**Paper Type: Original Article**

Evaluation of Effective Parameters in Managerial and Periodic Inspections of the Voltage Unit of a Steel Company Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

Morteza Taghizadeh Tavana^{1,*}, Mahsa Khodadadi¹

¹ Department of Electrical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran; mortezatz71@gmail.com; Mahsa.khodadadi@gmail.com.

Citation:

Taghizadeh Tavana, M., & Khodadadi, M. (2024). Evaluation of effective parameters in managerial and periodic inspections of the voltage unit of a steel company using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). *Management sciences and decision analysis*, 2(4), 294-302.

Received: 08/09/2024

Reviewed: 10/11/2024

Revised: 20/12/2024

Accepted: 24/02/2025

Abstract

Purpose: This study aims to identify and evaluate the effective parameters in managerial and periodic inspections of the voltage unit in a steel company to improve decision-making and reduce operational risks through the Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach.

Methodology: The research is applied–descriptive in nature. The FAHP model was employed to evaluate and weight the criteria. In the first step, key factors influencing managerial inspections were identified through literature review and expert opinions. Pairwise comparison questionnaires were then used to collect data, which were analyzed using MATLAB software.

Findings: The results revealed that technical factors such as equipment performance, employee safety, and cooling system condition have the highest impact on improving managerial inspections. Moreover, environmental and human factors contribute significantly to enhancing system sustainability and reducing operational hazards. The FAHP method effectively increased analytical accuracy under uncertainty.

Originality/Value: The originality of this research lies in integrating fuzzy logic with hierarchical analysis for assessing qualitative and quantitative factors in industrial environments. This model provides an efficient decision-making tool for preventive maintenance and managerial process optimization by reducing uncertainty and improving prioritization accuracy.

Keywords: Fuzzy analytic hierarchy process, Managerial inspections, Voltage unit, Preventive maintenance, Steel industry.

Corresponding Author: mortezatz71@gmail.com<https://doi.org/10.22105/msda.v2i4.87>

Licensee. **Management Sciences and Decision Analysis**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارزیابی پارامترهای موثر در بازدیدهای مدیریتی و دوره ای واحد ولتاژ شرکت فولاد با کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی-فازی

مرتضی تقی‌زاده توانا^۱، مهسا خدادادی^۲

^۱گروه مهندسی برق، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف شناسایی و ارزیابی پارامترهای موثر در بازدیدهای مدیریتی و دوره ای واحد ولتاژ شرکت فولاد انجام شده است تا با بهره‌گیری از رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، راهکارهایی برای بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و کاهش ریسک‌های عملیاتی ارائه شود.

روش‌شناسی پژوهش: روش تحقیق از نوع کاربردی-توصیفی است و از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای ارزیابی و وزن‌دهی شاخص‌ها استفاده شده است. در گام نخست، معیارها و زیرمعیارهای موثر بر بازدیدهای مدیریتی از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و نظرات خبرگان شناسایی شد. سپس با طراحی پرسشنامه مقایسه زوجی، داده‌ها جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* مورد تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد عوامل فنی از جمله وضعیت عملکرد تجهیزات، ایمنی کارکنان و وضعیت سیستم‌های خنک‌کاری بیشترین تاثیر را در بهبود اثربخشی بازدیدهای مدیریتی دارند. همچنین مشخص شد که توجه به شاخص‌های زیست‌محیطی و انسانی موجب افزایش پایداری و کاهش خطرات عملیاتی می‌شود. روش *FAHP* در این مطالعه توانست دقت تحلیل را در شرایط عدم قطعیت به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نوآوری پژوهش حاضر در استفاده ترکیبی از منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی عوامل کیفی و کمی در محیط‌های صنعتی است. این مدل ضمن کاهش عدم قطعیت، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری پیشگیرانه و بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریتی فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، بازدیدهای مدیریتی، واحد ولتاژ، نگهداری پیشگیرانه، صنعت فولاد.

۱- مقدمه

تصمیم‌گیری که انتخاب بهترین راه‌حل از بین راه‌حل‌های مختلف موجود تعریف شده است، نیازمند شناخت راه‌حل‌ها و ارزیابی آن‌ها می‌باشد. برای ارزیابی، نیاز به معیاری است که بتوان شقوق مختلف را با آن سنجید و در نهایت مطلوب‌ترین و مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمود. پیش‌بینی، جز لاینفک فرآیند تصمیم‌گیری است که رابطه مستقیمی با ریسک تصمیم‌گیری دارد [1]. بدین معنا که هرچه پیش‌بینی دقیق‌تر باشد، زیان یا ریسک تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان کاهش می‌یابد. این مساله زمانی که در مورد مباحث مدیریتی و برنامه‌ریزی برای ساختارهای سازمان‌یافته می‌باشد، بسیار مهم شمرده شده و نیازمند دستیابی به اطلاعاتی در خصوص وضعیت آینده، احتمالات ریسک و خطرات پیش روی در آن بخش است که بتوان روند آتی تغییرات و عملکرد را پیش‌بینی نمود [2].

