (کومار و همکاران، ۲۰۲۱). روش هزینه‌یابی MECCA در زنجیره تأمین مواد غذایی نیز استفاده شده است و به کمک این روش پتانسیل‌های کاهش هزینه، تولید درآمد و کاهش دی‌اکسیدکربن ناشی از جلوگیری و دورریز پسماند مواد غذایی در تولید آب توت سیاه در آلمان مورد بررسی قرار گرفته شده است (نادین می و همکارش، ۲۰۲۰).

### ۳. اهمیت و ضرورت تحقیق

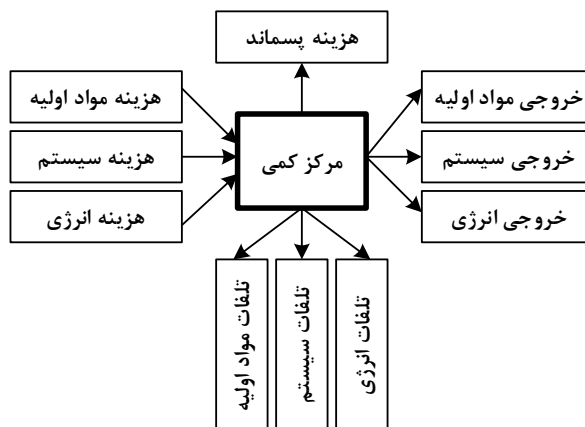
توجه به منابع انرژی و جلوگیری از هدر رفت آنها از اهمیت روز افزونی برخوردار است؛ همچنین مصرف پایدار به عنوان مقوله‌هایی بسیار مهم در روند توسعه پایدار محسوب می‌گردند و می‌توانند در ابعاد مختلف خرد، میان بخشی و کلان بر اقتصاد اثرگذار باشند. به همین جهت است که در صورت بهینه نبودن تولید و مصرف، حرکت اقتصاد به سمت توسعه پایدار با محدودیت‌های جدی روبرو خواهد شد (می و همکاران، ۲۰۲۰). صنایع و کارخانه‌ها نیز به دلیل مصرف منابع اولیه و انرژی، در توسعه پایدار نقشی مهم ایفا می‌کنند. از سوی دیگر هدر رفت منابع تولیدی در فرایند تولید سهم قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. سیستم هزینه‌یابی جریان مواد از جمله ابزارهایی است که با دنبال نمودن سه اصل کاهش، استفاده مجدد و بازیافت در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و پایداری تولید و مصرف اهمیت بسزایی دارد (عابدی و همکارش، ۱۳۹۲).

لذا امروزه استفاده از روش فلسفی و رویکرد خردگرایانه و سیستم‌های هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی به عنوان ابزاری جامع و دقیق برای شناسایی و تحلیل ناکارایی‌های انرژی در صنایع مختلف توصیه شده است (دیانتی و همکارش، ۱۳۹۴). سپس دو پرسش مطرح شد: به منظور افزایش بهره‌وری، می‌توان این سیستم را در بخشی از صنعت نیروگاهی کشور به کار گرفت. شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران یکی از شرکت‌هایی است که کلیه خدمات نیروگاهی را با بهره‌گیری از تجربیات و نیروی انسانی متخصص به صورت کامل اجرا می‌کند؛ در این تحقیق با بکارگیری از

روش MEFCA قصد بر این است که به مدیریت هزینه مواد اولیه و انرژی در تولید یک ست پره کامل در شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران پرداخته شود. مواد اولیه از جنس فولاد آلیاژ بصورت مکعب‌های بزرگ وارد کارخانه می‌شوند، برای ساخت پره، آنها را در سائزهای معین برش می‌دهند. آنگاه این مواد اولیه وارد مرحله تست می‌شوند تا با تست‌های غیرمخرب آنها را مورد آزمایش سلامت قرار دهند. مکعب‌های تست شده وارد مرحله ماشین‌کاری با دستگاه CNC می‌شوند تا آنها را به شکل پره‌های مورد نظر درآورند که در این مرحله بیشترین تلفات ایجاد می‌شود. در مرحله پولیش‌کاری با دستگاه سمباده‌زنی پره‌ها صیقل داده می‌شوند و در آخر آنها را از مرحله کنترل کیفیت می‌گذرانند (شرکت نیروگاهی ایران، ۱۳۹۹).

#### ۴. روش‌شناسی تحقیق

- روش پیشنهادی در این تحقیق روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی می‌باشد. ساختار آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود که شامل ورودی اصلی و تلفات خروجی و خروجی مثبت می‌باشد.
- ورودی: ورودی سیستم شامل مواد اولیه و ورودی، انرژی که شامل برق و آب، سیستم که شامل ابزارها و هزینه کارکنان است.
  - تلفات: تلفات مواد اولیه بالتبع باعث تلفات انرژی و سیستم می‌گردد.
  - هزینه مدیریت پسماند: هر مرحله شامل هزینه‌هایی برای دفع زباله و فاضلاب می‌گردد.
  - هزینه محصول خروجی مثبت: محصول نهایی مواد اولیه شامل هزینه انرژی و سیستم و مواد اولیه مثبتی است که باقیمانده است.



