تاریخ دریافت: ۲۹ تیر ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۴۰۱ صفحات ۵۱ الی ۶۳

ارزیابی و اولویت بندی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران در چارچوب توسعه پایدار، مبتنی بر کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

مهتاب مهدی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، ، دانشکده مهندسی برق، گروه برنامه ریزی و بهره برداری سیستم های قدرت ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

*ma.mahdi@mail.sbu.ac.ir

جمال عبدالله پور

عضو هیئات علمی پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

habdollahpour@nri.ac.ir

وحید وحیدی نسب

استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه برنامه ریزی و بهره برداری سیستم های قدرت، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران، ایران

v_vahidinasab@sbu.ac.ir

محمد صادق قاضی زاده

دانشیار ، دانشکده مهندسی برق، گروه برنامه ریزی و بهره برداری سیستم های قدرت، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران، ایران

m_ghazizadeh@sbu.ac.ir

چکیده: ایران همانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه با افزایش جمعیت و رشد اقتصادی با تقاضای روز افزون انرژی مواجه هستند. این کشور دارای منابع فراوان انرژی تجدیدپذیر است که می تواند بخش اصلی تامین عرضه کلی انرژی باشد. با توجه به پایان پذیر بودن منابع سوخت فسیلی این کشور قصد دارد سهم انرژی های تجدیدپذیر را در آینده نزدیک افزایش دهد. مطالعات متعددی درمورد منابع تجدیدپذیر صورت گرفته است اما وابستگی متقابل بین عوامل (معیارهای) مورد استفاده برای ارزیابی منابع تجدیدپذیر را در نظر نگرفته اند. در این مقاله یک چارچوب برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و سیاست گذاری برای انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر فرآیند تحلیل شبکه ای را معرفی می‌گردد . فرایند تحلیل شبکه ای یک روش تحلیل چند معیاره است و ابزاری را برای شناسایی اهمیت نسبی عناصر (معیارها) موثر بر هدف تصمیم گیری (به عنوان مثال، مسئله اولویت بندی منابع انرژی های تجدیدپذیر) فراهم می کند. مطالعه موردی این پژوهش، در مورد کشور ایران و انرژی های تجدیدپذیر با توجه به معیارهای استراتژیک مانند تکنولوژی، اقتصاد، اثرات زیست محیطی، سیاست و اجتماعی محاسبه شده و منابع انرژی اولویت بندی و تحلیل می شود. نتایج این پژوهش انرژی خورشیدی را در صدر گزینه های انرژی و پس از آن با اختلاف بسیار ناچیزی به ترتیب منابع انرژی برق آبی و زیست توده و سپس انرژی بادی و در اخر منبع زمین گرمایی برای کشور و شرایط آن، نشان میدهد. این قبیل مطالعات به تصمیم گیری کشورها کمک میکند تا از منابع انرژی تجدیدپذیر خود به بهترین نحو استفاده کنند.

کلمات کلیدی: تصمیم گیری چند معیاره، انرژی های تجدیدپذیر، روش تحلیل شبکه ای

* نویسنده مسئول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۱. مقدمه

در دنیای امروز انرژی به‌عنوان یک شاخص مهم توسعه اقتصادی برای کشورها اهمیت حیاتی دارد. وجود منابع انرژی فراوان برای ایجاد توسعه پایدار در یک جامعه ضروری است. این منابع انرژی باید با هزینه‌ای معقول و اقتصادی تهیه شده و برای تمامی نیازهای جامعه بدون ایجاد اثرات منفی اجتماعی و زیست محیطی مورداستفاده قرار گیرند. توسعه انرژی پایدار که قادر به برآورده کردن نیازهای حال و آینده هستند، به موضوعی در تحقیقات در سطح جهانی تبدیل شده است.توسعه پایدار عاملی برای برآورده ساختن نیازهای نسل فعلی، بدون به خطر انداختن توانایی نسل های آینده برای پاسخگویی به نیازهای خود، تعریف شده است[۱]. سیستم های انرژی نقش مهمی در توسعه اقتصادی و اجتماعی یک کشور و زندگی مردم ایفا می‌کنند. تعادل تولید انرژی و مصرف انرژی که برخی اوقات هیچ یا حداقل تأثیر منفی بر محیط‌زیست دارد، می‌تواند فرصتی را برای یک کشور برای به‌کارگیری فعالیت های اجتماعی و اقتصادی خود بدهد و به‌عنوان یک هدف نهایی شناخته شود[۲].استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق، هم از لحاظ حفاظت از محیط‌زیست و هم در صرفه جویی منابع تجدیدناپذیر مزایای زیادی دارد[۳]. در حال حاضر ۹۰۰ مگاوات نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه برق کشور وجود دارد و وزارت نیرو در دولت سیزدهم مکلف شده تا طی چهار سال ۱۰ هزار مگاوات به ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر اضافه کند. به طور متوسط ظرفیت نیروگاهی که از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان ۳۰ درصد است که در برخی کشورها این عدد نیز به ۸۰ درصد نیز می‌رسد اما در ایران تجدیدپذیرها تنها یک درصد از ظرفیت نیروگاهی کشور را دربرگرفته‌اند،

باتوجه‌به آمار و اطلاعات وزارت نیرو به دلیل کمبود منابع، امکان خرید تضمینی برق وجود ندارد و قرار است برنامه‌های مربوط به ورود سرمایه‌گذاران به این حوزه با جدیت پیگیری شود که تا اواخر سال ۱۴۰۰ درخواست ۳۲ هزار مگاوات ثبت شده است و پیش‌بینی شده است که این عدد به ۵۰ هزار مگاوات خواهد برسد. این‌که مسیر جدید برای احداث نیروگاه‌های جدید از محل ماده ۱۲ قانون رفع موانع تولید است یعنی به‌ازای سوخت صرفه‌جویی شده تهاتر صورت می‌گیرد و سود سرمایه‌گذاری طی مدت سه تا چهار سال برمی‌گردد و حدود شش تا هفت سال نیز تعهد وجود دارد.یکی از راه‌های تشویقی جهت ورود سرمایه‌گذاران به این حوزه صادرات برق است که این قانون هنوز به تصویب نرسیده است اما می‌توان توسط این قانون بخشی از توان تولیدی را صادر کرد. این رویه هم به رویه نیاز داخل کمک خواهد کرد و هم سرمایه‌گذار می‌تواند از منافع آن استفاده کند[۴].