اگر این پیش‌بینی با در نظر گرفتن معیارهای همه‌جانبه‌تری باشد، در نتیجه زیان یا ریسک عملیاتی کاهش خواهد یافت؛ به عبارت دیگر، ثبات حاصل از عملکرد سبب کاهش میزان هزینه‌ها، گردش کاری، شیف‌ها و... خواهد شد [3]. از سوی دیگر ارایه یک چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر اولویت‌بندی انجام کار، اختصاصی‌سازی عملکرد و ارایه جدول زمان‌بندی سبب افزایش راندمان و دقت در کار می‌گردد که تنها توسط سیستم‌های

تحلیل سلسله مراتبی^۱ با در نظر گرفتن درگیری معیارهای مختلف تحت الترانتیوهای گوناگون ممکن خواهد بود [1]. با توجه به چنین شرایطی می‌توان بیان داشت که هرچه مقدار الترانتیوها گسترده‌تر گردد، میزان معیارها و زیرمعیارهای تعریف‌شده نیز گسترده‌تر خواهد شد و این مساله سبب کاهش میزان دقت کار و افزایش عدم قطعیت‌های تحلیل می‌گردد. در این راستا به‌کارگیری دستورالعمل‌های معمول AHP مانند تحلیل دوتایی دارای خطا خواهد بود. رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاری^۲ این امکان را ایجاد کرده است تا با به‌کارگیری اصول تحلیل سلسله مراتبی، متغیرهای گوناگونی را در تحلیل وارد نمود. در این رویکرد تصمیم‌گیری، عموماً اهداف و عوامل متعددی مطرح است و فرد تصمیم‌گیرنده سعی می‌کند که از بین چندین گزینه موجود (محدود یا نامحدود)، بهترین گزینه را انتخاب نماید [4].

در دهه‌های اخیر، توجه محققین به استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده معطوف گردیده است. در این تصمیم‌گیری‌ها ممکن است به‌جای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی، از چندین معیار سنجش استفاده گردد. مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به دو گروه مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه^۳ و مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه^۴ تقسیم می‌شوند. در مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه، چندین هدف به‌صورت هم‌زمان برای بهینه‌سازی موردتوجه قرار می‌گیرند و مقیاس سنجش برای هر هدف ممکن است با مقیاس سنجش برای بقیه اهداف متفاوت باشد؛ اما مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه با مسایلی سروکار دارند که تصمیم‌گیرنده بخواهد از بین چندگزینه که با n شاخص ارزیابی می‌شوند، یکی را انتخاب یا آن‌ها را رتبه‌بندی نماید [2]. با بررسی تکنیک‌های متفاوت مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، تکنیک شباهت به حل ایده‌آل مناسب‌ترین روش برای طبقه‌بندی و رتبه‌بندی می‌باشد؛ اما این تکنیک فاقد الگوریتمی خاص برای محاسبه وزن (اهمیت نسبی) معیارها است لذا باید اهمیت نسبی (وزن) معیارها با استفاده از روشی دیگر تعیین شده و وزن‌های محاسبه‌شده به‌عنوان ورودی، مورد استفاده قرار گیرد [1].

با ارایه نظریه منطق فازی^۵ توسط پرفسور لطفی‌زاده [5] بیان داشت که به‌کارگیری مقادیر کلاسیک در تحلیل‌ها به سبب وجود عدم قطعیت‌های ناشی از متغیرهای محیطی همراه با خطاهای محاسباتی خواهد بود. همچنین اهمیت نسبی هر پارامتر که بسته به موقعیت آن متفاوت است نمی‌تواند توسط اعداد کلاسیک بیان گردد. بدین منظور ایشان با ارایه توابع عضویت و ارایه پارامترهای فازی نشان داد که هر عاملی (متشکل از هرچند الترانتیو یا زیرعامل) می‌تواند درجه‌ای از اهمیت و اولویت را در تحلیل دارا باشد. با در نظر گرفتن چنین ویژگی، تصمیم‌گیری‌های مربوط به پارامترهای گسترده و مبهم همراه با عدم قطعیت‌های مختلف می‌تواند به‌راحتی با مدنظر قرار دادن منطق فازی، ارزیابی گردد. در این راستا افرادی مانند فنلارهومون و پدرکیز پژوهشگران پیشتازی بودند که مفهوم منطق فازی را در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به کار بردند. در حقیقت، برای یک فرد تصمیم‌گیرنده راحت‌تر است که یک قضاوت را به‌صورت یک بازه به‌جای یک ارزش ثابت بیان کند. این امر از این مساله سرچشمه می‌گیرد که با توجه به طبیعت فازی مقایسات زوجی، فرد در بیان ترجیحش ناتوان است [3].

چندین رویکردی به‌صورت تلفیقی AHP و فازی خواهد بود که به‌صورت تحلیل سلسله مراتبی-فازی^۶ و تصمیم‌گیری چندمعیاری فازی ارایه می‌گردد. در این تحقیق از رویکردهای FAHP جهت ارزیابی، وزن‌دهی، اولویت‌بندی و شاخص‌های به‌کار گرفته‌شده در برنامه‌ریزی و ارزیابی پارامترهای موثر در بازدیدهای مدیریتی واحد ولتاژ شرکت فولاد استفاده گردیده است. بدین منظور، ابتدا با شناسایی، طبقه‌بندی الترانتیوها، اقدام به تعریف معیارها و زیرمعیارهای مطالعاتی گردیده و سپس با مدنظر قرار دادن ضرایب تاثیر و توابع عضویت فازی، اقدام به فازی‌سازی پارامتریک هرکدام از آن‌ها می‌گردد که به‌عنوان متغیرهای تحلیل وارد شده است. سپس با به‌کارگیری هسته استنتاج فازی، داده‌ها تحلیل و خروجی‌های تحلیل پس از غیرفازی‌سازی مورد تفسیر و کلاسه‌بندی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل در ارزیابی‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت شبکه‌ای برای بازدیدهای دوره‌ای واحد ولتاژ استفاده می‌شود.

