نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۵، شماره ۴۶، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۲۷ تا ۳۹
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 15, No 46, 2020, pp 27-39

طراحی و به کارگیری سیستم خبره در ارزیابی بهره‌وری معادن

حسین فنودی[۱]، احمدرضا صیادی[۲*]، علی رجب‌زاده[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد معدن، دانشگاه تربیت مدرس، hfanodi@yahoo.com
۲. دانشیار اقتصاد معدن دانشگاه تربیت مدرس، sayadi@modares.ac.ir
۳. دانشیار مدیریت دانشگاه تربیت مدرس، alirajabzadeh@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶)

چکیده

افزایش رقابت‌پذیری معادن مستلزم بهبود بهره‌وری و کارایی است. روش مدیریت چهار مرحله‌ای چرخه بهره‌وری شامل اندازه‌گیری، تحلیل، برنامه‌ریزی و بهبود بهره‌وری یکی از رایج‌ترین روش‌ها در حوزه مدیریت بهره‌وری در سطح بنگاه است. نرم‌افزارهای بهره‌وری عمدتا محدود به مرحله اندازه‌گیری و به ندرت تحلیل داده‌ها است و ارایه برنامه‌های بهبود عمدتا به صورت دستی توسط کارشناسان بهره‌وری انجام می‌گیرد که بسیار زمانبر است. روش هوشمند سیستم خبره می‌تواند در رفع این نقص مفید باشد. این روش بر اساس رویکرد مدیریت دانش، تشخیص مشکل، انتخاب راه حل، فرآیند تصمیم‌گیری و استفاده بهتر از زمان را تسهیل می‌کند. در این تحقیق، یک سیستم خبره مبتنی بر قاعده همراه با یک رابط کاربر گرافیکی برای اندازه‌گیری، ارزیابی و ارایه سیاست بهبود بهره‌وری در معادن مطابق با چرخه مدیریت بهره‌وری طراحی و پیاده‌سازی شده است. سیستم خبره شامل مجموعه قواعد مرتبط با نحوه محاسبه و تحلیل شکاف بهره‌وری و موتور استنتاج بر مبنای تحلیل قواعد پیشرو است. سیاست‌های کلان بهبود بر اساس شاخص‌های کمی و کیفی ارایه می‌شود. برای ارزیابی متغیرهای موثر و تعیین اهمیت نسبی این سیاست‌ها، یک سیستم استنتاج فازی مبتنی بر نظرات خبرگان نیز پیاده‌سازی شده است. برای بررسی کارکرد سیستم، از داده‌های یک مجتمع تولید طلا در یک دوره هشت ساله استفاده و شاخص‌های مختلف در حوزه‌های فنی، مالی، منابع انسانی و بازار تدوین و تحلیل شده است. برای شاخص‌های با رشد نامطلوب، هفت سیاست بهبود ارایه شده که بیشترین و کمترین سهم به ترتیب مربوط به سیاست "بهبود فرآیند تولید" و "مدیریت منابع انسانی" است. همچنین پس از اجرای سیستم استنتاج فازی، سیاست "کاهش مصرف انرژی" با اهمیت ۵۶ درصد دارای بیشترین اهمیت به دست آمد.

کلمات کلیدی

بهره‌وری، سیستم خبره، شاخص، ماتریس IPA.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

معادن یکی از بخش‌های مهم اقتصادی‌اند و افزایش توان رقابتی آن‌ها در گرو بهبود بهره‌وری و کارایی است. بهره‌وری دارای پیامدهای تجاری مهمی برای کشورهای تولیدکننده مواد معدنی است زیرا بهبود بهره‌وری کاهش هزینه‌ها، استفاده مطلوب از نهاده‌ها، افزایش توان رقابتی و توسعه صادرات را نیز به همراه خواهد داشت [۱]. با این وجود در دهه گذشته بهره‌وری در حوزه صنعت معدن در سطح جهانی روندی مناسبی نداشته است. به طوری‌که به عنوان مهم‌ترین ریسک بخش معدن در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ مطرح شده است [۲]. این امر توسعه پژوهش‌ها، توسعه ابزارهای مناسب و اهتمام تصمیم‌گیران برای ارتقای بهره‌وری در معادن را می‌طلبد.

روش‌ها و مدل‌های متعددی تاکنون در حوزه مدیریت بهره‌وری در سطح بنگاه ارایه شده‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، روش مدیریت بهره‌وری مطابق با چرخه بهره‌وری[1] است (شکل ۱) [۳] و امروزه از طرف برخی از سازمان‌های متولی بهره‌وری مانند سازمان بهره‌وری آسیا و سازمان ملی بهره‌وری ایران توصیه شده است.

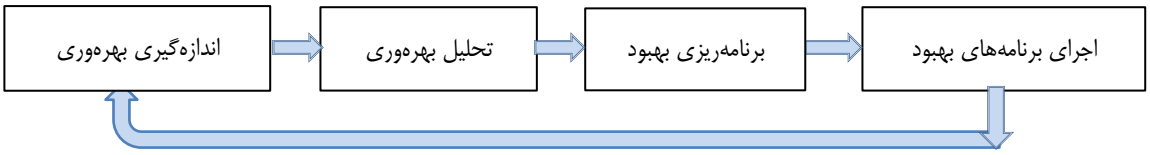
اندازه‌گیری، نخستین گام در این چرخه است و امکان درک وضعیت بهره‌وری را فراهم می‌سازد. اندازه‌گیری با دو رویکرد کمی و کیفی انجام می‌گیرد. در رویکرد نخست، سطح بهره‌وری با استفاده از شاخص‌های بهره‌وری جزیی و همچنین شاخص بهره‌وری کل عوامل تولید اندازه‌گیری می‌شود. شکل عمومی شاخص‌ها به صورت نسبت ستانده به داده سیستم است. در رویکرد دوم، عوامل کیفی با استفاده از پرسشنامه سنجیده می‌شود.

دومین گام چرخه، تحلیل بهره‌وری است که شامل تجزیه و تحلیل اعداد و ارقامی است که با اندازه‌گیری شاخص‌ها به دست می‌آید. بر این اساس می‌توان زمینه‌های بهبود را شناسایی و ضمن برنامه‌ریزی برنامه‌های بهبود (گام سوم) نسبت به اجرای آن‌ها اقدام کرد (گام چهارم چرخه).

نرم‌افزارهای موجود تنها قادر به اندازه‌گیری بهره‌وری بر اساس شاخص‌های بهره‌وری‌اند و برای تحلیل و تبیین برنامه‌های بهبود محدودیت دارند و عمدتا به صورت دستی توسط کارشناسان بهره‌وری انجام می‌گیرد [۴]. با توجه به تعدد عوامل موثر بر بهره‌وری، کیفی و تجربی بودن نحوه تاثیرگذاری آن‌ها و همچنین مبهم بودن متغیرهای تاثیرگذار، ارایه سیاست بهبود مستلزم دانش و تجربه زیاد کارشناسان در این زمینه است. محدودیت دسترسی به تحلیل‌گران و زمان‌بر بودن تحلیل گاه باعث می‌شود که برخی از مدیران به سادگی از این موضوع بگذرند و یا کار را تنها در محدوده اندازه‌گیری شاخص‌ها انجام دهند. روش هوشمند مبتنی بر مدیریت دانش که به عنوان سیستم خبره شناخته می‌شود، می‌تواند در رفع این نقیصه مفید باشد. توانایی این سیستم‌ها را می‌توان در تشخیص مشکل، تشخیص و انتخاب راه حل، توصیف و استدلال راه حل انتخابی، تعامل با اطلاعات ناقص و امکان ثبت و بازسازی تمام مراحل حل مساله خلاصه کرد. سازگاری بیشتر با شرایط کاربری، داشتن منوی کاربر گرافیکی، عدم نیاز به دانش اضافی برای کار با آن، بهبود فرآیند تصمیم‌گیری، استفاده بهتر از زمان و دسترسی به متخصصان از جمله مزایای سیستم خبره است [۵]. سیستم‌های خبره از جمله عمومی‌ترین روش‌های مدیریت دانش محسوب می‌شوند [۶]. این سیستم‌ها برای مدلسازی مهارت حل یک مساله توسط کارشناسان طراحی شده‌اند و می‌توانند به عنوان جایگزین یا به عنوان ابزار کمکی به کار گرفته شوند [۷]. یک سیستم خبره مبتنی بر قواعد[2] از بخش‌های متعددی تشکیل شده (شکل ۲) ولی حداقل باید شامل پایگاه دانش[3]، موتور استنتاج[4] و بخش ارتباط با کاربر[5] باشد [۸].

