علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره هشت، آبان ماه ۹۹

بررسی نیروگاه‌های تجدیدپذیر با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و ویکور

زین العابدین صادقی [۱]

z_sadeghi@uk.ac.ir

مریم رضایی جعفری [*۲]

امین قاسمی نژاد [۳]

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۵

چکیده

زمینه و هدف: تولید و مصرف برق را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل و ضرورت‌ها در رشد و توسعه هر کشور قلمداد کرد. برای تولید برق نیاز به احداث نیروگاه‌ست با توجه به ارز بری بالا و سرمایه‌بر بودن احداث و راه‌اندازی هر نیروگاه جدید در صنعت برق، لازم است که انتخاب این نیروگاه‌ها براساس طیف گسترده‌ای از معیارها صورت پذیرد.

روش تحقیق: در این پژوهش با استفاده از معیارهای اقتصادی، محیط زیستی و فنی به اولویت‌بندی نیروگاه‌های مختلف در کشور با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و ویکور پرداخته شده است.

یافته‌ها: شاخص‌های میزان آلودگی محیط زیست، میزان سرمایه‌گذاری اولیه به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی و امکان توسعه و افزایش ظرفیت از شاخص‌های اصلی تأثیرگذار بر اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران مطرح شد. به‌طورکلی با توجه به‌تمامی شاخص‌های مورد مطالعه در این تحقیق، میزان آلودگی محیط زیست بیشترین تأثیر را در اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق دارد. هم‌چنین، به ترتیب شاخص‌های مربوط به میزان سرمایه‌گذاری اولیه به ازای هرکیلو وات ساعت برق تولیدی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، امکان توسعه و افزایش ظرفیت و امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بیان شد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از اولویت‌بندی در هر سه روش تصمیم‌گیری چند معیاره، نشان می‌دهد نیروگاه‌های بادی به عنوان اولین گزینه برای انتخاب استراتژیک نیروگاه برق مطرح است و نیروگاه‌های خورشیدی، برقابی، مقیاس کوچک (پراکنده)، گازی، بخار، سیکل ترکیبی و دیزلی به‌ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.

۱- دانشیار اقتصاد انرژی دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۲- کارشناس ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۳- دانشجوی دکتری علوم‌اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

بنابراین پیشنهاد می‌گردد که دولت و نهادهای سیاستی با توجه به اولویت‌بندی انجام گرفته در نیروگاه‌های تولید برق به ایجاد زیرساخت-های لازم جهت بهره‌برداری از این انرژی‌ها بپردازند.

واژه‌های کلیدی : نیروگاه‌های تجدیدپذیر، تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و ویکور

J. Env. Sci. Tech., Vol 22, No.8, October, 2020

Investigating the Pollution of Renewable Power Plants with AHP, TOPSIS and VIKOR Analysis Approach

Zeinolabedin Sadeghi[1*]
z_sadeghi@uk.ac.ir
Maryam Rezaee Jafari[2]
Amin Ghasemi Nejad[3]

Admission Date:August 16, 2017 Date Received: October 17, 2016

Abstract

Background and Objective: Electricity production and consumption are considered as two of the most important factors and premises in the growth and development of every country. We need to build power plants for electricity production given the high costs and investment needed for the construction of each power plant in electricity industry, it is necessary to select these power plants according to a wide range of criteria.

Method: Using economic, environmental and technical criteria, this study attempts to prioritize different power plants in Iran via AHP, TOPSIS and VIKOR method.

Findings: Environmental pollution indices, initial investment per kilowatt hour of electricity generation, maintenance costs, easy access to spare parts and the possibility of developing and increasing capacity were introduced the main indicators affecting prioritization of the power plants in Iran. In general, according to all indices studied in this study, environmental pollution has the most impact on the prioritization of power generation plants. Also, the indexes related to the amount of initial investment per kWh, maintenance costs, the possibility of developing and increasing capacity, and easy access to spare parts were considered as the most important factors.

Discussion and Conclusions: The findings from the prioritization by each methods of Multiple Attribute Decision Making show that wind plants have the top priority in the strategic selection of electricity plant, and solar energy. Hydropower, small-scale (scattered), gas, steam, combined cycle and diesel respectively are the next priorities .Therefore, it is suggested that government and political organizations start to make foundations and infrastructure required for utilization of such energies in power plants given the illustrated prioritization.

Keywords: Renewable Power Plants, AHP, TOPSIS and VIKOR.

1- Associate Professor, Energy Economics, Department of Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran *(Corresponding Author)
2- M.Sc., Energy Economics, Department of Economics, Shahid Bahonar University of Kerman.
3- Ph.D., Candidates in Economics, Department of Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.

