

ارزیابی فرایند هوشمند سازی کنتورهای برق: رویکرد مهندسی ارزش و تحلیل سلسله مراتبی

^۱ محمد مردانی شهر بابک*، ^۲ سید مهدی موسوی

چکیده

این مقاله باهدف تحلیل سناریوی پیاده‌سازی کنتورهای هوشمند مبتنی بر رویکرد یکپارچه‌سازی مهندسی ارزش و روش رتبه‌بندی سلسله‌مراتبی AHP صورت گرفته است. مهندسی ارزش تلاش می‌کند تا با شناسایی کارکردهای محصول یا پروژه، کارکردهای غیرضروری را تشخیص داده و ضمن حذف آن‌ها اندیشه خود را به روش‌های دیگری که می‌تواند کارکردهای اصلی را برآورده کند، معطوف سازد. به این منظور، در این تحقیق، ابتدا با بررسی ادبیات و مبانی نظری تحقیق و تکمیل اطلاعات در خصوص کنتورهای هوشمند برق و روش‌های پیاده‌سازی موجود، به بررسی فرایندهای انجام کار با نگاه مهندسی ارزش به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های چرخه عمر، صرفه‌جویی در زمان، افزایش و بهبود کیفیت، حل مشکلات موجود و استفاده بهینه از منابع، پرداخته شد. سپس با اخذ نظر خبرگان و متصدیان صنعت برق کشور، ابتدا معیارها و زیرمعیارهای سنجش روش‌ها و فرایندهای اجرای هوشمند سازی کنتورهای برق احصاء گردیده و متعاقب آن، راه‌حل‌ها و گزینه‌های جایگزین در ۲ محور کاهش هزینه و ارتقای کیفیت، ارائه شد. اولویت‌بندی و تحلیل حساسیت ایده‌های نهایی جهت پیاده‌سازی کنتورهای هوشمند پس از بسط و توسعه آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice انجام گرفت. بهره‌گیری از نتایج این مقاله که بر اساس رویکردی تلفیقی از روش سلسله مراتبی و مهندسی ارزش به‌دست‌آمده است؛ بهسازی پروژه پیاده‌سازی کنتورهای هوشمند را به دنبال خواهد داشت.

تاریخ دریافت:

۱۳۹۹/۳/۲

تاریخ پذیرش:

۱۳۹۹/۶/۱۷

کلمات کلیدی:

مهندسی ارزش
هوشمندسازی
سلسله مراتبی
کنتورهای هوشمند برق

۱. دانشیار، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران (نویسنده مسئول) mmdardani@ihu.ac.ir

۲. کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران Mahdimousavi71@gmail.com

۱. مقدمه

با توجه به اینکه موضوع تعویض و جایگزینی ۱۲ میلیون کنتور دیجیتالی چند تعرفه در دستور کار شرکت توانیر قرار گرفته به منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه‌ها به طوری که بتواند تمام نیازمندی‌های آینده صنعت برق از جمله اعمال مدیریت بار را برآورده نماید؛ این شرکت، تصمیم به استفاده از رویکرد مهندسی ارزش گرفته است. بر اساس مصوبه هیئت محترم دولت، وظیفه پیاده‌سازی سیستم اندازه‌گیری هوشمند و کنترل سیستم‌های اندازه‌گیری، به وزارت نیرو محول شده است. با عنایت به این مصوبه و با توجه به اینکه سرانه‌ی مصرف انرژی الکتریکی در ایران نسبت به کشورهای صنعتی بالاتر بوده، شرکت مادر تخصصی توانیر با حمایت وزارت نیرو، بر آن شد تا طرح پیاده‌سازی سیستم اندازه‌گیری هوشمند (AMI) را در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی به انجام رساند. تحقق این خواسته‌ی مهم به سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا) محول گردید. در این راستا پس از انجام مطالعات امکان‌سنجی و تعیین مشخصات اولیه سیستم اندازه‌گیری هوشمند، چند منطقه نمونه به‌عنوان پایلوت پیاده‌سازی این سیستم انتخاب شدند. تکنیک مهندسی ارزش تلاش می‌کند تا با شناسایی کارکردهای محصول یا پروژه، کارکردهای غیرضروری را تشخیص داده و ضمن حذف آن‌ها اندیشه خود را به روش‌های دیگری که می‌تواند کارکردهای اصلی را برآورده نماید، معطوف سازد. مهندسی ارزش برای دستیابی به این مهم، خلاقیت را در جریان یک کار تیمی متشکل از افراد و تخصص‌های مختلف درگیر در پروژه به کار می‌گیرد. (پارک^۱، ۲۰۱۷) بهره‌گیری نتایج این مقاله بر اساس رویکردی تلفیقی از روش سلسله‌مراتبی و مهندسی ارزش به‌سازی روش پیاده‌سازی کنتورهای هوشمند برق را به دنبال خواهد داشت.

ماتسوی^۲ و همکاران در مقاله‌ای به منظور افزایش حفاظت از برق در خانوارها دریافتند تشخیص اینکه وسایل برقی مصرف برق زیادی دارند، مؤثر است. با این حال، جمع‌آوری داده‌های مربوط به وسایل برقی نیاز به دستگاه‌های زیادی داشته و دارای هزینه‌های بالایی خواهد بود. بنابراین، تفکیک

1. Park
2. Matsui

داده‌ها از کل داده‌ها به هر دستگاه منجر به کاهش هزینه و برق می‌شود. در پژوهش آن‌ها چگونگی تفکیک مصرف لوازم برقی از کل مصرف برق ارائه شده است.

وان آبل^۱ و پول در مقاله ای به توصیف عملکرد و تحقق زیرساخت‌های اندازه گیری هوشمند در هلند پرداخته و در مورد تغییراتی که در پاسخ به نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی و امنیت ایجاد شده است، بحث می‌کنند. آن‌ها همچنین درباره دلیل منطقی برای معرفی کنتورهای هوشمند - که کمتر از آنچه انتظار می‌رود یا در واقع امیدوار است - بحث می‌کنند و تحولات مداوم در استفاده از اطلاعات اندازه گیری هوشمند را در اپراتورهای محلی انرژی در نظر می‌گیرند.