الزامات سیستم خبره در چرخه مدیریت بهره‌وری به شرح زیر است [۵، ۹]:

- اندازه‌گیری: سیستم خبره باید حاوی دانش در حوزه اندازه‌گیری شاخص‌ها باشد.
- ارزیابی: سیستم خبره در این مرحله باید قادر به تعیین وضعیت شاخص باشد.

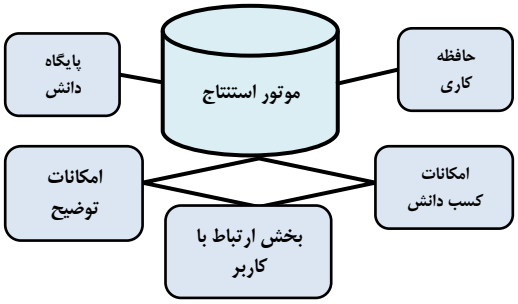


شکل ۱ - چرخه مدیریت بهره‌وری [۳].

1-Measurement Evaluation Planning Improvement (MEPI)

2-Rules
3-Knowledge base
4-Inference engine
5-User interface

- برنامه‌ریزی بهبود: با توجه به وضعیت شاخص‌ها سیاست بهبود پیشنهاد می‌شود. همچنین، سیستم خبره با توجه به ارتباط بین عوامل، اهمیت سیاست بهبود را نیز تعیین می‌کند.



شکل ۲- ساختار یک سیستم خبره مبتنی بر قواعد [۸].

در این تحقیق، هدف ارتقا و تسهیل فرآیند ارزیابی و پیشنهاد بهبود بهره‌وری در معادن بر مبنای استفاده از سیستم خبره[1] است.

۲- پیشینه پژوهش

مطالعات بسیار زیادی در حوزه بهره‌وری انجام گرفته با این وجود کمتر به بهره‌وری در معادن پرداخته شده است. یکی از قدیمی‌ترین تحقیقات منتشر شده در زمینه بهره‌وری معادن، محاسبه بهره‌وری کل عوامل تولید در معادن زغال‌سنگ آمریکا در سال ۱۹۸۸ است [۱۰]. در ایران نیز یکی از نخستین مطالعات به استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای افزایش بهره‌وری نیروی کار معادن در سال ۱۳۷۳ برمی‌گردد [۱۱]. این مطالعات متعاقبا در حوزه‌های مختلفی از بهره‌وری مانند بهره‌وری نیروی کار در معادن [۱۲، ۱۳، ۱۴]، بهره‌وری کل عوامل تولید [۱۵]، بهره‌وری چندعاملی [۱۶]، بهره‌وری انرژی [۱۷] و همچنین استفاده از مدل‌های ریاضی [۱۸، ۱۹، ۲۰] توسعه یافت. در اینجا تنها مروری بر پیشینه استفاده از سیستم خبره در مدیریت بهره‌وری می‌شود.

مقالات متعددی در زمینه سیستم‌های خبره، سیستم‌های خبره فازی و کاربردهای آن تاکنون منتشر شده است. به عنوان مثال می‌توان به کاربردهای آن در علوم مختلف [۲۱، ۲۲] و مهندسی عمران [۲۳] اشاره کرد. با این‌وجود در مورد استفاده از سیستم خبره در زمینه بهره‌وری، مقالات بسیار کمی منتشر شده است. از جمله، در سال ۲۰۰۵ یک سیستم خبره در محیط صفحه گسترده مانند اکسل ارایه شد که قادر به شناسایی نقاط قوت و ضعف و ارایه راهکار بهبود بهره‌وری است [۴]. این تحقیق تنها بر شاخص بهره‌وری کل مبتنی است و سایر شاخص‌ها مانند شاخص‌های جزیی در نظر گرفته نشده است. در همین سال مدلی مبتنی بر سیستم خبره فازی برای پیش‌بینی بهره‌وری کار در ساخت و سازهای صنعتی ارایه شد [۲۴]. در سال ۲۰۰۸ ضمن توسعه یک سیستم خبره فازی، عملکرد یک سیستم ایمنی، بهداشت و محیط‌زیستی (HSE) پالایشگاه گاز ارزیابی شد [۵]. در سال ۲۰۱۱ نیز مدلی برای افزایش دقت ارزیابی عملکرد کارکنان با استفاده از سیستم خبره منتشر شد. در هر ارزیابی از کارکنان، در نهایت به مدیر این امکان داده می‌شود که فرد را در سه بازه خوب، متوسط و ضعیف شناسایی و موجبات ارزیابی را فراهم کند [۲۵]. در سال ۲۰۱۶ نیز عملکرد سیستم‌های حمل و نقل با استفاده از منطق فازی ارزیابی شد [۲۶]. بررسی پیشینه فوق بیانگر این است که مطالعات انجام شده یا محدود به مرحله اندازه‌گیری است و یا اینکه تنها شاخص بهره‌وری کل مد نظر قرار گرفته است و سیستم‌های خبره در سطح کل چرخه بهره‌وری و با در نظر گرفتن توام شاخص‌های بهره‌وری کل و جز نیاز به مطالعات بیشتری دارد. علاوه بر این بررسی پیشینه تحقیق بیانگر فقدان مطالعات مرتبط در حوزه صنعت معدن است و در این مقاله تلاش شده به این مهم پرداخته شود.