منابع انرژی تجدیدپذیر محیط‌زیست در مقایسه با سوخت های فسیلی، با سطوح پایین یا عدم وجود آلاینده های هوا و انتشار گازهای گلخانه ای، پتانسیل ارزیابی ضایعات، قادر به‌جایگزین منابع متعارف در انواع برنامه های کاربردی با قیمت های رقابتی هستند[۵]. با این حال ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین و پایدارترین انواع انرژی در یک منطقه جغرافیایی یک مشکل پیچیده است و به مدیریت و برنامه ریزی مناسبی احتیاج دارد. چرا که برای دولت ها مدیریت صحیح زمانی اتفاق می افتد که تصمیمات درستی اتخاذ گردد. تصمیم گیری و ارزیابی جایگزین های انرژی پایدار با معیارهای متفاوت و متناقضی روبرو است که حل مسئله با دیدگاه تخصصی را طلب میکند. فرایند تعیین ترکیب بهینه منابع و فرایندها را برای پاسخگویی به تقاضای هر کشور به کار چالش برانگیز و پیچیده تبدیل کرده است روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به طور قابل توجهی در تصمیم‌گیری انتخاب نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر محبوب شده‌اند، زیرا آنها اهداف متضاد متعدد و ترجیحات تصمیم‌گیرنده را در نظر می‌گیرند. با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری علمی مشخص می‌شود که کدام گزینه مناسب‌تر است و امکان تصمیم‌گیری سریع‌تر، مطمئن‌تر و مؤثرتر در مورد انتخاب نوع نیروگاه را فراهم می‌کند. استفاده از داده‌های عددی در حل این مسئله مشکلات تصمیم‌گیری را ترفیع می‌کند و همچنین بعد از بررسی معیارهای مختلف که بعضاً در تضاد منافع هستند، بهترین گزینه را انتخاب می‌کند. معیارهای متعددی که برای موفقیت یک پروژه انرژی تجدیدپذیر تأثیر می‌گذارد باید مورد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. رویکرد تصمیم‌گیری معیارهای سنتی، به طور معمول با هدف شناسایی بهترین گزینه با هزینه کم، دیگر قادر به رسیدگی به این مشکلات نیست. بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر نمی‌تواند بر اساس یک محور یک‌بعدی ارزیابی، مانند هزینه یا سود باشد. فرمول‌بندی سیاست برای جایگزینی انرژی فسیلی توسط انرژی تجدیدپذیر باید در یک زمینه چندمعیاره موردتوجه قرار گیرد. تعدادی از معیارها، پیچیدگی برنامه‌ریزی و پروژه‌های انرژی، تجزیه‌وتحلیل چند معیار را به‌عنوان یک ابزار ارزشمند در روند تصمیم‌گیری انجام می‌دهد. با توجه به اثرات زیست محیطی و تمایل به کاهش انتشار آلاینده‌ها، استفاده از انرژی های تجدید پذیر رو به افزایش است.

انتخاب منابع انرژی در کشورهای مختلف با روند یکسانی صورت نمی‌گیرد؛ یکی از جنبه اقتصادی و دیگری سیاسی و یا فنی برتری دارد و سرمایه گذاری منابع انرژی فراتر از هزینه بوده و بخش مهمی از روند برنامه ریزی و سیاست‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر را تشکیل می‌دهد. بنابراین برای تشخیص منبع انرژی مناسب، هرکشور باید با توجه به شرایط موجود، منابع را از نظر اهداف ملی و شرایط آب و هوایی و کنترل آلودگی و متناسب با وضعیت سیاسی و قانون و مقررات برگزیند.

مطالعات زیادی با استفاده از تحلیل شبکه‌ای در بهره‌برداری از انرژی های تجدیدپذیر انجام شده است. ایسکین[۱] و همکارانش [۶]، با مورد توجه قرار دادن جنبه های اجتماعی، فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی از تحلیل شبکه‌ای برای بررسی عوامل تاثیرگذار بر قیمت گذاری انرژی تجدیدپذیر استفاده نمودند. آتماکا و باسار[۲] [۷]، نیروگاه‌های انرژی گاز طبیعی، بادی، زمین گرمایی، هیدروالکتریک، زغال‌سنگ/ زغال قهوه‌ای، و نیروگاه‌های انرژی هسته‌ای را با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ارزیابی کردند، درحالی‌که به معیارهای توسعه پایدار فنی، تناسب اقتصادی، کیفیت زندگی و معیارهای اجتماعی – اقتصادی توجه نمودند. تحلیل شبکه‌ای نیز با برخی روش‌های دیگر ارزیابی انرژی تجدیدپذیر در ادبیات ادغام شده است. ایروال[۳] [۸]، از BOCR و تحلیل شبکه‌ای برای ارزیابی منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین در ترکیه استفاده کردند. تحلیل راهبردی مسائل انرژی کشور با استفاده از روش BOCR ارائه شد، در حالی که وابستگی بین گزینه ها و معیارهای BOCR با تحلیل شبکه‌ای بررسی شد، سپس در زمان شناسایی اهمیت معیارها وابستگی میان آن ها در نظر گرفته شد. گزینه های انرزی تجدیدپذیری که مورد توجه واقع شدند شامل منابع انرژی آبی، زمین گرمایی، خورشیدی، بادی و زیست‌توده بوده. این نتیجه حاصل گردید که انرژی آبی، بهترین منبع انرژی تجدیدپذیر در ترکیه تلقی می شود. آراگونس بلتران[۴] و همکارانش[۹]، به بررسی این موضوع پرداختند که آیا باید در پروژه نیروگاه حرارتی خورشیدی خاص سرمایه‌گذاری نمود یا خیر و اولویت های پروژه ها را با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل شبکه‌ای شناسایی کردند و این نتیجه حاصل گردید که عملکرد تحلیل شبکه‌ای در این مرحله بهتر از تحلیل سلسله‌مراتبی می باشد.

اویان و همکاران[۵] [۱۰] برای تعیین مناسبترین منبع انرژی در صنایع تولیدکننده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای استفاده کردند. در این ارزیابی، الکتریسیته به‌عنوان پراستفاده‌ترین منبع انرژی و سوخت‌های نفتی به‌عنوان بدترین آنها معرفی شدند. آنها همچنین از تحلیل حساسیت استفاده کردند و در دو منظر متفاوت نتایج مختلفی گرفتند. قاسم پور و همکاران [۶] [۱۱]، برای تعیین بهترین راهبرد جمع آوری و بازیافت

[۱] Iskin
[۲] Atmaca and Basar
[۳] Ervural
[۴] Aragonés-Beltrán
[۵] Uyan
[۶] Ghasempour

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

در صنعت انرژی خورشیدی برای وزن‌دهی معیارها از فرآیند تحلیل شبکه‌ای استفاده کردند. بهترین راهبرد برای ترقی صنعت انرژی خورشیدی، راهبردهای درون صنعتی معرفی شد. بایسال[۷][۱۲]، برای رتبه‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیه، یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره متشکل از فرآیند تحلیل شبکه‌ای و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی پیشنهاد کرد. آنها از ۱۹ معیار در چهار دسته‌ی سود، فرصت، هزینه و ریسک برای ارزیابی ۵ گزینه شامل: انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی آبی و زیست‌توده استفاده کردند و در نهایت انرژی آبی به‌عنوان مناسب ترین گزینه پیشنهاد شد.