بیجرانو^۲ و همکاران در مقاله‌ای دریافته‌اند که میزان و اندازه گیری کنتورهای هوشمند، ملاحظات رفتاری متنوعی را نشان می‌دهد که می‌تواند بر نحوه واکنش مصرف کنندگان به اطلاعات تأثیر سازگاری با رفتار مصرفی خود در پاسخ به قیمت گذاری پویا تأثیر بگذارد.

۲. روش و اهداف اصلی انجام پژوهش

بهسازی روش پیاده‌سازی کنتورهای هوشمند برق با بهره‌گیری رویکرد تلفیقی روش سلسله مراتبی و پژوهش حاضر از منظر هدف، کاربردی و از نظر انجام، توصیفی، تحلیلی و پیمایشی است. روش گردآوری اطلاعات در این تحقیق، بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای از کتب، پایان‌نامه‌ها و مقالات موجود در کتابخانه‌ها و مقالات موجود در اینترنت و مراجعه به کارشناسان و خبرگان صنعت کنتورهای هوشمند برق از طریق پرسشنامه و مصاحبه است. بر این اساس، ابتدا بر اساس مطالعات مهندسی ارزش، ایده‌های اجرایی در سازمان شناسایی و سپس بر اساس معیارهای مؤثر بر آن‌ها و با به‌کارگیری مدل رتبه‌بندی AHP، ایده‌های مزبور اولویت‌بندی می‌گردند. مهندسی ارزش، از اهداف مهم این پژوهش است.

۳. مطالعات مهندسی ارزش

مهندسی ارزش یک روش نظام‌مند و خلاق برای بهینه کردن هزینه در طول عمر، کاهش زمان اجرا، افزایش سود، ارتقاء کیفیت، توسعه بازار، حل مشکل و استفاده از منابع با اثربخشی بیشتر است که به‌عنوان

1. Van Aubel
2. Batalla-Bejerano

روشی کارآمد برای شناسایی و حذف هزینه‌های غیرضروری، با حفظ و ارتقاء کیفیت شناخته شده است. (امینی^۱، ۲۰۰۵)

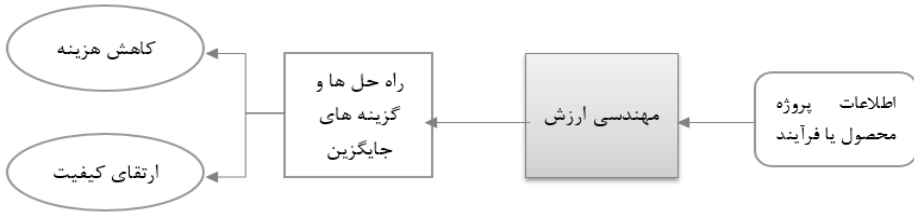
طی سالیان دراز پس از ابداع روش مهندسی ارزش توسط مایلز، روش مزبور در کشورهای مختلف و برای طراحی و ساخت محصولات بی‌شمار و اجرای پروژه‌های متعدد مورد استفاده قرار گرفته و ضمن بهبود کارایی، صرفه‌جویی‌های فراوانی برای کارفرمایان مختلف به همراه داشته است.

بر اساس تعریف مؤسسه بین‌المللی مدیریت پروژه، مهندسی ارزش نگرشی خلاق به منظور بهینه‌سازی هزینه‌های چرخه عمر، صرفه‌جویی در زمان، افزایش سود، بهبود کیفیت، افزایش سهم بازار، حل مشکلات و استفاده بهینه از منابع است. با دریافت اطلاعات پروژه (محصول)، ورودی مورد نیاز مهندسی ارزش فراهم شده و پس از انجام آن، راه‌حل‌ها و گزینه‌های جایگزین به‌عنوان خروجی مهندسی ارزش به‌منظور کاهش هزینه و ارتقای کیفیت پروژه (محصول) ارائه می‌گردد (میرمحمدصادقی^۲، ۲۰۱۵). خوشبختانه در سال‌های اخیر این روش دار کشور ما نیز معرفی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرکت توانیر در پایه‌گذاری اجرا و به‌کارگیری این روش در صنعت برق با برنامه‌ریزی دقیق و منسجم، نقش محوری خویش را به عهده گرفته است. شرکت توانیر انتخاب بهترین گزینه برای ارتقای دوازده میلیون کنتور مشترکین موجود را به‌طوری‌که تمام نیازهای آینده صنعت برق را در برگیرد را در دستور کار خود قرار داد.

ما در این تحقیق، با استفاده از چارچوب نظری شکل ۱ ابتدا با بررسی ادبیات و مبانی نظری تحقیق و تکمیل اطلاعات در خصوص کنتورهای هوشمند برق و روش‌های پیاده‌سازی موجود، به بررسی فرایندهای انجام کار با نگاه مهندسی ارزش به‌منظور بهینه‌سازی هزینه‌های چرخه عمر، صرفه‌جویی در زمان، افزایش و بهبود کیفیت، حل مشکلات موجود و استفاده بهینه از منابع، پرداخته ایم. سپس با اخذ نظر ۲۷ نفر از خبرگان و متصدیان صنعت برق کشور که اولاً در حوزه علمی کنتورهای هوشمند برق صاحب‌نظر بوده و ثانیاً دارای حداقل ۱۰ سال تجربه میدانی در این خصوص را دارا بوده و به‌طور هدفمند انتخاب شدند، ابتدا معیارها و زیرمعیارهای سنجش روش‌ها و فرایندهای اجرای هوشمند سازی کنتورهای برق احصاء گردیده و متعاقب آن، راه‌حل‌ها و گزینه‌های جایگزین در ۲ محور کاهش هزینه و ارتقای کیفیت، ارائه شد.