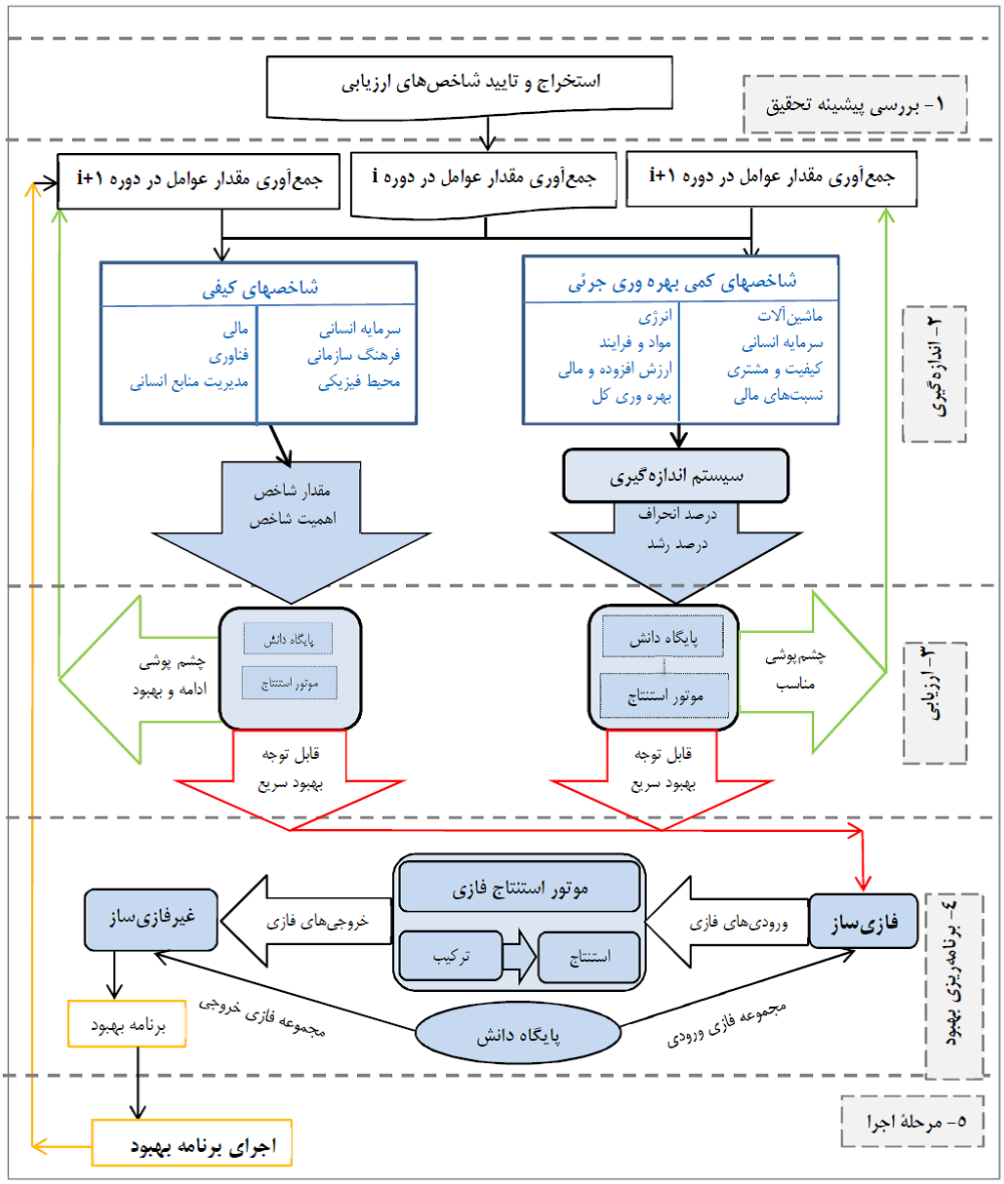
۳- روش‌شناسی پژوهش

مراحل کلی تحقیق مطابق با چرخه مدیریت بهره‌وری در شکل ۳ ارایه شده است. در مرحله نخست، ضمن بررسی ادبیات تحقیق، مجموعه شاخص‌های ارزیابی بهره‌وری احصا می‌شوند. در مرحله دوم یا اندازه‌گیری، مقدار شاخص، درصد رشد و درصد انحراف هر شاخص محاسبه می‌شود. در این مرحله برای شاخص‌های کیفی، مقدار و اهمیت هر شاخص نیز جمع‌آوری می‌شود.

در مرحله سوم یا ارزیابی، وضعیت شاخص‌های کمی بررسی می‌شود. سوال اصلی این است که آیا انحراف شاخص‌ها قابل چشم‌پوشی است؟ و یا اینکه انحراف قابل ملاحظه دارند؟ در صورت تشخیص وجود انحراف قابل ملاحظه، عامل انحراف شناسایی می‌شود که می‌تواند به دلیل عوامل داخلی (مدیریتی، فنی، ساختاری) و یا عوامل خارجی (سیاسی، اقتصادی، تکنولوژیکی و نظایر آن) باشد. شاخص‌های کیفی نیز بر اساس ماتریس اهمیت- عملکرد[2] [۲۷] که در ادامه معرفی خواهد شد، تحلیل می‌شود.

1-Experts system

2-Importance Performance Analysis (IPA)



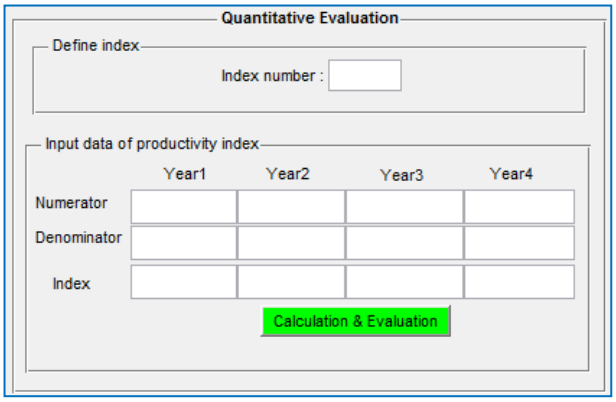
شکل ۳- روش‌شناسی.

در مرحله چهارم یا برنامه‌ریزی برای شاخص‌های کمی با وضعیت قابل توجه و بهبود سریع و همچنین برای شاخص‌های کیفی با وضعیت اتلاف منابع و بهبود سریع، سیاست بهبود مشخص می‌شود. همچنین در این مرحله سیستم استنتاج فازی با توجه به مقدار عوامل کمی و کیفی وضعیت هر عامل را در یک دوره مشخص و بر اساس تغییرات این عوامل در این دوره اهمیت سیاست‌های بهبود را تعیین می‌کند. در مرحله پایانی (پنجم) پس از اجرای سیاست‌های بهبود، داده‌های هر شاخص برای دوره بعدی مجددا جمع‌آوری شده و چرخه بهره‌وری تکرار می‌شود که این مرحله در حیطه این پژوهش قرار نمی‌گیرد. در ادامه مراحل اصلی کار در هر گام از چرخه بهره‌وری به تفصیل بیان شده است.

۳-۱- استخراج و اندازه‌گیری شاخص‌ها

اندازه‌گیری بهره‌وری در دو بخش کمی و کیفی انجام می‌گیرد.

- در تحلیل‌های کمی، سیستم قادر به اندازه‌گیری شاخص‌های کمی بهره‌وری در ابعاد مختلف (ماشین‌آلات، انرژی، نیروی انسانی، مواد و فرآیند، کیفیت و مشتریان، ارزش افزوده، نسبت‌های مالی و بهره‌وری کل) و همچنین محاسبه درصد رشد (بر اساس سری زمانی و درصد انحراف) است (شکل ۴ نمونه صفحه مربوط به محاسبه و ثبت شاخص‌ها در محیط متلب).
- برای اندازه‌گیری عوامل کیفی، با استفاده از پرسشنامه اهمیت و مقدار شاخص استخراج می‌شود.



شکل ۴- محیط مربوط به محاسبه و ثبت شاخص‌ها.

۳-۲- ارزیابی و تحلیل شاخص‌های بهره‌وری

تحلیل شاخص‌های کمی با توجه به دو معیار درصد انحراف و درصد تغییرات شاخص به صورت زیر انجام شده است [۲۸].

۳-۲-۱- درصد انحراف

با استفاده از روش نمو هموار (با ضریب آلفای ۰/۴)، شاخص‌ها برای یک دوره مناسب به دست آمده و با وضع موجود مقایسه می‌شود. ارزیابی بر اساس نوع انحرافات به دست آمده و نوع هر شاخص به صورت زیر انجام می‌گیرد:

- اگر انحرافات بین صفر تا ۱۵ درصد باشند، این انحرافات قابل‌چشم‌پوشی‌اند.
- اگر انحرافات بین ۱۵ تا ۶۰ درصد باشند، قابل‌توجه‌اند.
- اگر انحرافات بیش از ۶۰ درصد باشند، انحرافات شدیدند.

دامنه انحرافات بر اساس قضاوت‌های خبرگان (شامل مدیران و کارشناسان ذیربط در حوزه بهره‌وری با سابقه بالای ده سال، تحصیلات مرتبط با حوزه معدن، داشتن انگیزه در دادن اطلاعات) به دست آمده است.