مقدمه

امروزه انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید مطرح است به طوری که کمبود انرژی مورد نیاز فعالیت‌های اقتصادی، منجر به کند شدن یا توقف رشد اقتصادی و همچنین کاهش استاندارد زندگی می‌شود. وابسته بودن شیوه و سطح زندگی به انرژی سبب شده که دیگر نتوان زندگی را بدون تجهیزات و ماشین آلات تصور نمود (۱). بنابراین یکی از دغدغه های سیاست گذاران، تامین انرژی مورد نیاز جامعه با توجه به رشد و پیشرفت کشور و افزایش مصرف متناسب با آن است. باتوجه به گرایش روزافزون جوامع به استفاده از لوازم برقی، یکی از انرژی‌های که در زندگی امروزه بشر نقشی اساسی ایفا می‌کند انرژی الکتریکی است که از انرژی تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر موجود در طبیعت تولید می‌شود (۲). هر چند حجم فعلی ذخایر نفت و گاز کشور به گونه‌ای است که پیش‌بینی می شود کشور تا سال‌های متمادی آینده از نفت و گاز برخوردار باشد، اما این واقعیت که ذخایر نفت و گاز کشور بالاخره روزی به پایان می رسد، هشداری است برای مسوولان و متولیان انرژی کشور که به فکر منابع جدیدی در تولید انرژی کشور باشند. تنوع در ترکیب سبد انرژی سبب ایجاد امنیت در عرضه پایدار انرژی می‌شود. بر این اساس باید به ایجاد تنوع در سیستم عرضه با توجه به حجم بالای نیروگاه‌های فسیلی در سبد انرژی کشور و سهم اندک انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته شود. جایگزینی انرژی تجدیدپذیر در جهان پس از بحران انرژی در دهه ۷۰ و با افزایش سریع قیمت انرژی و همچنین نگرانی از اتمام منابع فسیلی آغاز گردید و توجه کشورها را به سایر منابع در دسترس برای تامین انرژی جلب نمود (۳). با افزایش آگاهی و نگرانی‌های عمومی از آلودگی محیط زیستی منابع فسیلی از یک‌سو منجر به حرکت به سمت تکنولوژی‌های پاک‌تر شد و از سوی دیگر چارچوب تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ریزی منابع انرژی را به‌تدریج اصلاح نمود، به طوری که نیاز به ترکیب ملاحظات سیاسی، محیط زیستی و ... با مسایل فنی و اقتصادی، باعث فراگیری کاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره در موضوعات انرژی شد (۴). بررسی وضعیت منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید برق در ایران نشان می‌دهد که به دلیل وجود پتانسیل‌های بالای انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی، برقابی و زیست‌توده زمینه مناسبی برای گسترش فعالیت‌های مربوط به این نوع انرژی‌ها در کشور وجود دارد. ایران به عنوان منطقه مناسبی برای انرژی خورشیدی لحاظ می‌شود که به طور متوسط ۳۰۰ روز در سال آفتاب دارد که متوسط انرژی دریافتی در جنوب و مرکز ۵/۴ و در شمال ایران ۲/۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز است. با توجه به گزارشات ترازنامه انرژی میزان استفاده انرژی در سال کم‌تر از ۱۰ کیلووات ساعت است و لازم به ذکراست که کشورهایی که میزان تابش سالانه آن‌ها کم‌تر از ایران است چندین برابر ایران انرژی خورشیدی استفاده می‌کنند که بنابراین در این حوزه پتانسیل سرمایه‌گذاری بالایی وجود دارد. همچنین ایران با ظرفیت بالقوه ۶۵۰۰ مگاوات به صورت تجاری (عمدتا در بخش شرقی کشور) فرصت خوبی برای استفاده از انرژی باد در ترکیب انرژی دارد. میزان استفاده از انرژی باد از ۰/۱ تراوات ساعت در سال ۲۰۰۵ به حدود ۰/۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۱۴ رسیده که هنوز با پتانسیل بالای باد در ایران فاصله دارد. در مورد انرژی زمین گرمایی می‌توان گفت که این انرژی از مواد متشکله داخلی زمین ۲۰ درصد و فروریختن مواد رادیو اکتیو ۸۰ درصد سرچشمه می‌گیرد. ۱۸ منطقه زمین گرمایی شناسایی شده در ایران وجود دارد و حدود ۸/۸ مگاوات از مساحت ایران به عنوان پتانسیل انرژی زمین گرمایی شناخته شده است. تولید برقابی در ایران با توجه روند بارش باران ترسالی و خشک‌سالی حالت سیکلی دارد و در مجموع نیز ظرفیت تولید برقابی در بین سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ افزایشی بوده است. همچنین ایران از پتانسیل بالایی برای زیست توه برخوردار است و به دلیل برخورداری میزان زیادی از ضایعات کشاورزی، حیوانات و زباله‌های شهری به ترتیب ۸/۸ ، ۷/۷ و ۳ میلیون تن در ایران چند نیروگاه زیست توده در شیراز و مشهد وجو دارد. با توجه به آمارهای وزارت نیرو مبنی بر رشد متوسط سالانه ۶ درصد در مصرف برق کشور و ضرورت احداث بیش از سه هزار مگاوات نیروگاه جدید (۵)، بنابراین لازم است که نوع نیروگاه‌ها براساس طیف گسترده‌ای از معیارها اولویت‌گذاری

شود. در این راستا تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله روش‌هایی است که به تصمیم‌گیرندگان در موضوعاتی که بیش از یک معیار وجود دارد، براساس تمایلات و اولویت‌های آن‌ها کمک می‌کند (۶).

این روش امروزه به منظور اولویت‌بندی نیروگاه‌ها و استرتژی‌های انرژی مورد توجه بسیاری از محققان از جمله مطالعات حجت و همکاران (۱۳۸۸) (۲)، رازینی و همکاران (۱۳۹۰) (۴)، صادقی و همکاران (۱۳۹۲) (۷)، رعایایی و مرادیان (۱۳۹۲) (۸)، لاجوردی و زنجانی غیور (۱۳۹۲) (۹) و منظور و رحیمی (۱۳۹۴) (۳) در داخل کشور و مطالعات یو و همکاران (۲۰۰۶)[1] (۱۰)، هیگز و همکاران (۲۰۰۸)[2] (۱۱)، کایا و کهرمان (۲۰۱۰)[3] (۱۲)، کریستبال (۲۰۱۱)[4] (۱۳)، اماکا و بصر (۲۰۱۲)[5] (۱۴)، چازیمورتیدی و پایلواچی (۲۰۱۲)[6] (۱۵)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۵)[7] (۱۶)، سنگل و همکاران (۲۰۱۵)[8] (۱۷) خارج از کشور قرار گرفته است. با توجه به مطالب فوق، مقاله حاضر چارچوبی نظام‌مند جهت تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مناسب‌ترین نیروگاه‌های تولید برق در ایران را مطرح می‌کند. بدین منظور با استفاده از نظرات متخصصین، خبرگان و صاحب‌نظران شاغل در صنعت برق و بررسی‌های به‌عمل آمده در خصوص شاخص‌هایی که می‌تواند به عنوان محورهایی که نقش به‌سزایی در تصمیم‌گیری جهت انتخاب نوع نیروگاه‌ها برای آینده تولید برق در ایران داشته باشند را با بهره‌گیری از سه روش تحلیل سلسله مراتبی[9]، تاپسیس[10] و ویکور[11]، به اولویت‌بندی گزینه‌ها پرداخته و سپس با استفاده از استراتژی اولویت بندی روش میانگین رتبه‌ها و روش بردا[12] ارزیابی و اولویت‌بندی نهایی گزینه‌های نیروگاهی انجام خواهد شد. بنابراین در ابتدا ضمن بیان مفهوم تصمیم‌گیری چند معیاره و روش‌های تصمیم‌گیری به‌کار رفته در مقاله، مولفه‌های تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل تحلیل می‌شود و در نهایت جمع‌بندی مقاله صورت خواهد گرفت.