با توجه به افق بلندمدت سند چشم‌انداز صنعت فولاد کشور، نقش تعمیرات و نگهداری مناسب هم‌راستا با هدف‌گذاری و ماموریت سند چشم‌انداز صنعت فولاد است. سطح مطلوب پایایی، متناسب با شرایط محیطی و خواسته‌های جامعه تعیین می‌شود. آرمان صنعت فولاد، به‌عنوان صنعت پیشرو در ارایه خدمات مهم در زمینه‌های اقتصادی و رفاهی کشور دارد و دارای نقشی اساسی در فراهم ساختن یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های توسعه پایدار در کشور است. این مساله سبب گردیده است تا نگرش به این سیستم همواره با نگرشی به روند پایدار توسعه کشور هم‌راستا گردد؛ بنابراین می‌توان بیان داشت که نتایج حاصل از تمامی ارزیابی‌های صورت گرفته در مدیریت واحدهای کاربردی شرکت فولاد مستقیماً در چشم‌انداز

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)² Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM)³ Multiple Attribute Decision Making (MADM)⁴ Multiple Objective Decision Making (MODM)⁵ Fuzzy logic⁶ Fuzzy-based Analytic Hierarchy Process (FAHP)

توسعه در سطوح مختلف شهری، استانی و کشوری دخیل خواهد بود. با توجه به اهداف اصلی مدنظر در این مطالعه که بر پایه مدیریت و برنامه‌ریزی دوره‌ای واحد و لثاژ مربوط به شرکت فولاد بنا نهاده شده است، می‌تواند در راستای بهبود ارزیابی‌های مدیریتی در صنعت فولاد مورد توجه باشد.

از سوی دیگر، به‌کارگیری سیستم‌های *FAHP* یکی از نوین‌ترین و توانمندترین رویکردهای تصمیم‌گیری برای گستره زیادی از متغیرها همراه با عدم قطعیت‌های فراوان می‌باشد. به‌کارگیری چنین سیستم تصمیم‌گیری برای انتخاب، طبقه‌بندی و اولویت‌دهی بر پایه اهمیت نسبی پارامترهای درگیر می‌تواند در انتخاب گزینه‌های برتر کمک بسیار زیادی داشته باشد. این جنبه از تحقیق را می‌توان به‌عنوان پایه اساس مطالعه و نوآوری تحقیق مشاهده نمود. به‌طوری‌که در حالت معمول از متغیرهای کلاسیک (اعداد ثابت) در مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده می‌گردد؛ که در این مطالعه از بازه‌ای از اعداد با ضرایب تاثیر و وزن‌های عملکردی استفاده شده است. این مساله نیز یک عامل توانمند در مدیریت درست و ساختاری برای صنعت بشمار می‌آید.

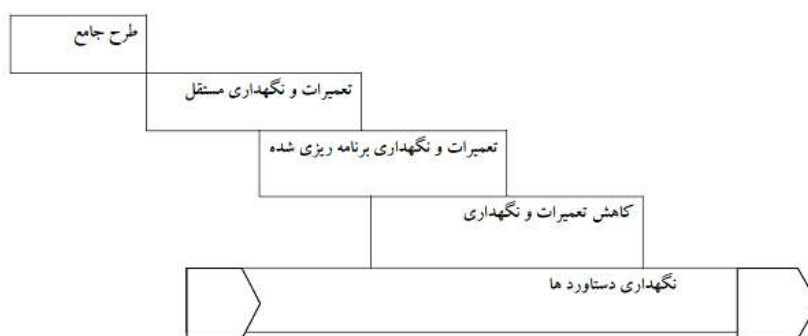
۲- استراتژی‌های نگهداری

تعمیرات و نگهداری بهره‌ور جامع^۱ یک رویکرد تعریف‌شده توسط ناکاجیما در ژاپن است که تمام عمر تجهیزات را در هر بخش شامل برنامه‌ریزی، ساخت و نگهداری تحت پوشش قرار می‌دهد. مفهوم این روش بر تبعیت از استرس مطلق ژاپنی‌ها در مواجه شدن با مسایل اساسی مانند روغن‌کاری، بازرسی‌های عینی و استفاده جهانی از بهترین عملیات‌ها در تمامی جوانب تعمیرات و نگهداری می‌باشد [5]. مدیریت کیفیت جامع^۲ یک مدیریتی است که به‌طور گسترده‌ای در صنعت مورد استقبال قرار گرفته است. نتیجه مثبت پیاده‌سازی این استراتژی، کاهش خرابی غیرمنتظره ماشین‌آلات بخصوص در صنایع فولاد داشته است که تولید را مختل می‌کرد و منجر به ضرر و زیان می‌شد. این روش در حقیقت می‌تواند به توان نتیجه‌ای از تلقیق مدیریت کیفیت جامع و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در نظر گرفته شود که به‌صورت یک برنامه‌ای بهبود مستمر بر تعمیرات و نگهداری برنامه‌ریزی شده و مستقل شده توجه دارد. این مساله بر مفاهیم تولید بهنگام، تولید ناب و تمرکز داشته و برای دستیابی به حداقل چرخه عمر، طراحی شده است. *TPM* یک رویکرد جامع بر اساس چرخه‌ی عمر تجهیزات را فراهم می‌کند که به‌وسیله آن خرابی تجهیزات، نقص محصولات و سوانح به حداقل ممکن می‌رسد.

