نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال هفتم، شمارهٔ دوم/ تابستان ۱۳۹۶/ صفحه ۵۲ـ۶۱

اولویت‌بندی احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر با استفاده از تلفیق روش منطق دیجیتالی بهبودیافته و ویکور فازی

فاطیما سدادی[۱]، محمدعلی بهشتی‌نیا[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد MBA، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
fatimasedady@semnan.ac.ir
[۲] استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
beheshtinia@semnan.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، کشورهای مختلف توجه فزاینده‌ای به انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک نظیر انرژی خورشیدی، باد، زمین‌گرمایی و... برای رسیدن به اهدافی نظیر ایجاد تنوع در استفاده از منابع انرژی، کاهش وابستگی به یک حامل انرژی، ملاحظات زیست‌محیطی و دستیابی به انرژی پایدار معطوف داشته‌اند. از سوی دیگر، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و محدود بودن آن‌ها، آلودگی‌های زیستی و رشد تکنولوژی‌های مرتبط از عوامل محرک برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده است. این مقاله به شناسایی معیارهای کیفی و کمی برای احداث نیروگاه‌های با منابع تجدیدپذیر از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی می‌پردازد. سپس با استفادهٔ ترکیبی از ابزارهای منطق دیجیتال بهبودیافته و ویکور فازی، روشی برای وزن‌دهی معیارها و اولویت‌بندی احداث نیروگاه‌های تولید برق با منابع تجدیدپذیر ارائه می‌شود. برای درک بهتر روش پیشنهادی، یک مطالعهٔ موردی دربارهٔ کشور ایران مطرح می‌شود و در آن، پنج نوع نیروگاه تولید برق با منابع تجدیدپذیر ارزیابی می‌گردند. نتایج نشان‌دهندهٔ این امر است که اولویت احداث با توجه به معیارهای تعیین‌شده، به‌ترتیب با نیروگاه‌های برق‌آبی، زمین‌گرمایی، بادی، زیست‌توده و فتوولتاییک است.

واژه‌های کلیدی: ویکور فازی، منطق دیجیتالی بهبودیافته، انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه، تصمیم‌گیری چندمعیاره.

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

پیش از رخداد بحران انرژی در دهۀ ۷۰، منابع انرژی فسیلی به‌عنوان منابع انرژی‌های مرسوم و ارزان‌قیمت در دسترس بودند و بلوغ تکنولوژی‌های استفاده از این منابع باعث محبوبیت و نفوذ آن‌ها در جوامع مختلف شده بود. بعد از بحران انرژی در دهۀ ۷۰ و با افزایش سریع قیمت انرژی و همچنین نگرانی از اتمام منابع فسیلی انرژی، توجه کشورها به سایر منابع در دسترس برای تأمین انرژی جلب شد. آلودگی آب، هوا، خاک و در عین حال تغییرات جوی، تأثیرات منفی چشمگیری بر کیفیت زندگی مردم به‌خصوص در کشورهای با اقتصاد در حال توسعه گذاشته است [۱].

طی سال‌های اخیر، افزایش سهم مصرف داخلی منابع فسیلی از کل تولید این منابع، کسب ارزش افزودۀ بیشتر، لزوم حفظ منابع انرژی برای نسل‌های آینده و مسائل زیست‌محیطی در منظر سیاست‌گذاران ایران، موردتوجه ویژه قرار گرفته است، به‌طوری‌که معیار ارزان بودن انرژی تولیدی، دیگر به‌عنوان تنها معیار تصمیم‌گیران کشور در انتخاب تکنولوژی تولید تلقی نمی‌شود. مسائلی مانند پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، امنیت انرژی و مسائل زیست‌محیطی نیز در مجموعه ملاحظات ارزیابی سیاست‌گذاران در نظر گرفته می‌شود.

این پژوهش یک مدل ترکیبی، با ادغام روش منطق دیجیتال بهبودیافته[1](MDL) و روش ویکور فازی[2](FVIKOR) برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی نیروگاه‌های تولید برق با منابع تجدیدپذیر، با درنظرگرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی ارائه می‌دهد. برای درک بهتر روش پیشنهادی، یک مطالعۀ موردی درخصوص تأمین‌کنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران بررسی و اولویت‌بندی شده‌اند. نوآوری‌های این مقاله شامل ارائۀ یک مدل ترکیبی براساس روش‌های منطق دیجیتال بهبودیافته و روش ویکور فازی برای رتبه‌بندی نیروگاه‌های تولید برق با منابع تجدیدپذیر، توجه همزمان به جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی و پیاده‌سازی این امر روی یک مطالعه موردی در کشور ایران است.

در ادامۀ این تحقیق، در بخش ۲ به بررسی ادبیات تحقیق پرداخته می‌شود. روش تحقیق در بخش ۳ و اعتبارسنجی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی مطالعه موردی در کشور ایران در بخش ۴ تبیین می‌شود. تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در بخش ۵ و نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در بخش ۶ ارائه می‌شود.

1. Modified Digital Logic Method (MDL)
2. Fuzzy-VIKOR

۲. ادبیات پژوهش

تاکنون در ایران، مطالعات اقتصادی اندکی در زمینۀ انرژی‌های نو انجام شده است. ایران سرشار از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است و موقعیت جغرافیایی آن موجب شده که منبع بسیار بزرگی از انرژی بادی باشد. شعربافیان [۲] ضمن برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران، نشان داد پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر چندین برابر منابع فسیلی است. شریفی، خوش‌اخلاق و کوچک‌زاده [۳] اقتصادی بودن نیروگاه خورشیدی (فتوولتاییک) را در مقایسه با نیروگاه دیزلی و اتصال به شبکۀ سراسری برق، به‌منظور تأمین برق روستاهای مرکزی ایران بررسی کرده و نتیجه گرفتند که سیستم‌های انرژی فتوولتایی در مقایسه با دیگر سیستم‌ها هزینۀ واحد کمتری دارند.

اهداف اصلی سیاست جهانی در این زمینه شامل رشد اقتصادی، امنیت تأمین انرژی و کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی است. برای رسیدن به این اهداف، همۀ جنبه‌های پایداری سیستم‌های انرژی (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی و فنی) را باید در نظر گرفت که به‌تدریج توسط تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران به رسمیت شناخته شده و در تعدادی از مطالعات در مورد پایداری سیستم‌های انرژی، منعکس شده است. نیاز به درنظرگرفتن ملاحظات اجتماعی و محیطی و فنی در برنامه‌ریزی انرژی به استفاده از روش‌های چندمعیاره منجر شد. جدول (۱) جزئیات این تحقیقات را نشان می‌دهد. اگرچه تمرکز بیشتر مطالعات انجام‌شده در تولید برق است، آن‌ها تا حد زیادی در حوزه و روش متفاوت‌اند. این تحقیقات با توجه به نوع و تعداد جنبه‌های فنی و پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و تعداد شاخص در نظرگرفته‌شده، روش ارزیابی (ارزیابی چرخۀ عمر، هزینۀ چرخۀ عمر و...) و روش یکپارچه‌سازی ملاحظات پایداری (برای مثال رویکرد ذهنی[3]، تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره[4] و...) با یکدیگر تفاوت دارند.

در این تحقیق یک مدل ترکیبی با ادغام روش منطق دیجیتال بهبودیافته و روش ویکور فازی برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی نیروگاه‌های تولید برق با منابع تجدیدپذیر با درنظرگرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی ارائه می‌دهد. همچنین رویکرد پیشنهادی روی کشور ایران با توجه به شرایط اقلیمی آن پیاده‌سازی می‌شود.