برنامه‌ریزی و سیاست گذاری انرژی تجدیدپذیر به ارزیابی طرح انرژی قابل‌اجرا یا انتشار گزینه‌های مختلف انرژی تجدیدپذیر اشاره دارد. برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر، تبدیل به تصمیم بسیار پیچیده برای ذی‌نفعان و عوامل مرتبط شده است. مستکاس و همکاران[۸] [۱۳]، تحلیل گسترده ای از چندین مقاله تحقیقاتی منتشر شده در مورد تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه کردند و به بیان برجسته کاربردهای آنها در منطقه انرژی های تجدیدپذیر پرداخته است. کومار و همکاران[۹][۱۴]، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره منعطف و مستقیمی را پیشنهاد نمودند تا به سیاست گذاران در رتبه بندی انرژی پایدار کمک کنند. بلتران[۱۰] و همکارانش [۹]، طی تحقیقی از تحلیل سلسله‌مراتبی یا تحلیل شبکه‌ای برای اولویت بندی پروژه های سرمایه‌گذاری نیروگاه های حرارتی خورشیدی ،استفاده نمودند.

این پژوهش قصد دارد که با هدف توسعه پایدار و استفاده از مدل یکپارچه تحلیل شبکه‌ای، به اولویت بندی این انرژی ها برای تولید برق تجدید پذیر از دیدگاه سیاست گذاران وتصمیم سازان ایران بپردازد. اهدافی که در این پژوهش عبارت است از:

- شناسایی و احصاء منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران به تفکیک شرایط جغرافیایی و اقتصادی و نیز شرایط آمایشی کشور
- شناسایی معیارها و شاخص‌های ابعاد توسعه پایدار به منظور تعیین چارچوب اولویت‌بندی و بهره‌برداری انرژی‌های تجدیدپذیر
- ارزیابی و واولویت‌بندی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران، در چارچوب توسعه پایدار و مبتنی بر کاربرد روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

۲. روش شناسی

تصمیم‌گیری، شاخصه مطالعات و انتخاب گزینه مناسب، برای پیدا کردن بهترین راه‌حل بر اساس عوامل مختلف و باتوجه‌به انتظارات تصمیم گیرندگان است. هر تصمیم در یک محیطی از تصمیم‌گیری ساخته شده که به‌عنوان مجموعه‌ای از اطلاعات، گزینه‌ها، مقادیر و ترجیحات موجود در زمانی که تصمیم باید ساخته شود، تعریف می‌شود. در یک روش تک معیاری، تحلیل‌گر یک معیار منحصربه‌فرد را ایجاد می‌کند که تمام جنبه‌های مربوط به مشکل را در برگیرد. در بسیاری از موارد، ما مجموعه‌ای از اهداف متضاد چندگانه داریم. برخی از مشکلات تصمیم‌گیری باید شامل گروهی از تصمیم گیرندگان یا گروهی از کارشناسان یا قضات درخواست شده توسط تنها تصمیم‌گیرنده باشند. تصمیم‌گیری چندمعیاره[۱۱] یکی از روش‌های تصمیم‌گیری گسترده، و مورداستفاده در دولت، علم و کسب‌وکار است. روش‌های حل تصمیم‌گیری چندمعیاره، شاخه‌ای از یک دسته کلی از مدل‌های تحقیقاتی عملیاتی است که مناسب برای رفع

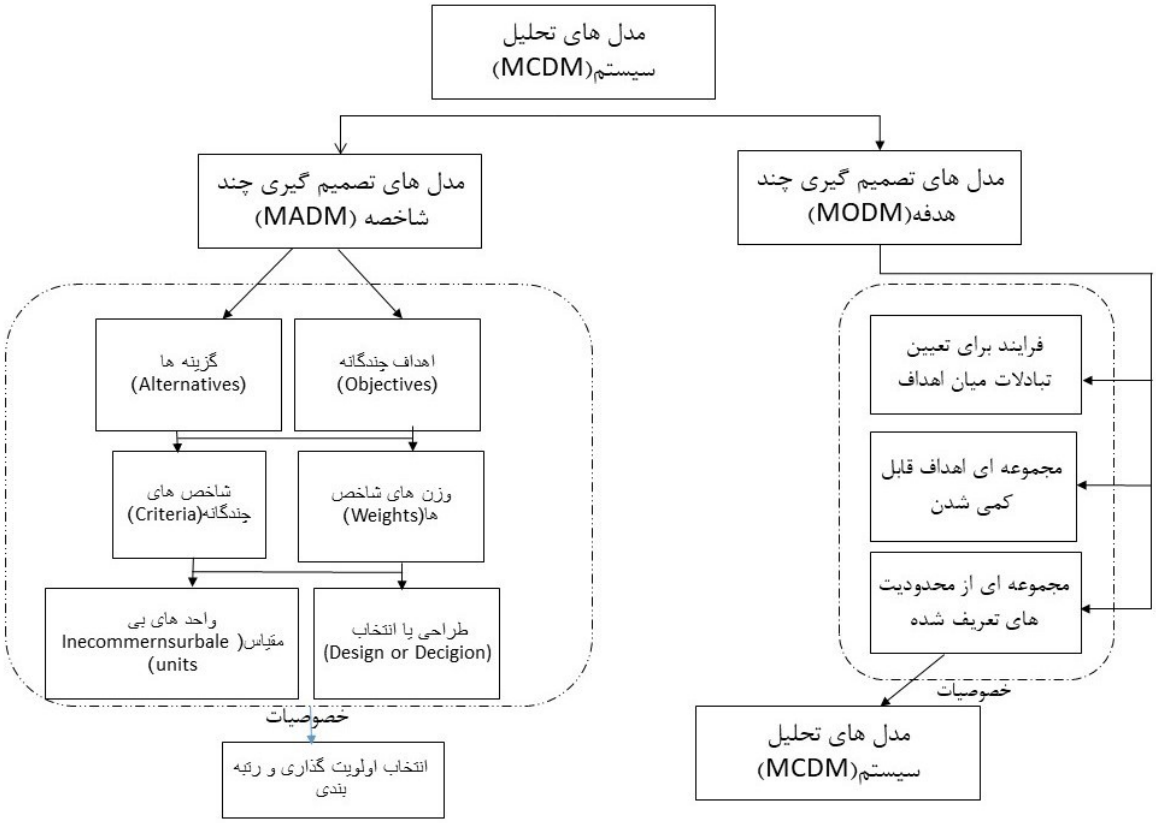
[۷] Baysal
[۸] Moustakas
[۹] Kumar
[۱۰] Aragonés-Beltrán
[۱۱] Multi Criteria Decision Making