این روش تمامی افراد در سازمان از مدیران سطوح عالی تا تعمیرکاران ماشین‌آلات را در برمی‌گیرد. فعالیت‌های *TPM*، بر روی از بین بردن شش فقدان عمده تمرکز یافته که شامل: شکست تجهیزات، زمان تنظیم، معطل ماندن و توقف جزئی، کاهش سرعت، نقص در فرآیند و کاهش عملکرد می‌باشد [6]. ایجاد سلامت، ایمنی و سیستم‌های سازگار با محیط مهم‌ترین عامل تمرکز در این محیط بوده و سعی می‌گردد محیط کاری و ناحیه‌ای امن ایجاد شود که توسط فرآیندها و رویکردها آسیب نبیند. در این بخش برای ایجاد یک محیط کاری امن و به دور از هر حادثه‌ای تلاش شده که ممکن است بر روی سایر ارکان تاثیرگذار باشد. کمیته‌ای برای پیشبرد این که تشکیل شده و با نمایش‌ها و تبلیغات گوناگون اطلاعات لازم را به کارگران آموزش می‌دهند [5]. این کمیته زیر نظر مستقیم مقام ارشد سازمان فعالیت می‌نماید، مدیر ایمنی باید آینده‌نگر بوده و با برگزاری مسابقات، سمینارها و جشن‌های مختلف، پرسنل را از امور ایمنی آگاه ساخته و آن‌ها را تشویق به رعایت موارد ایمنی نمایند. با توجه به این ارکان، رویکرد جامع به‌صورت شکل ۱ پیاده‌سازی می‌گردد. این سیستم با استفاده از یک طرح جامع که توسط یک تیم عملیاتی همراه با مدیر تعمیرات و نگهداری و مدیر بخش مربوطه مشخص شده است. برای واحد زیر نظر طراحی شده و در برنامه‌ریزی توالی پیاده‌سازی آن مشخص می‌شود.

¹ Total Productive Maintenance (TPM)

² Total Quality Management (TQM)



شکل ۱- مهم‌ترین فعالیت‌های پیاده‌سازی TPM.

Figure 1- The most important activities of implementing TPM.

امروزه به‌کارگیری رویکردهای نوین بخصوص تحلیل‌های کامپیوتری و تصمیم‌گیری‌های انعطاف‌پذیر سبب گردیده تا استراتژی‌های نگهداری بسته به شرایط و موقعیت‌های مختلف طی روندهای گوناگونی طبقه‌بندی و بکار برده شوند. یکی از استراتژی‌هایی که امروزه به‌صورت گسترده در صنایع مختلف برای مدیریت بهینه استفاده می‌شود، استراتژی‌های تلفیقی است. این استراتژی نگرشی جامع و پوششی برای تمامی مسایل و ارکان فعالیتی واحدها داشته و سبب برنامه‌ریزی، نظارت و بازرسی پیوسته و پاسخ به سوانح اضطراری و فرسایشی تجهیزات می‌گردد [5]. این مساله می‌تواند برای تمامی سطوح مختلف تعمیر داده شده و مکانیسم خودکار را برای ارزیابی و آرایه سیستم مدیریت فرآیندی پیاده‌سازی نماید. با توجه به بیانات فوق می‌توان بیان نمود که در مدیریت استراتژیک و تصمیم‌گیری در مساله نگهداری و تعمیرات تجهیزات در بخش صنایع فولاد (که به‌عنوان مهم‌ترین نگرانی و پرهزینه‌ترین مساله پیش‌روی) از استراتژی‌های گوناگونی بهره گرفته می‌شود. در این میان همواره سعی گردیده تا این استراتژی‌های پیاده‌سازی شده دارای بهترین توجه اقتصادی و کمترین حجم هزینه‌های تحمیلی را برای شرکت به همراه داشته باشد [6]؛ بنابراین داشتن دید مقایسه‌ای نسبت به استراتژی‌های پیاده‌سازی شده می‌تواند در تصمیم‌گیری مناسب در به‌کارگیری این رویکردها مناسب به‌شمار آید. جدول ۱ اقدام به آرایه مقایسه‌ای از استراتژی‌های مدیریتی در بخش تعمیرات و نگهداری پرداخته است.

جدول ۱- بررسی مقایسه‌ای روش‌های نگهداری.

Table 1- Comparative study of maintenance methods.

روش نگهداری	رویکرد	شاخص ارزیابی
اصلاحی	تعمیر ماشین‌آلات در زمان خرابی	نیاز به بودجه‌ای زیاد برای تعمیرات و نگهداری
پیشگیرانه	تعمیر بر اساس برنامه‌ای از پیش تعیین شده	جایگزینی عناصر و تعویض اجزا به‌صورت دوره‌ای
پیشگویانه	کشف منابع خرابی	بازتاب دادن و تصحیح شکست‌ها
اقتضایی	بازتاب شرایط ماشین‌آلات	تصمیم‌گیری بر اساس شرایط تجهیزات
بهره‌ور جامع	مشارکت کارکنان در فرآیند تعمیر و نگهداری	کاهش هزینه‌ها، کاهش خرابی دستگاه‌ها و ترویج همکاری
تلفیقی فرآیندی	به‌کارگیری رویکردهای مبتنی بر شرایط	استفاده تلفیقی و همه‌جانبه از رویکردهای دیگر

۳- منطق فازی و تصمیم‌گیری مراتبی-فازی

فرآیند تحلیل AHP که توسط توماس ساعتی بنانهاده شده است، یکی از جامع‌ترین سامانه‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است؛ چراکه این روش امکان فرموله کردن مساله را به‌صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مساله دارد. گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها صورت می‌پذیرد. این رویکرد، بر پایه مقایسات زوجی معیارها^۱ توسط افراد خبره، با مقیاس معین می‌باشد. سپس، با به‌کارگیری خروجی این مرحله، یک یا تعداد بیشتری ماتریس مقایسات زوجی تشکیل می‌شود که برای وزن دهی (رتبه‌بندی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. AHP بر مبنای مقایسه زوجی بنانهاده شده که قضاوت و محاسبات را آسان می‌کند. همچنین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد و در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند کرد. پس از تعیین اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر، نباید آهنگ سازگاری^۲ که CR از تقسیم شاخص سازگاری^۳

¹ Alternatives² Consistency Ratio (CR)³ Consistency Index (CI)

بر میانگین شاخص سازگاری^۱ محاسبه می‌شود. مقدار RI نیز توسط ساعتی و همکاران برای مقادیر مختلف آماده‌سازی گردیده است [2]. برای محاسبه آهنگ ناسازگاری/سازگاری به‌صورت زیر اقدام می‌گردد [1]:

۱. محاسبه بردار مجموع وزنی: ماتریس مقایسات زوجی را در بردار ستونی «وزن نسبی» ضرب کنید بردار جدیدی را که به این طریق به دست می‌آورید، بردار مجموع وزنی بنامید.
۲. محاسبه بردار سازگاری: عناصر بردار مجموع وزنی را بر بردار اولویت نسبی تقسیم و بردار حاصل «بردار سازگاری» نامیده می‌شود.
۳. میانگین عناصر برداری سازگاری L_{max} را به دست می‌دهد.
۴. محاسبه شاخص سازگاری: شاخص سازگاری برابر $CI = \frac{L_{max}}{n-1}$ است که n تعداد معیارهای موجود در مساله است.
۵. محاسبه آهنگ سازگاری: نسبت سازگاری از تقسیم شاخص سازگاری بر شاخص تصادفی به دست می‌آید ($CR = \frac{CI}{RI}$). لازم به ذکر می‌باشد که نسبت سازگاری ۰/۱ یا کمتر سازگاری در مقایسات را بیان می‌کند.

تصمیم‌گیری چندمعیاری یک زمینه پیشرفته در حوضه تحقیقات کاربردی در عملیات محسوب می‌گردد که گستره وسیعی از تکنیک‌های مختلف ارزیابی را در اختیار تصمیم‌گیران و تحلیل‌گران در حوضه مدیریت و برنامه‌ریزی برای حل مسایل مختلف به‌ویژه مباحث مهندسی و مدیریت عملیاتی قرار می‌دهد [5]. این مساله سبب گردیده تا در طول دهه‌ی گذشته متخصصین و محققین فناوری‌های نوین از تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری برای تحلیل و برنامه‌ریزی در اولویت‌بندی، حساسیت‌سنجی و ارایه مدل‌های چارچوب عملیاتی بهره‌گیرند. این محققین با بهبود و تلفیق تکنیک‌های تصمیم‌گیری سبب حل مسایل پیچیده‌تر در رده‌های مختلف مدیریت و عملیات گردیده‌اند. در این تصمیم‌گیری‌ها بجای به‌کارگیری معیارهای تک‌سنجش بهینگی از مجموعه‌ای از معیارهای سنجش برای ارزیابی و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری بهره‌گرفته شده است. در تحلیل توسعه‌ای توسط تحلیل فرآیندی سلسله‌مراتبی و سیستم تصمیم‌گیری، فرض نمایید که A یک ماتریس مقایسه زوجی باشد که به‌صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & 1 & M_{23} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

حال با به‌کارگیری روش خبرگی در هر یک از سطریهای ماتریس مقایسات زوجی، ارزش S_k که خود یک تابع فضایی است به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$S_k = \sum_{j=1}^n A \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right] \quad (2)$$

در این رابطه M الترناتیوهای مربوط به هر معیار تصمیم، i و j نشان‌دهنده گزینه‌ها و شاخص‌ها و A تابع الترناتیوهای مبتنی بر AHP می‌باشد. در این روش، پس از محاسبه S_k درجه بزرگی آن‌ها را نسبت به هم به دست آورد. به‌طورکلی هر معیار و زیرمعیار به‌صورت مفرد و مجموع دارای وزن و ضریب تاثیر می‌باشد که در ارزیابی‌ها برحسب میزان اهمیت و حساسیت آن می‌تواند ضرایب با وزن بالاتر به‌کاربرده شود [1].

منطق فازی اولین بار در پی تنظیم نظریه مجموعه‌های فازی به‌وسیله پروفیسور لطفی‌زاده [5] در صحنه محاسبات نو ظاهر شد [2]. واژه فازی به معنای غیردقیق، ناواضح و مبهم (شناور) است که به‌منظور ارزیابی پارامترهای کیفی یا عوامل همراه با عدم قطعیت فراوان که امکان تحلیل آن‌ها به‌صورت معادلات و مکانیک کلاسیک وجود ندارد. منطق فازی از منطق ارزش‌های «صفر و یک» نرم‌افزارهای کلاسیک فراتر رفته و درگاهی جدید برای دنیای علوم مهندسی می‌گشاید، زیرا فضای شناور و نامحدود بین اعداد صفر و یک را نیز در منطق و استدلال‌های خود به کار برده و به چالش می‌کشد. منطق فازی از فضای بین دو ارزش «برویم» یا «نرویم»، ارزش‌های جدید «شاید برویم» یا «می‌رویم اگر» یا حتی «احتمال دارد برویم» را استخراج کرده و به کار می‌گیرد [3].

¹ Recompatibility Index (RI)