شکل ۹. ساختار MEFA

در این روش مراحل تولید مورد نظر به چند مرحله تقسیم می‌شود، که به هر مرحله یک مرکز کمی گویند. به هر مرحله یک ضریب تخصیص برای مرکز کمی در نظر گرفته می‌شود (می و همکارش، ۲۰۲۰).

$$index_{MC} = \frac{cost_{MC}}{w_{MC}} \quad (۱)$$

$$index_{SC} = \frac{cost_{SC}}{w_{MC}} \quad (۲)$$

$$index_{EC} = \frac{cost_{EC}}{w_{MC}} \quad (۳)$$

هزینه‌های تلف شده بخش‌های مختلف با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود (بهنامی و همکارانش، ۲۰۱۹):

$$cost_{WM} = w_W \times index_{MC} \quad (۴)$$

$$cost_{WS} = w_W \times index_{SC} \quad (۵)$$

$$cost_{WE} = w_W \times index_{EC} \quad (۶)$$

هزینه محصول مثبت خروجی نیز بصورت زیر محاسبه می‌شود (عابدی و همکارش، ۱۳۹۶):

$$cost_{PM} = (w_{MC} - w_W) \times (index_{MC}) \quad (۷)$$

$$\text{cost}_{PS} = (w_{MC} - w_W) \times (\text{index}_{SC}) \quad (۸)$$

$$\text{cost}_{PE} = (w_{MC} - w_W) \times (\text{index}_{EC}) \quad (۹)$$

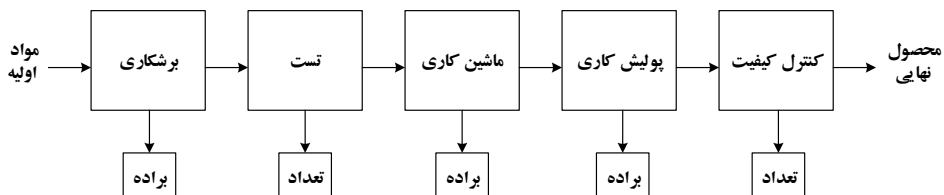
که در روابط فوق، MC به معنای هزینه مواد، SC هزینه سیستم و EC هزینه انرژی می‌باشد. تلفات بصورت زیر محاسبه می‌شود. در رابطه‌های فوق  $\text{index}_{MC}$  و  $\text{Index}_{SC}$  و  $\text{Index}_{EC}$  به ترتیب شاخص مواد اولیه، شاخص سیستم، شاخص انرژی ورودی،  $\text{Cost}_{MC}$  و  $\text{Cost}_{SC}$  و  $\text{Cost}_{EC}$  به ترتیب هزینه مواد اولیه، هزینه سیستم، هزینه انرژی ورودی،  $w_{MC}$  و  $w_W$  به ترتیب وزن مواد اولیه، وزن تلف شده،  $\text{Cost}_{WM}$  و  $\text{Cost}_{WS}$  و  $\text{Cost}_{WE}$  به ترتیب هزینه مواد اولیه تلف شده، هزینه سیستم تلف شده، هزینه انرژی تلف شده و در نهایت  $\text{Cost}_{PM}$  و  $\text{Cost}_{PS}$  و  $\text{Cost}_{PE}$  به ترتیب هزینه مواد اولیه مثبت خروجی، هزینه سیستم مثبت خروجی، هزینه انرژی مثبت خروجی است.

## ۵. شبیه‌سازی و مطالعه موردی

تولید و مصرف پایدار به عنوان مقوله‌هایی بسیار مهم در روند توسعه پایدار محسوب می‌گردند و می‌توانند در ابعاد مختلف خرد، میان‌بخشی و کلان بر اقتصاد اثرگذار باشند. به همین جهت است که در صورت بهینه نبودن تولید و مصرف، حرکت اقتصاد به سمت توسعه پایدار با محدودیت‌های جدی روبرو خواهد شد.

سیستم هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی از جمله ابزارهایی است که با دنبال نمودن سه اصل کاهش، استفاده مجدد و بازیافت در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و پایداری تولید و مصرف اهمیت بسزایی دارد. از روش MECCA علاوه بر بهبود بهره‌وری و شاخص‌های زیست محیطی، با آشکارسازی ضایعات پنهان و تخمین میزان واقعی تولید ضایعات در فرآیند تولید به عنوان یک محرک قوی جهت ایجاد انگیزه بخش مدیریت عمل می‌نماید. همچنین با کاهش هزینه‌های تولید، هزینه‌های مالی را بهبود می‌بخشد. بنابراین زمینه‌ساز تولید پاک در راستای توسعه صنعت پایدار می‌باشد. در شکل ۲ هزینه‌های ساخت یک ست پره توربین به روش ماشینکاری به تفکیک بیان شده است. در ادامه به مقایسه ساختار MECCA برای ساخت پره توربین به دو روش ماشینکاری و فورج بررسی شده است. طبیعی است در مقایسه دو روش فوق، تمامی هزینه‌ها در ساخت پره توربین، از

ابتدا (سرمایه‌گذاری) تا انتها در نظر گرفته شود. اطلاعات بیان شده برای سال ۱۳۹۹ بوده و مستقیماً از کارشناسان و خبرگان شرکت تعمیرات صنعت نیروگاهی کشور دریافت شده است.



