

## **Giving Structure and Weight to Sustainable and Green Production Indicators of Iranian Thermal Power Plants using Best-Worst Method**

**Mehdi Abbasi\*, Mohammad Reza Dehghani\*\***

### **Abstract**

Performance evaluation is necessary for sustainable and green production of companies such as thermal power plants. Sustainability Balanced Scorecard (SBSC) is a common model in this area. Assumption in SBSC is perspectives/indicators/sub-indicators (elements) weight equality that may be problematic in real-world problems. In this paper, firstly a mathematical model was presented to calculate global weight of elements in hierarchical structure by Best-Worst Method (BWM). Then, four properties of the desirable practical structure of the elements were defined by getting idea from designing hierarchical structure concepts in the Analytic Hierarchy Process. Then, an algorithm was presented to design multi-level structure of problems elements and give weights to them using the proposed giving weight model, four properties of the desirable practical structure, and Consistency Ratio Thresholds. A four-level hierarchical structure including 50 identified performance evaluation elements of SBSC model was presented using the proposed algorithm for giving structure and weight to performance evaluation SBSC elements in Iranian thermal power plants according to green and sustainable production. Finally, by considering the elements used in the resulting structure, a suitable indicators list of Iranian thermal power plants according to green and sustainable production was derived. The findings indicate the suitability of the proposed algorithm.

**Keywords: Performance Evaluation; Hierarchical Structure; Sustainability Balanced Scorecard (SBSC); Best-Worst Method (BWM); Thermal Power Plants.**

---

Received: Jul. 17, 2021; Accepted: Mar. 23, 2022.

\* Assistant Professor of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran (Corresponding Author).

Email: [abbasi\\_m@iaushiraz.ac.ir](mailto:abbasi_m@iaushiraz.ac.ir)

\*\* Expert in Quality Management and Improvement of Methods, Fars Power Generation Management Company, Shiraz, Iran.

## ساختاردهی و وزن‌دهی به شاخص‌های تولید پایدار و سبز نیروگاه‌های حرارتی کشور با استفاده از روش بهترین - بدترین

مه‌دی عباسی\*، محمدرضا دهقانی\*\*

### چکیده

ارزیابی عملکرد، امری ضروری در تولید پایدار و سبز شرکت‌هایی مانند نیروگاه‌های حرارتی به‌شمار می‌رود. کارت امتیازی متوازن پایدار (SBSC) یکی از مدل‌های رایج در این زمینه است. در SBSC وزن منظرها/ شاخص‌ها/ زیرشاخص‌ها (عناصر) یکسان در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که در مسائل واقعی ممکن است این‌گونه نباشد. در این پژوهش ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از روش بهترین-بدترین ارائه شد؛ سپس با ایده‌گرفتن از مفاهیم طراحی ساختار سلسله‌مراتبی در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، چهار ویژگی ساختار مطلوب کاربردی عناصر تعریف شد. در ادامه با استفاده از مدل وزن‌دهی پیشنهادی، چهار ویژگی تعریف شده و آستانه‌های قابل قبول نرخ سازگاری، الگوریتمی برای طراحی ساختار چندسطحی عناصر مسئله‌ها و تعیین وزن آن‌ها ارائه شد. با اجرای الگوریتم پیشنهادی برای ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر ارزیابی عملکرد SBSC در نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز، ساختار سلسله‌مراتبی چهارسطحی وزن‌دار مدل SBSC شامل ۵۰ عنصر ارزیابی عملکرد ارائه شد؛ سپس با توجه به عناصر به‌کار رفته در ساختار حاصل شده، فهرست مناسبی از شاخص‌های تولید پایدار و سبز منطبق با نیروگاه‌های حرارتی کشور استخراج شد. یافته‌ها نشان‌دهنده مناسب بودن عملکرد الگوریتم پیشنهادی است.

**کلیدواژه‌ها:** ارزیابی عملکرد؛ ساختار سلسله‌مراتبی؛ کارت امتیازی متوازن پایدار (SBSC)؛ روش بهترین-بدترین (BWM)؛ نیروگاه‌های حرارتی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶.

\* استادیار مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (نویسنده مسئول).