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

مشکلات پیچیده بوده که شامل عدم اطمینان زیاد، اهداف متضاد، اشکال مختلف داده‌ها و اطلاعات، منافع و دیدگاه‌های پیچیده‌ی درحال‌رشد و حسابداری برای بیوفیزیک پیچیده و سیستم‌های اجتماعی تکامل‌یافته است[۲]. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) شامل تصمیم‌گیری چند مشخصه[۱۲] و تصمیم‌گیری چندهدفه[۱۳] می‌شود. MCDM یک اصطلاح کلی است و به دو زیرمجموعه ذکر شده تقسیم می‌شود. ازاین‌رو هیچ تفاوتی بین روش‌های تصمیم‌گیری MCDM و MADM وجود ندارد و برخی از محققان آنها را به‌جای هم بکار می‌برند. MADM که تنها یک هدف با معیارهای متفاوت و بیش از یک معیار را شامل می‌شود (شکل ۱). جنبه متمایز، اختصاص وزن یا اندازه‌گیری میزان اهمیت معیارهای مختلف، و در نهایت برای مسائل رتبه‌بندی استفاده می‌شود. MODM همان‌طور که از نامش پیداست مسئله دارای اهداف مختلف است. رویکرد رایج برای حل مسئله MODM، برنامه‌ریزی هدف است، جایی که ما اهدافی را برای هر یک از مقاصد معرفی می‌کنیم، و معیار نهایی، می‌تواند مجموع انحراف مطلق هر هدف که توسط یک گزینه به‌دست‌آمده، باشد. مشکلات رفع وزن یا اولویت‌ها در هر دو MADM و MODM رایج هستند. بااین‌حال، به لحاظ فلسفی، MADM اساساً یک مسئله انتخاب و اولویت‌بندی بوده، درحالی‌که MODM اغلب یک مسئله طراحی و بهینه‌سازی است. روش‌های مختلف ویژگی های مشترکی نیز دارند اما هر یک دارای برخی از ویژگی‌های متمایز در ارزیابی گزینه‌های موجود در برابر هر یک از معیارها، تعیین وزن معیارها، به‌دست‌آوردن رتبه‌های کلی برای گزینه‌ها و در نهایت انتخاب یکی از آن‌ها هستند. بنابراین روش‌های مختلف ممکن است راه‌حل مشابهی را برای یک مسئله خاص ارائه ندهند. چنین تفاوت‌هایی ناشی از (الف) استفاده از معیارهای مختلف، (ب) انواع روش‌ها در مواجه با اهداف مختلف، در مقیاس متفاوت، (ج) استفاده از پارامترهای اضافی و تأثیرگذار بر راه‌حل و (د) روش‌های مختلف در انتخاب بهترین راه‌حل باشد. در ادبیات انرژی‌های تجدیدپذیر، روش‌های مختلفی برای اهداف متعدد مورداستفاده قرار گرفته‌اند. در این میان، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بیشترین کاربرد را دارند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با انتخاب از بین گزینه‌های موجود یا ارزیابی گزینه‌های متعدد با معیارهای متنوعی سروکار دارند که احتمال دارد برخی با یکدیگر در تضاد باشند. این روش‌ها در سراسر ادبیات انرژی تجدیدپذیر نیز بکار برده می‌شود تا عملکرد منابع و سیاست‌های انرژی را ارزیابی و مکان بهینه تأسیسات انرژی را شناسایی کند و بهترین و مناسب‌ترین منبع انرژی را از بین فناوری‌های مختلف انتخاب نماید.

[۱۲] Multi-Attribute Decision-Making(MADM)
[۱۳] Multi Objective Decision-Making(MODM)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل ۱. *مدل تحلیل سیستم*

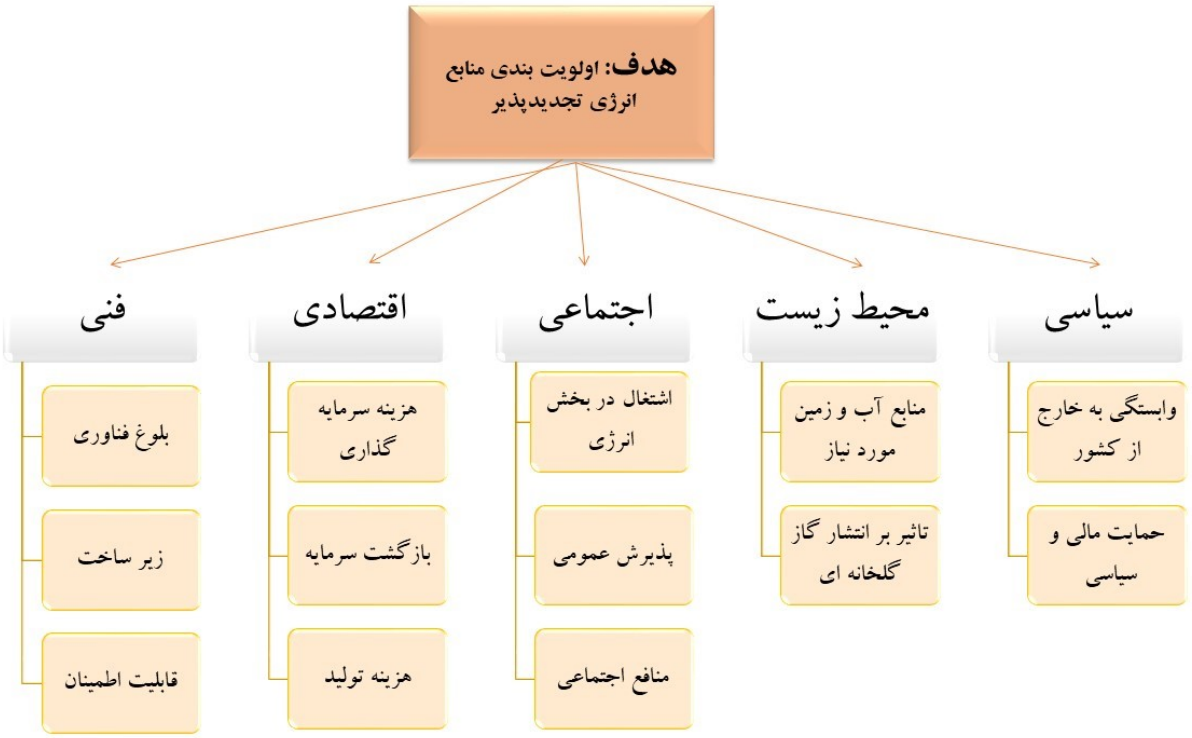
تحلیل سلسله‌مراتبی متداول‌ترین روش کاربردی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رسیدگی به مسائل مرتبط با انرژی تجدیدپذیر و پایدار است. مفهوم اصلی تحلیل سلسله‌مراتبی بیان مسئله‌ای پیچیده در ساختار سلسله‌مراتبی است[۱۵]. گزینه های تصمیم‌گیری در پایین این سلسله مراتب قرار دارند در حالی که هدف ،در بالای سلسله مراتب واقع شده است. روش تحلیل شبکه ای تعمیم‌یافته روش تحلیل سلسله مراتبی است که دررابطه‌با وابستگی‌هاست، در تحلیل سلسله مراتبی معیارها مستقل هستند. اگر معیارها، مستقل نباشند، معیارهای وابسته در تصمیم‌گیری و نتیجه‌گیری اهمیت دارند و باید وابستگی آنها ارزیابی شود.