3. Subjective Approach
4. Multi Criteria Decision Making (MCDM)

جدول (۱): خلاصه‌ای از پیشینهٔ تحقیق

ردیف	تحقیق	روش یکپارچگی شاخص‌ها	هدف و حوزه
۱	May & Brennan (2006)	اعمال نشده	ارزیابی پایداری تولید برق از سوخت‌های فسیلی استرالیا: زغال‌سنگ و گاز طبیعی با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۴]
۲	Heinrich et al. (2007)	تئوری ارزش چندگانه[1]	چارچوب تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی و انتخاب جایگزین انرژی برای اهداف چندگانه تحت عدم قطعیت [۵]
۳	Gökçek, M, & Genç (2009)	اعمال نشده	هزینهٔ تولید انرژی الکتریکی و کل پرداخت موردنیاز برای نصب و راه‌اندازی نیروگاه [۶]
۴	Chatzimouratidis & Pivalachi (2009a; b)	فرایند تحلیل سلسله مراتبی	ارزیابی پایداری ده نوع نیروگاه [۷]
۵	Evans et al. (2009)	مجموع وزنی	بررسی شاخص‌های توسعهٔ پایدار برای فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر (PV خورشیدی، آبی، باد و زمین‌گرمایی) [۸]
۶	Jacobson (2009)	تئوری ارزش چندگانه	بررسی و رتبه‌بندی فناوری‌های قدرت که می‌تواند راه‌حلی برای گرم شدن کرهٔ زمین، آلودگی هوا و امنیت انرژی ارائه دهد [۹]
۷	Kowalski et al. (2009)	SIMOS and PROMETHEE[2]	بررسی سناریوهای برق پایدار برای اتریش (در سطح ملی و محلی) با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۱۰]
۸	Roth et al. (2009)	تئوری ارزش چندگانه	ارزیابی پایداری نمونه کارهای تکنولوژی تأمین برق (بهترین گزینه‌های تجاری در دسترس) با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۱۱]
۹	Gallego-Carrera & Mack (2010)	اعمال نشده	ارزیابی پایداری فناوری تولید برق از طریق شاخص‌های اجتماعی [۱۲]
۱۰	Gujba et al. (2010, 2011)	اعمال نشده	ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی تولید برق در نیجریه [۱۳]
۱۱	Onat & Bayar (2010)	مجموع وزنی[3]	شاخص‌های توسعه پایدار در سیستم‌های تولید برق [۱۴]
۱۲	Rovere et al. (2010)	تحلیل پوششی داده‌ها[4]	روش برای تجزیه‌وتحلیل پایداری در گسترش برق با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی و فناوری [۱۵]
۱۳	Dorini et al. (2010)	برنامه‌ریزی توافقی[5]	مقایسه پایداری از دو گزینه برای تولید برق: زغال‌سنگ در برابر زیست‌توده با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۱۶]
۱۴	Bagheri Moghaddam et al. (2011)	PROMETHEE and AHP	حل مسائل برنامه‌ریزی الکتریسیتهٔ پایدار، استفاده از روشی ترکیبی [۱۷]
۱۵	Athanasios Chatzimouratidis et al. (2012)	AHP	مطالعه و ارزیابی نیروگاه‌های تولید برق از ابعاد گوناگون با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی: مورد یونان [۱۸]
۱۶	Khatami et al. (2013)	PROMETHEE	ارزیابی انواع فناوری‌های تجدیدپذیر تولید برق در منطقهٔ سیستان و بلوچستان با معیارهای هزینهٔ سرمایه‌گذاری مهندسی، تأمین تجهیزات و ساخت، هزینهٔ بهره‌برداری و نگهداری سالانه، کارایی، ضریب ظرفیت، طول عمر، مصرف داخلی و پتانسیل منابع [۱۹]
۱۷	Stamford &Azapagic (2014)	اعمال نشده	ارزیابی پایداری تولید برق با معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۲۰]
۱۸	Maxim (2014)	نوسانی[6]	ارزیابی پایداری فناوری تولید برق با معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۲۱]
۱۹	Ahmad & Mat taher. (2014)	AHP	انتخاب منابع انرژی تجدیدپذیر برای توسعهٔ پایدار برق سیستم تولید با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی با معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی: مورد مالزی [۲۲]
۲۰	Li et al. (2015)	اعمال نشده	مقایسهٔ سیستم‌های تولید برق انرژی گرمایی، بادی و خورشیدی [۲۳]
۲۱	Sengul et al. (2015)	FTOPSIS	روش TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی سیستم‌های تأمین انرژی تجدیدپذیر در ترکیه با معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی [۲۴]

1. Multi Attribute Value Theory6
2. PROMETHEE :Preference Ranking Organization Method For Enrichment Evaluation
3. Weighted sum
4. Data Envelopment Analysis
5. Compromise Programming
6. Swing

۳. روش تحقیق

۱.۳. موضوع و هدف تحقیق

موضوع این تحقیق، ارائهٔ مدلی ترکیبی از روش‌های MDL و FVIKOR، به‌منظور رتبه‌بندی نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر با درنظرگرفتن معیارهای فنی و توسعه پایدار است. هدف از ارائهٔ این مدل، کسب راهکاری برای انتخاب بهترین سوخت تجدیدپذیر جایگزین برای سوخت‌های فسیلی پایان‌پذیر است.

۲.۳. سؤالات تحقیق

این پژوهش به پرسش‌های زیر پاسخ می‌دهد:

پرسش اصلی تحقیق:

- رتبه‌بندی نیروگاه‌ها با فناوری استفاده از منابع تجدیدپذیر به چه صورتی است؟

سؤالات فرعی تحقیق:

- چه معیارها و زیرمعیارهایی در ارزیابی و انتخاب بهترین نیروگاه تجدیدپذیر، بیشترین تأثیر را دارند؟
- اهمیت هریک از این معیارها و زیرمعیارها به چه میزان است؟
- گزینه‌های مناسب برای احداث نیروگاه با منابع تجدیدپذیر در ایران کدام‌اند؟

۳.۳. روش گردآوری اطلاعات

همان‌گونه که اشاره شد، این مقاله به بررسی نیروگاه‌های تجدیدپذیر با توجه به اهداف توسعهٔ پایدار می‌پردازد. بدین منظور برای تعیین معیارها با استفاده از مرور ادبیات و پرسش از خبرگان، معیارها و زیرمعیارهایی که تأثیر مستقیم بر تصمیم‌گیری دارند، انتخاب می‌شوند. برای جمع‌آوری اطلاعات از دو پرسش‌نامه استفاده شده است: پرسشنامهٔ اول به‌منظور شناسایی وزن و اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری به روش منطق دیجیتال بهبودیافته و پرسش‌نامه دوم برای رتبه‌بندی نیروگاه‌ها با روش ویکور فازی به‌کار می‌رود. در انتها نیز روش ترکیبی جدیدی به‌منظور رتبه‌بندی نیروگاه‌ها بر مبنای شاخص‌های تعیین‌شده ارائه می‌شود.

۴.۳. روش پیشنهادی

این مقاله ابتدا به شناسایی معیارهای موردنیاز برای اولویت‌بندی نیروگاه‌ها می‌پردازد و با استفاده از روش منطق دیجیتال بهبودیافته، وزن معیارهای موردنظر تعیین می‌شود. سپس با کمک روش ویکور فازی نیروگاه‌ها اولویت‌بندی می‌گردند. بدین صورت در این مقاله از مزایای هر دو روش استفاده می‌شود.