مواد و روش

تصمیم گیری چند شاخصه (MADM)[13]

پیش از جنگ جهانی دوم، بیش‌تر مسایل بهینه‌سازی بر یک تابع هدف، متکی بود اما امروزه با درنظرگرفتن چندین معیار به مسایل بهینه‌سازی پرداخته می‌شود که گاهی این معیارها باهم در تناقض هستند. مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در مسایلی به‌کار می‌رود که تعدادی گزینه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و در مورد آن‌ها یک نوع اولویت‌بندی انجام می‌شود. افزون بر این گزینه‌ها همان‌طور که از نام تصمیم‌گیری چند شاخصه برمی‌آید چندین شاخص وجود دارد که تصمیم‌گیرنده باید آن‌ها را در مسایل خود مشخص کند. این شاخص‌ها در ارتباط با هریک از گزینه‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این تحقیق از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه ترکیب سلسله مراتب، تاپسیس و ویکور به منظور انتخاب استراتژیک نیروگاه‌ها جهت تولید برق استفاده می‌شود.

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی[14] توسط ساعتی[15](۱۸) در دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد شد. این روش، مانند آن‌چه در مغز انسان انجام می‌شود به تحلیل مسایل می‌پردازد. این روش تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد اثرات متقابل و هم‌زمان بسیاری از وضعیت‌های پیچیده و نامعین را تعیین کنند. برای حل مسایل تصمیم‌گیری از طریق تحلیل سلسله مراتبی، باید مساله را به دقت تبیین و

1- Yue & et al (2006)
2- Gary Higgs & et al (2008)
3- Kaya and Kahraman (2010)
4- Cristóbal (2011)
5- Atmaca and Basar (2012)
6- Chatzimouratidi and Pilavachi (2012)
7- Zhang et al (2015)
8- Sengül et al (2015)
9- analytic hierarchy process (AHP)
10- The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
11- VIKOR
12- Borda method
13- Multiple Attribute Decision Making
14- Analytic Hierarchy Process
15- Saaty (1970)

جزییات آن را براساس ساختار سیستم سلسله مراتبی رسم نمود. این روش بر سه اصل زیر بنا شده است.

ایجاد ساختار سلسله مراتبی

تبدیل موضوع یا مساله مورد بررسی به ساختاری سلسله مراتبی، مهم‌ترین قسمت تحلیل این فرآیند محسوب می‌شود. اساس روش تحلیل سلسله مراتبی بر مبنای مقایسات زوجی قرار دارد. بنابراین پس از تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم (یک نمایش گرافیکی از مسأله پیچیده واقعی بوده که در رأس آن هدف کلی مسأله و در سطوح بعدی معیارها و گزینه‌ها قرار دارند) عوامل و عناصر موجود در هر سطر به‌ترتیب از سطر پایین به بالا، نسبت به تک تک عوامل و عناصر موجود در سطوح بالاتر به صورت دو به دو توسط تصمیم‌گیرنده مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

تعیین ضریت اهمیت معیارها و زیرمعیارها

برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها چند روش وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها، مقایسه زوجی است. در این روش معیارها مقایسه می‌شوند و درجه اهمیت هر معیار نسبت به دیگری مشخص می‌گردد. برای این کار می توان از یک روش استاندارد ارایه شده توسط ساعتی استفاده کرد. روش کار به این ترتیب است که به هر مقایسه دودویی (همانند جدول ۱) یک عدد از ۱ تا ۹ نسبت داده می‌شود .

جدول ۱- امتیازات در نظر گرفته‌شده برای ترجیهات

Table 1. Intended rates for preferences

۱	ترجیح کم	Equally preference
۳	کمی مرجح	Moderately preference
۵	ترجیح بیش‌تر	Strongly preference
۷	ترجیح خیلی بیش‌تر	Very strongly preference
۹	کاملاً مرجح	Extremely preference
۲و۴و۶و۸	ترجیحات بین فواصل طبقات	

بعد از تعیین ضرایب اهمیت معیارها و زیرمعیارها، ضریب اهمیت گزینه ها را باید تعیین نمود (۱۹).

تعیین امتیاز نهایی گزینه‌ها

در این مرحله از تلفیق ضرایب اهمیت مزبور، امتیاز نهایی هریک از گزینه‌ها تعیین خواهد شد. برای این کار از اصل ترکیب سلسله مراتبی ساعتی که منجر به بردار اولویت با در نظر گرفتن همه قضاوت‌ها در تمامی سطوح سلسله مراتبی می‌شود.

$$\text{امتیاز نهایی (اولویت) گزینه ها} = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} W_k W_i\left(g_{ij}\right) \qquad (۱)$$

که در آن W_k: ضریب اهمیت معیار، k، W_i: ضریب اهمیت معیار i، g_{ij}: امتیاز گزینه j در ارتباط با زیر معیار .

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} X_{ij}^2}} \qquad (۲)$$

روش تاپسیس (TOPSIS)

در این روش علاوه بر در نظر گرفتن فاصله یک گزینه A_i از نقطه ایده آل، فاصله آن نقطه از نقطه ایده‌آل منفی هم در نظر گرفته می شود. بدان معنی که گزینه انتخابی باید دارای کم-ترین فاصله از راه حل ایده‌آل بوده و در عین حال دارای دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی باشد. حل مساله با این روش مستلزم شش گام است :

گام صفر- به دست آوردن ماتریس تصمیم: در این روش ماتریس تصمیمی ارزیابی می شود که شامل m گزینه و n شاخص است.