مراحل اصلی روش تحلیل شبکه ای در تصمیم‌گیری چندمعیاره عبارتند از:

مرحله ۱. تعیین درخت شبکه ای

به منظور تشکیل درخت شبکه ای، هدف، معیارها و گزینه ها عناصر این شبکه هستند و با توجه به روش انتخابی ارتباط دوطرفه میان همه بخش ها می تواند مطرح شود. مسئله پیش رو تعیین و اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر برای کشور ایران است که گزینه‌های پیش رو در کشور ایران، انرژی خورشیدی، بادی، برق‌آبی، زیست‌توده و زمین گرمایی انتخاب شده است. پس از آن به انتخاب معیارها و زیر معیارهای مهم در اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته می‌شود. تمامی معیارها و زیر معیارهای مرتبط با تحقیق از ادبیات موضوع استخراج شدند و در شکل ۲ نمایش داده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل ۲. *معیارها و زیر معیار های انتخابی تحقیق*

مرحله ۲. انجام مقایسات زوجی

مرحله بعدی طراحی پرسش‌نامه مقایسات زوجی است. بر مقایسات را انجام و بردار وزن و اولویت عناصر را تشکیل میدهیم و از کارشناسان و متخصصان دعوت می شود تا دو عنصر را نسبت به هدف که در سطح بالاتر قرار دارد، مقایسه کنند. اولویت، امتیازی است که اهمیت گزینه‌ها یا معیارها را در تصمیمات، رتبه‌بندی می‌کند. پس از مرحله ساختارمند کردن مسئله، سه نوع از اولویت‌ها باید محاسبه شوند: اولویت‌های معیارها اهمیت هر معیار نسبت به یکدیگر، اولویت‌های گزینه‌ها اهمیت گزینه‌ها نسبت به یک معیار خاص، نتایج اولویت‌های گزینه محلی برای محاسبه اولویت‌های گزینه نهایی هستند. برای مقایسه به مقیاس نیاز است که در اینجا از مقیاس ساعتی استفاده شده است. در این مقیاس عدد ۱ به نشانه اهمیت مساوی دو عنصر مقایسه شده است و عدد ۹ برتری کامل عنصر را بیان میکند جدول ۱ نحوه ارزش گذاری شاخص ها را نسبت به هم نشان میدهد. مقایسات با توجه به اینکه روش تحقیق روش تحلیل شبکه ای می باشد مقایسه ها و ارتباطات بین تمام خوشه ها و عناصر امکان پذیر است. مقایسه ها با توجه به وابستگی ها شکل میگیرد و ضریب ناسازگاری همواره باید مقادیری کمتر ۰.۱ داشته باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول ۱. نحوه ارزش گذاری شاخص ها در جدول مقایسات زوجی

ترجیحات	مقدار
کامال مرجح یا کامال مهمتر یا کامال مطلوبتر	۹
ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی	۷
ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت قوی	۵
کمی مرجح یا کمی مهمتر یا کمی مطلوبتر	۳
ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل قوی	۲،۴،۶،۸

مرحله۳ . محاسبه اوزان در سوپرماتریس ها:

پس از انجام مقایسات زوجی، سوپرماتریس مدل ANP برای نشان دادن اولویت نسبی عناصر ساخته شده است. همه بردار های وزن محاسبه شده در یک ماتریس بزرگ به نام سوپر ماتریس جمع میشوند. سوپرماتریس یک ماتریس دو بعدی از عناصر است. سوپرماتریس نشان دهنده تمامی روابط بین عناصر حاضر در شبکه بوده و قدم اولیه برای تعیین همه الویت های موجود بین گزینه ها، شاخص ها و زیر معیارها است. به عبارتی تأثیر اولویت یک عنصر در سمت چپ ماتریس بر روی یک عنصر در بالای ماتریس با توجه به یک معیار خاص است. سوپرماتریس اصلی از ماتریس های مقایسه زوجی عناصر به دست می آید. ساختار این ماتریس مربعی به فرم معادله ۱ است:

معادله ۱:

$$W=\begin{array}{c} \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_m \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mm} \end{bmatrix} \end{array}$$

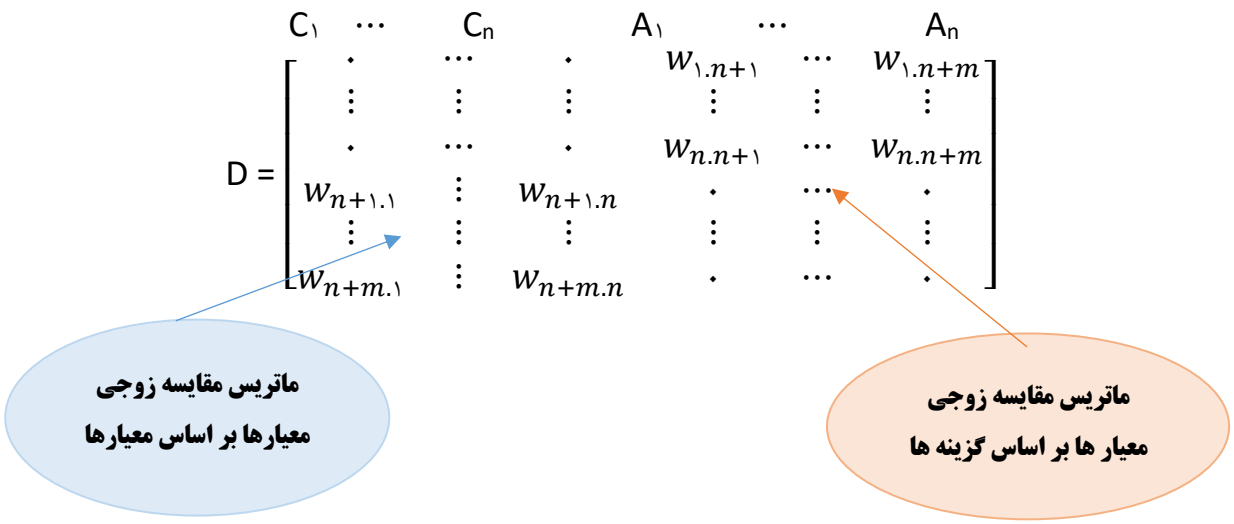
C_i نماد خوشه ها هستند که میتوانند حاوی یک یا چند عنصر باشد.

w_{ij} ها نیز نماد بردار های وزنی هستند که وزن یا اهمیت نسبی عناصر حاضر در خوشه C_i را نسبت به وزن عناصر حاضر خوشه C_j نشان میدهند.