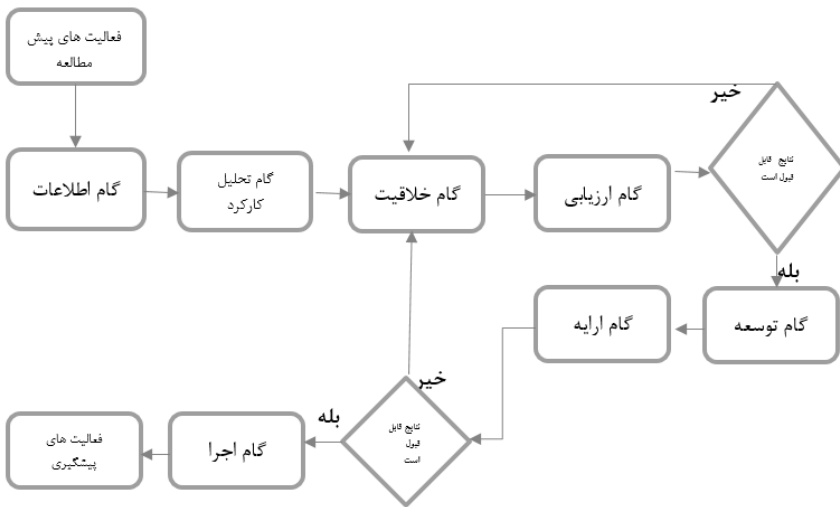
1. Amini

2. Mirmohamadsadeghi



شکل ۱. چارچوب نظری تحقیق

بر اساس مدل مفهومی پژوهش، کار در سه گام عمده انجام می‌شود که عبارت‌اند از گام پیش مطالعه، گام مطالعه اصلی، گام پس مطالعه. هر یک از این سه گام به فازها یا فعالیت‌های مهمی تقسیم می‌شوند که در شکل ۲ ملاحظه می‌شوند (آیر، ۲۰۱۱).



شکل ۲. فرآیند مهندسی ارزش

۴. تعیین معیارهای ارزیابی

معیارها به منظور مقایسه گزینه‌ها و ایده‌های مختلف در فازهای ارزیابی و توسعه مشخص می‌گردند. این فاکتورها جایگاه کیفی و کمی گزینه‌های جدید را نسبت به طرح اولیه از نظر برآورده کردن نیازها و خواسته‌های کارفرما، کیفیت و مطلوبیت طرح مشخص خواهد کرد. این معیارها در طول مطالعات، بازنگری، اصلاح و نسبت به یکدیگر وزن دهی خواهند شد (مایلز^۱ و دیگران، ۲۰۱۵).

با توجه به نظر خبرگان و پاسخ به پرسشنامه تحقیق، آن‌ها به اتفاق، معیارهای ارزش زیر که در انتخاب ایده‌های برتر ملاک ارزیابی قرار می‌گیرد را به شرح ذیل تعیین نمودند. (جدول ۱)

جدول ۱. معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی مهندسی ارزش

معیارهای ارزیابی	زیر معیارهای ارزیابی
کارایی	۱- نیاز سیستم به اپراتور
	۲- زمان عکس‌العمل سیستم
	۳- صرفه اقتصادی
	۴- انتقال به موقع اطلاعات
قابلیت اطمینان	۱- سهولت تعمیر و نگهداری
	۲- انواع تجهیزات خطایابی و نگهداری
	۳- عدم دسترسی مشترک به کنتر
مدیریت پذیری	۱- محیط عملیاتی سیستم
	۲- قابلیت تعمیم طرح پایلوت به مناطق مشابه
	۳- سطح مهارت کارکنان نگهدارنده سیستم
اثربخشی	۱- سطح سرویس
	۲- ارتباط باهدف پروژه
	۳- ارتباط باسیاست‌های جاری کشور

۶. اولویت‌بندی ایده‌های منتج از فرایند مهندسی ارزش با استفاده از مدل سلسله مراتبی

۶-۱. مقایسات زوجی داده‌ها

اساس روش AHP بر مقایسات زوجی یا دودویی گزینه‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری است. برای چنین مقایسه‌ای نیاز به جمع‌آوری اطلاعات از تصمیم‌گیرندگان است. در این مرحله خبرگان مقایسه‌هایی را بین معیارها و زیر معیارهای تصمیم‌گیری انجام داده و امتیاز آن‌ها را نسبت به یکدیگر تعیین می‌کنند (ویشنوی و دیگران^۱، ۲۰۱۷). نحوه تکمیل پرسشنامه و جمع‌آوری نظرات خبرگان در این مرحله بدین شرح است:

۱. خبرگان معیارهای اصلی تصمیم‌گیری را به صورت زوجی مقایسه می‌نمایند و برحسب اولویت نسبی آن‌ها یک عدد بین ۱ تا ۹ به آن‌ها می‌دهند.
۲. خبرگان مطلوبیت نسبی هر یک از زیرمعیارهای معیارهای اصلی را به تفکیک آن معیار و با توجه به آن معیار، باهم مقایسه زوجی می‌نمایند (مشابه گام ۱).
۳. خبرگان مطلوبیت نسبی هر یک از حالت‌ها (راهبرد) را با توجه به هر یک از زیر معیارها به صورت جداگانه محاسبه می‌کنند.

جدول ۲ اهمیت نسبی معیارهای اصلی از نظر خبرگان را نشان می‌دهد. نرخ ناسازگاری مقایسه زوجی این معیارها ۰.۰۵ بوده که نشان می‌دهد مقایسه از دقت خوبی برخوردار بوده است.

جدول ۲. ماتریس ارجحیت نسبی معیارهای کلی

معیار کلی	کارایی	قابلیت اطمینان	مدیریت پذیری	اثر بخشی
کارایی	1	1/2	1/4	1/3
قابلیت اطمینان	2	1	1/2	2
مدیریت پذیری	4	2	1	3
اثر بخشی	3	1/2	1/3	1
جمع ستونی	10	4	2	6/33

پس از مقایسه معیارهای کلی به مقایسه زیرمعیارهای هر یک از معیارهای کلی به صورت دودویی می‌پردازیم.

جدول ۳ نشان‌دهنده اهمیت نسبی زیرمعیارهای کارایی از دیدگاه خبرگان است. نرخ ناسازگاری مقایسه زوجی زیر معیارهای کارایی ۰.۰۰۸ است که نشان‌دهنده دقت مورد قبول این مقایسه زوجی است.

جدول ۳. ماتریس ارجحیت نسبی زیرمعیارهای کارایی

معیارهای کارایی	انتقال به موقع اطلاعات	صرفه اقتصادی	زمان عکس‌العمل سیستم	نیاز سیستم به اپراتور
انتقال به موقع اطلاعات	1	3	2	2
صرفه اقتصادی	1/3	1	1/3	2
زمان عکس‌العمل سیستم	1/2	3	1	2
نیاز سیستم به اپراتور	1/2	1/2	1/2	1
جمع ستونی	2/33	7/5	3/83	7

جدول ۴ نشان‌دهنده اهمیت نسبی زیرمعیارهای قابلیت اطمینان از نظر خبرگان است. نرخ ناسازگاری مقایسه زوجی زیرمعیارهای قابلیت اطمینان ۰.۰۰۸ است که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای این مقایسه زوجی می‌باشد.