گام اول- تبدیل ماتریس تصمیم گیری موجود به یک ماتریس بی مقیاس شده با استفاده از فرمول :

گام دوم- ایجاد ماتریس بی مقیاس وزین با مفروض بودن بردار W به عنوان ورودی الگوریتم

$$W = \{W_1, W_2, \dots\dots\dots\dots, W_n\}$$

$$\text{ماتریس بی‌مقیاس وزین} = N_d W_{n.n} \qquad (۳)$$

به طوریکه N_d ماتریسی است که امتیازات شاخص‌ها در آن بی مقیاس و قابل مقایسه شده است و $W_{n.n}$ ماتریسی است قطری که فقط عناصر قطر اصلی آن غیر صفر خواهد بود.

گام سوم - مشخص نمودن راه حل ایده آل مثبت و ایده آل منفی

گزینه ایده‌آل مثبت): گزینه‌ایده‌آل مثبت:

$$A^* = \{(\max V_{ij} \mid j \in J), (\min V_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1,2,3,\dots,m\} = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_j^*, \dots, V_n^*\} \qquad (۴)((۹(((((((۹(((۴(($$

گزینه‌ایده‌آل منفی: A^*

$$A^* = \{(\min V_{ij} \mid j \in J), (\max V_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1,2,3,\dots,m\} = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_j^-, \dots, V_n^-\} \qquad (۵)$$

گام چهارم- محاسبه اندازه جدایی (فاصله): فاصله گزینه iام با ایده آل ها با استفاده از روش اقلیدسی بدین قرار است :

$$S_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^*)^2} \quad i = 1,2,3,\dots,m \qquad (۶)$$

$$S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad i = 1,2,3,\dots,m \qquad (۷)$$

گام پنجم - محاسبه نزدیکی نسبی A_i به راه حل ایده آل

$$C_{i^*} = \frac{S_{i^-}}{S_{i^*} + S_{i^-}} \qquad 0 < C_{i^*} < 1 \qquad (۸)$$

ملاحظه می‌شود که چنانچه $A_i = A_i^+$ گردد آنگاه $C_{i+}=1$ و در صورتی که $A_i=A^-$ آنگاه $C_i-=0$ خواهد شد.

گام ششم - رتبه‌بندی گزینه ها: براساس ترتیب نزولی C_i+ میتوان گزینه‌های موجود از مسأله مفروض را رتبه بندی نمود (۷).

ویکور (VIKOR):

این روش یکی از روش‌های حل مسأله چندمعیاره می‌باشد و در شرایطی که فرد تصمیم‌گیرنده قادر به شناسایی و بیان برتری‌های یک مسأله در زمان شروع و طراحی آن نیست، این روش می‌تواند به عنوان ابزار موثری برای تصمیم‌گیری مطرح شود. اگر در یک مساله تصمیم گیری چندمعیاره، n معیار و m گزینه وجود داشته باشد، به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از این روش، مراحل روش به شرح ذیل می باشد:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری براساس آلترناتیو و شاخص‌ها و بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم با استفاده از نرمالیزه خطی استفاده می‌پذیرد.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_i.\frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-}; \qquad R_i = \max_j \left[w_i.\frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right] \qquad (۱۱)$$

در اینجا S_i بیان‌گر نسبت فاصله گزینه iام از راه حل ایده آل مثبت (بهترین ترکیب) و R_i بیانگر نسبت فاصله گزینه iام از راه حل ایده آل منفی (بدترین ترکیب) است.

گام پنجم: مقدار Q_j (ایده‌آل) برای هر از i ها به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = v\left[\frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-}\right] - (1-v)\left[\frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-}\right] \qquad (۱۲)$$

که در اینجا

$R^+ = min_i R_i \;\; , R^+ = max_i R_i \;\; , S^- = min_i S_i \;\; , S^+ = max_i S_i$

$\left[\frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-}\right]$ بیان‌گر نسبت فاصله از راه حل ایده آل منفی گزینه i ام و به عبارت دیگر موافقت اکثریت برای نسبت i ام است.

$\left[\frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-}\right]$ بیان‌گر نسبت فاصله از راه حل ایده آل گزینه i ام و به عبارت دیگر مخالفت اکثریت برای نسبت i ام است.

گام دوم: محاسبه وزن شاخص‌ها براساس روش سلسله مراتبی یا آنتروپی شانون

در این مرحله وزن شاخص‌ها با توجه به اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری با استفاده از روشی مانند AHP محاسبه می‌شود.

گام سوم: محاسبه ایده‌آل مثبت (f_j^+) و ایده‌آل منفی (f_j^-) براساس فرمول (۹)و (۱۰):

$$f_j^+ = max\, f_{ij} \qquad i = 1, 2, \ldots\ldots, m \qquad (۹)$$

$$f_j^- = min f_{ij} \qquad j = 1,2, \ldots\ldots, n \qquad (۱۰)$$

در اینجا (f_j^+) بهترین راه حل ایده آل مثبت برای معیار jام و (f_j^-) بدترین راه حل ایده آل مثبت برای معیار jام می‌باشد.

گام چهارم: محاسبه فاصله هر گزینه از راه حل ایده آل و سپس حاصل جمع آن‌ها برای ارزش نهایی براساس روابط ذیل است:

Q_iشاخص ویکور بوده و ارزش ویکور i ام را بیان می‌کند و v نیز وزنی برای استراتژی بیشینه مطلوبیت گروهی است که می‌تواند بین ۰ تا ۱ را به خود اختصاص دهد. به طوری که هنگامی که مقدار آن بیش‌تر از ۰/۵ باشد شاخصQ_i منجر به اکثریت موافق و هنگامی که مقدار آن کم‌تر از ۰/۵ باشد شاخصQ_i بیان‌گر نگرش منفی اکثریت است. اما معمولاً در محاسبات برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود که بیان‌گر نگرش توافقی متخصصان است.

گام ششم: رتبه‌بندی عوامل براساس میزان Q_i (ایده‌آل): در این مرحله براساس Q_i محاسبه شده در گام قبل، گزینه‌ها را رتبه بندی و تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد.