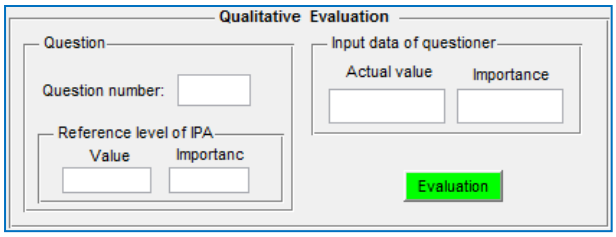
۳-۲-۲- درصد رشد

در این روش، درصد تغییرات با توجه به سری زمانی مورد بررسی قرار گرفته و برای سال مورد نظر هدف‌گذاری می‌شود. میزان انحراف با توجه به مقدار سال آخر و مقدار هدف تعیین شده محاسبه می‌شود. قضاوت در مورد انحراف مشابه روش اول است.

شاخص‌ها به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع اول شاخص‌هایی‌اند که اگر روند افزاینده داشته باشند، مطلوب‌اند. مانند شاخص نسبت فروش به مجموع دارایی‌ها و نوع دوم شاخص‌هایی‌اند که اگر کاهنده باشند، مطلوب‌اند، مانند شاخص نسبت میزان هزینه‌های نت به کل هزینه‌های تولید. به دسته اول شاخص‌های افزاینده و به دسته دوم کاهنده اطلاق می‌شود.

ارزیابی کیفی (تحلیل شاخص های کیفی) بر اساس داده‌های حاصل از پرسشنامه و بر اساس ماتریس تجزیه و تحلیل اهمیت-عملکرد (IPA) انجام گرفته و در نهایت برای هر مولفه با مقایسه میانگین اهمیت و وضعیت تمامی پرسش‌ها تحلیل مطلوب ارایه می‌شود (شکل ۵). مقدار ۶/۵ روی نمودار بر اساس قضاوت خبرگان و بر مبنای مقایسه رتبه‌ای ۱ تا ۱۰ به دست‌آمده است. شکل ۶ نمونه صفحه مربوط به ثبت داده برای ارزیابی عوامل کیفی را نشان می‌دهد.

شکل ۵- ماتریس IPA.



شکل ۶- محیط مربوط به ارزیابی کیفی.

۳-۳- پیشنهاد سیاست‌های کلان بهبود (بر مبنای تحلیل مفهومی و سیستم خبره فازی)

این سیاست‌ها بر مبنای تحلیل شکاف بهره‌وری ارایه می‌شوند. شاخص‌هایی (کمی و کیفی) که دارای شکاف قابل ملاحظه بین وضع موجود و مطلوب باشند، نیاز به تدوین سیاست بهبود دارند. در شاخص‌های کیفی تحلیل پرسشنامه بر مبنای طیف از خیلی کم تا خیلی زیاد ارایه شده است و تحلیل شاخص‌های کمی نیز بر مبنای ارقام محاسبه شده انجام گرفته است. معمولا وضعیت شاخص‌ها و عوامل موثر بر بهره‌وری معادن، چگونگی تاثیر آن‌ها بر یکدیگر و همچنین ارایه سیاست‌های بهبود، دارای مفاهیم نادقیق و مبهم است؛ بنابراین برای ارایه نتایج این مدل نامعین از منطق فازی استفاده شده است [۲۹]. در این تحقیق، با توجه به سیاست‌های بهبود بهره‌وری در معادن و ارتباط بین عوامل موثر در پیشنهاد سیاست، یک سیستم استنتاج فازی مطابق با مراحل زیر طراحی و پیاده شده است:

گام اول: طراحی اولیه

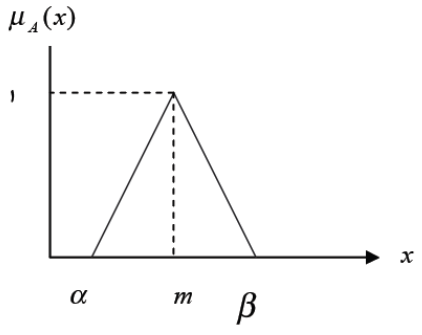
در این قسمت متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی سیستم تعریف می‌شوند. ورودی‌ها و خروجی‌ها بر اساس ادبیات موضوع، نظرات خبرگان، لیست شاخص‌ها، مطالعات میدانی نگارندگان و نظایر آن تعیین شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ورودی‌های سیستم شامل ۲۳ متغیر کمی و کیفی و خروجی‌های سیستم ۱۵ سیاست بهبودند که از طریق پرسشنامه و کسب نظر خبرگان استخراج شده‌اند.

گام دوم: فازی‌سازی

در این مرحله شاخص‌های کیفی مانند سرمایه‌های انسانی و نظایر آن بر اساس طیف لیکرت فازی‌سازی می‌شوند. از آنجایی که ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل به صورت خطی است، برای فازی‌سازی متغیرها از توابع مثلثی استفاده شده است. در واقع، هدف استفاده از منطق فازی تاکید بر اعداد فازی است و بنابراین از عدد مثلثی یا ذوزنقه‌ای برای تبدیل واژگان زبانی استفاده شده است. بدین ترتیب برای هر کدام از طیف‌ها یک عدد فازی مثلثی اختصاص داده شده است. به عنوان نمونه برای طیف خیلی کم عدد (۲و۱و۱) در نظر گرفته شده است (شکل ۸ و رابطه ۱) [۳۰].

ورودی‌ها			خروجی‌ها
تناژ محصول تولیدی	تعداد کل کارکنان		بهبود فرآیند تولید
عیار محصول	تعداد کارکنان تولیدی		بهبود آهنگ بازیابی
تناژ باطله تولیدی	تعداد کارکنان اداری		اجرای سیستم انتقال فناوری برای معدن
میزان فروش	تعداد نفرات حادثه‌دیده		برنامه‌ریزی برای جایگزینی ماشین‌آلات
تعداد مشتری	سطح رضایت از حقوق		تدوین و طراحی برنامه نت ماشین‌آلات
هزینه تولید	سطح رضایت از امکانات رفاهی		پیاده‌سازی سیستم کنترل کیفیت
هزینه نگهداری و تعمیرات (نت)	فراوانی مشاغل متناسب با شاغل		طراحی و اجرای سیستم مدیریت هزینه
هزینه مصرف قطعات یدکی	سطح تحصیلات		کاهش مصرف انرژی
هزینه مصرف انرژی	سطح انگیزش کارکنان	ارایه راهکار بهبود (ممدانی)	تغییر در سیاست‌های بازاریابی محصول
تعداد خرابی‌ها	سطح رعایت الزامات ایمنی (کاهش رشد تعداد حوادث)		طراحی امنیت شغلی و بهبود HSE
متوسط کارکرد ماشین‌آلات			افزایش دوره‌های آموزش کارکنان
میزان دسترسی ماشین آلات			به کارگیری موثر از کارکنان تولیدی
میانگین زمان تعمیرات			به کارگیری موثر از کارکنان اداری
			طراحی سیستم انگیزش و رضایت
			بهبود شرایط و امکانات رفاهی

شکل ۷- نمای کلی از سیستم فازی.



شکل ۸- نمایش اعداد مثلثی

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \dfrac{x-\alpha}{m-\alpha} & \alpha < x < m \\ 1 & x = m \\ \dfrac{\beta - x}{\beta - m} & m < x < \beta \\ 0 & others \end{cases} \quad (1)$$

گام سوم: تدوین قواعد استنتاج فازی

در این مرحله با توجه به اینکه ورودی‌ها و خروجی‌ها فازی است و ویژگی ناپیوسته دارند، قوانین استنتاج فازی بر اساس روش استنتاج ممدانی [۳۰ و ۳۱] تدوین می‌شوند. در سیستم حاضر از موتور استنتاج بیشینه-کمینه استفاده شده است. برای تدوین قوانین فازی به منظور ارایه اهمیت سیاست بهبود از ضریب تاثیر عوامل بر یکدیگر و تاثیر عوامل در ارایه سیاست بهبود استفاده شده است. قانون "اگر هزینه تعمیرات و نگهداری، هزینه مصرف انرژی، هزینه مصرف قطعات یدکی و هزینه نیروی انسانی تغییرات کاهنده داشته باشد؛ آن گاه سیاست بهبود "مدیریت هزینه" اهمیتی به مقدار کم خواهد داشت" مثالی از قوانین کدنویسی شده برای سیاست بهبود "مدیریت هزینه" است.