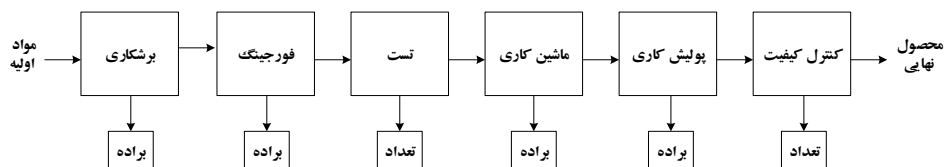
شکل ۱۰. ساختار MECCA برای ساخت پره توربین به روش ماشین‌کاری

در جدول ۱، هزینه‌های مربوط به ساخت پره به روش ماشین‌کاری نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید میزان مواد اولیه ورودی به میزان ۳۹۹۳/۷۵ کیلوگرم است که هزینه آن معادل ۳۹۹/۳۷۵ میلیون تومان است. همچنین محصول خروجی ۵۱۸/۵۷۱۹ کیلوگرم است که نشان می‌دهد میزان ۳۴۷۵/۱۷۸ کیلوگرم تلفات وجود دارد که میزان چشمگیری است. با توجه به این میزان تلفات، ما تلفات انرژی و سیستم زیادی نیز خواهیم داشت. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان تلفات مربوط به مرحله ماشین‌کاری است که میزان تقریباً ۸۶/۵ درصد کل مواد اولیه ورودی می‌باشد. پس باید برای این مرحله چاره‌ای اندیشید.

جدول ۱. هزینه‌های مربوط به ساخت پره به روش ماشین‌کاری (بر حسب میلیون تومان)

| مرحله فرایند        | برشکاری | تست    | ماشین کاری | پولیش کاری | کنترل کیفیت | کل     |
|---------------------|---------|--------|------------|------------|-------------|--------|
| هزینه مواد          | ۳۹۹/۳۸  | ۳۹۵/۳۸ | ۳۹۲/۸۱     | ۵۲/۷۹      | ۵۲/۵۳       | ۳۹۹/۳۸ |
| هزینه انرژی         | ۹/۱     | ۳/۱۲   | ۱۹/۷۴      | ۴/۹۱       | ۳/۱۲        | ۴۰     |
| هزینه سیستم         | ۵۹/۰۶   | ۳۶/۱۷  | ۳۹۳/۴۷     | ۳۱/۸۶      | ۹۱/۴۴       | ۶۱۲    |
| هزینه منفی          | ۳/۹۹    | ۲/۵۸   | ۳۴۰/۰۱     | ۲/۶۴       | ۰/۶۷        | ۳۴۷/۵۲ |
| تلفات انرژی         | ۰/۰۹    | ۰/۰۲   | ۱۷/۰۹      | ۰/۰۲       | ۰/۰۴        | ۱۷/۲۶  |
| تلفات سیستم         | ۰/۵۹    | ۰/۲۴   | ۳۴۰/۵۸     | ۰/۱۶       | ۱/۱۷        | ۳۴۲/۷۴ |
| هزینه مثبت          | ۳۹۵/۳۸  | ۳۹۲/۸۱ | ۵۲/۷۹      | ۵۲/۵۳      | ۵۱/۸۶       | ۵۱/۸۶  |
| انرژی مثبت          | ۹/۰۱    | ۳/۱۰   | ۲/۶۵       | ۴/۸۹       | ۳/۰۸        | ۲۲/۷۴  |
| هزینه سیستم مثبت    | ۵۸/۴۷   | ۳۵/۹۳  | ۵۲/۸۸      | ۳۱/۷۰      | ۹۰/۲۷       | ۲۶۹/۲۶ |
| تلفات در بخش مدیریت | ۰/۱۰    | ۰/۵۰   | ۰/۵۰       | ۰/۱۵       | ۰/۱۰        | ۰/۹۵   |

یکی از روش‌های تولید پره روش فورج قطعات می‌باشد. در این روش مکعب‌ها به اندازه‌های پره مورد نظر در آورده می‌شوند و در کوره به حالت خمیر در آورده می‌شوند و با دستگاه پرس آنرا در قالب‌های از پیش ساخته شده پرس می‌کنند و ادامه مراحل مثل قبل می‌باشند. در شکل ۳ مراحل ساخت پره با روش فورج آورده شده است.



شکل ۱۱. ساختار MEFCA برای ساخت پره به روش فورج

هزینه‌های مربوط به ساخت پره به روش فورج در جدول ۲ مشاهده می‌شود. میزان مواد اولیه ورودی ۱۳۱۲/۵ کیلوگرم است که محصول خروجی ۵۲۵/۰۲۵ کیلوگرم است پس تلفات آن ۷۸۷/۴۷۵ کیلوگرم می‌باشد و تلفات کمی به نسبت روش ماشین کاری می‌باشد. در ادامه نیز، دو روش استفاده شده ساخت پره توربین با هم مقایسه می‌شود.