جدول ۴. ماتریس ارجحیت نسبی زیرمعیارهای قابلیت اطمینان

معیارهای قابلیت اطمینان	سهولت تعمیر و نگهداری	انواع تجهیزات خطایابی و نگهداری	عدم دسترسی مشترک به کنتور
سهولت تعمیر و نگهداری	1	1/3	1/2
انواع تجهیزات خطایابی و نگهداری	3	1	2
عدم دسترسی مشترک به کنتور	2	1/2	1

جدول ۵ نشان‌دهنده اهمیت نسبی زیرمعیارهای اثربخشی از نظر خبرگان است. نرخ ناسازگاری مقایسه زوجی زیرمعیارهای اثربخشی ۰.۰۵ است.

جدول ۵. ماتریس ارجحیت نسبی زیرمعیارهای اثربخشی

معیارهای اثربخشی	سطح سرویس	ارتباط باهدف پروژه	ارتباط باسیاست‌های جاری کشور
سطح سرویس	1	1	1
ارتباط باهدف پروژه	1	1	1/2
ارتباط باسیاست‌های جاری کشور	1	2	1

جدول ۶ نشان‌دهنده اهمیت نسبی زیرمعیارهای اثربخشی از نظر خبرگان می‌باشد. نرخ ناسازگاری مقایسه زوجی زیرمعیارهای اثربخشی ۰.۰۲ است.

جدول ۶. ماتریس ارجحیت نسبی زیرمعیارهای مدیریت پذیری

معیارهای مدیریت پذیری	محیط عملیاتی سیستم	قابلیت تعمیر طرح پایلوت به مناطق مشابه	سطح مهارت کارکنان نگره‌دارنده سیستم
محیط عملیاتی سیستم	1	1/2	1/2
قابلیت تعمیر طرح پایلوت به مناطق مشابه	2	1	3/2
سطح مهارت کارکنان نگره‌دارنده سیستم	2	2/3	1

۲-۶. محاسبه وزن نسبی

برای محاسبه وزن نسبی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. پروفیسور ساعتی به ارائه چهار روش تقریبی زیر می‌پردازد: ۱-مجموع سطری، ۲- مجموع ستونی، ۳- میانگین حسابی و ۴ میانگین هندسی در این مقاله از روش میانگین حسابی استفاده شده است. در این روش برای محاسبه وزن نسبی گزینه‌ها ابتدا میانگین حسابی ستون‌های ماتریس معیار را به دست می‌آوریم و سپس با تقسیم هر پارامتر

موجود در هر ستون به مقدار جمع پارامترهای همان ستون مقدار نرمال هر پارامتر را به دست می‌آوریم و در نهایت با میانگین‌گیری بین مقادیر نرمال هر سطر وزن نسبی هر عنصر را به دست می‌آوریم. در ادامه وزن نسبی معیارهای کلی و زیر معیارها محاسبه شده است.

برای نرمال کردن معیارهای کلی، ابتدا میانگین حسابی آن‌ها را با یکدیگر جمع کرده و سپس میانگین حسابی هر یک از آن‌ها را بر عدد به دست آمده تقسیم می‌کنیم.

$$0.397 = 0.1 + 0.125 + 0.12 + 0.052$$

مجموع ضرایب اهمیت معیارهای کلی برابر یک است که نشانه نسبی بودن آن‌ها است:

$$1 = 0.099 + 0.251 + 0.463 + 0.185$$

برای نرمال کردن غیرمعیارها نیز از همین فرآیند استفاده می‌شود و اهمیت نسبی آن‌ها محاسبه می‌شود.

۳-۶. فاز تحلیل کارکرد

تحلیل کارکرد و ترسیم نمودار به‌عنوان قلب مهندسی ارزش تعریف می‌گردد و انجام کامل و دقیق آن نقش تعیین‌کننده‌ای در شناسایی کشتزارهای خلاقیت و تحلیل هزینه ناشی از تغییرات به‌کارگیری ایده‌های جدید خواهد داشت (گرین^۱، ۱۹۹۴) (جدول ۸ و ۷).

جدول ۷. اجزای پروژه و کارکردها

کارکرد	اجزای پروژه
تبادل اطلاعات	کنتور سه فاز اتصال مستقیم RS485
اندازه‌گیری	کنتور تک فاز
اعمال مدیریت مصرف - تشخیص دست‌کاری کننتور	کنتور سه فاز اتصال مستقیم PLC
جمع‌آوری و تبادل اطلاعات - بهینه کردن شبکه مخابراتی	کنتور سه فاز اتصال ثانویه 485
مدیریت و پردازش اطلاعات - کنترل و مدیریت تجهیزات و شبکه ارتباطی - کنترل و مدیریت مصرف	کنتور سه فاز اتصال GPRS ثانویه
	کنتور سه فاز اتصال اولیه
	جمع کننده داده
کاهش تلفات - بهبود قابلیت اطمینان - حفاظت و امنیت	نرم‌افزار
تجهیزات اندازه‌گیری	طراحی
	مرکز کنترل

جدول ۸. تعیین نوع کارکرد

نوع کارکردها	کارکردها
اصلی	اندازه‌گیری
فرعی	تبادل اطلاعات
اصلی	اعمال تعرفه
فرعی	تشخیص دست‌کاری کننتور
فرعی	جمع‌آوری اطلاعات
فرعی	بهینه کردن شبکه مخابراتی
اصلی	مدیریت و پردازش اطلاعات
فرعی	کنترل و مدیریت تجهیزات و شبکه ارتباطی
اصلی	کنترل و مدیریت مصرف
فرعی	اندازه‌گیری تلفات
فرعی	بهبود قابلیت اطمینان
فرعی	حفاظت و امنیت تجهیزات اندازه‌گیری
فرعی	محدود کردن دیماندد

۴-۶. فاز خلاقیت و هم‌اندیشی و ارزیابی ایده‌ها

فاز خلاقیت و هم‌اندیشی یکی از مراحل مهم فرایند مهندسی ارزش است. در این مرحله کمیت ایده‌ها مهم است نه کیفیت آن‌ها. در این فاز اعضای گروه با توجه به تعیین اجزای مهم ارائه طرح و کارکردها، ایده‌های جدید و خلاق را به‌صورت طوفان ذهنی ارائه نمودند. تأکید شده است که در این مرحله از کار هیچ‌گونه قضاوت و یا انتقادی در مورد عملی بودن و یا نبودن، کارایی محاسن و معایب ایده‌ها مطرح نگردیده و گروه به‌صورت کاملاً آزاد بدون هرگونه خودسانسوری و یا دغدغه ذهنی، هر ایده‌ای که به ذهن ایشان می‌رسد را مطرح و با استفاده از ایده‌های یکدیگر ایده‌های جدید بسازند (پاینه و دیگران^۱، ۲۰۰۸).