۱.۴.۳. روش منطق دیجیتال بهبودیافته

تعیین مقدار صحیح معیارهای چندارزشی در روش‌هایی مانند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP[1]) به‌طور همزمان برای تصمیم‌گیرنده، به‌خصوص در مواقعی که معیارها زیاد است، نسبتاً پیچیده است. برای حل این مشکل، روش منطق دیجیتال بهبودیافته توسط دهقان منشادی و همکاران [۲۵] توسعه داده شد که از سه ارزش {۳و۲،۱} برای مقایسهٔ دو به دوی معیارها استفاده می‌کند. به این صورت که برای معیار با اهمیت کمتر عدد (۱)، با اهمیت برابر عدد (۲) و برای اهمیت بیشتر عدد (۳) در نظر گرفته شد. پس از انجام شدن همهٔ مقایسه‌های دو به دو، وزن‌های این روش به‌صورت رابطهٔ (۱) قابل محاسبه‌اند:

$$W_j = \frac{\sum_{k=1}^{n} C_{jk}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} C_{jk}},\ j \text{ and } k = \{1,\ldots,n\} \text{ and } j \neq k \qquad (۱)$$

که n تعداد معیارها و Wj وزن معیار j است. همچنین اگر دو معیار j و k به یک اندازه مهم باشند، $Cjk = Ckj = ۲$. در غیر این صورت اگر که معیار k از معیار j مهم‌تر باشد، $Cjk = ۳$ و $Ckj = ۱$ و اگر معیار k از معیار j از اهمیت کمتری برخوردار باشد، $Cjk = ۱$ و $Ckj = ۳$.

نقطه‌ضعف اصلی روش AHP این است که در پرکردن ماتریس مقایسات زوجی بین دو عنصر، باید به امتیازاتی که به عناصر دیگر داده شده است نیز توجه کرد؛ برای مثال اگر به اختلاف یک معیار (یا گزینه) با عنصر (یا گزینه) دیگر عدد ۵ را نسبت می‌دهیم، در تعیین برتری دو معیار (یا گزینه) دیگر که اختلاف بیشتری با دو معیار (یا گزینه) دیگر دارند باید عدد بزرگ‌تری را نسبت داد. توجه به اندازهٔ اختلافات و تعیین میزان این اختلافات در متغیرهای کیفی امری گیج‌کننده است. اما در روش MDL اختلاف ارزش گزینه‌ها از یکدیگر مهم نیست و تنها برتری یا عدم برتری آن‌ها نسبت به یکدیگر مهم است؛ این امر کار را برای تصمیم‌گیرنده آسان‌تر می‌کند و اعتبار جواب‌های وی افزایش می‌یابد.

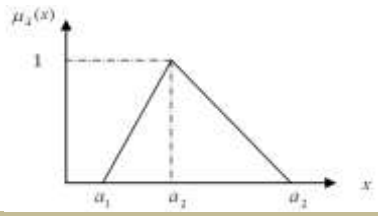
۲.۴.۳. تئوری فازی

زاده [۲۶] اولین بار تئوری مجموعه فازی را مطرح کرد و پس از آن کاربرد بسیار زیادی در مسائل مختلف پیدا نمود. از روش فازی در مواقعی که ابهامات ذاتی در متغیرها و پارامترها وجود دارد، استفاده می‌شود [۲۷]. ازآنجاکه متغیرهای زبانی را نمی‌توان به‌صورت مستقیم در محاسبات ریاضی دخالت داد، هرکدام از آن‌ها را می‌توان به اعداد فازی مثلثی تبدیل کرد [۲۸]. تعداد بسیار زیادی از تحقیقات، اعداد

1. Analytical Hierarchy Process

فازی مثلثی را به‌منظور استفاده از متغیرهای زبانی در مدل‌های محاسباتی و تصمیم‌گیری خود به‌کار گرفته‌اند [۲۹]. یک مجموعه فازی توسعه‌یافته یک مجموعه قطعی است. برای مجموعه جهانی X، یک زیرمجموعهٔ فازی $\tilde{A}$ از X با تابع عضویت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ تعریف می‌شود که به هر عضو x در X، یک عدد حقیقی در بازه $[0,1]$ نسبت می‌دهد. مقدار تابع $\mu_{\tilde{A}}(x)$ به‌معنای میزان عضویت x در $\tilde{A}$ است. یک عدد فازی مثلثی $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$ را می‌توان مطابق رابطهٔ (۲) تعریف کرد. تابع عضویت عدد فازی مثلثی در شکل (۱) نشان داده شده است:

$$\mu_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0 & x<a_1 \ \ or \ \ x>a_3\\ (x-a_1)/(a_2-a_1) & a_1\le x\le a_2\\ (a_3-x)/(a_3-a_2) & a_2\le x\le a_3\end{cases} \qquad (۲)$$



شکل (۱): تابع عضویت عدد فازی مثلثی

اگر $\tilde{M}=(m_1,m_2,m_3)$ و $\tilde{L}=(l_1,l_2,l_3)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، برخی محاسبات ریاضی آن‌ها به‌صورت زیرند:

$$\tilde{L}+\tilde{M}=(l_1+m_1,l_2+m_2,l_3+m_3) \qquad (۳)$$

$$\tilde{L}-\tilde{M}=(l_1-m_3,l_2-m_2,l_3-m_1) \qquad (۴)$$

$$\tilde{L}\times\tilde{M}=(\min(l_1m_1,l_1m_3,l_3m_1,l_3m_3),\ l_2m_2,\max(l_1m_1,l_1m_3,l_3m_1,l_3m_3)) \qquad (۵)$$

$$\tilde{L}/\tilde{M}=(\min(l_1/m_1,l_1/m_3,l_3/m_1,l_3/m_3),\ l_2/m_2,\max(l_1/m_1,l_1/m_3,l_3/m_1,l_3/m_3)) \qquad (۶)$$

همچنین به‌منظور تبدیل یک عدد فازی مثل $\tilde{M}=(m_1,m_2,m_3)$ به یک عدد قطعی، از روش‌های غیرفازی کردن[1] استفاده می‌شود. در این مقاله از رابطهٔ (۷) برای غیرفازی کردن استفاده شده است:

$$D(\tilde{M})=\frac{m_1+4m_2+m_3}{6} \qquad (۷)$$

۳.۴.۳. روش ویکور فازی

روش ویکور (VIKOR[2]) اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط اپریکوویچ ارائه و در سال۲۰۰۲ توسط اپریکوویچ و ژنگ براساس روش ال پی متریک[3] توسعه داده شد [۳۰]. درواقع، مدل ویکور از طریق ارزیابی گزینه‌ها براساس معیارها، گزینه‌ها را اولویت‌بندی یا رتبه‌بندی می‌کند. در این مدل، معیارها وزن‌دهی نمی‌شوند بلکه از طریق روش‌های دیگر ارزیابی شده و سپس گزینه‌ها براساس معیارها و با ترکیب در ارزش معیارها، ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند. مزیت مدل ویکور در این است که الزاماً در این مدل، برای ارزیابی گزینه‌ها براساس معیارها، نیازی به استفاده از نظریات کارشناسان نیست بلکه می‌توان از داده‌های خام استفاده کرد. معیار رتبه‌بندی گزینه‌ها در این روش براساس میزان نزدیکی آن‌ها به جواب ایدئال است که حداکثر مطلوبیت گروهی و حداقل تأسف فردی را در بر دارد. یکی دیگر از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایهٔ نزدیکی به جواب ایدئال، روش تاپسیس (TOPSIS[4]) است. هر دو روش تاپسیس و یکور تأکید دارند گزینه‌ای بهتر است که متوسط فاصلهٔ آن از جواب ایدئال مثبت کمتر باشد. اما مزیت روش ویکور نسبت به تاپسیس این است که علاوه بر این عامل، به این نکته توجه دارد که بیشینه فاصلهٔ گزینهٔ موردنظر با گزینهٔ ایدئال مثبت به‌ازای معیارای مختلف نیز کمتر باشد. به عبارتی گزینه مطلوب در هریک از معیارها نباید با جواب ایدئال مثبت فاصلهٔ زیادی داشته باشد. در سال‌های اخیر، روش ویکور توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۳۱]؛ زیرا برای حل مسائل با معیارهای متضاد با واحدهای سنجش متفاوت بسیار مناسب است [۳۲]. گام‌های فرایند ویکورفازی مربوط به مدل ترکیبی برای اولویت‌دهی با درنظرگرفتن مجموعه‌ای از m گزینه و n معیار به شرح زیر است:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم فازی $\tilde{X}$ (یا همان ماتریس امتیازدهی گزینه‌ها براساس معیارها) که هر درایه آن با x_{ij} نشان داده شده است.