Email: [abbasi\\_m@iaushiraz.ac.ir](mailto:abbasi_m@iaushiraz.ac.ir)

\*\* کارشناس مدیریت کیفیت و بهبود روش‌ها، شرکت مدیریت بهره‌برداری تولید برق فارس، شیراز، ایران.

## ۱. مقدمه

صنعت برق از جمله صنایع زیربنایی و مادر است و در توسعه کشور نقش مهمی دارد. یکی از زیرمجموعه‌های این صنعت، نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی است. روش‌های اصلی تولید برق در نیروگاه‌ها را می‌توان به سه دسته استفاده از سوخت‌های فسیلی (حرارتی؛ نیروگاه‌های دیزلی، توربین‌های گازی، حرارتی بخار و چرخه‌های ترکیبی)، استفاده از انرژی هسته‌ای و استفاده از انرژی‌های تجدیدشونده تقسیم کرد [۳۸]. از آنجاکه کشور ایران دارای ذخایر قابل توجه انرژی فسیلی است، بخش عمده‌ای از توان تولید برق کشور به نیروگاه‌های حرارتی اختصاص دارد [۶]. در سال ۱۳۹۹ سهم نیروگاه‌های حرارتی (سیکل ترکیبی، گازی، بخاری و دیزلی) از نیروگاه‌های برق کشور، تقریباً ۸۴ درصد بوده است [۴۱]. از طرف دیگر نیاز به انرژی و تقاضای برق با رشد جمعیت، صنعتی شدن و شهرنشینی افزایش می‌یابد؛ از این رو نیازهای انرژی کشورهای در حال توسعه با افزایش نرخ صنعتی شدن در حال افزایش است [۴]. علی‌رغم وجود جنبه‌های مثبت عملکرد نیروگاه‌ها در توسعه اجتماعی، اقتصادی و سطح زندگی مردم، آلودگی‌های زیست‌محیطی و تأثیر نیروگاه‌ها بر تعادل اکوسیستم به‌عنوان جنبه‌های منفی عملکرد نیروگاه‌ها بوده و این موضوع از دغدغه‌های اصلی جامعه است. دستیابی به نقطه تعادل بین جنبه‌های مثبت و منفی عملکرد نیروگاه‌ها با تعریف مجموعه‌ای مناسب از شاخص‌ها/ زیرشاخص‌ها، وزن‌دهی به آن‌ها و استفاده از روش مناسب برای ارزیابی کلی عملکرد نیروگاه‌ها مقدور است [۷]؛ به عبارت دیگر نیروگاه‌ها می‌توانند با شناسایی شاخص‌های مناسب، نسبت به ارزیابی و بهبود عملکرد خود در راستای تولید پایدار و سبز اقدام کنند (شکاف اول پژوهش).

پایداری به صورت « توسعه‌ای که نیازهای فعلی را بدون به‌خطرانداختن توانایی نسل‌های آینده برآورده کند» نیز تعریف شده است. اهداف اصلی پایداری شامل اهداف اقتصادی، پاکیزگی محیطی و مسئولیت اجتماعی است [۴۵]. تولید سبز شامل اقدامات زیست‌محیطی و فرآیندهای تولید سازگار با محیط‌زیست است [۱۴]. بسیاری از شرکت‌ها، سیستم‌های مدیریت زیست‌محیطی و پایداری خاصی مانند کارت امتیازی متوازن پایدار<sup>۱</sup> (SBSC) را اجرا کرده‌اند که در آن، پایداری در کارت امتیازی متوازن سنتی (BSC) لحاظ شده است [۱۸]؛ از این رو یکی از مدل‌های رایج ارزیابی عملکرد نیروگاه‌ها در راستای تولید پایدار و سبز، SBSC بوده که شامل ۵ منظر مالی، زیست‌محیطی، پایداری، فرآیندهای داخلی و رشد و یادگیری است [۴۶]. در SBSC، منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها (عناصر) یک ساختار سلسله‌مراتب تشکیل می‌دهند و فرض مساوی بودن وزن عناصر در هر سطح وجود دارد (شکاف دوم پژوهش). این فرض لزوماً در مسائل واقعی برقرار نیست؛ از این رو برای رفع این نقیصه می‌توان از روش‌ها و تکنیک‌های حل مسائل