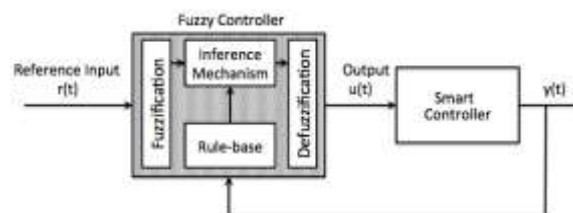
منطق فازی بیش از ۲۰ سال پس از ۱۹۶۵ از درگاه دانشگاه‌ها به بیرون راه نیافت زیرا کمتر کسی معنای آن را درک کرده بود. در اواسط دهه ۸۰ میلادی قرن گذشته صنعتگران ژاپنی معنا و ارزش صنعتی این علم را دریافته و منطق فازی را به کار گرفتند. اولین پروژه آن‌ها طرح هدایت و کنترل تمام خودکار قطار زیرزمینی شهر سندای بود که توسط شرکت هیتاچی برنامه‌ریزی و ساخته شد. نتیجه این طرح موفق و چشم‌گیر ژاپنی‌ها به‌طور ساده این‌گونه خلاصه می‌شود: آغاز حرکت نامحسوس (تکان‌های ضربه‌ای) قطار، شتاب گرفتن نامحسوس، ترمز و ایستادن نامحسوس و صرفه‌جویی در مصرف برق. از این پس منطق فازی بسیار سریع در تکنولوژی دستگاه‌های صوتی و تصویری ژاپنی‌ها راه یافت (از جمله نلرزدن تصویر فیلم دیجیتال ضمن لرزیدن دست فیلم‌بردار). اروپایی‌ها بسیار دیر، یعنی در اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی، پس از خوابیدن موج بحث‌های علمی در رابطه با منطق فازی استفاده صنعتی از آن را آغاز کردند [4]. منطق فازی از جمله منطق‌های چند ارزشی است و بر نظریه مجموعه‌های فازی ۱ تکیه می‌کند. مجموعه‌های فازی، خود از تعمیم و گسترش مجموعه‌های قطعی به صورتی طبیعی حاصل می‌آیند. مجموعه‌های قطعی بر پایه منطق کلاسیک ۲ به‌صورت زیر می‌باشند [7]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A, \\ 0 & \text{if } x \notin A. \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه، $\mu_A(x)$ تابع عضویت عنصر x در مجموعه قطعی A است. مجموعه A نیز به‌صورت لیستی از متغیرهای پایه x قابل تعریف است ($A = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$). زمانی که عدم قطعیت‌های مطرح‌شده در زمینه پارامترها افزایش می‌یابد یا متغیرهای زبانی (کلمات، توصیف‌ها و جملات زبان‌های انسانی یا ماشینی) بجای اعداد وارد تحلیل می‌گردند، دیگر امکان به‌کارگیری منطق کلاسیک وجود ندارد [9]. در این موارد نیازمند به‌کارگیری منطق جدید است که امکان تحلیل چنین مواردی را داشته باشد. همان‌گونه که در محاسبات ریاضی از متغیرهای عددی استفاده می‌گردد، در منطق فازی نیز از متغیرهای زبانی (گفتاری یا غیر عددی) استفاده می‌گردد. متغیرهای زبانی بر اساس ارزش‌های زبانی (گفتاری) که در مجموعه عبارت (کلمات/اصطلاحات) قرار دارند بیان می‌شود. عبارت زبانی ۳ صفاتی برای متغیرهای زبانی هستند [2]. با توجه به شکل ۲ در نظر بگیرید پرسنلی درخواست تغییر در یک متغیر در یک مکان یا بازه می‌باشد، تحت تابع متغیر ورودی و خروجی خواهد بود. میزان خطای سیستمی در این حالت به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e(t) = V_{ref}(t) - V_{out}(t). \quad (4)$$

$$\int e(t)dt = \int [V_{ref}(t) - V_{out}(t)] dt. \quad (5)$$



شکل ۲- فلوچارت فرآیندی در تحلیل فازی مورد استفاده در این تحقیق.

Figure 2 - Process flowchart in fuzzy analysis used in this research.

سیستم استنتاج فازی، فرآیندی سیستماتیک برای تبدیل یک پایگاه دانش به یک نگاشت غیرخطی را فراهم می‌آورند. به همین علت، از سیستم‌های مبتنی بر دانش (سیستم‌های فازی) در کاربردهای مهندسی و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. ممدانی و اصیلان در سال ۱۹۷۵ برای کنترل ترکیب یک موتور بخار و بویلر با استفاده از ترکیب قواعد کنترل زبانی در تجربیات عملگرهای انسانی، از وجود سیستم استنتاج فازی استفاده کردند [10].

یک سیستم فازی دارای اجزای زیر است که در شکل ۳ نشان داده شده است [9]:

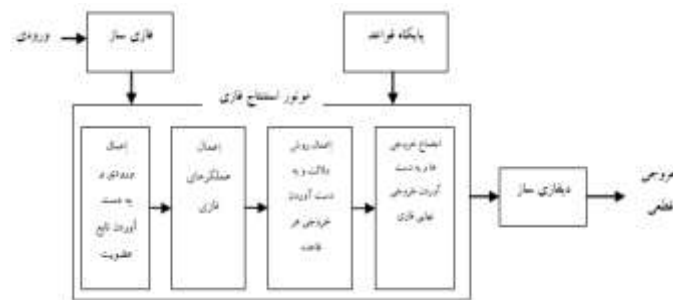
۱. یک فازی ساز در ورودی که مقدار عددی متغیرها را به یک مجموعه فازی تبدیل می‌کند.
۲. پایگاه قواعد فازی که مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه است.

¹ Fuzzy sets
² Classical logic

³ Linguistic terms

۳. موتور استنتاج فازی که ورودی‌ها را با یک سری اعمال به خروجی تبدیل می‌کند.

۴. غیرفازی ساز که خروجی فازی را به یک عدد قطعی تبدیل می‌کند.



شکل ۳- مراحل سیستم استنتاج فازی FIS.

Figure 3- Steps of the FIS fuzzy inference system.

۴- نتیجه‌ها و یافته‌های تحقیق

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی اگرچه افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای انجام مقایسات استفاده می‌نمایند، اما باید به این نکته توجه داشت که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی سنتی، امکان انعکاس سبک تفکر انسانی را به‌طور کامل ندارد. استفاده از اعداد فازی سازگاری بیشتری با عبارات کلامی و گاه مبهم انسانی دارد؛ بنابراین بهتر است که با به‌کارگیری اعداد فازی به تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. دو پژوهشگر هلندی به نام فان لاروهوف و پدریک به سال ۱۹۸۳ برای نخستین بار روشی را برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد نمودند. این روش با جایگزینی اعداد فازی مثلی در ماتریس مقایسه‌های زوجی و بر مبنای حداقل مجذورات لگاریتمی بنا نهاده شده است. پیچیدگی مراحل این روش باعث شده این روش چندان مورد استفاده قرار نگیرد.