$$\tilde{x}=\left[\tilde{x}_{ij}\right]_{m*n}=\begin{array}{c} \\ A_1\\ A_2\\ \cdot\\ \cdot\\ \cdot\\ A_m\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{cccccc}C_1 & C_2 & . & . & . & C_n\end{array}\\ \begin{bmatrix}\tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & . & . & . & \tilde{x}_{1n}\\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & . & . & . & \tilde{x}_{2n}\\ . & . & . & . & . & .\\ . & . & . & . & . & .\\ . & . & . & . & . & .\\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & . & . & . & \tilde{x}_{mn}\end{bmatrix}\end{array} \qquad (۸)$$

در اینجا $A_1,A_2,\ldots,A_m$ گزینه‌های ممکن، $C_1,C_2,\ldots,C_n$ معیارها و $\tilde{X}_{ij}$ رتبه گزینه A_i از منظر معیار C_j هستند.

1. Defuzzification

2. VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
3. LP-metric
4. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

گام ۲. نرمال‌سازی خطی ماتریس تصمیم‌گیری که از فرمول (۹) استفاده می‌شود [۳۳]. ماتریس نرمالایزشده با $\tilde{V}$ نشان داده شده است:

$$\tilde{v}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} \tilde{x}_{ij}} \quad (۹)$$

$$\tilde{V} = \left[\tilde{v}_{ij}\right]_{m*n} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \cdots & \tilde{v}_{1n} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \cdots & \tilde{v}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{v}_{m1} & \tilde{v}_{m2} & \cdots & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

گام ۳. تعیین نقطهٔ ایدئال مثبت و منفی: برای هر معیار، بهترین و بدترینِ هریک را در میان همهٔ گزینه‌ها تعیین کرده و به‌ترتیب $\tilde{F}_i^+$ و $\tilde{F}_i^-$ می‌نامیم. اگر معیار از نوع سود باشد خواهیم داشت:

$$\tilde{F}_i^+ = \max_j \tilde{V}_{ij} \quad (۱۱)$$
$$\tilde{F}_i^- = \min_j \tilde{V}_{ij}$$
$$\forall i = 1,2,...,m \quad ; \quad j = 1,2,...,n$$

ولی اگر معیار از نوع هزینه باشد، خواهیم داشت:

$$\tilde{F}_i^+ = \min_j \tilde{V}_{ij} \quad (۱۲)$$
$$\tilde{F}_i^- = \max_j \tilde{V}_{ij}$$
$$\forall i = 1,2,...,m \quad ; \quad j = 1,2,...,n$$

گام ۴. محاسبهٔ دو مقدار سودمندی[1] $\tilde{S}_j$ که بیانگر فاصلهٔ نسبی گزینهٔ jام از نقطهٔ ایدئال مثبت و مقدار تأسف[2] $\tilde{R}_j$ که بیانگر حداکثر فاصلهٔ گزینه jام از نقطهٔ ایدئال مثبت به‌ازای معیارهای مختلف‌اند از روابط (۱۳) و (۱۴):

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^{m} W_i \otimes \frac{\tilde{F}_i^+ - \tilde{V}_{ij}}{\tilde{F}_i^+ - \tilde{F}_i^-} \quad (۱۳)$$

$$\tilde{R}_j = \max_i \left[W_i \otimes \frac{\tilde{F}_i^+ - \tilde{V}_{ij}}{\tilde{F}_i^+ - \tilde{F}_i^-} \right] \quad (۱۴)$$

که Wi وزن معیار iام است. $\tilde{S}_j$ و $\tilde{R}_j$ نیز به‌ترتیب مجموع وزنی فاصلهٔ گزینهٔ j تا گزینهٔ ایدئال مثبت به‌ازای تمامی معیارها و $\tilde{R}_j$ به بیشینه فاصلهٔ گزینهٔ jام از گزینهٔ ایدئال مثبت به‌ازای معیارهای مختلف می‌باشند.

گام ۵. محاسبهٔ شاخص ویکور از رابطهٔ (۱۵)، که $\tilde{S}^+ = \max_j \tilde{S}_j$، $\tilde{S}^- = \min_j \tilde{S}_j$ و $\tilde{R}^+ = \max_j \tilde{R}_j$، $\tilde{R}^- = \min_j \tilde{R}_j$ است. $\tilde{Q}_j$ شاخص ویکور بوده و ارزش ویکور گزینهٔ jام را بیان می‌کند. v نیز وزنی برای استراتژی بیشینهٔ مطلوبیت گروهی[3] است که می‌تواند مقداری بین ۰ تا ۱ را به خود اختصاص دهد [۳۴]. مقدار v در محاسبات این تحقیق برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است:

$$\tilde{Q}_j = v\left[\frac{\tilde{S}_j - \tilde{S}^+}{\tilde{S}^- - \tilde{S}^+}\right] + (1-v)\left[\frac{\tilde{R}_j - \tilde{R}^+}{\tilde{R}^- - \tilde{R}^+}\right] \quad (۱۵)$$

گام ۶. اولویت‌بندی گزینه‌هاست؛ بدین ترتیب گزینه‌ای که $\tilde{Q}_j$ کمتری نسبت به سایر گزینه‌ها دارد، در اولویت قرار می‌گیرد و درنهایت، شروط پایانی الگوریتم بررسی می‌شوند.

در این مقاله، از معیارهای کمی و کیفی برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده شده است. در معیارهای کیفی، از عبارات کلامی برای امتیازدهی گزینه‌ها استفاده شده است. جدول (۲) اعداد فازی معادل عبارات کلامی به‌کارگرفته‌شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): متغیرهای کلامی در ویکور فازی

علامت اختصاری	عبارت کلامی	عدد فازی
VP	خیلی ضعیف	(۱ و ۰ و ۰)
P	ضعیف	(۳ و ۱ و ۰)
MP	تا حدودی ضعیف	(۵ و ۳ و ۱)
F	بی‌تفاوت	(۷ و ۵ و ۳)
MG	تا حدودی خوب	(۹ و ۷ و ۵)
G	خوب	(۱۰ و ۹ و ۷)
VG	خیلی خوب	(۱۰ و ۱۰ و ۹)

۴. مطالعهٔ موردی

کشور ایران دارای منابع فراوان سوخت‌های فسیلی است. با این حال، مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران به‌دلیل افزایش جمعیت و رشد تولید ناخالص داخلی، غیر بهینه است و سیاست‌گذاران انرژی مدت‌هاست در تلاش‌اند مصرف انرژی را تنوع بخشند و انرژی‌های تجدیدپذیر را وارد سبد انرژی کنند. امنیت انرژی از دید سیاست‌گذاران انرژی ایران بسیار حیاتی است. در حال حاضر، انواع منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران وجود دارند. تولید برق از منابع تجدیدپذیر، شامل برق‌آبی، زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی، باد و زیست‌توده می‌باشد که نشان از ظرفیت بالای ایران برای تولید برق از سوخت‌های تجدیدپذیر است [۳۵].

کشور ایران منابع و ظرفیت لازم و کافی برای ساخت پنج نوع نیروگاه تجدیدپذیر را دارد [۳۵]. جدول (۳) این گزینه‌ها را نشان می‌دهد که در این تحقیق نیز از آن‌ها استفاده شده است.