گام چهارم: فازی‌زدایی

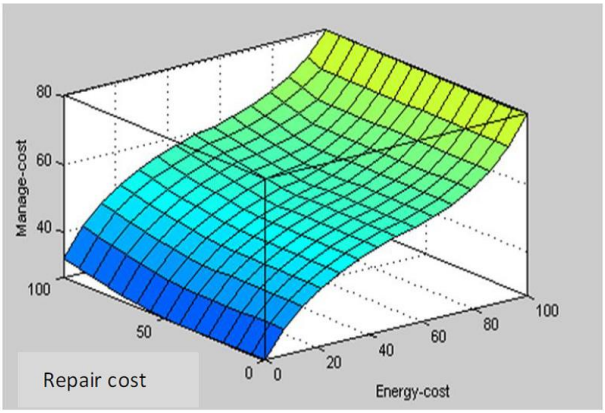
برای فازی‌زدایی خروجی از روش گرانیگاه استفاده شده است [۳۲]. در واقع با فازی‌زدایی، فازهای کم، متوسط و زیاد خروجی‌ها به صورت اعداد معمولی نمایش داده می‌شود.

گام پنجم: اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی در دو بخش آزمون سیستم فازی و سیستم کمی و کیفی انجام گرفته است.

آزمودن سیستم استنتاج فازی

در این مرحله از طراحی از روش تحلیل رفتار خروجی‌ها استفاده شد. با استفاده از این روش مقدار تعدادی از ورودی‌ها برای سیستم ثابت نگاه داشته می‌شود و سپس با تغییر مقدار دیگر ورودی‌های سیستم، مقدار خروجی محاسبه می‌شود، از کنار هم قرار دادن این مقادیر رفتاری برای هر خروجی به دست می‌آید؛ در صورتی که رفتار خروجی‌ها با تغییر مقدار ورودی‌ها، بر اساس ادبیات تحقیق یا نظر خبرگان مورد تایید قرار گرفت، اعتبار سیستم تایید می‌شود [۳۱]. اعداد مربوط به ورودی‌های سیستم خبره بر مبنای اعداد مثلثی تعیین شده و برای خروجی‌ها هم به همین روال عمل شده است. برای هر دسته از ورودی‌ها این کار انجام گرفت. خروجی‌های معادل هر ترکیب با استفاده از نرم‌افزار متلب[1] محاسبه شد و برای تایید در اختیار خبرگان گذاشته شد که نتایج حاکی از صحت خروجی سیستم بود. شکل ۹ یک مورد از این رفتارها را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۹- رفتار راهکار بهبود (مدیریت هزینه) بر اساس تغییر دو متغیر.

آزمودن سیستم کمی و کیفی

برای بررسی صحت عملکرد سیستم و آزمودن آن با داده‌های واقعی، متغیرهای ورودی سه بنگاه نمونه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تایید عملکرد سیستم، از مقایسه نتایج اجرای دستی الگوریتم با اجرای سیستم طراحی شده استفاده شده است [۳۳] که نشان‌دهنده صحت نتایج حاصل از این سیستم بود.

۴- یافته‌های پژوهش

برای پیاده‌سازی مدل، از داده‌های یک مجتمع معدنی طلا در کشور در یک دوره هشت ساله ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ استفاده شده و ضمن ارزیابی و تحلیل بهره‌وری، سیاست‌های کلان بهبود ارایه شده است. این مجتمع در استان اصفهان واقع شده و از سال ۱۳۷۱شروع به کار کرده است. میزان طلای تولیدی بالغ بر ۲۷۰ کیلوگرم در سال است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، تعداد ۳۸ شاخص با استفاده از سیستم ارزیابی کمی محاسبه و تحلیل شد. در این میان، شاخص‌های مالی با رشد مطلوب و شاخص‌های انرژی و تعمیرات و نگهداری تغییرات (رشد) نامطلوب دارند. همچنین سیستم برای شاخص‌های با رشد نامطلوب هفت سیاست بهبود ارایه کرد که بیشترین و کمترین سهم به ترتیب مربوط به سیاست "بهبود فرآیند تولید" و "مدیریت منابع انسانی" است. نتایج سیستم کمی شامل پیش‌بینی شاخص در سال آخر، درصد تغییرات، درصد انحراف، ارزیابی شاخص و ارایه سیاست بهبود در یک دوره چهار ساله است. در مجموع هفت سیاست بهبود برای تمام ابعاد پیشنهاد شده است که در جدول ۱ آورده شده است. ضمن به دست آوردن میزان اهمیت و مقدار عوامل از طریق پرسشنامه، در مجموع ۴۰ متغیر کیفی موثر در بهره‌وری مجتمع ارزیابی شد. در جدول ۲، یک نمونه ارزیابی عوامل

1-MATLAB

داخلی (کیفی) آورده شده است. برای هر مولفه دو عدد عنوان شده است که عدد نخست بیانگر وضع موجود و عدد دوم نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن است. هر دو عدد در بازه یک تا ده است. پس از اجرای سیستم استنتاج فازی میزان اهمیت سیاست‌های بهبود برای مجتمع به دست آمد که سیاست کاهش مصرف انرژی با اهمیت ۵۶ درصد دارای بیشترین و سیاست‌های افزایش دوره آموزش، طراحی و تدوین برنامه نت ماشین‌آلات و برنامه‌ریزی برای جایگزینی ماشین‌آلات با اهمیت ۵ درصد دارای کمترین اهمیت‌اند.

جدول ۱- نمونه سیاست‌های بهبود برای مجتمع معدنی

شاخص	سیاست بهبود	توضیحات
ماشین‌آلات معدن	ارتقا سیستم نت، کاهش خرابی هم‌زمان با افزایش تولید	افزایش هزینه مصرف قطعات یدکی
ماشین‌آلات کارخانه	بهینه کردن راندمان ماشین‌آلات	ارزش افزوده کم نسبت به ارزش ماشین‌آلات
انرژی کارخانه	بهبود فرآیند تولید، بهبود برنامه‌ریزی تولید	افزایش ۳۰ درصدی مصرف انرژی نسبت به تولید
	کاهش مصرف انرژی	
نیروی انسانی معدن	افزایش آموزش، تعدیل نیروی انسانی/برون سپاری	افزایش هزینه نیروی انسانی
نیروی انسانی کارخانه	بهبود سیستم مدیریت منابع انسانی	افزایش هزینه نیروی انسانی
	بهبود فعالیت‌های نیروی انسانی در فرآیند تولید، ارتقا اثر بخشی آموزش	
مواد و فرآیند معدن	بهینه کردن الگوی انفجار	افزایش ۷۸ درصدی مواد منفجره مصرفی نسبت به تناژ استخراجی ماده معدنی
	بهبود آهنگ بازیابی، بهبود فرآیند تولید	
مواد و فرآیند کارخانه	بهبود انتخاب تامین‌کنندگان	افزایش ۳۶ درصدی ارزش مواد مصرفی مستقیم نسبت به ارزش محصول
	بهبود آهنگ بازیابی	

جدول ۲- نمونه ارزیابی عوامل داخلی مجتمع.