ایده پردازی در این فاز در کارگاه مهندسی ارزش به روش طوفان فکری انجام گردید و نتیجه این فاز ۷۱ ایده بود، که پس از هم‌اندیشی و مورد قضاوت قرار دادن توسط خبرگان ۲۱ ایده مناسب برای فاز بسط و توسعه انتخاب گردید و ارائه گردیده است.

۵-۶. وزن نسبی گزینه‌ها (شاخص‌ها)

پس از تعیین وزن نسبی معیارهای کلی و زیر معیارها در این بخش بر پایه مدل رتبه‌بندی سلسله مراتبی AHP و بر اساس شاخص‌های ارزیابی ایده‌ها برای تعیین وزن نسبی گزینه‌ها، ابتدا امتیاز اولیه هر یک از ایده‌های با توجه به معیارها و زیر معیارها توسط اعضای گروه دلفی به‌صورت طیفی تعیین می‌شود. در این مرحله خبرگان با توجه به معیارهای موردنظر مهندسی ارزش به ایده‌های موردنظر با توجه به جدول راهنمای زیر امتیازدهی کردند. سپس هر یک از امتیازات داده‌شده به روش مجموع ستونی نرمال گردید و درنهایت وزن نسبی آن‌ها محاسبه شد.

جدول ۹. راهنمای امتیازدهی به ایده‌ها

ردیف	عنوان فارسی	عدد امتیاز	عنوان لاتین
۱	کاملاً ارجح	۹	Extremely Preferred
۲	ارجحیت خیلی زیاد	۷	Very Strongly Preferred
۳	ارجحیت زیاد	۵	Strongly Preferred
۴	ارجح	۳	Moderately Preferred
۵	ارجحیت یکسان	۱	Equally Preferred
۶	ترجیحات بینابین	۸، ۶، ۴، ۲	Intermediate Values

۶-۶. وزن نهایی ایده‌ها

در یک فرایند سلسله مراتبی وزن نهایی گزینه‌ها از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن گزینه‌ها به دست می‌آید. (جدول ۱۰) برای این کار از اصل ترکیب سلسله مراتبی که منجر به یک بردار اولویت با در نظر گرفتن همه قضاوت‌ها در تمامی سطوح سلسله مراتبی می‌شود، استفاده خواهد شد (چک و دیگران^۱، ۲۰۱۸)

$$V_H = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n W_k W_i (g_{ij})$$

V_H : امتیاز نهایی ایده H

W_k : وزن معیار k

W_i : وزن زیر معیار i

g_{ij} : امتیاز گزینه J در ارتباط با معیار یا زیرمعیار i

جدول ۱۰. وزن نهایی ایده‌های غربال شده

اثر بخشی		مدیریت پذیری		قابلیت اطمینان		کارایی		معیارها و زیرمعیارها کد گزینه
رتبه	وزن نهایی	رتبه	وزن نهایی	رتبه	وزن نهایی	رتبه	وزن نهایی	
1	0/0067	2	0/0141	2	0/0074	1	0/00501	۱
2	0/0045	1	0/0168	1	0/0081	2	0/00488	۲
13	0/0004	15	0/0012	13	0/0011	12	0/00079	۳
11	0/0007	10	0/0029	17	0/0007	5	0/00118	۴
10	0/0008	16	0/0011	6	0/0020	6	0/00114	۵
14	0/0003	17	0/0010	7	0/0018	14	0/00071	۶
7	0/0016	16	0/0011	10	0/0015	4	0/00119	۷
6	0/0017	13	0/0018	7	0/0018	3	0/00138	۸
11	0/0007	16	0/0011	16	0/0008	19	0/00045	۹
9	0/0014	14	0/0014	8	0/0018	7	0/00110	۱۰
10	0/0008	9	0/0031	19	0/0005	17	0/00052	۱۱
12	0/0005	6	0/0049	15	0/0009	16	0/00058	۱۲
4	0/0021	12	0/0021	14	0/0010	15	0/00062	۱۳
3	0/0026	10	0/0029	18	0/0005	13	0/00076	۱۴
4	0/0021	7	0/0041	11	0/0013	11	0/00088	۱۵
5	0/0019	7	0/0041	12	0/0012	14	0/00071	۱۶
3	0/0026	4	0/0056	5	0/0024	3	0/00138	۱۷
8	0/0015	11	0/0026	9	0/0016	9	0/00101	۱۸
5	0/0019	5	0/0053	3	0/0035	8	0/00102	۱۹
5	0/0019	3	0/0077	3	0/0035	18	0/00047	۲۰
7	0/0016	8	0/0035	4	0/0027	10	0/00099	۲۱

۶-۷. محاسبه اعتبار داده‌ها

نرخ ناسازگاری سازوکاری است که با استفاده از آن اعتبار جواب‌های مصاحبه‌شوندگان به مقایسات زوجی موردسنجش قرار می‌گیرد. تقریباً تمامی محاسبات AHP بر اساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرنده که در قالب ماتریس مقایسات زوجی ظاهر می‌شود، صورت می‌پذیرد و هرگونه اشتباه و ناسازگاری در مقایسه و تعیین اهمیت بین گزینه‌ها و شاخص‌ها نتیجه نهایی به‌دست‌آمده از محاسبات را نامعتبر می‌سازد (جین^۱ و دیگران، ۲۰۱۸).

مقادیر شاخص ناسازگاری را برای ماتریس‌هایی که اعداد آن‌ها کاملاً تصادفی اختیار شده باشند محاسبه کرده‌اند n بعدی نام نهاده‌اند که مقادیر آن‌ها برای ماتریس‌های (I.I.R) و آن را شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی مطابق جدول ۱۱ است.