1. Utility Measure
2. Regret Measure
3. Maximum Group Utility

جدول (۳): مشخصات محل احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر [۳۳]

گزینه	نوع نیروگاه	محل قابل احداث
A_1	برق‌آبی	در اطراف سدها و رودخانه‌های پرآب
A_2	بادی	رودبار، تبریز، زابل، شیراز، ماهشهر
A_3	فتوولتاییک	یزد، سمنان، تهران، طالقان، خراسان
A_4	زیست‌توده	فارس، شیراز، خراسان
A_5	زمین‌گرمایی	مشکین‌شهر، سبلان، سرعین، دماوند، سهند، خوی، ماکو

معیارها و زیرمعیارهای مورداستفاده (شامل ۴ معیار اصلی و ۱۲ زیرمعیار) نیز با مرور ادبیات و پرسش از خبرگان شناسایی و در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. برخی از معیارها و زیرمعیارهای مورداستفاده در تحقیق نظیر بهره‌وری، هزینهٔ سرمایه‌گذاری، هزینهٔ نگهداری و تعمیرات و... از مرور ادبیات و برخی دیگر از طریق پرسش از خبرگان شناسایی شده‌اند که تنها محدود به شرایط کشور ایران نیستند و می‌توان آن‌ها را به‌صورت عام نیز در نظر گرفت. اما وزن و اهمیت این عوامل در کشور ایران می‌تواند متفاوت با کشورهای دیگر باشد.

جدول (۴): معیارها و زیرمعیارها جهت ارزیابی نیروگاه‌های تجدیدپذیر [۳۶]

شرح معیار اصلی	زیرمعیار	شرح زیرمعیار
فنی(C_1)	$C_{1,1}$	بهره‌وری
	$C_{1,2}$	قابلیت توسعه
	$C_{1,3}$	سهولت دسترسی به فناوری
اقتصادی(C_2)	$C_{2,1}$	هزینهٔ سرمایه‌گذاری
	$C_{2,2}$	هزینهٔ نگهداری و تعمیرات
	$C_{2,3}$	عمر سرویس
محیطی(C_3)	$C_{3,1}$	انتشار NOx
	$C_{3,2}$	میزان استفاده از زمین
	$C_{3,3}$	انتشار CO_2
اجتماعی(C_4)	$C_{4,1}$	ایمنی
	$C_{4,2}$	ایجاد اشتغال
	$C_{4,3}$	توسعهٔ محلی و مزایای اجتماعی

۴.۱. تعیین وزن هر معیار

پس از شناسایی معیارهای ارزیابی، به‌منظور استفاده از نظر همهٔ تصمیم گیرندگان، از روش منطق دیجیتال بهبودیافته بهره گرفته شده است. اطلاعات موردنیاز برای حل مسئله به‌کمک این روش، از پرسشنامهٔ اول استخراج می‌شوند. در این پرسش نامه، معیارهای درنظرگرفته‌شده به‌صورت دو به دو، نسبت به هم مقایسه شده و با توجه به روش منطق دیجیتالی بهبودیافته، ارزشگذاری می‌شوند. وزن هریک معیار برابر مجموع امتیازاتش است که با استفاده از روش نرمال‌سازی ساعتی [۳۵] وزن نرمال‌شدهٔ هر معیار قابل‌محاسبه است. جدول (۵) وزن نرمال شدهٔ معیارهای این مسئله را با کمک روش منطق دیجیتال بهبودیافته نشان می‌دهد.

جدول (۵): وزن نرمال‌شدهٔ معیارها

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن نسبت به معیار	وزن نسبت به هدف
فنی	۰/۲۹۱	$C_{1,1}$	۰/۴۵۴	۰/۱۳۲
		$C_{1,2}$	۰/۱۸۱	۰/۱۰۶
		$C_{1,3}$	۰/۳۶۳	۰/۰۵۳
اقتصادی	۰/۳۷۵	$C_{2,1}$	۰/۵	۰/۱۸۷
		$C_{2,2}$	۰/۳۳۳	۰/۱۲۵
		$C_{2,3}$	۰/۱۶۶	۰/۰۶۲
زیست‌محیطی	۰/۲۰۸	$C_{3,1}$	۰/۳۳۳	۰/۰۶۹
		$C_{3,2}$	۰/۱۶۶	۰/۰۳۴
		$C_{3,3}$	۰/۵	۰/۱۰۴
اجتماعی	۰/۱۲۵	$C_{4,1}$	۰/۵	۰/۰۶۲
		$C_{4,2}$	۰/۳۳۳	۰/۰۴۱
		$C_{4,3}$	۰/۱۶۶	۰/۰۲۰

۴.۲. ارزیابی و اولویت‌بندی نیروگاه‌ها در روش منطق دیجیتال بهبودیافته ـ ویکور

پس از تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها، ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری با نظر خبرگان و اطلاعات داده‌شده توسط آن‌ها تشکیل شد. پس از معادل‌سازی عبارات کلامی با اعداد فازی، جدول (۶) به‌دست آمد. ماتریس تصمیم‌گیری فازی نرمال‌شده در جدول (۷) و مقادیر شاخص مطلوبیت، شاخص تأسف، شاخص ویکور فازی و مقدار غیرفازی‌شدهٔ آن در جدول (۸) نشان داده شده‌اند.

۵. تحلیل نتایج

یافته‌های تحقیق بیانگر این مطلب است که از بین چهار معیار اصلی، معیار اقتصادی اهمیت بیشتری نسبت به سایر معیارها در احداث نیروگاه با منابع تجدیدپذیر در ایران دارد. بررسی زیرمعیارها نشان می‌دهد که در احداث نیروگاه با منابع تجدیدپذیر، فاکتورهای میزان سرمایه‌گذاری، بهره‌وری، هزینهٔ نگهداری و تعمیرات، قابلیت توسعه و میزان انتشار گاز CO_2، به‌ترتیب دارای بیشترین اولویت‌اند. به‌علاوه، مطابق با یافته‌های تحقیق، نیروگاه برق‌آبی، بیشترین رتبه را با توجه به معیارها و اهمیت آن‌ها داراست و نیروگاه‌های زمین‌گرمایی، بادی، زیست‌توده و فوتوولتاییک به‌ترتیب رتبه‌های پایین‌تری دارند.

به‌منظور بررسی بیشتر و ارائهٔ راهکارهای بهتر برای تصمیم‌گیران، این رتبه‌بندی‌ها از منظر هریک از جنبه‌های توسعهٔ پایدار نیز به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۹) نشان داده شده است.