نام بعد	مولفه	میانگین وضع موجود	میانگین اهمیت نسبی
مدیریت منابع انسانی	وجود رویه‌ها و روش‌های مدون برای مشارکت کارکنان	۵/۵	۷

۵- سیستم

برای اعتبارسنجی سیستم، نتایج برای مقادیر مختلف تحلیل شده است. برای تحلیل سیستم کمی برای درصد تغییرات و درصد انحراف هر شاخص پنج مقدار (۱۰۰، ۵۰، ۰، ۵۰- و ۱۰۰-) در نظر گرفته شد سپس با توجه به نظر خبرگان (حدود ۱۰ نفر با تخصص‌های مهندسی معدن، صنایع و فناوری اطلاعات، مدیریت صنعتی و حسابداری) خروجی سیستم (ارزیابی شاخص و سیاست بهبود) مورد تایید قرار گرفت. مقادیر و نتایج خروجی سیستم در جدول ۳ آورده شده و وضعیت شاخص برای دو نوع افزاینده و کاهنده بیان شده است. سیستم برای شاخص‌هایی که درصد تغییرات آن‌ها دارای وضعیت قابل توجه و شدید است، سیاست بهبود را ارایه می‌دهد. همچنین برای بررسی نتایج سیستم کیفی چهار مقدار مختلف برای اهمیت و میزان واقعی هر شاخص در نظر گرفته شد و بر اساس این مقادیر چهار ناحیه ماتریس IPA برای هر متغیر بررسی شد که خروجی حاکی از صحت نتایج حاصل از سیستم است. همچنین برای تحلیل نتایج سیستم استنتاج فازی بر اساس محاسبات انجام شده در مدل طراحی شده، پنج حالت مختلف برای عوامل موثر در بهره‌وری معدن در نظر گرفته شده است که نتایج خروجی سیستم تعیین اهمیت سیاست بهبود در این پنج حالت مطابق با جدول ۴ است.

جدول ۳- نتایج خروجی سیستم کمی برای پنج مقدار.

تغییرات	انحراف	وضعیت شاخص		تغییرات	انحراف	وضعیت شاخص		تغییرات	انحراف	وضعیت شاخص	
		افزاینده	کاهنده			افزاینده	کاهنده			افزاینده	کاهنده
۱۰۰	۱۰۰	شدید	شدید	۵۰	۱۰۰	شدید	شدید	۰	۱۰۰	شدید	شدید
۱۰۰	۵۰	قابل توجه	شدید	۵۰	۵۰	قابل توجه	قابل توجه	۰	۵۰	قابل توجه	قابل توجه
۱۰۰	۰	مناسب	شدید	۵۰	۰	مناسب	قابل توجه	۰	۰	چشم پوشی	چشم پوشی
۱۰۰	-۵۰	قابل توجه	شدید	۵۰	-۵۰	قابل توجه	قابل توجه	۰	-۵۰	قابل توجه	قابل توجه
۱۰۰	-۱۰۰	شدید	شدید	۵۰	-۱۰۰	شدید	شدید	۰	-۱۰۰	شدید	شدید
-۵۰	۱۰۰	شدید	شدید	-۱۰۰	۱۰۰	شدید	شدید				
-۵۰	۵۰	قابل توجه	قابل توجه	-۱۰۰	۵۰	شدید	قابل توجه				
-۵۰	۰	قابل توجه	مناسب	-۱۰۰	۰	شدید	مناسب				
-۵۰	-۵۰	قابل توجه	قابل توجه	-۱۰۰	-۵۰	شدید	قابل توجه				
-۵۰	-۱۰۰	شدید	شدید	-۱۰۰	-۱۰۰	شدید	شدید				

جدول ۴- نتایج سیستم استنتاج فازی.

سیاست بهبود	میزان اهمیت سیاست بهبود (نتیجه سیستم)				
	-۱۰۰	-۵۰	۰	۵۰	۱۰۰
مطالعه و اجرای سیستم انتقال فنّاوری معدن	۸۷	۵۴٫۹	۵	۵	۵
بهبود فرآیند تولید	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
بهبود آهنگ بازیابی	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
سیستم کنترل کیفیت	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۵	۵
تدوین و طراحی برنامه نت ماشین‌آلات	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
برنامه‌ریزی برای جایگزینی ماشین‌آلات	۵	۵	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
به کارگیری فنناوری برای کاهش مصرف انرژی	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
طراحی و اجرای سیستم مدیریت هزینه	۵	۵	۵	۵۴٫۹	۸۷
تغییر در سیاست‌های بازاریابی محصول	۸۷	۶۰٫۳۵	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵
آموزش کارکنان با برنامه تولید و کار	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۵	۵
طراحی امنیت شغلی و بهبود HSE	۵۰	۵۰	۵۰	۵۴٫۹	۸۷
افزایش دوره آموزش کارکنان	۵	۵	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
به کارگیری موثر از کارکنان تولیدی	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵	۳۴٫۹	۴۳٫۶
به کارگیری موثر از کارکنان اداری	۸۷	۶۰٫۳	۴۳٫۶	۵۴٫۹	۵
طراحی سیستم انگیزش و رضایت	۸۷	۸۷	۸۷	۵۴٫۹	۵
بهبود شرایط و امکانات رفاهی	۴۳٫۶	۴۳٫۶	۴۳٫۶	۳۴٫۹	۵

در ادامه نتایج سیستم که نشان‌دهنده اهمیت سیاست بهبود است، در این پنج حالت تحلیل می‌شود. سیستم به گونه‌ای طراحی شده که با افزایش تغییرات نامطلوب متغیرهای موثر، اهمیت سیاست بهبود افزایش می‌یابد و بالعکس.