جدول ۱۱. شاخص تصادفی بودن

N	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
R.I	۰.	۰.۵	۰.	۱.۱	۱.	۱.۳	۱.۴	۱.۴	۱.۴	۱.۵	۱.۴	۱.۵	۱.۵	۱.۵
I	۰	۸	۹	۲	۱	۲	۱	۵	۹	۱	۸	۶	۷	۹

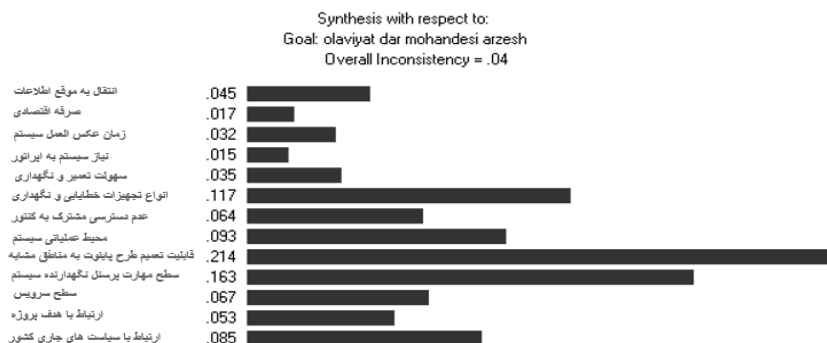
برای محاسبه نرخ ناسازگاری در یک مدل سلسله مراتبی، شاخص ناسازگاری هر ماتریس I.I را در وزن عنصر مربوطه‌ی آن ضرب نموده و حاصل جمع آن‌ها را به دست می‌آوریم. این حاصل جمع را I.I می‌نامیم. همچنین وزن عناصر را در I.I.R ماتریس‌های مربوطه ضرب کرده و مجموعشان را I.I.R نام‌گذاری می‌کنیم حاصل تقسیم $I.I / I.I.R$ نرخ ناسازگاری سلسله مراتبی را نشان می‌دهد (لاترا^۲ و دیگران، ۲۰۱۸).

در شرایطی که نرخ ناسازگاری ۰.۱ یا کمتر باشد، بیانگر سازگاری در مقایسات است و اعتبارسنجی پاسخ‌دهنده‌ها تأیید می‌گردد. در تحقیق حاضر نرخ ناسازگاری معیارها با استفاده از نرم‌افزار Expert

1. jain

2 Luthra

Choice محاسبه شد. این نرخ‌ها همگی کمتر از ۰.۱ هستند. نرخ ناسازگاری کل ساختار سلسله مراتبی با استفاده از همین نرم‌افزار محاسبه گردید و برابر با ۰.۰۴ است که از ۰.۱ کمتر است. (شکل ۴)



شکل ۴. نرخ ناسازگاری کل ساختار سلسله مراتبی

۶-۸. روایی و پایایی نتایج حاصل از داده‌های فاز مهندسی ارزش

الف- روایی

پس از احصاء جدول معیارها و ایده‌ها از طریق منابع و مصاحبه با صاحب‌نظران، مجدداً این جدول در اختیار ۱۰ نفر از جامعه آماری خبرگان قرار گرفت و پس از اخذ نظر آن‌ها و انجام اصلاحات، مورد تأیید آن‌ها قرار گرفت.

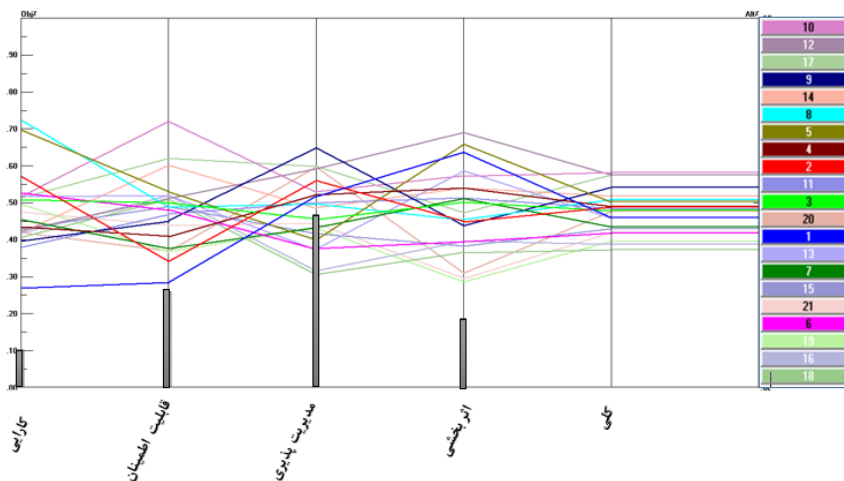
ب- پایایی نتایج

پایایی نتایج از طریق نرم‌افزار Ecpert Chice و محاسبه ضریب نرخ ناسازگاری (۰.۰۴) انجام گرفت. از آنجا که ضریب ناسازگاری به میزان زیادی از عدد ۰.۱ که شاخص تشخیص می‌باشد کمتر است؛ لذا پایایی نتایج مورد تأیید می‌باشد.

۷. اولویت‌بندی بر اساس آنالیز حساسیت

وزن معیارها دارای بیشترین تأثیر در اولویت‌بندی گزینه‌هاست. تصمیم‌گیرنده باید درجه قابلیت اعتماد نتایج را برای تصمیم‌گیری نهایی بداند. به دلیل وجود عدم قطعیت در مراحل مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره، لازم است که قبل از انتخاب گزینه نهایی، تحلیل حساسیت بر روی مسئله صورت گیرد. بنابراین