جدول ۲. هزینه‌های مربوط به ساخت پره به روش فورج (بر حسب میلیون تومان)

| مرحله فرایند     | برشکاری | فورجینگ | تست    | ماشین کاری | پولیش کاری | کنترل کیفیت | کل     |
|------------------|---------|---------|--------|------------|------------|-------------|--------|
| هزینه مواد       | ۱۳۱/۲۵  | ۱۲۹/۹۴  | ۱۱۶/۹۴ | ۱۱۴/۶۸     | ۵۲/۸۰      | ۵۲/۶۹       | ۱۳۱/۲۵ |
| هزینه انرژی      | ۵/۳۰    | ۷/۲۸    | ۲/۰۸   | ۱۰/۲۳      | ۴/۸۶       | ۳/۱۲        | ۳۲/۸۷  |
| هزینه سیستم      | ۳۴/۳۶   | ۱۲۰     | ۲۳/۳۶  | ۲۲۶/۵۳     | ۳۱/۵۳      | ۹۱/۴۴       | ۵۲۷/۲۲ |
| هزینه منفی       | ۱/۳۱    | ۱۲/۹۹   | ۲/۲۷   | ۶۱/۸۸      | ۰/۱۱       | ۰/۱۹        | ۷۸/۷۵  |
| تلفات انرژی      | ۰/۰۵    | ۰/۷۳    | ۰/۰۴   | ۵/۵۲       | ۰/۰۱       | ۰/۰۱        | ۶/۳۶   |
| تلفات سیستم      | ۰/۳۴    | ۱۲      | ۰/۴۵   | ۱۲۲/۲۳     | ۰/۰۶       | ۰/۳۳        | ۱۳۵/۴۲ |
| هزینه مثبت       | ۱۲۹/۹۴  | ۱۱۶/۹۴  | ۱۱۴/۶۸ | ۵۲/۸۰      | ۵۲/۶۹      | ۵۲/۵۰       | ۵۲/۵۰  |
| انرژی مثبت       | ۵/۲۴    | ۶/۵۶    | ۲/۰۴   | ۴/۷۱       | ۴/۸۵       | ۳/۱۱        | ۲۶/۵۱  |
| هزینه سیستم مثبت | ۳۴/۰۱   | ۱۰۸     | ۲۲/۹۱  | ۱۰۴/۲۹     | ۳۱/۴۷      | ۹۱/۱۱       | ۳۹۱/۷۹ |
| تلفات در مدیریت  | ۰/۰۷    | ۰/۳۰    | ۰/۱۰   | ۰/۲۰       | ۰/۱۰       | ۰/۱۰        | ۰/۸۷   |

با توجه به جدول ۳ هزینه ورودی در روش ماشین‌کاری ۱۰۵۱/۳۶ میلیون تومان است در حالی که در روش فورج میزان ۶۹۱/۳۳ میلیون تومان است که میزان هزینه ورودی را ۳۶۰/۰۳ میلیون تومان کاهش داده است، همچنین میزان متریال را ۲۶۸۱ کیلوگرم کاهش یافته است که این خود یک بهینگی در هزینه ورودی است. هزینه تلفات در روش ماشین‌کاری ۷۰۸ میلیون تومان است که در روش فورج ۲۲۰ میلیون تومان است که میزان ۴۸۸ میلیون تومان از تلفات کاهش یافته است. همچنین هزینه پره خروجی مثبت ۳۴۳ میلیون تومان است که ۳۲ درصد هزینه کل ساخت را برداشته است و نزدیک ۶۸ درصد تلف شده است در حالیکه در روش فورج ۶۸ درصد هزینه ورودی به محصول مثبت اختصاص داده شده است و تلفات ۳۲ درصد است. همچنین هزینه مدیریت پسماند کاهش یافته است. همانطور که در جدول زیر مشخص شده تفاوت در پسماند ناشی از تفاوت روش‌ها در ساخت پره بوده که امری بدیهی است. همانگونه که در نتایج مشاهده می‌شود، سهم هزینه‌های سیستم در روش فورج نسبت به روش ماشین‌کاری بیشتر بوده اما هزینه‌های انرژی تقریباً سهم یکسانی دارند. در خصوص سهم هزینه‌های متریال می‌توان مشاهده نمود در روش فورج، هزینه‌های این بخش بیشتر است. همچنین با مقایسه درصد هزینه از کل خروجی‌ها بین دو روش می‌توان مشاهده نمود که هزینه‌های سیستم در روش فورج بیشتر بوده اما هزینه‌های متریال در روش ماشین‌کاری نسبت به روش فورج کمتر است. ضمن اینکه در روش فورج سهم خروجی‌های مثبت نسبت به خروجی‌های منفی بیشتر است، اما در روش ماشین‌کاری معکوس است و سهم خروجی‌های منفی بیشتر از خروجی‌های مثبت است.

جدول ۳. مقایسه دو روش ساخت پره

| مدل انجام فرایند | ماشین کاری       | فورج     | میزان بهبود (درصد) |
|------------------|------------------|----------|--------------------|
| ورودی            | موا اولیه (kg)   | ۳۹۹۳/۷۵  | ۱۳۱۲/۵             |
|                  | انرژی            | ۳۹/۹۹۶   | ۳۲/۸۶۹             |
|                  | سیستم            | ۶۱۱/۹۹۷  | ۵۲۷/۲۱۶            |
| خروجی منفی       | موا اولیه (kg)   | ۳۴۷۵/۱۷۸ | ۷۸۷/۴۷۴            |
|                  | انرژی            | ۱۷/۲۶۱   | ۶/۳۶۱              |
|                  | سیستم            | ۳۴۲/۷۳۹  | ۱۳۵/۴۲۲            |
| خروجی مثبت       | موا اولیه (kg)   | ۵۱۸/۵۷۲  | ۵۲۵/۰۲۵            |
|                  | انرژی            | ۲۲/۷۳۵   | ۲۶/۵۰۷             |
|                  | سیستم            | ۲۶۹/۲۵۷  | ۳۹۱/۷۹۳            |
| پسماند           | تلفات مواد اولیه | ۰/۸۵     | ۰/۸۷               |