تصمیم‌گیری چندشاخصه<sup>۱</sup> برای تعیین وزن عناصر استفاده کرد. از جمله مشهورترین این تکنیک‌ها، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۲</sup> (AHP) است که در دهه ۱۹۷۰ توسط ساعتی<sup>۳</sup> معرفی شد [۳]. روش بهترین - بدترین<sup>۴</sup> (BWM) توسط رضایی (۲۰۱۵)، ارائه شد و یکی از جدیدترین روش‌های تعیین وزن شاخص‌ها در مسائل تصمیم‌گیری چندشاخصه محسوب می‌شود. این روش نسبت به روش AHP، به داده‌های مقایسه‌ای کمتری نیاز دارد و به مقایسه‌های سازگارتر منجر می‌شود؛ بدین معنی که نتایج قابل‌اعتمادتری ایجاد می‌کند [۳۲]. در این روش به زمان کمتری برای انجام مقایسات زوجی نیاز است [۲۷]؛ از این رو در روش پیشنهادی پژوهش حاضر از BWM استفاده شده است.

برای اطمینان از قابل‌قبول بودن وزن شاخص‌های محاسبه‌شده توسط BWM، به محاسبه نرخ سازگاری<sup>۵</sup> نیاز بوده و استفاده از جداول استاندارد آستانه قابل‌قبول نرخ سازگاری<sup>۶</sup> در این خصوص راهگشا است [۳۲، ۲۴]. در جداول آستانه قابل‌قبول نرخ سازگاری، آستانه قابل‌قبول برای مسائل با حداکثر ۹ شاخص ارائه شده است. در شرایطی که مسئله بیش از ۹ شاخص داشته باشد، امکان استفاده از جداول مزبور و در نتیجه امکان اطمینان از قابل‌اعتماد بودن وزن‌های محاسبه‌شده وجود ندارد (شکاف سوم پژوهش)؛ بنابراین طبقه‌بندی و تشکیل ساختار سلسله‌مراتب عناصر برای مسئله‌های با بیش از ۹ شاخص می‌تواند مفید باشد؛ از این رو لازم است نحوه تشکیل، گسترش و بهبود ساختار سلسله‌مراتب عناصری مانند SBSC به‌منظور تعیین وزن عناصر مربوطه توسط BWM مشخص باشد (شکاف چهارم پژوهش). از طرف دیگر BWM سلسله‌مراتبی روشی شناخته‌شده برای محاسبه وزن عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی بوده و مبتنی بر محاسبه وزن‌های اولیه<sup>۷</sup> و نهایی<sup>۸</sup> عناصر است. در روش مزبور، تعیین وزن نهایی عناصر مستلزم محاسبه وزن اولیه عنصر موردنظر و همچنین اطلاع‌داشتن از وزن اولیه کلیه عناصر سطوح بالادستی است (شکاف پنجم پژوهش).

در این پژوهش به‌منظور پرکردن شکاف‌های ذکرشده، ابتدا مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM معرفی می‌شود؛ سپس با استفاده از مفاهیم طراحی ساختار سلسله‌مراتبی در AHP ([۳۶ و ۵])، چهار ویژگی ساختار مطلوب کاربردی عناصر تعریف خواهد شد. در ادامه با استفاده از رویکردهای تحلیلی و سیستمی، مدل وزن‌دهی پیشنهادی، چهار ویژگی ساختار مطلوب و احتساب آستانه قابل‌قبول  $CR^I$  و  $CR^O$ ، الگوریتمی برای طراحی ساختار

- 
1. Multiple Attribute Decision Making
  2. Analytic Hierarchy Process
  3. Saaty
  4. Best Worst Method
  5. Consistency Ratio
  6. Consistency Ratio Thresholds
  7. Local
  8. Global

K سطحی وزن‌دار عناصر مسائلی مانند SBSC ارائه می‌شود؛ سپس الگوریتم پیشنهادی به منظور ساختاردهی و وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی کشور بر اساس SBSC در راستای تولید پایدار و سبز و با تأکید بر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی اجرا می‌شود. در این راستا فهرست مناسبی از شاخص‌های تولید پایدار و سبز منطبق با نیروگاه‌های حرارتی کشور تهیه شد. در انتها، نتیجه‌گیری پژوهش ارائه شده است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