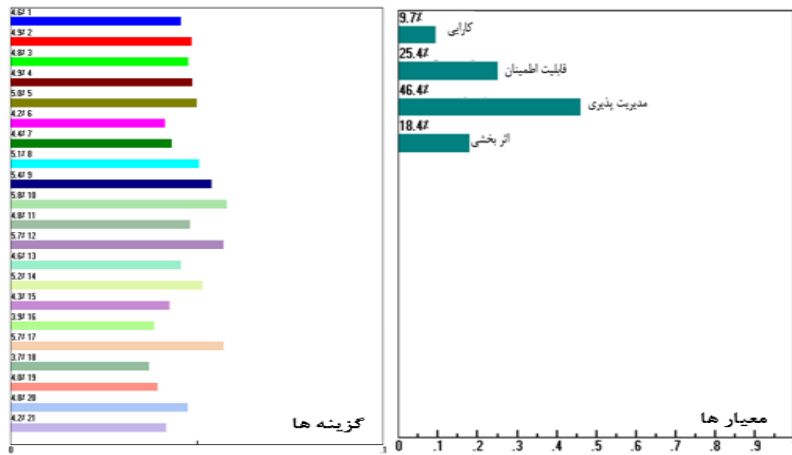
تحلیل حساسیت بعد از حصول رتبه‌بندی گزینه‌ها پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از نرم‌افزار Expert choice-11 یک تحلیل حساسیت کامل قابل انجام است. برای انجام این عمل درحالی‌که وزن‌های دیگر معیارها ثابت باقی‌مانده، وزن یک معیار به صورت تدریجی، افزایش و یا کاهش می‌یابد. بعد از انجام تحلیل حساسیت، رتبه‌بندی گزینه‌ها ممکن است تغییر یابد. تحلیل تمام تغییرات ممکن توسط نرم‌افزار EC-11 که دارای ماژول تحلیل حساسیت قدرتمند و کاربر دوستی است، قابل انجام است.



شکل ۵. نمودار تحلیل حساسیت عملکرد نسبت به هدف کلی

اعداد در شکل ۵، نمایانگر کد گزینه‌هاست چراکه از نوشتن کامل گزینه‌ها خودداری شده است. مطابق شکل ۵، کد ۱۰ بالاترین رتبه را نسبت به هدف کلی به دست آورده است. در رتبه‌های بعدی به ترتیب:

۱۲، ۱۷، ۹، ۱۱، ۴، ۲، ۵، ۸، ۱۴، ۳، ۲۰، ۱، ۱۳، ۷، ۱۵، ۲۱، ۶، ۱۹، ۱۶، ۱۸ قرار گرفته‌اند. در تحلیل حساسیت صورت گرفته که نمودار آن در شکل ۶ ارائه شده، با تغییر درصد وزنی بین معیارهای اصلی، پایداری اولویت‌بندی گزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آنالیزهای حساسیت انجام شده بر روی گره هدف حساسیت گزینه‌ها را نسبت به تمام معیارهای موجود در زیر هدف نشان خواهد داد.



شکل ۶. نمودار تحلیل حساسیت دینامیک نسبت به هدف کلی

جدول ۱۲. نحوه تأثیر افزایش اهمیت معیارها بر گزینه‌ها به صورت تأثیرات مثبت و منفی

کد گزینه‌ها	کارایی	قابلیت اطمینان	مدیریت پذیری	اثر بخشی
۱	-	-	-	+
۲	+	-	+	-
۳	+	+	-	+
۴	+	-	-	+
۵	+	+	-	+
۶	+	+	-	-
۷	+	-	-	+
۸	+	-	+	-
۹	-	-	+	-
۱۰	-	+	-	+
۱۱	-	-	+	+
۱۲	-	-	-	+
۱۳	+	+	-	+

کد گزینه‌ها	کارایی	قابلیت اطمینان	مدیریت پذیری	اثربخشی
۱۴	-	+	-	+
۱۵	-	+	+	-
۱۶	-	+	-	+
۱۷	-	+	+	-
۱۸	-	+	-	+
۱۹	+	-	+	-
۲۰	-	-	+	-
۲۱	+	-	+	-

با تغییر درصد وزنی معیار کارایی از ۹/۷٪ تا ۴۶/۶٪ اولویت‌بندی ثابت باقی می‌ماند و بعد از اولویت فرایندها جابه‌جا خواهد شد. با تغییر درصد وزنی معیار قابلیت اطمینان از ۲۵/۴٪ تا ۳۱/۹٪ اولویت‌بندی گزینه‌ها بدون تغییر خواهد ماند و بعد از آن تغییر خواهد کرد اما همچنان با توجه به تأثیر مثبت بر گزینه با کد ۱۰ در اولویت برتر خواهد بود. وزن اولیه معیار مدیریت پذیری ۴/۴۶٪ بوده است و اولویت فرایندها تا افزایش وزن این معیار تا ۵۵/۶٪ ثابت باقی خواهد ماند. اولویت فرایندهای اثربخشی با تغییر وزن این معیار ۱۸/۴٪ به ۲۶/۸٪ ثابت باقی خواهد ماند. بر اساس شکل ۶ مشخص می‌گردد که بیشترین حساسیت را مدیریت پذیری مربوط به کد گزینه‌های ۲، ۸، ۹، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱ دارد به عبارتی بیشترین تأثیر را در مدیریت پذیری گزینه‌های مذکور دارند به طوری که با افزایش ضریب اهمیت این معیار، در مقایسات زوجی AHP، بر اهمیت گزینه‌های مطرح شده در بالا افزوده و از اهمیت گزینه‌های دیگر کاسته می‌گردد. بر این اساس در جدول ۱۲ چگونگی تأثیر افزایش اهمیت معیار مدیریت پذیری آورده شده است.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مهندسی ارزش مبحثی است که در چند سال گذشته پیرامون بهبود روش انجام پروژه‌های گوناگون در کشورمان مطرح شده است. اگرچه سابقه‌ی این موضوع در جهان به چندین دهه قبل می‌رسد؛ در ایران این بحث به صورت جدی از اواخر دهه‌ی هفتاد شمسی مطرح شده است و در این سال‌ها مطالعاتی با عنوان