جدول (۶): ماتریس تصمیم‌گیری فازی یکپارچه

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$C_{1,1}$	(۱۰ و ۹ و ۷)	(۹ و ۷ و ۵)	(۵ و ۳ و ۱)	(۹ و ۷ و ۵)	(۷ و ۵ و ۳)
$C_{1,2}$	(۱۰ و ۹ و ۷)	(۱۰ و ۹ و ۷)	(۷ و ۵ و ۳)	(۹ و ۷ و ۵)	(۹ و ۷ و ۵)
$C_{1,3}$	(۸۰و۸۰و۸۰)	(۲۵و۳۵و۳۵)	(۹/۴و۹/۴و۹/۴)	(۲۸و۲۸و۲۸)	(۶و۶و۶)
$C_{2,1}$	(۱۷۵۰و۱۷۵۰و۱۷۵۰)	(۱۱۰۰و۱۱۰۰و۱۱۰۰)	(۵۰۰۰و۵۰۰۰و۵۰۰۰)	(۱۴۸۸و۱۴۸۸و۱۴۸۸)	(۲۰۰۰و۲۰۰۰و۲۰۰۰)
$C_{2,2}$	(۰/۳و۰/۳و۰/۳)	(۴/۵و۴/۵و۴/۵)	(۴و۴و۴)	(۱/۲و۱/۲و۱/۲)	(۰/۳و۰/۳و۰/۳)
$C_{2,3}$	(۵۰و۵۰و۵۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)	(۲۰و۲۰و۲۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)
$C_{3,1}$	(۲۳و۲۳و۲۳)	(۳۲و۳۲و۳۲)	(۱۷۸و۱۷۸و۱۷۸)	(۱۳۲۵و۱۳۲۵و۱۳۲۵)	(۲۸۰و۲۸۰و۲۸۰)
$C_{3,2}$	(۷۵۰و۷۵۰و۷۵۰)	(۱۰۰و۱۰۰و۱۰۰)	(۳۵و۳۵و۳۵)	(۵۰۰۰و۵۰۰۰و۵۰۰۰)	(۱۸و۱۸و۱۸)
$C_{3,3}$	(۲۲۶۹۶و۲۲۶۹۶و۲۲۶۹۶)	(۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲)	(۴۹۱۷۴و۴۹۱۷۴و۴۹۱۷۴)	(۵۸۰۰۰و۵۸۰۰۰و۵۸۰۰۰)	(۱۸۹۱۳و۱۸۹۱۳و۱۸۹۱۳)
$C_{4,1}$	(۱ و ۰ و ۰)	(۵ و ۳ و ۱)	(۱۰ و ۹ و ۷)	(۱ و ۰ و ۰)	(۱ و ۰ و ۰)
$C_{4,2}$	(۵و۵و۵)	(۱۱و۱۱و۱۱)	(۱۰و۱۰و۱۰)	(۷۲و۷۲و۷۲)	(۵۴و۵۴و۵۴)
$C_{4,3}$	(۵ و ۳ و ۱)	(۱۰ و ۱۰ و ۹)	(۱۰ و ۹ و ۷)	(۵ و ۳ و ۱)	(۵ و ۳ و ۱)

جدول (۷): ماتریس تصمیم‌گیری فازی نرمال‌شده

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$C_{1,1}$	(۰/۴۷۶۱و ۰/۲۹۰۳ و ۰/۱۷۵)	(۰/۴۲۸۵و ۰/۲۲۵۸ و ۰/۱۲۵)	(۰/۲۳۸۰ و ۰/۰۹۶۷ و ۰/۰۲۵)	(۰/۴۲۸۵ و ۰/۲۲۵۸ و ۰/۱۲۵)	(۰/۳۳۳۳ و۰ ۰/۱۶۱۲ و ۰/۰۷۵)
$C_{1,2}$	(۰/۳۷۰۳ و ۰/۲۴۳۲ و ۰/۱۵۵۶)	(۰/۳۷۰۳و ۰/۲۴۳۲ و ۰/۱۵۵۶)	(۰/۲۵۹۲ و ۰/۱۳۵۱ و ۰/۰۶۶۷)	(۰/۳۳۳۳ و ۰/۱۸۹۱ و ۰/۱۱۱۱)	(۰/۳۳۳۳و ۰/۱۸۹۱ و ۰/۱۱۱۱)
$C_{1,3}$	(۰/۵۰۵۰ و۰/۵۰۵۱ و۰/۵۰۵۱)	(۰/۲۲۰۹ و۰/۲۲۱ و۰/۲۲۱)	(۰/۰۵۹۳ و۰/۰۵۹۳ و۰/۰۵۹۳)	(۰/۱۷۶۷ و۰/۱۷۶۸ و۰/۱۷۶۷)	(۰/۰۳۷۸ و۰/۰۳۷۹ و۰/۰۳۷۸)
$C_{2,1}$	(۰/۱۵۴۳ و۰/۱۵۴۳ و۰/۱۵۴۳)	(۰/۰۹۷۰ و۰/۰۹۷۰ و۰/۰۹۷۰)	(۰/۴۴۰۹ و۰/۴۴۱ و۰/۴۴۰۹)	(۰/۱۳۱۲ و۰/۱۳۱۲ و۰/۱۳۱۲)	(۰/۱۷۶۳ و۰/۱۷۶۴ و۰/۱۷۶۳)
$C_{2,2}$	(۰/۰۲۹۱ و۰/۰۲۹۱ و۰/۰۲۹۱)	(۰/۴۳۶۸ و۰/۴۳۶۸ و۰/۴۳۶۸)	(۰/۳۸۸۳ و۰/۳۸۸۳ و۰/۳۸۸۳)	(۰/۱۱۶۵ و۰/۱۱۶۵ و۰/۱۱۶۵)	(۰/۰۲۹۱ و۰/۰۲۹۱ و۰/۰۲۹۱)
$C_{2,3}$	(۰/۳۱۲۵ و۰/۳۱۲۵ و۰/۳۱۲۵)	(۰/۱۸۷۵و۰/۱۸۷۵و۰/۱۸۷۵)	(۰/۱۲۵ و۰/۱۲۵ و۰/۱۲۵)	(۰/۱۸۷۵ و۰ /۱۸۷۵و۰/۱۸۷۵)	(۰/۱۸۷۵ و ۰/۱۸۷۵ و۰/۱۸۷۵)
$C_{3,1}$	(۰/۰۱۲۵ و۰/۰۱۲۵ و۰/۰۱۲۵)	(۰/۰۱۷۴ و۰/۰۱۷۴ و۰/۰۱۷۴)	(۰/۰۹۶۸ و۰/۰۹۶۸ و۰/۰۹۶۸)	(۰/۷۲۰۸ و۰/۷۲۰۸ و۰/۷۲۰۸)	(۰/۱۵۲۳ و۰/۱۵۲۳ و۰/۱۵۲۳)
$C_{3,2}$	(۰/۱۲۷۰ و۰/۱۲۷۰ و۰/۱۲۷۰)	(۰/۰۱۶۹ و۰/۰۱۶۹ و۰/۰۱۶۹)	(۰/۰۰۵۹ و۰/۰۰۵۹ و۰/۰۰۵۹)	(۰/۸۴۷۰ و۰/۸۴۷۰ و۰/۸۴۷۰)	(۰/۰۰۳۰ و۰/۰۰۳۰ و۰/۰۰۳۰)
$C_{3,3}$	(۰/۱۳۶۳ و۰/۱۳۶۳ و۰/۱۳۶۴)	(۰/۱۰۶۰و۰/۱۰۶۰ و۰/۱۰۶۱)	(۰/۲۹۵۴ و۰/۲۹۵۴ و۰/۲۹۵۴)	(۰/۳۴۸۴ و۰/۳۴۸۴ و۰/۳۴۸۵)	(۰/۱۱۳۶و ۰/۱۱۳۶ و۰/۱۱۳۶)
$C_{4,1}$	(۰/۱۲۵ و ۰ و ۰)	(۰/۶۲۵ و ۰/۲۵ و ۰/۰۵۵۵)	(۱/۲۵ و ۰/۷۵ و ۰/۰۳۸۸۸)	(۰/۱۲۵ و ۰ و ۰)	(۰/۱۲۵ و ۰ و ۰)
$C_{4,2}$	(۰/۰۳۲۸ و۰/۰۳۲۸ و۰/۰۳۲۸)	(۰/۰۷۲۳ و۰/۰۷۲۳ و۰/۰۷۲۳)	(۰/۰۶۵۷ و۰/۰۶۵۷ و۰/۰۶۵۷)	(۰/۴۷۳۶ و۰/۴۷۳۶ و۰/۴۷۳۶)	(۰/۳۵۵۲ و۰/۳۵۵۲ و۰/۳۵۵۲)
$C_{4,3}$	(۰/۲۶۳۱ و ۰/۱۰۷۱ و ۰/۰۲۸۵)	(۰/۵۲۶۳ و ۰/۳۵۷۱ و ۰/۲۵۷۱)	(۰/۵۲۶۳ و ۰/۳۲۱۴ و ۰/۲)	(۰/۲۶۳۱ و ۰/۱۰۷۱ و ۰/۰۲۸۵)	(۰/۲۶۳۱ و ۰/۱۰۷۱ و ۰/۰۲۸۵)