در ادامه این پژوهش نیز به منظور بررسی صرفه اقتصادی تولید پره توربین با روش فورج، از تکنیک‌های اقتصاد مهندسی استفاده خواهد شد. اطلاعات مالی که علاوه بر داده‌های گذشته برای این محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. اطلاعات مالی مورد نیاز برای ایجاد جریان‌های مالی

| ردیف | عنوان                                             | مقدار                   |
|------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| ۱    | ظرفیت تولید پره در یک سال                         | ۱۵ ست هزار تایی         |
| ۲    | متوسط قیمت فروش هر پره                            | هر ست ۱/۵ میلیارد تومان |
| ۳    | ارزش فعلی تجهیزات ماشین کاری                      | ۱۵۰ میلیارد تومان       |
| ۴    | عمر مفید باقی مانده تجهیزات ماشین کاری            | ۴۰ سال                  |
| ۵    | ارزش اسقاطی تجهیزات ماشین کاری                    | ۱۰ میلیارد تومان        |
| ۶    | میزان سرمایه مورد نیاز جهت راه اندازی کارگاه فورج | ۱۰ میلیارد تومان        |
| ۷    | عمر مفید تجهیزات فورج                             | ۴۰ سال                  |
| ۸    | ارزش اسقاطی تجهیزات فورج                          | ۵۰۰ میلیون تومان        |

برای مقایسه دو روش فورج و ماشین‌کاری با استفاده از تکنیک‌های اقتصاد مهندسی و روش ارزش خالص فعلی استفاده شده است (اسکونزاد، ۱۳۹۸). مطالعات اقتصادی مربوط به روش ماشین‌کاری و روش فورجینگ در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند. در این تحقیق افق برنامه‌ریزی مطالعه ۴۰ ساله خواهد بود با توجه به وضعیت تورمی موجود در این شرکت فرض شده که در هر دوره ۴ ساله این درآمد ۵۰ درصد افزوده خواهد شد. این موضوع در خصوص هزینه‌های عملیاتی نیز صادق است. لازم به ذکر است که این نرخ مطابق با نظر کارشناسان و مهندسیان خبره در شرکت تعمیرات صنعت نیروگاهی کشور بدست آمده است. بنابراین افق زمانی در دوره‌های زمانی ۴ ساله بوده که جمعاً ۱۰ دوره در نظر گرفته شده است. در این تحقیق نرخ بهره متوسط برابر ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. البته واضح است که برای یک دوره ۴۰ ساله این نرخ در هر سال متغیر خواهد بود و در این تحقیق مقدار متوسط در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق ساختار پیشنهادی مورد نظر بوده است و در صورت متغیر بودن این نرخ، می‌توان در ساختار پیشنهادی از نرخ‌های جدید استفاده نمود.

جدول ۵. محاسبات اقتصاد مهندسی روش ماشین‌کاری (اعداد به میلیارد تومان)

| دوره | سرمایه‌گذاری اولیه | ارزش اسقاط | درآمد | هزینه بهره‌برداری | درآمدها قبل از کسر مالیات | هزینه استهلاک | درآمد مالیات‌پذیر | مالیات | بعد از کسر مالیات | ارزش فعلی جریان |
|------|--------------------|------------|-------|-------------------|---------------------------|---------------|-------------------|--------|-------------------|-----------------|
| ۰    | ۱۵۰                | ۰          | ۰     | ۰                 | ۰                         | ۰             | ۰                 | ۰      | ۰                 | ۷۷۷             |
| ۱    | ۰                  | ۰          | ۹۰    | ۵۳                | ۳۷                        | ۱۴            | ۲۳                | ۲      | ۳۵                |                 |
| ۲    | ۰                  | ۰          | ۱۳۵   | ۸۰                | ۵۵                        | ۱۴            | ۴۱                | ۴      | ۵۱                |                 |
| ۳    | ۰                  | ۰          | ۲۰۳   | ۱۲۰               | ۸۲                        | ۱۴            | ۶۸                | ۶      | ۷۶                |                 |
| ۴    | ۰                  | ۰          | ۳۰۴   | ۱۸۰               | ۱۲۳                       | ۱۴            | ۱۰۹               | ۱۰     | ۱۱۴               |                 |
| ۵    | ۰                  | ۰          | ۴۵۶   | ۲۷۱               | ۱۸۵                       | ۱۴            | ۱۷۱               | ۱۵     | ۱۷۰               |                 |
| ۶    | ۰                  | ۰          | ۶۸۳   | ۴۰۶               | ۲۷۸                       | ۱۴            | ۲۶۴               | ۲۴     | ۲۵۴               |                 |
| ۷    | ۰                  | ۰          | ۱۰۲۵  | ۶۹                | ۴۱۶                       | ۱۴            | ۴۰۲               | ۳۶     | ۳۸۰               |                 |
| ۸    | ۰                  | ۰          | ۱۵۳۸  | ۹۱۳               | ۶۲۵                       | ۱۴            | ۶۱۱               | ۵۵     | ۵۷۰               |                 |
| ۹    | ۰                  | ۰          | ۲۳۰۷  | ۱۳۷۰              | ۹۳۷                       | ۱۴            | ۹۲۳               | ۸۳     | ۸۵۴               |                 |
| ۱۰   | ۰                  | ۱۰         | ۳۴۶۰  | ۲۰۵۴              | ۱۴۰۵                      | ۱۴            | ۱۳۹۱              | ۱۲۵    | ۱۲۸۰              |                 |