مهندسی ارزش در برخی از پروژه‌ها از جمله در حوزه نفت، گاز، پتروشیمی، راه، و نیرو انجام شده است. برای یافتن نقاط ضعف و اشکالات فرآیند مهندسی ارزش لازم است آسیب‌های فرآیند مشخص شده و شناسایی شوند که سبب شناخت بهتر ما از فرآیند و عملکرد بهتر در پیاده‌سازی فرآیند مهندسی ارزش می‌شود. در این پژوهش، بر اساس مدل تحلیلی تحقیق، ابتدا با بررسی ادبیات و مبانی نظری تحقیق و تکمیل اطلاعات در خصوص کنتورهای هوشمند برق و روش‌های پیاده‌سازی موجود، به بررسی فرایندهای انجام کار با نگاه مهندسی ارزش به منظور بهینه‌سازی هزینه‌های چرخه عمر، صرفه‌جویی در زمان، افزایش و بهبود کیفیت، حل مشکلات موجود و استفاده بهینه از منابع، پرداخته شد. سپس با اخذ نظر خبرگان و متصدیان صنعت برق کشور، ابتدا معیارها و زیرمعیارهای سنجش روش‌ها و فرایندهای اجرای هوشمند سازی کنتورهای برق احصاء گردیده و متعاقب آن، راه‌حل‌ها و گزینه‌های جایگزین در ۲ محور کاهش هزینه و ارتقای کیفیت، ارائه شد. در ادامه، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در قالب مراحل ساخت سلسله مراتبی، مقایسات زوجی، محاسبه وزن نسبی و وزن نهایی ایده‌ها، این گزینه‌ها با توجه به معیارهای تعیین شده اولویت‌بندی گردیدند. در پایان، آنالیز حساسیت برای مقایسه و اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌ها برای کمک به مدیران در تصمیم‌گیری، انجام شد. نتایج تحقیق حاکی از آن است که از بین معیارهای چهارگانه معیار مدیریت پذیری با ۴۶٪ بیشترین تأثیر را بر روی معیارها دارا بوده و کمترین تأثیر مربوط به معیار کارایی می‌باشد و معیارهای قابلیت اطمینان و اثربخشی به ترتیب بعد از معیار مدیریت پذیری قرار دارند. مطابق شکل ۵، ایده مربوط به کد ۱۰ با عنوان " استفاده از جمع‌کننده داده موجود در پست‌های توزیع و تجمیع اطلاعات یک یا چند تابلوی برق در پست‌های توزیع و حذف D.C و DCU از این تابلوها و در عوض استفاده نمودن از کنتورهای نوع PLC در تابلوها" بالاترین رتبه را نسبت به هدف کلی به دست آورده است و کمترین رتبه مربوط به ایده با کد ۱۸ تحت عنوان " ارائه سیستم HAN در برخی از منازل و فروشگاه‌ها به منظور مطالعه چگونگی تغییر رفتار و الگوی مصرف آن‌ها" است. اولویت سایر ایده‌ها مطابق با شکل ۶ می‌باشد. در ادامه پیشنهادات نگارندگان بشرح ذیل می‌باشد:

۱- بر اساس نتایج حاصل از تحقیق به مدیران و متصدیان هوشمند سازی کنتورها در کشور پیشنهاد می‌شود که در تصمیم‌گیری در این خصوص به معیارهای مدیریت پذیری و قابلیت اطمینان در هوشمند سازی کنتورها توجه بیشتری نمایند.

- ۲- نتایج تحقیق بیانگر این است که مدیران و متصدیان هوشمند سازی کنتورهای برق به ایده‌های بهبود مطابق با اولویت مندرج در شکل ۶ عمل نمایند.
- ۳- به محققین و پژوهشگرانی که علاقه‌مند به تحقیق در این حوزه می‌باشند توصیه می‌شود که از سایر تکنیک‌های تصمیم‌گیری از جمله روش‌های TOPSIS، VIKOR و ANP با رویکرد فازی را برای مطالعات آتی، پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- [1] Alikhani, m. (2000) Prioritize Investment Projects Using AHP Model (Case Study of Energy Sector) *MSc Theses*, Tehran, Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- [2] Amini, B. (2005) Feasibility Study of Value Engineering Potential in Road Construction Based on Modeling Construction Costs, *Second National Conference on Value Engineering, Tehran*, University of Science and Technology, Industrial Engineering, (In Persian)
- [3] Ayer, S. S., (2011) The method of applying value engineering, translation: Jabal Ameli, M. S, Mir Mohammad Sadeghi, S. A, *Forat Publications*, Tehran, Iran (In Persian)
- [4] Batalla-Bejerano, J., Trujillo-Baute, E., & Villa-Arrieta, M. (2020). Smart meters and consumer behaviour: Insights from the empirical literature. *Energy Policy*, 144, 111610.
- [5] Bowen, W. M., (1993). AHP: Multiple Criteria Evaluation in Klosterman. New runswick: Center for Urban Policy Research.
- [6] Cheek, R., Sale, M., & Wolverson, C. C. (2018). UX (User Experience)-Driven Website Design Utilizing Analytic Hierarchy Process (AHP) Multi-Attribute Decision Modeling. In *Entrepreneurship, Collaboration, and Innovation in the Modern Business Era* (pp. 121-135). IGI Global.
- [7] Ghodsipour, S.h. (2010), Analytical Hierarchy Process (AHP), Amir Kabir University Press, Tehran. (In Persian)
- [8] Green, S. D. (1994). Beyond value engineering: SMART value management for building projects. *International Journal of Project Management*, 12(1), 49-56.
- [9] Jain, V., Sangaiah, A. K., Sakhuja, S., Thoduka, N., & Aggarwal, R. (2018). Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry. *Neural Computing and Applications*, 29(7), 555-564.
- [10] Luthra, S., Mangla, S. K., Venkatesh, V. G., & Jakhar, S. K. (2018). Management of Risks in Sustainable Supply Chain Using AHP and Monte Carlo Simulation. In *Managerial Strategies for Business Sustainability During Turbulent Times* (pp. 58-76). IGI Global.

- [11] Matsui, K., Yamagata, Y., & Nishi, H. (2015). Disaggregation of Electric Appliance's Consumption Using Collected Data by Smart Metering System. *Energy Procedia*, 75, 2940-2945.
- [12] Miles, L. D. (2015). *Techniques of value analysis and engineering*. Miles Value Foundation.
- [13] Mirmohammadsadeghi, S. A. M ,Safaei , S. H , Safdel , A,(2015) *Comprehensive Value Engineering Book*. Tehran. Forat publication, 13(In Persian)
- [14] Park, R. (2017). *Value engineering: a plan for invention*. Routledge.
- [15] Payne, A.F., Storbacka, K., Frow, P.,(2008) Managing the co-creation of value. *Journal of the Academy of Marketing Science* 36 (1), pp. 83–96, 2008.
- [16] Vaishnavi, B., Yarrakula, K., Karthikeyan, J., & Thirumalai, C. (2017, January). An assessment framework for Precipitation decision making using AHP. In *Intelligent Systems and Control (ISCO), 2017 11th International Conference on* (pp. 418-421). IEEE.
- [17] Van Aubel, P., & Poll, E. (2019). Smart metering in the Netherlands: what, how, and why. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 719-725.