هر یک از w_{ij} ها نیز خود می توانند یک ماتریس باشند.

$w_{ij} = 0$ زمانی رخ می دهد که عناصر حاضر در خوشه C_i هیچ گونه ارتباطی با عناصر حاضر در خوشه C_j نداشته باشند.اگر ماتریس بالا را برای تمام شاخص ها بدست آوریم ماتریس زیر به دست می آید که به آن سوپر ماتریس گفته می شود:

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل ۳: ماتریس مقایسات زوجی

سوپرماتریس اصلی اولویت های ستون از ماتریس های مقایسات زوجی عناصر به دست می آید. هنگامی که تمام ماتریس های مقایسه زوجی (وزن های به دست آمده از ماتریس های متقابل) پر شدند، مجموع بردارهای اولویت مرتبط در سطح گره ابرماتریس وزن نشده را تشکیل می دهند در ANP ما به دنبال اولویت های حالت پایدار از یک ماتریس هستیم. نتیجه ANP غیرخطی و نسبتاً پیچیده است. ماتریس حدی ممکن است همگرا نباشد مگر اینکه ماتریس ستونی تصادفی باشد، یعنی مجموع هر یک از ستون های آن یک باشد. اگر مجموع ستون ها به یک برسد، از این واقعیت که مقدار ویژه اصلی یک ماتریس بین بزرگترین و کوچکترین مجموع ستون های آن قرار دارد، می دانیم که مقدار ویژه اصلی یک ماتریس تصادفی برابر با یک است.

سوپرماتریس بدون وزن از اولویت های به دست آمده از مقایسه های مختلف زوجی ساخته شده است. ستون یک گره شامل اولویت‌های تمام گره‌هایی است که با توجه به آن به صورت زوجی مقایسه شده‌اند. بعد از تشکیل سوپرماتریس اولیه، باید سوپرماتریس موزون ایجاد شود سوپر ماتریس موزون از نرمال‌سازی سوپرماتریس اولیه حاصل می‌شود. نرمال‌سازی یا بی‌مقیاس سازی یک مفهوم زیربنایی در تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند تکنیک AHP و ANP استد. در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره این روش باعث بی‌مقیاس سازی می‌شود. روش‌های متعددی به این منظور مطرح شده که در ادامه هریک از آنها تشریح شده است. یک روش ساده برای نرمال کردن اعداد توسط ساعتی مطرح شده که به محاسبه **بردار ویژه** نیز معروف شده است. در این روش کافی است هر عدد در یک مجموعه بر مجموع عناصر آن مجموعه تقسیم شود. در این صورت جمع کل عناصر پس از نرمال‌سازی یک خواهد بود.معادله ۲ نرمال سازی خطی و معادله ۳ روش نرمال سازی اقلیدسی است.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{۱}^{m} x_{ij}} \qquad (۲)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt[۲]{\Sigma_i x_{ij}^{۲}}} \qquad (۳)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

در این مرحله برای بدست آوردن سوپر ماتریس حدی، سوپر ماتریس وزن دار آنقدر به توان رسانده می شود تا با دو حالت ممکن ایجاد شود. اگر توان های ماتریس اولیه به یک ماتریس بهایی همگرا شود ماتریس نهایی را سوپرماتریس حدی است. اگر توان های ماتریس اولیه به صورت تناوبی به n ماتریس نهایی همگرا شود، میانگین ماتریس های نهایی سر ماتریس حدی است. عناصر بر اساس ویژگی های مشترک آنها در مجموعه هایی به نام خوشه طبقه بندی می شوند. با تعریف خوشه ها می توان ارتباط بین خوشه ها را نیز تعیین و مدلسازی نمود.

مرحله۴. امتیاز دهی به عناصر

در نهایت مرحله آخر به‌عنوان رتبه‌بندی گزینه ها می‌شود. همچنین در این مرحله رتبه بندی و نرمال سازی همه عناصر موجود در هر یک از خوشه ها انجام می شود و در قالب سوپرماتریس نرمال شده نمایش داده میشود خروجی نهایی، امتیاز ها و رتبه های شاخص ها و گزینه ها خواهد بود.

برای اجرای مدل تحلیل شبکه ای در این پژوهش از نرم افزار سوپر دسیشن استفاده شده است. نرم افزار سوپردسیژن میتواند مسائل تحلیل شبکه‌ای و همچنین مسائل تحلیل سلسله مراتبی با تعداد زیادی خوشه یا معیار با ساختارهای پیچیده را به سرعت حل کند و نرم افزار از تمام معادلاتی که بیان شد استفاده میکند.

جهت پیاده سازی ساختار شبکه های مسئله خوشه ها و سپس وابستگی معیارها همان پیکان ها با جهت های مناسب تعیین میشود. نحوه ارجحیت گزینه ها و پر کردن پرسشنامه مقایسه زوجی به این صورت است که یک معیار به چه میزان مهمتر از معیار دیگری است در واقع برای پر کردن هر سطر از پرسشنامه مقایسه زوجی باید توجه کنیم که کدام یک اهمیت بیشتری دارد در واقع به چه میزان مهم تر از دیگری است. آخرین مرحله از فرایند تصمیم‌گیری، تجزیه‌وتحلیل حساسیت است که در آن داده‌های ورودی کمی تغییر می‌کنند تا تأثیر آن بر نتایج مشاهده شود. از آنجایی که مدل‌های تصمیم پیچیده اغلب تعریف نشده‌اند، تجزیه‌وتحلیل حساسیت اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلفی تولید شود. این سناریوهای مختلف ممکن است منجر به رتبه‌بندی‌های دیگر و بحث‌های بیشتری شود. اگر رتبه‌بندی تغییر نکند، گفته می‌شود که نتایج قوی هستند در غیر این صورت آنها حساس هستند. تجزیه‌وتحلیل حساسیت با تغییر وزن معیارها و مشاهده تأثیر بر اولویت گزینه‌ها انجام می‌شود.