روش های تلفیقی MADM

با توجه به کاربرد تکنیک‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه در این پژوهش و متفاوت بودن نتایج بدست‌آمده از این

روش‌ها در ادامه به استفاده از روش‌های ادغام[1] به‌منظور دست-یابی به یک رتبه‌بندی واحد برای هر یک از نیروگاه‌ها پرداخته می‌شود. برخی از این روش‌ها عبارتند از روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا، روش کپلند.

روش میانگین رتبه‌ها

این روش گزینه ها را بر اساس میانگین رتبه‌های بدست آمده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه اولویت‌بندی می-کند.

روش بردا

این روش، بر اساس" قاعده اکثریت"استوار است. با روش بردا، گزینه ها را دو به دو با هم مقایسه می‌شود، اگر در این مقایسه رأی اکثریت وجود داشت آن‌را با M کدگذاری می‌کنیم واگر رأی اکثریت وجود نداشت ویا آراء مساوی بود آن را X کدگذاری می‌کنیم.

هر مقایسه زوجی بصورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد .تعداد مقایسات، برابر با $\frac{m(m-1)}{2}$ است m، تعداد گزینه‌ها است معیار اولویت در این روش، آن است که در چند دفعه، بردهای گزینه (یعنیM) که در سطر دارای اکثریت است.

مرحله ادغام

در این مرحله تلاش می‌شود با توجه به استرتژی اولویت بندی گفته شده(میانگین رتبه‌ها، روش بردا) از طریق تشکیل یک مجموعه رتبه‌بندی جزیی (Poset)[2] به یک اجماع رسید. منظور از اجماع توافق ((همه روش‌ها)) روی یک رتبه بندی است .

تعیین گزینه‌ها و معیارها

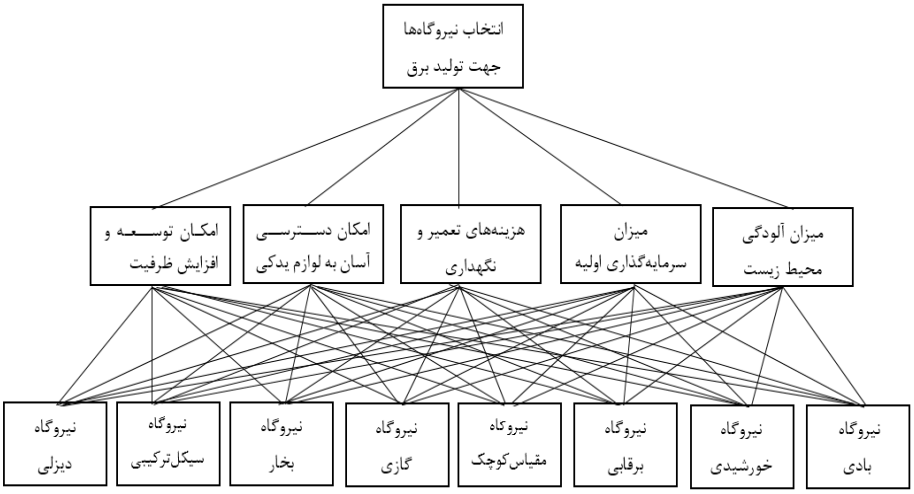
در این مقاله با توجه به ابعاد شاخص‌های تعیین شده که شامل مسایل محیط زیستی، اقتصادی و فنی می‌باشد و با در نظرگرفتن نیروگاه‌های مورد بهره‌برداری در کشور هشت نوع نیروگاه شامل نیروگاه برقابی، بادی، خورشیدی، گازی، بخار، مقیاس کوچک (پراکنده)، سیکل ترکیبی و دیزلی به عنوان گزینه‌های مطرح در پژوهش مطرح می‌شود. شایان ذکر است که در هر یک از این نیروگاه‌ها برای تولید برق از فناوری خاصی استفاده می‌شود که در نتیجه مزایا و معایب قابل توجهی در قیاس با سایر موارد ذکر شده دیگر به دنبال دارد. از این منظر تولید برق استراتژیک می‌شود ، زیرا نقاط ضعف و قوت هر کدام از این سیستم‌ها از نظر اقتصادی قابل توجه خواهد بود. از معیارهای کلیدی در انتخاب تکنولوژی تولید برق، معیارهای اقتصادی است. با توجه به محدود بودن منابع مالی سرمایه-گذاران و تولیدکنندگان برق و از طرف دیگر نیاز به تولید برق جهت پاسخ‌گویی به نیاز مصرف کنندگان، توجه به معیار اقتصادی در انتخاب گزینه تولید برق دارای اهمیت است و میزان سرمایه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری جهت احداث نیروگاه به عنوان دغدغه اصلی سرمایه‌گذاران مطرح است. یکی دیگر از معیارهای ارزیابی گزینه‌های مختلف تولید برق، میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی آن ها است. به گزارش وزارت نیرو بیش‌تر آلودگی تولید شده در کشور به بخش حمل و نقل و بخش نیروگاهی تعلق دارد. کاهش انتشار گازهای گل‌خانه ای از بخش برق، مستلزم استفاده از الگوهای مختلف انرژی برای تولید برق است. مقایسه میزان انتشار گازهای گل‌خانه‌ای از فناوری‌های مختلف برق به انتخاب روش‌های موثر در کاهش انتشار گازهای گل‌خانه ای کمک می‌کند. از نظر فنی نیز توسعه برق نیروگاهی و استفاده از تکنولوژی های تولید برق علاوه بر تامین انرژی، می‌تواند اثر مثبتی بر سطح اشتغال دارد.