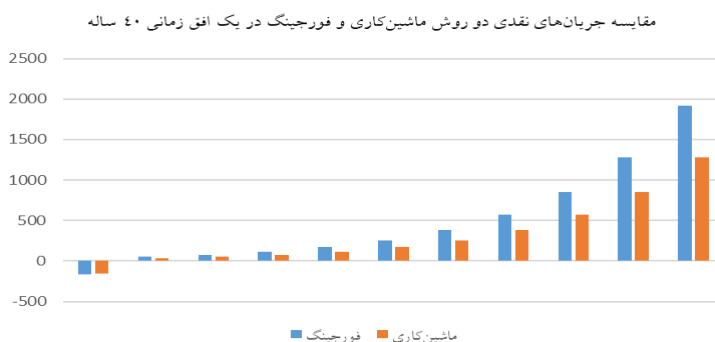
ارزش فعلی بیشتر در این مقایسه به معنای بهتر بودن روش از منظر توجیه اقتصادی می‌باشد. سرمایه‌گذاری اولیه در دوره اول برنامه‌ریزی برابر ۱۵۰ میلیارد تومان است. ارزش اسقاطی تجهیزات پس از پایان طول عمر برابر ۰/۵ میلیارد تومان است. با توجه به اینکه هر دوره برابر ۴ سال در نظر گرفته شده و ظرفیت تولید هر سال برابر ۱۵ ست پره می‌باشد، مقدار تولید پره برابر ۶۰ ست در طول یک دوره است که درآمدی معادل ۹۰ میلیارد تومان به همراه خواهد داشت. هزینه‌های عملیاتی شامل کل هزینه‌های انرژی، سیستم و متریال برای روش ماشین‌کاری طبق محاسبات انجام شده در فصل قبلی تحقیق به ازای ۱۱۸۰ پره برابر ۱/۰۵۱ میلیارد تومان است که با تناسب‌گیری به ازای تولید ۶۰ ست پره هزار تایی برابر ۵۳/۴۴ میلیارد تومان خواهد بود. در روش فورجینگ به صورت مشابه مقدار هزینه‌های عملیاتی برابر ۳۵/۱۳ میلیارد تومان است. استهلاک به روش خط مستقیم برای هر

دوره چهارساله در تجهیزات روش ماشین‌کاری برابر ۱۴ میلیارد تومان  $(10/100-150)$  و در تجهیزات روش فورج برابر ۱۴/۹۵ میلیارد تومان  $(10/100-150)$  است.

جدول ۶. محاسبات اقتصاد مهندسی روش فورج (اعداد به میلیارد تومان)

| دوره | سرمایه‌گذاری اولیه | ارزش اسقاط | درآمد | هزینه بهره‌برداری | درآمدها قبل از کسر مالیات | هزینه استهلاک | درآمد مالیات‌پذیر | مالیات | بعد از کسر مالیات | ارزش فعلی جریان |
|------|--------------------|------------|-------|-------------------|---------------------------|---------------|-------------------|--------|-------------------|-----------------|
| ۰    | ۱۶۰                | ۰          | ۰     | ۰                 | ۰                         | ۰             | ۰                 | ۰      | ۰                 | ۱۲۲۹            |
| ۱    | ۰                  | ۰          | ۹۰    | ۳۵                | ۵۵                        | ۱۴/۹۵         | ۴                 | ۴      | ۵۱                |                 |
| ۲    | ۰                  | ۰          | ۱۳۵   | ۵۳                | ۸۵                        | ۱۴/۹۵         | ۶۷                | ۶      | ۷۶                |                 |
| ۳    | ۰                  | ۰          | ۲۰۳   | ۷۹                | ۱۲۳                       | ۱۴/۹۵         | ۱۰۹               | ۱۰     | ۱۱۴               |                 |
| ۴    | ۰                  | ۰          | ۳۰۴   | ۱۱۹               | ۱۸۵                       | ۱۴/۹۵         | ۱۷۰               | ۱۵     | ۱۷۰               |                 |
| ۵    | ۰                  | ۰          | ۴۵۶   | ۱۷۸               | ۲۷۸                       | ۱۴/۹۵         | ۲۶۳               | ۲۴     | ۲۵۴               |                 |
| ۶    | ۰                  | ۰          | ۶۸۳   | ۲۶۷               | ۴۱۷                       | ۱۴/۹۵         | ۴۰۲               | ۳۶     | ۳۸۱               |                 |
| ۷    | ۰                  | ۰          | ۱۰۲۵  | ۴۰                | ۶۲۵                       | ۱۴/۹۵         | ۶۱۰               | ۵۵     | ۵۷۰               |                 |
| ۸    | ۰                  | ۰          | ۱۵۳۸  | ۶۰۰               | ۹۳۸                       | ۱۴/۹۵         | ۹۲۳               | ۸۳     | ۸۵۴               |                 |
| ۹    | ۰                  | ۰          | ۲۳۰۷  | ۹۰۰               | ۱۴۰۶                      | ۱۴/۹۵         | ۱۳۹۱              | ۱۲۵    | ۱۲۸۱              |                 |
| ۱۰   | ۰                  | ۱۰/۵       | ۳۴۶۰  | ۱۳۵۱              | ۲۱۰۹                      | ۱۴/۹۵         | ۲۰۹۴              | ۱۸۸    | ۱۹۲۱              |                 |