۳. نتایج

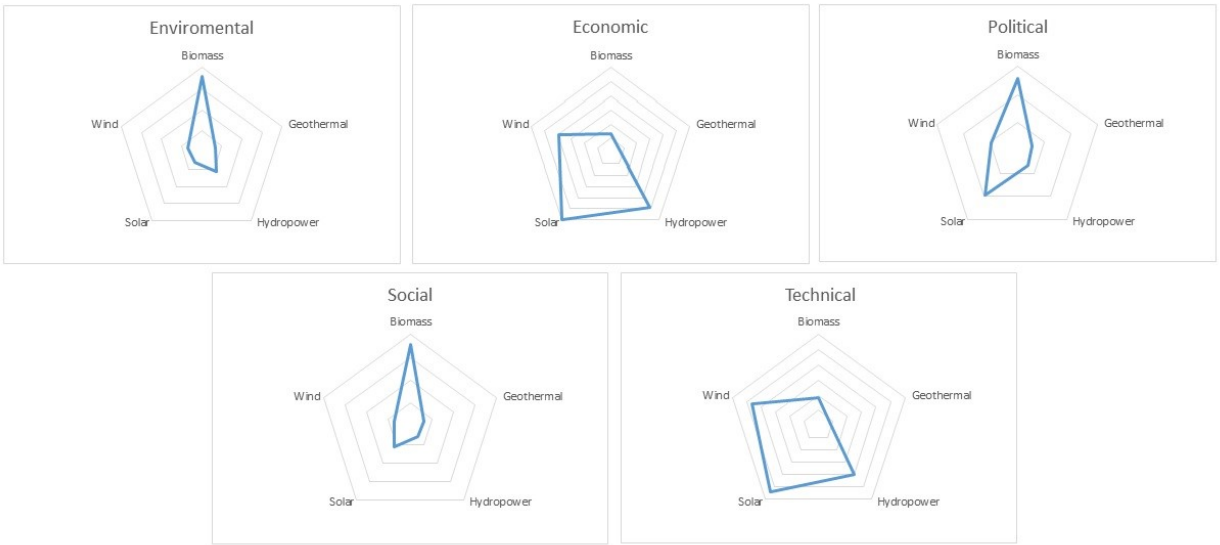
پس از انجام مقایسات زوجی، سوپرماتریس مدل تحلیل شبکه ای برای نشان دادن اولویت نسبی عناصر ساخته شد. سوپرماتریس یک ماتریس دو بعدی از عناصر است و نشان دهنده تأثیر اولویت یک عنصر در سمت چپ ماتریس بر روی یک عنصر در بالای ماتریس با توجه به یک معیار خاص است. پس از شبکه بندی، ایجاد ارتباط بین عناصر و وارد کردن میانگین نظرات خبرگان نوبت به نتیجه گیری و تحلیل آن است. در شکل ۴ سوپر ماتریس وزن دار گزینه ها نسبت به معیارها آمده است. از دیدگاه اقتصادی و فناوری منبع خورشیدی بهترین گزینه است و از دیدگاه زیست محیطی،اجتماعی و سیاسی زیست توده بهترین گزینه انرژی تجدیدپذیر است. در شکل ۵ منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه های معیارهای مختلف مقایسه و اولویت بندی شده اند. شکل ۶ وزن زیرمعیار های مختلف را نمایش می دهد که از دیدگاه متخصصین پژوهش هزینه سرمایه گذاری بیشترین وزن را در اتخاذ تصمیم نهایی دارد. نهایتا با در نظر گرفتن وزن معیارها و زیرمعیار های استراتژیک مانند تکنولوژی، اقتصاد، اثرات زیست محیطی، سیاست و اجتماعی و اعمال فرایند تحلیل شبکه ای بر روی مطالعه موردی این پژوهش یعنی کشور ایران منابع انرژی تجدیدپذیر اولویت بندی می شود. نتایج این پژوهش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

انرژی خورشیدی را در صدر گزینه های انرژی و پس از آن با اختلاف بسیار ناچیزی به ترتیب منابع انرژی برق آبی و زیست توده و سپس انرژی بادی و در آخر منبع زمین گرمایی برای کشور و شرایط آن، نشان میدهد (شکل ۷).

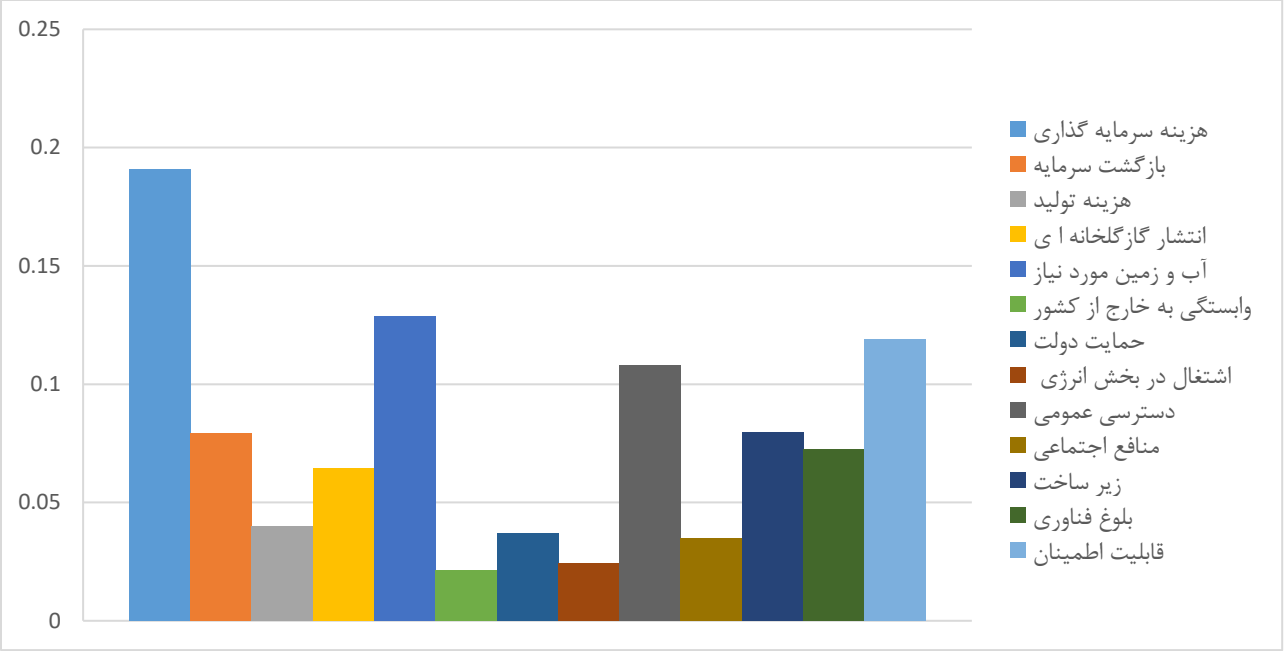
Cluster Node Labels		criteria				
		Economical	Enviromental	political	Social	Technical
Alternatives	Biomass	0.026828	0.179347	0.128786	0.179398	0.036902
	Geothermal	0.012226	0.032773	0.027919	0.031662	0.015783
	Hydropower	0.097458	0.057214	0.031006	0.028791	0.079679
	Solar	0.118860	0.028941	0.097184	0.057245	0.108736
	Wind	0.077961	0.035059	0.048439	0.036237	0.092233