امتیاز دهی گزینه‌ها و معیارها

معیارهای کلیدی که در ترجیحات سیاست‌گذاران جهت اولویت‌بندی گزینه‌های تولید برق لحاظ می‌شود از روش‌های مختلفی به دست می‌آیند. در این مقاله برای به دست آوردن معیارها با مرور مطالعات پیشین مجموعه ای از معیارها جمع-آوری شده و سپس نظرات تصمیم‌گیران نیز در رابطه با معیارهای پیشنهادی اخذ شد. در شکل ۳درخت نهایی معیارهای تصمیم‌گیری برای مقایسه میان فناوری نیروگاهی با ۵ معیار در سه گروه اصلی اقتصادی، زیست محیطی و فنی نشان داده شده است. به منظور ارزیابی و امتیازدهی گزینه‌ها،از نظرات ۲۳ نفر از خبرگان حوزه انرژی از قبیل مهندسین برق،

1- Aggregate methods
2- Partially ordered set

مهندسین مکانیک، اساتید دانشگاه و متخصصین گروه مپنا استفاده شده است، این امتیازات در قالب ماتریس تصمیم وارد نرم‌افزار اکسپرت چویس شده و نرم افزار با تعیین امتیازکل، هر یک از گزینه‌ها را رتبه‌بندی نموده است. لازم به ذکراست که فرم نظرسنجی به صورت ماتریس مقایسه زوجی معیارها و ماتریس تصمیم مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل۲- درخت معیارهای تصمیم‌گیری

Figure 2. Multiple Criteria Decision Tree

نتایج و بحث

بررسی نتایج با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

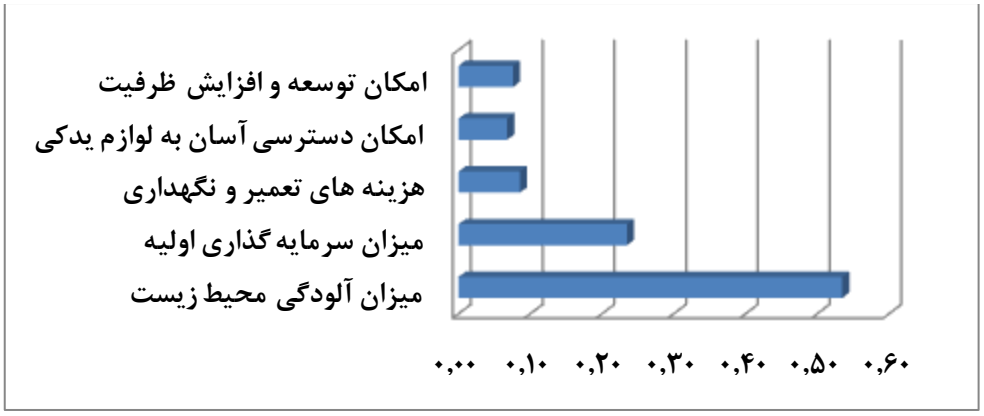
در این بخش جهت بررسی نظر نخبگان که از طریق مصاحبه با صاحب نظران این حوزه جمع آوری شده است و از نرم افزار اکسپرت چویس[1] استفاده گردیده است. دراین نرم‌افزار پس از تعریف معیارها و گزینه‌های موردنظر در ابتدا باید اطلاعات مربوط به مقایسات زوجی گزینه ها با توجه به هرکدام از معیارها بطور جداگانه وارد شود.

1- EXPERT CHOICE

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی معیارها

Table 2. *Pair wise* comparison matrix

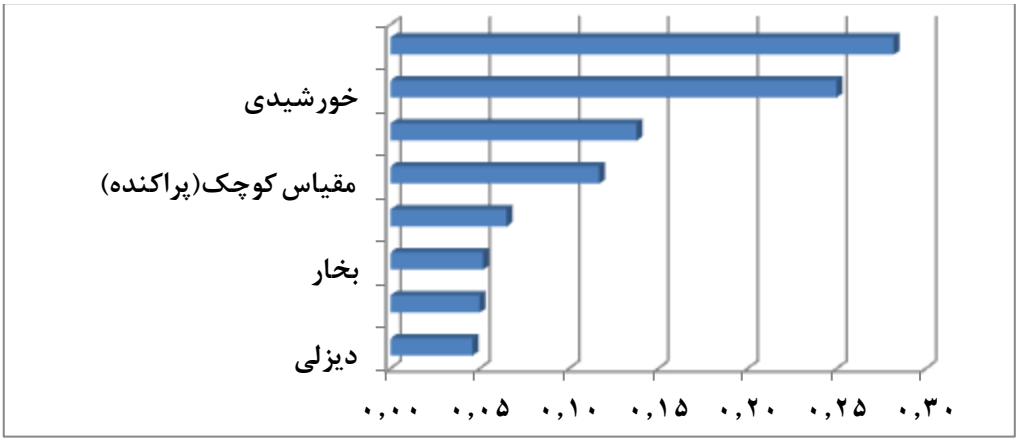
معیارها / معیارها	میزان آلودگی محیط زیست	میزان سرمایه‌گذاری اولیه به ازا هر KWH برق تولیدی	هزینه‌های تعمیر و نگهداری	امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی	امکان توسعه و افزایش ظرفیت
میزان آلودگی محیط زیست	۱	۴	۶	۶	۵
میزان سرمایه‌گذاری اولیه به ازا هر KWH برق تولیدی		۱	۴	۳	۴
هزینه‌های تعمیر و نگهداری			۱	۲	۱
امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی				۱	۱
امکان توسعه و افزایش ظرفیت					۱



شکل ۳- وزن محاسبه شده برای معیارها در نرم افزار اکسپرت چویس

Figure3. The calculated weight of criteria in EXPERT CHOICE

و در نهایت وزن محاسبه شده برای گزینه‌ها در نرم افـزار به صورت زیر می باشد.



شکل ۴- وزن محاسبه شده برای گزینه‌ها در نرم افزار اکسپرت چویس

Figure 4. The calculated weight of options in EXPERT CHOICE

اولویت‌بندی نیروگاه‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی به صورت زیر می باشد.

۱-بادی ۲-خورشیدی ۳-برقابی ۴-مقیاس کوچک (پراکنده) ۵-گازی ۶-بخار ۷-سیکل ترکیبی ۸-دیزلی.

نرخ ناسازگاری برای محاسبه وزن معیارها و الویت‌بندی نیروگاه‌ها در نرم افزار اکسپرت چویس به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۶ می باشد که نشان دهنده کیفیت مطلوب سازگاری بین گزینه-ها و شاخص هاست.

بررسی نتایج با روش تاپسیس (TOPSIS)

در نرم افزار EXPERT CHOICE علاوه بر تخمین‌ها، ماتریس تصمیم و بردار وزن مربوط به شاخص‌ها نیز بدست می آید.