نمودار شکل ۴، مقایسه جریان‌های نقدی این دو روش را نشان می‌دهد. مقدار ارزش خالص فعلی در روش ماشین‌کاری برابر ۷۷۷ میلیارد تومان و در روش فورج برابر ۱۲۲۹ میلیارد تومان است که نشان‌دهنده اختلاف چشمگیر و قابل توجه میان این دو روش از منظر تکنیک‌های اقتصاد مهندسی می‌باشد. در نتیجه می‌توان ادعا نمود روش فورجینگ نسبت به روش ماشین‌کاری از حیث مسائل اقتصادی با در نظر گرفتن افق برنامه‌ریزی بلندمدت از وضعیت بسیار بهتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۴. مقایسه جریان‌های نقدی دو روش ماشین‌کاری و فورجینگ

## ۶. نتیجه‌گیری

از دهه ۱۹۹۰ تاکنون با روی کار آمدن سیستم‌های مدیریت نوین، مساله کاهش میزان مواد و انرژی مصرفی در صنایع و کارخانجات مختلف، با هدف تامین منافع اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. روش هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA) ابزاری سازمانی است که شرکت‌های تولیدی برای بهبود کارایی مواد اولیه و انرژی و سیستم خود استفاده می‌کنند. هدف MEFCA این است که در انرژی صرفه‌جویی گردد و هزینه‌ها با اجتناب از زیان‌های مادی (زباله) باعث ذخیره مالی گردد. برای رسیدن به این هدف، می‌توان از MEFCA برای محاسبه هزینه‌های واقعی ضایعات (هزینه‌های پنهان) استفاده کرد. MEFCA یک عنصر مهم از بهره‌وری منابع عملیاتی برای شرکت‌ها است و از طریق استاندارد ایزو ۱۴۰۵۱ استاندارد شده است. با استفاده از روش MEFCA به مطالعه و مقایسه دو روش ساخت پره به روش فورج کردن و ماشین‌کاری پرداختیم. در روش ماشین‌کاری ورودی ۳۹۹۳/۵ کیلوگرم بود که میزان ۸۷ درصد آن به تلفات می‌انجامید که با توجه به الگوریتم MEFCA مشاهده شد که بیشترین تلفات مربوط به قسمت ماشین‌کاری با CNC می‌باشد که این تلفات موجب بالا رفتن هزینه تلفات می‌گردید. راهکاری برای این موضوع ارائه گردید که آن روش فورج کردن قطعات بود که میزان مواد اولیه ورودی ۱۳۱۲/۵ کیلوگرم شد و تلفات آن ۶۰ درصد ورودی (۷۸۷/۵ کیلوگرم) شد که مشاهده گردید تلفات کاهش یافت. به طور کلی در پژوهش حاضر با استفاده داده‌های استنتاج شده به بررسی هزینه‌های ساخت پره توربین پرداخته شد. روش مرسوم ساخت پره توربین روش ماشین‌کاری است که مشاهده شد، تلفات

زیادی دارد. با مطالعه بر روی روش‌های مختلف مشخص شد، روش فورج قطعات باعث کاهش تلفات و هزینه می‌گردد. در پایان هزینه‌های دو روش با هم مقایسه شد و از تکنیک‌های اقتصاد مهندسی به منظور مقایسه دو روش در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت استفاده گردید. روش MECA را می‌توان در صنعت ایران بکار برد و با استفاده از آن به هزینه‌یابی یک محصول پرداخت که در آینده با تلفات کمتر و صرفه جویی در هزینه مواجه شد.

## منابع

- اسکونزاد، محمد مهدی (۱۳۹۸)، *اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی*، ناشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- پور کاظمی، محمد حسین (۱۳۸۵)، "ارزیابی کارایی مجتمع‌های صنایع پتروشیمی ایران با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها". فصلنامه پیک نور، سال ۴، شماره ۲، صص ۳۵-۴۵.
- حیدری، ابراهیم؛ صادقی، حسین (۱۳۸۴) "تخمین کارایی انرژی در بخش صنعت ایران در قالب تابع تقاضای تعدیل جزئی"، *مجله تحقیقات اقتصادی*، شماره ۸۶، صص ۱۷۹-۲۰۰.
- دیانتی دیلمی، زهرا؛ درخشان، مؤده (۱۳۹۴)، "حسابداری هزینه‌یابی انرژی: رویکرد سنتی و جریان محور"، سال ۸، شماره ۲۷، صص ۱-۲۰.
- عابدی، زهرا؛ دشتی رحمت آبادی، یحیی (۱۳۹۲)، "سیستم حسابداری هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی - ابزاری مناسب جهت نیل به توسعه پایدار در فرایند تولیدات کارخانه‌ای مورد بررسی: شرکت آذر کاوین"، *سومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی*، تهران.
- عابدی، زهرا؛ جعفرنسب، فائزه (۱۳۹۶)، "سیستم حسابداری هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی در راستای حصول اهداف بهره‌وری سبز، مطالعه موردی: بخش احیا (خط ۶) کارخانه آلومینیوم سازی ایران"، *هفتمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی-ایتك*، تهران.
- گراوند، سهراب؛ مهرگان، نادر؛ صادقی، حسین؛ ملکشاهی، مجتبی (۱۳۹۲)، "ارزیابی کارایی انرژی در صنعت پتروشیمی کشور"، *مجله علمی پژوهشی سیاست‌گذاری اقتصادی*، سال پنجم، شماره دهم، پاییز و زمستان، صص ۵۷-۷۴.
- گزارش معرفی شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران (۱۳۹۹)، <http://ipr-co.com>.