جدول (۸): مقادیر شاخص مطلوبیت، شاخص تأسف و شاخص ویکور

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
R	(۰/۲۶۵۰و ۰/۰۶۲ و ۰/۰۴۱)	(۰/۳۰۹۰و ۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۵)	(۰/۳۹۷۰ و ۰/۱۸۷ و ۰/۱۸۷)	(۰/۳۰۹۱ و ۰/۱۰۴ و ۰/۱۰۴)	(۰/۳۵۳۰و ۰/۰۸۸ و ۰/۰۵۳)
S	(۰/۸۵۴۲ و ۰/۱۷۲۱ و۰/۲۶۷۷-)	(۱/۰۱۶۱و ۰/۳۲۲۲ و ۰/۱۴۲۱-)	(۱/۴۶۲۲ و ۰/۷۷۸۰ و ۰/۳۳۵۳)	(۱/۱۹۲۰ و ۰/۵۰۹۹ و ۰/۰۳۴۸)	(۱/۰۷۰۴ و ۰/۳۸۸۳ و ۰/۰۷۷۹-)
Q_{Total}	(۲/۵۱۶۴و ۰ و۱/۷۵۹۵-)	(۱/۸۵۷۲و۰/۳۷۵۸ و۲/۰۰۵۱-)	(۱ و۱ و۲/۸۶۶۹-)	(۱/۸۲۱۳ و۰/۴۴۶۷ و۲/۰۴۳۵-)	(۲/۲۵۶۷ و۰/۲۸۲۴ و۲/۲۶۸۵-)
$Q_{Defuzzified}$	۰/۱۲۶۱	۰/۲۲۵۹	۰/۳۵۵۵	۰/۲۶۰۸	۰/۱۸۶۳

جدول (۹): شاخص ویکور برای نیروگاه‌ها از جنبه‌های مختلف

گزینه	فنی	اقتصادی	محیطی	اجتماعی	کل
A_1	۰/۰۶۰۱	۰	۰/۱۰۱۳	۰/۶۲۸۵	۰/۱۲۶۱
A_2	۰/۲۲۵۳	۰/۵۰۷۱	۰	۰/۱۹۳۷	۰/۲۲۵۹
A_3	۰/۶۳۵۶	۱	۰/۶۰۴۹	۰/۰۴۸۶	۰/۳۵۵۵
A_4	۰/۳۱۰۳	۰/۱۱۷۳	۱	۰/۵۰۲۶	۰/۲۶۰۸
A_5	۰/۴۳۹۷	۰/۱۱۹۷	۰/۱۰۱۵	۰/۵۴۴۱	۰/۱۸۶۳

همان‌طور که دیده می‌شود، نیروگاه برق‌آبی هم از منظر فنی و هم اقتصادی بیشترین رتبه را در کشور ایران داراست (شاخص ویکور پایین‌تری دارد)؛ دلیل آن میزان بازدهی بالاتر، قابلیت اطمینان بالای این نیروگاه نسبت به سایر گزینه‌هاست. همچنین نیروگاه فتوولتاییک از دیدگاه فنی و اقتصادی غیرمطلوب‌ترین گزینه است؛ دلیل این موضوع ناشی از عدم رسیدن به بلوغ کامل، بازدهی پایین و هزینهٔ بالای سرمایه‌گذاری این فناوری است. از دید زیست‌محیطی، زیست‌توده بدترین گزینه است؛ زیرا بالاترین میزان انتشار آلایندگی را در بین این پنج گزینه دارد. از منظر اجتماعی، نیروگاه برق‌آبی به‌دلیل ایمنی پایین برای مردم به‌دلیل خطر غرق شدن افراد در سدها و رودخانه‌ها و بالاتر بودن میزان مرگ‌ومیر ناشی از آن و نیز کمترین میزان اشتغال در میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر، بدترین گزینه است. از منظر محیطی، نیروگاه بادی و از منظر اجتماعی نیز نیروگاه فتوولتاییک بیشترین مطلوبیت را دارا هستند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

دسترسی کشورهای در حال توسعه به انواع منابع جدید انرژی، برای توسعهٔ اقتصادی آن‌ها اهمیت اساسی دارد و پژوهش‌های جدید نشان داده که بین سطح توسعهٔ یک کشور و میزان مصرف انرژی آن، رابطهٔ مستقیمی برقرار است. با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی و افزایش سطح مصرف انرژی در جهان فعلی، دیگر نمی‌توان به منابع موجود انرژی متکی بود. درکشور ایران نیز با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی و کم شدن منابع انرژی فسیلی، ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، کاهش آلودگی هوا، محدودیت‌های برق‌رسانی و تأمین سوخت برای نقاط و روستاهای دورافتاده و همچنین وجود زمینهٔ مناسب اقلیمی و تابش آفتاب در بیشتر مناطق و در اکثر فصول سال، همچنین وجود پستی و بلندی‌ها در مسیر نهرهای آب، داشتن مناطق واجد پتانسیل بالای باد و قابلیت‌های تولید انرژی زمین‌گرمایی، زمینهٔ لازم و مناسبی را برای استفاده و گسترش انرژی‌های نو و پاک فراهم آورده است.

در این مقاله، با استفاده از یک مدل ترکیبی از تکنیک‌های MDL و FVIKOR به تعیین اولویت احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور ایران با درنظرگرفتن چهار معیار اصلی اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی پرداخته شد. برای هر یک از چهار معیار، سه زیرمعیار در نظر گرفته شده است (در مجموع ۱۲ معیار). زیرمعیارهای فنی شامل بهره‌وری، قابلیت توسعه و سهولت دسترسی به فناوری، زیرمعیارهای اقتصادی شامل هزینهٔ سرمایه‌گذاری، هزینهٔ نگهداری و تعمیرات، و عمر سرویس، زیرمعیارهای زیست‌محیطی شامل انتشار NOx، میزان استفاده از زمین و انتشار CO_2 و زیرمعیارهای اجتماعی شامل ایمنی، ایجاد اشتغال و توسعهٔ محلی و مزایای اجتماعی است. گزینه‌های موردبررسی برای احداث نیز شامل پنج نیروگاه تجدیدپذیر برق‌آبی، بادی، فتوولتاییک، زیست‌توده و زمین‌گرمایی هستند. پس از تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از تکنیک MDL، از روش FVIKOR برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است. به‌علت وجود شاخص‌های کیفی، از تئوری فازی برای پوشش عدم قطعیت اطلاعات استفاده شده است. نتایج نشان داد از منظر خبرگان، زیرمعیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی به‌ترتیب بیشترین اهمیت را دارند. نتایج همچنین نشان داد که اولویت احداث به‌ترتیب با نیروگاه‌های برق‌آبی، زمین‌گرمایی، بادی، زیست‌توده و فتوولتاییک است. و همچنین از منظر فنی و اقتصادی، نیروگاه برق‌آبی، از منظر محیطی نیروگاه بادی و از منظر اجتماعی نیروگاه فتوولتاییک بیشترین مطلوبیت را دارند.

استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق برای سایر مسائل تصمیم‌گیری در حوزهٔ انرژی نظیر خرید تجهیزات نیروگاهی یا انتخاب محل احداث نیروگاه‌ها می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. ترکیب سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با MDL یا FVIKOR می‌تواند به‌عنوان حوزه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. درنظرگرفتن معیارها و زیرمعیارهای جدید در مسئلهٔ مورد بررسی می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی مطرح شود.