جدول۳- ماتریس تصمیم

Table 3. Decision matrix

وزن	۰/۵۸۳	۰/۲۳۵	۰/۰۸۶	۰/۰۶۸	۰/۰۷۶
معیار / گزینه	میزان آلودگی محیط زیست	میزان سرمایه‌گذاری اولیه به ازا هر KWH برق تولیدی	هزینه‌های تعمیر و نگهداری	امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی	امکان توسعه و افزایش ظرفیت
بادی	۰/۳۶۲	۰/۶۰۴	۰/۵۲۹	۰/۷۵۳	۱
خورشیدی	۰/۱۹۷	۱	۰/۱۵۷	۱	۰/۷۲۹
برقابی	۰/۸۷۹	۰/۰۵۶	۰/۲۴	۰/۲۹۵	۰/۴۷۷
مقیاس کوچک	۰/۲۰۹	۰/۴۴۵	۱	۰/۲۹۵	۰/۲۶۵
گازی	۰/۴۳	۰/۱۶۶	۰/۱۳۳	۰/۰۴۹	۰/۲۴۸
بخار	۱	۰/۰۸۶	۰/۱۶۱	۰/۰۹۲	۰/۰۹۳
سیکل ترکیبی	۰/۵۴۸	۰/۱۹۶	۰/۲۲۱	۰/۰۷۵	۰/۱۱۸
دیزلی	۰/۱۲۶	۰/۱۹۷	۰/۵۵۴	۰/۱۴۹	۰/۰۵۴

در ابتدا باید ماتریس تصمیم گیری موجود را به یک ماتریس بی مقیاس شده تبدیل شود. سپس ماتریس تصمیم‌گیری بی مقیاس شده را در ماتریس مربوط به وزن معیارها ضرب کرد تا ماتریس تصمیم گیری بی مقیاس وزین بدست آید

جدول۴- ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزین

Table 4. Weighted normalized decision matrix

۰/۵۸۳	۰/۲۳۵	۰/۰۸۶	۰/۰۶۸	۰/۰۷۶
۰/۴۲۱۱	۰/۱۳۲۶	۰/۰۳۴۲	۰/۰۳۱۷	۰/۰۱۷۴
۰/۳۰۷۰	۰/۱۷۶۱	۰/۰۱۰۱	۰/۰۵۲۴	۰/۰۰۹۴
۰/۲۰۰۸	۰/۰۵۱۹	۰/۰۱۵۵	۰/۰۰۲۹	۰/۰۴۲۳
۰/۱۱۱۶	۰/۰۵۱۹	۰/۰۶۴۷۰	۰/۰۲۳۳	۰/۰۱۰۰
۰/۱۰۴۴	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۸۷	۰/۰۲۰۷
۰/۰۳۹۱	۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۴۸۱
۰/۰۴۹۶	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۰۲	۰/۰۲۶۴
۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۶۲	۰/۰۳۵۸	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۶۰

حال باید گزینه‌های ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی مشخص گردد، برای این‌کار برای میزان آلودگی محیط زیست، میزان سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های تعمیر و نگهداری مقدار مینیمم و برای امکان دسترسی آسان به لوازم یدکی و امکان توسعه و افزایش ظرفیت، ماکزیمم را در نظر گرفته می شود.

ایده ال منفی(A^-) = (۰/۰۲۲۷، ۰/۰۰۸۶ ، ۰/۰۰۸۶، ۰/۰۰۶۱ ، ۰/۰۰۲۹)

ایـــده ال مثبـــت (A^+)= (۰/۴۲۱۱، ۰/۱۷۶۱، ۰/۰۶۴۷۰، ۰/۰۵۲۴، ۰/۰۴۸۲)

پس از محاسبه فاصله گزینه ها با ایده آل ها با استفاده از روش اقلیدسی و محاسبه نزدیکی نسبی هریک از گزینه‌ها به راه حل ایده آل، در نهایت اولویت بندی نیروگاه های کشور به صورت زیر بدست آمد.

۱-بادی ۲-خورشیدی ۳-برقابی ۴-مقیاس کوچک (پراکنده) ۵- گازی ۶- بخار ۷- سیکل ترکیبی ۸- دیزلی.

بررسی نتایج به کمک روش ویکور (VIKOR)

در این روش نیز با توجه به ماتریس تصمیم به دست آمده و ماتریس وزین، اولوی بندی نیروگاه‌های کشور به صورت زیر می‌باشد:

۱-بادی ۲-خورشیدی ۳-برقابی ۴-مقیاس کوچک(پراکنده) ۵- گازی ۶- سیکل ترکیبی ۷- بخار ۸- دیزلی

روش‌های تلفیقی MADM

در این مرحله تلاش می شود با توجه به سه استرتژی اولویت بندی مذکور از طریق تشکیل یک مجموعه رتبه‌بندی جزیی به یک اجماع رسید.

جدول ۵- نتیجه نهایی حاصل از ادغام

Table 5. The final result of merging

نتیجه نهایی	اولویت بندی روش بردا	اولویت بندی روش میانگین رتبه ها
بادی	بادی	بادی
خورشیدی	خورشیدی	خورشیدی
برقابی	برقابی	برقابی
مقیاس کوچک(پراکنده)	مقیاس کوچک(پراکنده)	مقیاس کوچک(پراکنده)
گازی	گازی	گازی
بخار	بخار	بخار
سیکل ترکیبی	سیکل ترکیبی	سیکل ترکیبی
دیزلی	دیزلی	دیزلی

اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها با روش بردا و میانگین رتبه‌ها مطابق جدول (۵) می‌باشد که اولویت‌بندی گزینه‌ها را به ترتیب به صورت نیروگاه بادی، خورشیدی، برقابی، مقیاس کوچک، گازی، بخار، سیکل ترکیبی و دیزلی نمایش می‌دهد که این رتبه بندی نهایی با روش رتبه بندی بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس یک‌سان می‌باشد.