- Behnami A., Zoroufchi-Benis K., Shakerkhatibi M., Fatehifar E., Derafshi S., and M. Chavoshbashi** (2019) "Integrating data reconciliation into material flow cost accounting: The case of a petrochemical wastewater treatment plant", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, pp. 616-628.
- DIN EN ISO 14051:2011, (2018) "Environmental Management – Material Flow Cost Accounting General Framework (ISO 14051)", *ISO/TC 207 Environmental management*, 38 Pages, Edition 1.
- Doorasamy M. and H. Garbharran** (2015), "The effectiveness of using material flow cost accounting (MEFCA) to identify non-product output costs", *Environmental Economics Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 70-82.
- Dunuwila P., Rodrigo V. and N. Goto** (2020), "Improving financial and environmental sustainability in concentrated latex manufacture", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 255, pp. 1-12.
- Grosch P.** (2008), "Measuring Residential Energy Efficiency Improvements with DEA". *Ruhr Economic Papers*, Vol. 60, pp. 3-24.
- Hyrslava J., Vagner M. and J. Palasek** (2011), "Material Flow Cost Accounting (MEFCA) – tool For the Optimization of Corporate Production Processes", *Business Management and Education*, Vol. 9, No. 1, pp.5–18.
- Jo Yee H., Denny K., Kin-Wan Y. and Viknesh Andiappan** (2021) "Synthesis of wastewater treatment plant based on minimal waste generation cost: A material flow cost accounting (MFCA) approach" in *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 148, pp. 559-578.
- Kokubu K. and H. Tachikawa** (2013) "Material Flow Cost Accounting: Significance and Practical Approach?" in *Handbook of Sustainable Engineering*, Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 351 –369.
- Kumar-Sahu A., Padhy R.K., Das D. and A. Gautam** (2021) "Improving financial and environmental performance through MFCA: A SME case study" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 279, pp. 1-19.
- Dekamin M. and M. Barmaki** (2019). "Implementation of material flow cost accounting (MFCA) in soybean production", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 210, pp. 459-465, 2019.
- Martinez C.** (2011), "Energy Efficiency Development in German and Colombia Non-Energy-Intensive Sectors: a NonParametric Analysis". *Journal of Energy Efficiency*, Vol. 4, pp. 115-131.
- Sun M., Sun Y. and C. Li** (2014) "Integration of material flow cost accounting and ERP software", *IEEE Science and Information Conference*, London, UK.
- Yagi M. and K. Kokubu** (2019) "Waste decomposition analysis in Japanese manufacturing sectors for material flow cost accounting", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 224, pp. 823-837.
- May N. and E. Guenther** (2020). "Shared benefit by Material Flow Cost Accounting in the food supply chain – The case of berry pomace as upcycled by-product of a black currant juice production", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 245, 2020.

**KhanMula N., Rizwan M. and F. Islam** (2016), "The Extent of Application of Standard Costing: A Comparison of Chinese and Pakistani Manufacturing Firms Hailey College of Commerce", Vol. 2, No. 1, pp. 1-6.

**Schmidt M. and M. Nakajima** (2013), "Material Flow Cost Accounting as an Approach to Improve Resource Efficiency in Manufacturing Companies", *Resources*, Vol. 2, No. 3, pp. 358-369.

**Dierkes S. and D. Siepelmeyer** (2019) "Production and cost theory-based material flow cost accounting", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 235, pp. 483-392.

**Sygulla R., Bierer A. and U. Götze** (2011), "Material Flow Cost Accounting – Proposals for Improving the Evaluation of Monetary Effects of Resource Saving Process Designs", *Material Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Madison, Wisconsin, USA.

**Sygulla R., Gotze U. and A. Bierer** (2014), "Material Flow Cost Accounting: A Tool for Designing Economically and Ecologically Sustainable Production Processes," *Technology and Manufacturing Process Selection*, pp. 281 –296, Springer, London.

**Tang X. and S. Takakuwa** (2012), "MEFCA-Based Simulation Analysis for Enviroment-Oriented Scm Optimization Conducted by SMES", *Proceedings of the Winter Simulation Conference*.

**Wang Y., Kuo Ch. and R. Song** (2017), "Potentials for Improvement of Resource Efficiency in Printed Circuit Board Manufacturing: A Case Study Based on Material Flow Cost Accounting", *Sustainability*, Vol. 9, No. 6, pp.1-16.