شکل ۴: ماتریس وزن دار گزینه ها نسبت به معیار ها

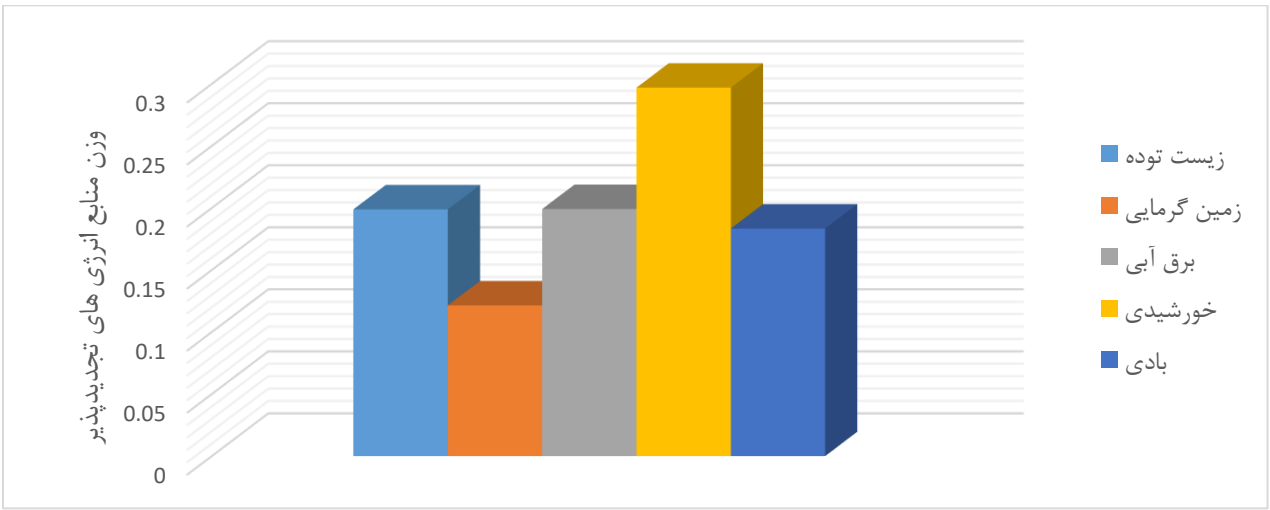


شکل ۵: اولویت بندی گزینه های انرژی تجدیدپذیر بر اساس معیار ها

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل ۶: وزن زیر معیار های مختلف در تصمیم گیری



شکل ۷: رتبه بندی گزینه های انرژی تجدیدپذیر

٤. بحث و نتیجه گیری

انرژی های تجدیدپذیر در دهه گذشته به یکی از اولویت های سیاست گذاران انرژی ایران تبدیل شده است. این مساله هنگامی اهمیت بیشتری پیدا می کند که نقش آن در گسترش تولید برق و تنوع بخشیدن به ترکیب تامین انرژی پایدار بررسی شود. هدف این پژوهش ارزیابی گزینه های موجود انرژی تجدیدپذیر و انتخاب مناسب ترین گزینه انرژی برای کشور ایران است. در فرآیندهای تصمیم گیری و ارزیابی، عوامل زیادی وجود دارد که شامل قضاوت های ذهنی و کیفی می شود و نیازمند در نظر گرفتن عوامل پیچیده مختلف است. در چنین فرآیندهایی، روش های تصمیم گیری چند معیاره را می توان برای انتخاب صحیح ترین گزینه انرژی مورد استفاده قرار داد. با توجه به پیچیدگی مسائل مربوط به حوزه انرژی، بسیاری از سازمان ها از تصمیم گیری چند معیاره استفاده می کنند. هر تصمیم گیرنده

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

ممکن است انگیزه ها یا اهداف خود را داشته باشد و بنابراین ممکن است فرآیند تصمیم گیری را از منظر خود ببینند. با این حال، انگیزه و علاقه مشترکی برای دستیابی به تصمیم نهایی در مورد انتخاب بهترین گزینه وجود دارد. بنابراین، در انتخاب گزینه مناسب که به فرآیند تصمیم گیری چند معیاره کمک می کند، روش تحلیل شبکه ای می تواند یک روش قابل اعتماد و پذیرفته شده برای جمع آوری داده ها از پاسخ دهندگان برای بخش تخصص آنها باشد. مدل پیشنهادی می‌تواند به سرمایه‌گذاران و دست اندرکاران حوزه انرژی در بهبود فرآیند تصمیم‌گیری کمک کند.

۵. منابع

۱. Borowy, I., *Defining sustainable development for our common future: A history of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Commission)*. ۲۰۱۳: Routledge.

۲. Wang, J.-J., et al., *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.* Renewable and sustainable energy reviews, ۲۰۰۹. ۱۳(۹): p. ۲۲۶۳-۲۲۷۸.

۳. Cavallaro, F., *A comparative assessment of thin-film photovoltaic production processes using the ELECTRE III method.* Energy Policy, ۲۰۱۰. ۳۸(۱): p. ٤٦.٤٧٤-۳

٤. www.satba.gov.ir.

۵. Aras, H., Ş. Erdoğmuş, and E. Koç, *Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process.* Renewable Energy, ۲۰۰٤. ۲۹(۸): p. ۱۳۸۳-۱۳۹۲.

٦. Iskin, I., et al., *Exploring renewable energy pricing with analytic network process—Comparing a developed and a developing economy.* Energy Economics, ۲۰۱۲. ۳٤(٤): p. ۸۸۲-۸۹۱.

۷. Atmaca, E. and H.B. Basar, *Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP).* Energy, ۲۰۱۲. ٤٤(:(۱p. ۵۵۵-۵٦۳.

۸. Ervural, B.C., et al., *An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey's energy planning.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۱۸. ۸۲: p. ۱۵۳۸-۱۵۵۰.

۹. Aragonés-Beltrán, P., et al., *An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects.* Energy, ۲۰۱٤. ٦٦: p. ۲۲۲-۲۳۸.

۱۰. Uyan, M. and O. Dogmus, *An Integrated GIS-based ANP Analysis for Selecting Solar Farm Installation Locations: Case Study in Cumra Region, Turkey.* ۲۰۲۲.

۱۱. Ghasempour, R., et al., *Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review.* International Journal of Renewable Energy Development, ۲۰.(۱)۸ .۱۹

۱۲. Baysal, M.E. and N.C. Çetin, *Priority ranking for energy resources in Turkey and investment planning for renewable energy resources.* Complex & Intelligent Systems, ۲۰۱۸. ٤(٤): p. ۲٦۱-۲٦۹.

۱۳. Moustakas, K., et al., *A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective*. ۲۰۲۰, Elsevier. p. ۱۰۹٤۱۸.

۱٤. Kumar, A., et al., *A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۲۰۱۷. ٦۹: p. ۵۹٦-٦۰۹.

۱۵. Kahraman, C., *Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments*. Vol. ۱٦. ۲۰۰۸: Springer Science & Business Media.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]