- سیاست اجرای سیستم انتقال فناوری: متغیرهای موثر، تناژ باطله، میزان فروش، میزان تولید و عیار محصول‌اند. تنها متغیر کاهنده، تناژ باطله است. بنابراین با تغییر میزان متغیرها از ۱۰۰- تا ۱۰۰ درصد، از اهمیت این سیاست کاسته می‌شود (کاهش از۸۷ به ۵).
- سیاست بهبود سیستم کنترل کیفیت: تنها متغیر موثر عیار محصول است. این متغیر افزاینده است، بنابراین با تغییرات مثبت متغیر، از اهمیت سیاست بهبود کاسته شود (کاهش از ۴۳ به ۵).
- سیاست تغییر در خط مشی بازاریابی محصول: متغیرهای موثر شامل میزان تولید، میزان فروش و تعداد مشتری‌اند. تمامی این متغیرها از نوع فزاینده‌اند، بنابراین تغییر مقدار آن‌ها از ۱۰۰- تا ۱۰۰ درصد باید باعث کاهش این سیاست بهبود شود (کاهش از ۸۷ به ۵).
- سیاست کاهش مصرف انرژی: متغیرهای موثر شامل هزینه مصرف انرژی، میزان تولید و متوسط کارکرد ماشین‌آلات‌اند. تنها متغیر کاهنده، هزینه مصرف انرژی است، بنابراین در حالتی که متغیرها ۱۰۰- درصد تغییر دارند، متغیرهای تولید و کارکرد ماشین‌آلات دارای شرایط نامطلوب‌اند، در نتیجه اهمیت سیاست بهبود دارای مقدار ۴۳٫۶ است که با تغییر میزان متغیرها تا صفر اهمیت سیاست کاسته می‌شود اما با افزایش متغیرها از ۰ تا ۱۰۰ درصد، اهمیت سیاست بهبود به ۴۳٫۶ افزایش می‌یابد (به دلیل افزایش هزینه مصرف انرژی).
- سیاست طراحی و اجرای سیستم مدیریت هزینه: متغیرهای موثر بر این سیاست عبارت از هزینه نت، هزینه مصرف قطعات یدکی، هزینه مصرف انرژی و تعداد نیروی انسانی است. این متغیرها کاهنده‌اند، بنابراین با افزایش تغییرات این متغیرها از۱۰۰- به ۱۰۰ انتظار می‌رود که اهمیت سیاست بهبود افزایش یابد (افزایش از ۵ تا ۸۷).
- سیاست طراحی امنیت شغلی و بهبود HSE: متغیرهای موثر شامل تعداد نفرات حادثه دیده (متغیر کاهنده) و میزان امینی (متغیر افزاینده) است. هنگامی که میزان متغیرها ۱۰۰- است، ایمنی شرایط بدی دارد، پس اهمیت سیاست بهبود ۵۰ است و این میزان اهمیت برای دو حالت ۵۰- و صفر نیز ثابت است اما با افزایش میزان تغییرات از صفر تا ۱۰۰ ، متغیر تعداد نفرات حادثه دیده نامطلوب است بنابراین اهمیت سیاست بهبود به ۸۷ افزایش خواهد یافت.
- سیاست افزایش دوره آموزش کارکنان: متغیرهای موثر شامل تعداد نفرات حادثه دیده، سطح تحصیلات، تعداد خرابی ماشین‌آلات و تناسب شغل با شاغل دو متغیر تحصیلات و تناسب شغل با شاغل از نوع افزاینده‌اند، بنابراین هنگامی که مقدار متغیرها ۱۰۰- درصد است، اهمیت سیاست بهبود به دلیل تاثیر کم دو متغیر تحصیلات و تناسب شغل با شاغل ۵ می‌شود. با افزایش درصد تغییرات متغیرها به ۱۰۰ اهمیت سیاست بهبود به دلیل شرایط بد دو متغیر تعداد نفرات حادثه دیده و تعداد خرابی‌ها به ۴۳ افزایش می‌یابد.
- سیاست استفاده موثر از ظرفیت کارکنان تولیدی: متغیرهای موثر شامل تعداد کارکنان تولیدی و میزان تولید است. با تغییر میزان متغیرها از ۱۰۰- به صفر، با افزایش میزان تولید، اهمیت سیاست بهبود از ۴۳ به ۵ کاهش یابد اما با افزایش میزان متغیرها از صفر تا ۱۰۰ تعداد نفرات افزایش می‌یابد، بنابراین اهمیت سیاست بهبود از ۵ به ۴۳ افزایش می‌یابد.
- سیاست استفاده موثر از ظرفیت کارکنان اداری: متغیرهای موثر شامل تعداد کارکنان اداری، میزان فروش، میزان تولید و تعداد مشتری است. تنها متغیر کاهنده تعداد کارکنان اداری است، بنابراین با تغییر مقدار متغیرها از ۱۰۰- تا ۱۰۰ درصد از اهمیت این سیاست کاسته می‌شود.
- سیاست طراحی سیستم انگیزش و رضایت: متغیرهای موثر شامل انگیزه و میزان رضایت از حقوق است. این دو متغیر از نوع افزاینده‌اند، بنابراین با تغییر مقدار آن‌ها از ۱۰۰- تا ۱۰۰ درصد باید باعث کاهش این سیاست بهبود شود (کاهش از ۸۷ به ۵).
- سیاست بهبود امکانات رفاهی: متغیر موثر، رضایت از امکانات رفاهی (متغیر افزاینده) است، بنابراین با تغییرات مثبت متغیر باید از اهمیت سیاست بهبود کاسته شود (کاهش از ۴۳ به ۵).
- سیاست تدوین و طراحی برنامه تعمیرات و نگهداری ماشین‌آلات: متغیرهای موثر شامل میزان دسترسی

ماشین‌آلات (تنها متغیر افزاینده با اهمیت بالا)، تعداد خرابی، هزینه نت و زمان تعمیرات است، بنابراین در تغییرات ۱۰۰- درصد متغیرها اهمیت سیاست بهبود ۴۳ است. با تغییر میزان تغییرات تا صفر از اهمیت این سیاست کاسته می‌شود اما با تغییر میزان متغیرها از صفر با ۱۰۰ تنها متغیر میزان دسترسی شرایط مطلوبی دارد و سه متغیر دیگر نامطلوب‌اند، بنابراین اهمیت سیاست بهبود به ۴۳ افزایش می‌یابد.

- سیاست برنامه‌ریزی برای جایگزینی ماشین‌آلات: متغیرهای موثر شامل تعداد خرابی، هزینه نت، میزان تولید و هزینه مصرف قطعات یدکی است. تنها متغیر افزاینده میزان تولید است. بنابراین در شرایطی که تمامی این متغیرها در شرایط بدی باشند باید اهمیت این سیاست بهبود افزایش یابد. بنابراین تغییر میزان متغیرها از ۱۰۰- به ۱۰۰ باعث افزایش اهمیت سیاست بهبود از ۵ به ۴۳ شده است.
- سیاست بهبود آهنگ بازیابی: متغیرهای موثر شامل تناژ باطله و تناژ ماده معدنی است. با تغییر میزان متغیرها از ۱۰۰- به صفر متغیر تناژ ماده معدنی افزایش می‌یابد؛ بنابراین انتظار می‌رود، اهمیت سیاست بهبود از ۴۳ به ۵ کاهش یابد اما با افزایش میزان متغیرها از صفر تا ۱۰۰ میزان باطله افزایش می‌یابد، بنابراین اهمیت سیاست بهبود از ۵ به ۴۳ افزایش می‌یابد.
- سیاست بهبود فرآیند تولید: متغیرهای موثر شامل میزان تولید و هزینه تولید است. با تغییر میزان متغیرها از ۱۰۰- به صفر متغیر میزان تولید افزایش می‌یابد، بنابراین انتظار می‌رود، اهمیت سیاست بهبود از ۴۳ به ۵ کاهش یابد اما با افزایش میزان متغیرها از صفر تا هزینه تولید افزایش می‌یابد، بنابراین اهمیت سیاست بهبود از ۵ به ۴۳ افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک سیستم خبره در قالب سه زیرسیستم مطابق با چرخه مدیریت بهره‌وری برای ارزیابی بهره‌وری معادن طراحی شده است.

رابط کاربری با نمایش نتایج کمی (مقدار شاخص، پیش‌بینی مقدار شاخص، درصد تغییرات و درصد رشد) و نتایج کیفی (وضعیت شاخص و ارایه سیاست بهبود) موجب افزایش سرعت پاسخ‌گویی و قابلیت اطمینان سیستم شده است. این سیستم کاربرپسند است و موجب تسهیل روند ارزیابی بهره‌وری در معادن در سه مرحله از چرخه مدیریت بهره‌وری شده است.

این سیستم علاوه بر اینکه قابلیت‌های مدل‌های پیشین را که محدود به مرحله ارزیابی‌اند تحت پوشش قرار می‌دهد، قادر به اندازه‌گیری، ارزیابی و ارایه راه‌حل بهبود برای شاخص‌های اصلی بهره‌وری در معادن است. مدلسازی ماتریس IPA در قالب یک رابط کاربر گرافیکی، ارزیابی پرسشنامه کیفی با متغیرهای کیفی موثر بر بهره‌وری معدن را تسهیل کرده است. همچنین سنجش میزان تاثیر متقابل عوامل موثر بر بهره‌وری در معادن از دیگر امکانات این سیستم است که زمینه‌ساز طراحی سیستم استنتاج فازی برای ارزیابی عوامل موثر بر بهره‌وری و تعیین ضرورت سیاست بهبود با توجه به ارتباط بین این عوامل شد. این سیستم در یک منوی کاربری مشاهده میزان اهمیت راهکار بهبود را با توجه به مقدار شاخص در یک دوره مقدور ساخته است.