نتیجه گیری

با توجه به پایان پذیری و قیمت رو به رشد منابع انرژی فسیلی و نیز آلاینده‌های تولید شده ناشی از این سوخت‌ها که تاثیرات مخربی روی محیط زیست و سلامتی انسان‌ها می‌گذارند، تلاش‌هایی جهت جایگزین کردن سوختی پاک به جای سوخت‌های فسیلی در حال انجام است که این امر منافع بسیاری از جمله بهبود اشتغال، افزایش توانمندی‌های ملی و امکان صادرات این تکنولوژی‌ها در صورت بومی سازی آن‌ها را فراهم می‌کند و از منابع فسیلی صرفه‌جویی شده، می‌توان در فعالیت‌های دیگری با ارزش افزوده بالاتر استفاده نمود. در این مطالعه جایگاه نیروگاه‌های کشور با استفاده از معیارهای شناسایی شده و نظر خبرگان در این حوزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اولویت‌بندی گزینه‌های روش میانگین ساده و روش بردا با نتایج حاصل از تاپسیس، ویکور و تحلیل سلسله مراتبی نشان می‌دهد که هر سه روش به خوبی الویت-بندی نیروگاه‌ها را انجام داده‌اند و بنابراین نیروگاه‌های بادی به عنوان اولین گزینه به منظور انتخاب استراتژیک نیروگاه برق انتخاب می‌گردد. نیروگاه‌های خورشیدی، برقابی، مقیاس کوچک (پراکنده)، گازی، بخار، سیکل ترکیبی و دیزلی به ترتیب در الویت‌های بعدی قرار گرفتند. همان‌طور قبلا ذکر شد، شاخص میزان آلودگی محیط زیست از نظر خبرگان مهم-ترین شاخص تصمیم‌گیری در این پژوهش تعیین گردید و انتخاب نیروگاه‌های بادی نیز با این شاخص کاملا منطبق است. زیرا در نیروگاه‌های بادی برای تولید برق از انرژی باد که جز انرژی‌های پاک است، استفاده می‌شود که آلودگی قابل ملاحظه‌ای برای محیط زیست ندارد. در چند سال اخیر با توسعه نگرش امنیت عرضه انرژی و آلودگی محیط‌زیستی، استفاده از انرژی‌های نو و به خصوص انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی رو به افزایش است زیرا در تکنولوژی توربین بادی نیاز به آب و سوخت نیست و قیمت این توربین‌ها در مقایسه با دیگر اشکال انرژی پایین است و از همه مهم‌تر استفاده از این تکنولوژی باعث ایجاد سیستم پایدار انرژی می-گردد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که دولت و نهادهای سیاستی با توجه به اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق به ایجاد زیرساخت‌های لازم جهت بهره‌برداری از این انرژی‌ها بپردازند.

Reference

1. Amirmoeini M, Mohammadi T, Khorsandi M. Modeling Electricity Demand in the Industrial Sector in Iran: a Structural Time Series Model. Journal of economic modeling research (JEMR). 2015; 5 (18):87-117. (In Persian)
2. Hojjat M, Jafarian H R, Sharifian Attar T, Oloumi Baygi M, GHolami GH R, Javidi Dasht Bayaz M H .Introduction of a new index for ranking the efficiency of power plants in the electricity market from the owner's point of view (Case study: Khorasan Regional Power Plants), 17th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Iran University of Science and Technology 2009. (In Persian)
3. Manzoor D, Rahimi A R. Prioritization of the electricity power plant by using the multi-criteria decision-making models, Iranian energy economics, 2015; 4(14): 191-215. (In Persian)
4. Razini S., Tafreshi S., Bathaee S. Multi-Criteria Decision Making Based on Scenario Planning for Long-Term Power Generation Planning in Iran, 2011;. 14(1): 19-35. (In Persian)
5. Tavanir Mentor of Human Resources and Researchs, Energy Balance Sheet, 1392. (In Persian)
6. Løken E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. Renewable and Sustainable. Energy Reviews. 2007 Sep 1; 11(7):1584-95.
7. Sadeqi Z, Dalalbashi Esfahani Z, Horri H R. The Priorities of the Factors Affecting Location of Renewable Energy Plants in Kerman Province Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques. Quarterly journal of energy policy and planning research. 2013. 1(2), 193-110. (In Persian)
8. Roayaei E, Moradian A. Prioritizing the country's thermal power plants to install a recycling system for injection into oil reservoirs. 28th International Power system Conference, Tehran, Iran 2013. (In Persian)
9. Lajevardi M, Zanjani Ghayur SA. Hierarchical Analysis Method Application in Prioritization of Power Plant with Renewable Energy in Iran-case study. International Journal of Data Envelopment Analysis. 2014 Jun 28; 2(2): 381-7.
10. Yue CD, Wang SS. GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan. Energy Policy. 2006 Apr 1; 34(6):730-742.
11. Higgs G, Berry R, Kidner D, Langford M. Using IT approaches to promote public participation in renewable energy planning: Prospects and challenges. Land Use Policy, 2008, 25(4), 596-607.
12. Kaya T, Kahraman C. Multicriteria Renewable Energy Planning Using an Integrated Fuzzy VIKOR & AHP Methodology: The Case of Istanbul. Energy; 35: 2517-2527.
13. Cristóbal JRS. Multi-Criteria Decision-Making in the Selection of a Renewable Energy Project in Spain: The Vikor Method. Renewable Energy. 2011, 36; 498-502.
14. Atmaca E, Basar HB. Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). Energy. 2012 Aug 1; 44(1):555-563.

15. Chatzimouratidis AI, Pilavachi PA. Decision support systems for power plants impact on the living standard. Energy conversion and management. 2012 Dec 1; 64:182-198.
16. Zhang L, Zhou P, Newton S, Fang JX, Zhou DQ, Zhang LP. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method. Energy Oct 1, 2015; 90: 953-964.
17. Sengül Ü, Eren M, Eslamian Shiraz S H, Gezder V, Bilal Sengül A. Fuzzy TOPSIS Method for Ranking Renewable Energy Supply Systems in Turkey, Renewable Energy. 2015; 75: 617-625.
18. Saaty, T L. The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hil, New York 1980.
19. Akbari, N and Zahedi Keyvan, M. Application of ranking approaches and MADAM decision making. Tehran: Country Municipalities Organization, 2008.