پس از آن روش‌های متعددی برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد گردیده است و امروزه به‌عنوان یک رهیافت بسیار موفق در این زمینه بشمار می‌آید. نظر به نارسائی‌های نخستین روش FAHP، بوکلی به سال ۱۹۸۵ روش جدیدی را برای فازی‌سازی تکنیک AHP گسترش داد که به روش میانگین هندسی بوکلی موسوم است. بوکلی دو ایراد اساسی به تکنیک لاروهوف و پدریک وارد کرده است. نخست اینکه آن‌ها از معادلات خطی استفاده کرده بودند و این روش ممکن است همیشه پاسخ یکسانی نداشته باشد. دوم اینکه اعداد دوزنقه‌ای برای فازی‌سازی دیدگاه خبرگان مناسب‌تر از اعداد مثلی است. بوکلی در سال ۲۰۰۱ طی ارایه نظریه‌ای بیان داشت که اگر سازگاری مقایسه‌های زوجی باید کامل باشد، در این صورت نتیجه حاصل از روش وی با روش بردار ویژه ساعتی یکسان خواهد بود؛ در غیر این صورت نتایج روش وی بیشتر با واقعیت سازگار خواهد بود. روش بوکلی روشی پیچیده و مفصل است که قهرمان [11] در کتاب تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی به‌صورت بدان اشاره گردیده است. با توجه به رویکرد کلی بوکلی می‌توان بیان داشت که روند وزن‌دهی بوکلی به‌صورت روابط زیر قابل ساده‌سازی خواهد بود.

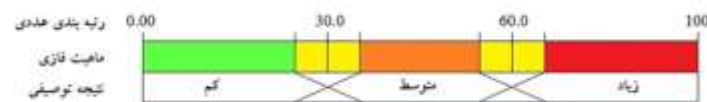
$$\tilde{t}_{ij} = \{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}\}. \quad (6)$$

$$\tilde{Z}_i = \left[\prod_{j=1}^n \tilde{t}_{ij} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (7)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \tilde{w}_i = \frac{\tilde{Z}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{Z}_i}. \quad (8)$$

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}. \quad (9)$$

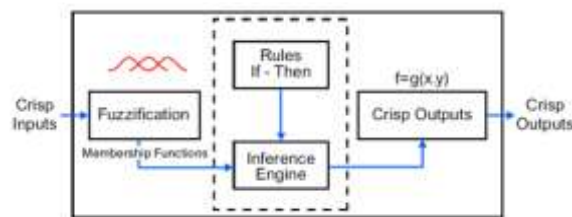
در سال ۱۹۹۲ روشی با عنوان روش تحلیل توسعه‌ای توسط چانگ ارایه گردید که بعدها به سال ۱۹۹۶ این روش توسط خود وی بهبود اصلاح و نهایی گردیده است. روش گسترش‌یافته چانگ بیش از همه روش‌های دیگر برای محاسبات تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مورد استفاده قرار گرفته است. اعداد مورد استفاده در این روش، اعداد مثلثی فازی بوده و تطابق بیشتری با *AHP* کلاسیک دارد. تنها تفاوت بحث نرمال‌سازی و تعیین وزن نهایی است که چانگ از مفهوم درجه امکان‌پذیری استفاده کرده است. منظور از درجه امکان‌پذیری آن است که مشخص شود چقدر احتمال دارد، یک عدد فازی بزرگتر از یک عدد فازی دیگر باشد. این روش علاوه بر پیچیدگی و محاسبات طولانی آنکه سبب گردیده تا همواره به‌منظور تحلیل نتایج از گروه ارزیابی بهبود یافته فازی بهره گرفته شود. شمای کلی ارزیابی قوانین با استفاده از روش سوگنو در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است نتایج قانون در سیستم استنتاج سوگنو به صریح و خطی می‌باشد.



شکل ۴- دیاگرام یک سیستم استنتاج سوگنو.

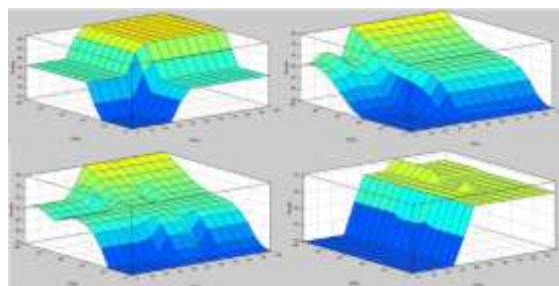
Figure 4 - Diagram of a Sugeno inference system.

بعد از آماده‌سازی پارامترهای ورودی و برای ارزیابی پارامترهای خروجی توسط منطق فازی ورودی‌های آماده‌سازی شده توسط رویکرد مبانی سلسله‌مراتبی-فازی به‌صورت عملکردی در سه گروه «تاثیرپذیری زیاد»، «تاثیرپذیری متوسط» و «تاثیرپذیری کم» طبقه‌بندی شده است. این تاثیرپذیری به‌منظور تهیه تابع هدف و نرخ تاثیر هرکدام از عوامل می‌باشد. چنین طبقه‌بندی سبب می‌گردد که خروجی اطلاعات فازی علاوه بر میزان کمیت آن (که به‌صورت مقدار ارزش عددی نمایش داده می‌شود)؛ به‌صورت کیفی و بر پایه میزان اهمیت هر عامل نسبت به کل هدف موردبررسی نیز رتبه‌بندی گردد. شکل ۵ طبقه‌بندی عملکردی فازی انجام گرفته برای مدل را که برای خروجی‌های تابع هدف مشخص گردیده؛ نشان داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، با افزایش تاثیرپذیری هر عامل، میزان حساسیت و اهمیت آن عامل بر روی برنامه‌ریزی بازدیدهای دوره‌ای موتورها نیز بیشتر خواهد گردید. روند ارزشیابی معیاری به‌صورت قوانین «اگر-آنگاه» برای تمامی توابع عضویت و عامل به‌صورت تک‌به‌تک تعریف شده که در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌گردد، هر قانون دارای یک بازه تغییرات بوده که می‌تواند بر روی نتایج خروجی موثر باشد. این مساله نیز به نوبه خود سبب کاهش عدم قطعیت‌های موجود به دلیل افزایش همپوشانی داده‌ها بخصوص در بخش‌هایی که تصمیم‌گیری نیازمند استدلال منطقی و مناسب از روی داده‌های شهودی یا کیفی دارد، می‌باشد.