بهره‌وری در یک مجتمع معدنی طلا در کشور با استفاده از این سیستم ارزیابی و نتایج زیر حاصل شد:

- از میان ۳۸ شاخص کمی محاسبه و تحلیل شده، شاخص‌های مالی با رشد مطلوب و شاخص‌های انرژی و تعمیرات و نگهداری تغییرات (رشد) نامطلوب دارند. همچنین سیستم برای شاخص‌های با رشد نامطلوب هفت سیاست بهبود ارایه داد که بیشترین و کمترین سهم به ترتیب مربوط به سیاست "بهبود فرآیند تولید" و "مدیریت منابع انسانی" است.
- با استفاده از سیستم کیفی تعداد ۴۰ متغیر کیفی (پرسش) موثر بر بهره‌وری این مجتمع معدنی ارزیابی شد. همچنین پس از اجرای سیستم استنتاج فازی میزان اهمیت سیاست‌های بهبود برای مجتمع به دست آمد که سیاست کاهش مصرف انرژی با اهمیت ۵۶ درصد دارای بیشترین و سیاست‌های افزایش دوره آموزش، طراحی و تدوین برنامه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات و برنامه‌ریزی برای جایگزینی ماشین‌آلات با اهمیت ۵ درصد دارای کمترین اهمیت است.

منابع

1. Tilton, J. E., 2014, *"Cyclical and secular determinants of productivity in the copper, aluminum, iron ore, and coal industries*", Miner. Econ., 27(1): 1–19.
2. EY Global Mining & Metals Advisory Institute, 2016, "Business risks facing mining

and metals", Available on: http:// EY.com.

3. Sumanth, D. J., Dedeoglu, M., 1988, "Application of expert systems to productivity measurement in companies / organizations", Computers & Industrial Engineering, 14(3): 241–249.
4. Rao. M. P., Miller. D. M., Lin. B., 2005, "PET: An expert system for productivity analysis", Expert Systems with Applications, 29: 300–309.
5. Azadeh, A., Fam, I. M., Khoshnoud, M. Nikafrouz, M., 2008, "Design and implementation of a fuzzy expert system for performance assessment of an integrated health, safety, environment (HSE) and ergonomics system: The case of a gas refinery", Int. Sci.178(22): 4280–4300, (in Persian).
6. Kaur, E. N., Rekhi, E. N. S., Nayyar, A., 2013. "Review of Expert Systems based on Fuzzy logic", Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng., 2(3):1334-1339.
7. Muqeem Idrus, B., Keem, S., Khamidi. Y., Zakaria, M. F., Arazi, M.S., 2012, "Estimation of Production rates for Formwork Installation using Fuzzy Expert Systems", Glob. J. Res. Eng., 12(1)–E.
8. Chekushina, E. V., Vorobev. A. E., Chekushina T. V., 2013, "Use of expert systems in the mining", Middle-East J Sci Res,18 :1–3.
9. Rao., M. P., Miller, D. M. , 2004,."Expert systems applications for productivity analysis", Ind. Manag. Data Syst., 104(9):776–785.
10. Szwilski, A., 1988, "Significance and measurement of coal mine productivity", Mining Science and Technology, 6(30): 221-231.
11. Sakaki, H., 1994, "Planning and improvement of labor productivity in mines", 3th Iranian Mining Symposium, Yazd University, Yazd, Iran (in Persian).
12. Jara, J. J., Pérez, P., Villalobos, P., 2010, "Good deposits are not enough: Mining labor productivity analysis in the copper industry in Chile and Peru 1992–2009", Resources Policy, 35(4):247-256.
13. Jopp, T.A., 2016, "Did closures do any good? Labor productivity, mine dynamics, and rationalization in interwar Ruhr coal mining", The Economic History Review, 00(0) :1-36, DOI: 10.1111/ehr.12383.
14. Neingo, P.N., Tholana, T., 2016, "Trends in productivity in the South African gold mining industry", Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116:283-290.
15. Asafu-Adjaye, J., Mahadevan, R., 2003, "How cost efficient are Australia's mining industries?", Energy Economics, 25(4): 315-329.
16. Topp, V., Soames, L., Parham, D. and Bloch, H., 2008, "Productivity in the Mining Industry: Measurement and Interpretation", Australian Government, Productivity Commission, Staff Working Paper, Melbourne, VIC.

۱۷. محمودی، ز.، صیادی، ا.ر.، رجب‌زاده، ع.،۱۳۹۳، "ارزیابی بهره‌وری انرژی در معادن با رویکرد پویایی سیستمی"، سومین کنفرانس معادن روباز ایران، ۲۹-۳۱ اردیبهشت، کرمان.

۱۸. محمودی، ز.، صیادی، ا.ر.، رجب‌زاده، ع.،۱۳۹۵، "ارایه مدل پویایی ارزیابی بهره‌وری نیروی کار معادن (مطالعهٔ موردی: مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو)"، مجله مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، ۲ (۸): ۲۸۷-۳۰۸.

۱۹. سلطانی، م.ر.، خدایاری، ف.، صیادی، ا.ر.، رجب‌زاده، ع.، ۱۳۹۲، "بهینه‌سازی بهره‌وری مجتمع فسفات اسفوردی با استفاده از برنامه‌ریزی کسری"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، ۸ (۲۰): ۳۵-۲۵.

۲۰. سلطانی، م.ر.، صیادی، ا.ر.، مهرگان، م.ر ، عابدی، م.ر.،۱۳۹۱، "ارایه رویکرد ترکیبیDEA-AP برای رتبه‌بندی کارایی معادن سنگ آهن ایران"، مجله پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی، ۲ (۳):۶۴-۴۵.

21. Durkin, J., 1990, "Research Review: Application of expert systems in the sciences", The Ohio Journal of Science, 90(5): 171-179.
22. Shu-Hsien L., 2005, "Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004", Expert Systems with Applications, 28: 93–103.

23. Akram, M., Abdul Rahman, I., Memon, I., 2014, "A review on expert system and its applications in civil engineering", International Journal of Civil Engineering and Built Environment, 1 :24-29.

24. Fayek, A., R., and Oduba, A., 2008, "Predicting industrial construction labor productivity using fuzzy expert systems", Journal of Construction Engineering and Management, 131(8).

۲۵. مرادی، م.، مرادی، س.ف طلوعی اشلقی، ع.،۱۳۹۰، "مدلسازی ارزیابی عملکرد کارکنان با استفاده از سیستم خبره"، دو فصلنامه علمی پژوهشی راهبردهای بازرگانی- دانشور رفتار سابق، ۱ (۴۷)، ۴۷-۱.

26. Rajak, S., Parthiban, P., Dhanalakshmi, R., 2016, "Sustainable transportation systems performance evaluation using fuzzy logic", Ecol. Indic., 71: 503–513.

27. Martilla, J. A., James. J. C., 1977, "Importance performance analysis", Journal of Marketing, 41(1): 77-79.

۲۸. صیادی، ا.ر.، رجب‌زاده، ع.،۱۳۹۳، "مطالعه و تدوین چرخه بهره‌وری و تدوین شاخص‌های اصلی آن"، مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران - یزد، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران.

29. Mehrbakhsh, N., Karamollah. B., Othman. I., Nasim. J., Mousa. B., 2011, "An application expert system for evaluating effective factors on trust in B2C Websites Trust, Security, ANFIS, Fuzzy Logic, Rule Based Systems", Electronic Commerce, Engineering, 3: 1063-1071.

30. Lin, C.C., Chen, S.C., Chu. Y.M., 2011, "Automatic price negotiation on the web: An agent-based web application using fuzzy expert system", Expert Syst. Appl., 38(5): 5090–5100.

۳۱. رجب زاده، علی، نیک قدم حجتی، س.، فریدی ماسوله، م.، ۱۳۹۳، انتشارات صفار، ۱۹۲ صفحه.

۳۲. فرجی، ح.، آذر، عادل، علم مدیریت فازی، ۱۳۸۹، نشر کتاب مهربان، ۳۰۸ صفحه

۳۳. خدیور، آ.، نصر نصرآبادی، ش.، فلاح،ا.،۱۳۹۳،"طراحی سیستم خبره فازی جهت انتخاب استراتژی مدیریت دانش"، پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات،۳۰(۱)، ۱۱۹-۹۱.