مراجع

[1] Kan, H., R. Chen, and S. Tong, "*Ambient Air Pollution, Climate Change, and Population Health in China*", Environment International, Vol. 42, pp. 10-19, 2012.

[2] شعربافیان، نیلوفر، «**برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران: راهکاری برای توسعه پایدار انرژی خورشیدی**»، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۴، ۱۵، ۳۵-۵۳، ۱۳۸۷.

[3] کوچک زاده، میثم، شریف، علیمراد، خوش اخلاق، رحمان، «**ارزیابی اقتصادی استفاده از نیروگاه‌های هیبرید خورشیدی در ایران**»، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی. ۱۳۸۵: دانشکده فنی دانشگاه تهران.

[4] May, J.R. and D.J. Brennan, "*Sustainability Assessment of Australian Electricity Generation*", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 84, No. 2, pp. 131-142, 2006.

[5] Heinrich, G., L. Basson, B. Cohen, M. Howells, and J. Petrie, "*Ranking and Selection of Power Expansion Alternatives for Multiple Objectives under Uncertainty*", Energy, Vol. 32, No. 12, pp. 2350-2369, 2007.

[6] Gökçek, M. and M.S. Genç, "*Evaluation of Electricity*

Generation and Energy Cost of Wind Energy Conversion Systems (Wecss) in Central Turkey", Applied Energy, Vol. 86, No. 12, pp. 2731-2739, 2009.

[7] Chatzimouratidis, A.I. and P.A. Pilavachi, "*Technological, Economic and Sustainability Evaluation of Power Plants Using the Analytic Hierarchy Process"*, Energy Policy, Vol. 37, No. 3, pp. 778-787, 2009.

[8] Evans, A., V. Strezov, and T.J. Evans, "*Assessment of Sustainability Indicators for Renewable Energy Technologies"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 5, pp. 1082-1088, 2009.

[9] Jacobson, M.Z., "*Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security"*, Energy & Environmental Science, Vol. 2, No. 2, pp. 148-173, 2009.

[10] Kowalski, K., S. Stagl, R. Madlener, and I. Omann, "*Sustainable Energy Futures: Methodological Challenges in Combining Scenarios and Participatory Multi-Criteria Analysis"*, European Journal of Operational Research, Vol. 197, No. 3, pp. 1063-1074, 2009.

[11] Roth, S., S. Hirschberg, C. Bauer, P. Burgherr, R. Dones, T. Heck, and W. Schenler, "*Sustainability of Electricity Supply Technology Portfolio"*, Annals of Nuclear Energy, Vol. 36, No. 3, pp. 409-416, 2009.

[12] Gallego Carrera, D. and A. Mack, "*Sustainability Assessment of Energy Technologies Via Social Indicators: Results of a Survey among European Energy Experts"*, Energy Policy, Vol. 38, No. 2, pp. 1030-1039, 2010.

[13] Gujba, H., Y. Mulugetta, and A. Azapagic, "*Power Generation Scenarios for Nigeria: An Environmental and Cost Assessment"*, Energy Policy, Vol. 39, No. 2, pp. 968-980, 2011.

[14]. Onat, N. and H. Bayar, "*The Sustainability Indicators of Power Production Systems"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 9, pp. 3108-3115, 2010.

[15]. Rovere, E.L.L., J.B. Soares, L.B. Oliveira, and T. Lauria, "*Sustainable Expansion of Electricity Sector: Sustainability Indicators as an Instrument to Support Decision Making"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 1, pp. 422-429, 2010.

[16] Dorini, G., Z. Kapelan, and A. Azapagic, "*Managing Uncertainty in Multiple-Criteria Decision Making Related to Sustainability Assessment"*, Clean Technologies and Environmental Policy, Vol. 13, No. 1, pp. 133-139, 2010.

[17] Moghaddam, N.B., M. Nasiri, and S.M. Mousavi, "*An Appropriate Multiple Criteria Decision Making Method for Solving Electricity Planning Problems, Addressing Sustainability Issue"*, International Journal of Environmental Science & Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 605-620, 2011.

[18] Chatzimouratidis, A.I. and P.A. Pilavachi, "*Decision Support Systems for Power Plants Impact on the Living Standard"*, Energy Conversion and Management, Vol. 64, pp. 182-198, 2012.

[19] Khatami Firouzabadi, A. and E. Ghazimatin, "*Application of Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation Method in Energy Planning - Regional Level"*, Iranian Journal of Fuzzy Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 67-81, 2013.

[20] Stamford, L. and A. Azapagic, "*Life Cycle Sustainability Assessment of Uk Electricity Scenarios to 2070"*, Energy for Sustainable Development, Vol. 23, pp. 194-211, 2014.

[21] Maxim, A., "*Sustainability Assessment of Electricity Generation Technologies Using Weighted Multi-Criteria Decision Analysis"*, Energy Policy, Vol. 65, pp. 284-297, 2014.

[22] Ahmad, S. and R.M. Tahar, "*Selection of Renewable Energy Sources for Sustainable Development of Electricity Generation System Using Analytic Hierarchy Process: A Case of Malaysia"*, Renewable Energy, Vol. 63, pp. 458-466, 2014.

[23] Li, K., H. Bian, C. Liu, D. Zhang, and Y. Yang, "*Comparison of Geothermal with Solar and Wind Power Generation Systems"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, pp. 1464-1474, 2015.

[24] Şengül, Ü., M. Eren, S. Eslamian Shiraz, V. Gezder, and A.B. Şengül, "*Fuzzy Topsis Method for Ranking Renewable Energy Supply Systems in Turkey"*, Renewable Energy, Vol. 75, pp. 617-625, 2015.

[25] Dehghan-Manshadi, B., H. Mahmudi, A. Abedian, and R. Mahmudi, "*A Novel Method for Materials Selection in Mechanical Design: Combination of Non-Linear Normalization and a Modified Digital Logic Method"*, Materials & Design, Vol. 28, No. 1, pp. 8-15, 2007.

[26] Zadeh, L.A., "*Fuzzy Sets"*, Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, 1965.

[27] Liu, B., "*Dependent-Chance Programming in Fuzzy Environments"*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 109, No. 1, pp. 97-106, 2000.

[28] Chou, S.-Y. and Y.-H. Chang, "*A Decision Support System for Supplier Selection Based on a Strategy-Aligned Fuzzy Smart Approach"*, Expert Systems with Applications, Vol. 34, No. 4, pp. 2241-2253, 2008.

[29] Dubois, D. and H. Prade, "*Gradualness, Uncertainty and Bipolarity: Making Sense of Fuzzy Sets"*, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 192, pp. 3-24, 2012.

[30] Opricovic, S. and G.-H. Tzeng, "*Multicriteria Planning of Post-Earthquake Sustainable Reconstruction"*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 211-220, 2002.

[31] Chang, C.-L., "*A Modified Vikor Method for Multiple Criteria Analysis"*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 168, No. 1, pp. 339-344, 2009.

[32] Opricovic, S. and G.-H. Tzeng, "*Extended Vikor Method in Comparison with Outranking Methods"*, European Journal of Operational Research, Vol. 178, No. 2, pp. 514-529, 2007.

[33] Chen, S.-J. and C.-L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*. 1992: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[34] Opricovic, S. and G.-H. Tzeng, "*Compromise Solution by Mcdm Methods: A Comparative Analysis of Vikor and Topsis"*, European Journal of Operational Research, Vol. 156, No. 2, pp. 445-455, 2004.

[35] Bahrami, M. and P. Abbaszadeh, "*An Overview of Renewable Energies in Iran"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 24, pp. 198-208, 2013.

[36] Wang, J.-J., Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, and J.-H. Zhao, "*Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 9, pp. 2263-2278, 2009.