شکل ۵- متغیرهای ورودی-خروجی این مطالعه.

Figure 4- Diagram of a Sugeno inference system.



شکل ۶- گراف تصمیم‌گیری فازی-مراتبی برای معیار بازدیدهای دوره‌ای و مدیریت عملیاتی واحد ولتاژ.

Figure 6- Fuzzy-hierarchical decision graph for periodic inspection criteria and operational management of the voltage unit.

با تکیه بر نتایج حاصل از تهیه ماتریس‌های ارزیابی برای معیارها و زیرمعیارها می‌توان مشاهده نمود که ضرایب تاثیر ماتریس‌ها به‌صورت سازگار بوده و ماتریس‌های برآورد شده به‌صورت بهینه می‌باشند. به‌منظور تعیین میزان همبستگی ماتریس‌های تصمیم در ایجاد زیرمعیارهای تعاملی، ماتریس تصمیم و اولویت‌بندی زیرمعیاری کل نیز برای عوامل موثر در مدل برنامه‌ریزی بازدید دوره‌ای تهیه گردیده است. همان‌طور که از نتایج تحلیل کل مشاهده می‌گردد، نرخ سازگاری برآورد شده به‌صورت ۹/۳٪ می‌باشد که نشان‌دهنده تاثیر بالای عامل انسانی و زیرمعیار نیروهای فعال بیشترین نقش را در تاثیرپذیری مدل دارا می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل *FAHP* ابزاری کارآمد برای شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای موثر در بازبدهای مدیریتی و دوره‌ای واحد ولتاژ شرکت فولاد است. عوامل فنی مانند وضعیت عملکردی واحد ولتاژ و سیستم‌های خنک‌کاری، به‌عنوان اولویت‌های اصلی، نشان‌دهنده نقش کلیدی آن‌ها در افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های نگهداری است. همچنین، توجه به عوامل ایمنی و محیط‌زیستی، با توجه به تطابق با استانداردهای بین‌المللی، به بهبود پایداری و کاهش مخاطرات عملیاتی کمک می‌کند. با استفاده از این رویکرد، امکان ترکیب داده‌های کیفی و کمی فراهم شده و عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند تصمیم‌گیری کاهش یافته است. پیشنهادهایی نظیر تدوین چک‌لیست‌های استاندارد، توسعه برنامه‌های آموزشی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین پایش وضعیت، می‌تواند فرآیند نگهداری پیشگیرانه را در صنایع فولادی بهینه کند. به‌طورکلی، این مطالعه نشان داد که اتخاذ رویکردهای مبتنی بر تحلیل چندمعیاره و استفاده از ابزارهای تصمیم‌گیری هوشمند، نه تنها در ارتقای بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها موثر است، بلکه به بهبود ایمنی، پایداری محیط‌زیستی و کاهش ریسک‌های عملیاتی در صنایع سنگین کمک شایانی می‌کند.

منابع

- [1] Asgharpour, M. J. (2013). *Multi-criteria decision making*. Institute of printing and publishing, university of Tehran. (In Persian). <https://havoshbook.com/book/2460>
- [2] Pedrycz, W., Ekel, P., & Parreiras, R. (2011). *Fuzzy multicriteria decision-making: Models, methods and applications*. John Wiley & Sons. https://www.google.com/books/edition/Fuzzy_Multicriteria_Decision_Making/xjvuNd3wwmsC?hl=en&gbpv=0
- [3] Koliouska, C., Andreopoulou, Z., Zopounidis, C., & Lemonakis, C. (2017). E-commerce in the context of protected areas development: A managerial perspective under a multi-criteria approach. In *Multiple criteria decision making: Applications in management and engineering* (pp. 99–111). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39292-9_6
- [4] Zegordi, H., Rezaee, E., Nazari, A., & Honari, F. (2011). Provide a model for risk reduction in power plant project based multi-objective optimization approach and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy economics studies*, 31, 161–195. (In Persian). <https://elmnet.ir/doc/864860-51122>
- [5] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [6] Daraei, M., & Movahedi, M. M. (2016). *Application of decision-making techniques in selecting maintenance and repair strategies*. Norozi. (In Persian). <https://elmnet.ir/doc/30793516-21361>
- [7] Nader Behbahani Nejad. (2015). *Machine maintenance and service with emphasis on condition monitoring*. Kerdgar. (In Persian). <https://www.gisoom.com/book/11164991/>
- [8] Erdoğan, M., & Kaya, İ. (2016). A combined fuzzy approach to determine the best region for a nuclear power plant in Turkey. *Applied soft computing*, 39, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.013>
- [9] Yucesan, M., & Kahraman, G. (2019). Risk evaluation and prevention in hydropower plant operations: A model based on Pythagorean fuzzy AHP. *Energy policy*, 126, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.039>
- [10] Chen, C. T., Lin, C. T., & Huang, S. F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International journal of production economics*, 102(2), 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.03.009>
- [11] Ghahreman, C. (2016). *Fuzzy multi-criteria decision making*. Simaye danesh. (In Persian). <https://www.gisoom.com/book/11279237/>