**تولید پایدار و سبز:** مفهوم تولید پایدار برای نخستین بار در سال ۱۹۹۲ در «کنفرانس محیط‌زیست و توسعه سازمان ملل متحد» ارائه شد. مفهوم یادشده ارتباطی نزدیک با مفهوم توسعه پایدار دارد. تولید پایدار به معنای تولید کالا و خدمات با استفاده از فرآیندها و سیستم‌های غیرآلاینده، با صرفه در انرژی و منابع طبیعی، بادوام از لحاظ اقتصادی و ایمن و سالم برای کارگران، جوامع و مصرف‌کنندگان است؛ بنابراین اصول تولید پایدار بر ارتباط بین سیستم‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی مرتبط با تولید و مصرف تأکید دارند [۴۳]. عوامل مختلف زیست‌محیطی مربوط به پایداری شامل منابع طبیعی، انرژی، آلودگی و ضایعات هستند [۲]. از طرف دیگر تولیدات سبز، نوعی نوآوری سازگار با محیط‌زیست هستند که اغلب شامل بهره‌وری انرژی، بازیافت، نگرانی‌های ایمنی و بهداشتی، منابع تجدیدپذیر و غیره است [۲۸]. برای تولید پایدار، پایداری محیط‌زیست به‌تنهایی کافی نیست؛ بنابراین برای تولید پایدار مناسب باید دیدگاه‌های اقتصادی و اجتماعی نیز در نظر گرفته شود [۲۵]؛ از این رو به شرکت‌ها توصیه می‌شود که با کاهش استفاده از منابع و اجتناب از مسائل اجتماعی در کل چرخه عمر فرآیندها و محصولات، سود خالص فعالیت‌های اقتصادی را افزایش دهند [۴۵]. در مجموع، سیستم تولید پایدار و سبز شامل ایجاد توازن بین تلاش‌های جهانی و منطقه‌ای برای برآورده کردن نیازهای مشتریان بدون ایجاد مزاحمت برای طبیعت است [۴۲].

**SBSC:** کاپلان و نورتون<sup>۱</sup> با درک الزامات سازمان‌های مدرن و برای اجرای مؤثر استراتژی و ایجاد یک سیستم جامع بهبود عملکرد و مدیریت، در سال ۱۹۹۲ سیستم مدیریت BSC را معرفی کردند. این سیستم به‌عنوان یک چارچوب جامع ارزیابی عملکرد و پیشرفت استراتژی، تعادل بین اهداف کوتاه‌مدت و بلندمدت را برقرار می‌کند [۱۱]؛ همچنین این مدل استراتژی و چشم‌انداز سازمان را به چهار منظر رشد و یادگیری، فرآیندهای داخلی، مشتریان و مالی ترجمه می‌کند [۲۱]. برای برطرف کردن برخی کمبودها در مدل BSC، فیگه<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۲)، با

1. Kaplan and Norton

2. Figge

افزودن جنبه‌های اجتماعی و محیطی سازمان برای پایداری عملکرد به چهار منظر BSC، SBSC را ارائه کردند؛ بنابراین در این مدل امکان در نظر گرفتن عوامل استراتژیک غیرمالی مؤثر بر موفقیت اقتصادی یک سازمان نیز وجود دارد. SBSC نشان‌دهنده رابطه کمی بین عملکرد اقتصادی، محیطی و اجتماعی یک شرکت است [۱۶]. از طرف دیگر در سال‌های اخیر، توجه به مسئولیت اجتماعی و توسعه پایدار به موضوعات مهمی تبدیل شده‌اند [۲۶]. علی‌رغم آنکه محیط سازمان در حفظ توسعه پایدار نقش دارد، BSC فقط بر مدیریت داخلی سازمان متمرکز بوده و محیط سازمان را نادیده می‌گیرد؛ بنابراین برخی از پژوهشگران شاخص‌های پایداری را در چارچوب مفهومی BSC وارد کرده‌اند؛ درحالی‌که برخی دیگر شاخص‌های بهره‌وری محیط‌زیست را در BSC قرار داده‌اند [۲۳]؛ پس می‌توان SBSC را شامل ۵ منظر مالی، زیست‌محیطی، پایداری، فرآیندهای داخلی و رشد و یادگیری در نظر گرفت [۴۶].

**پیشینه پژوهش:** ابتدا پژوهش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد نیروگاه‌ها با استفاده از ساختاردهی و وزن‌دهی به شاخص‌های شناسایی شده ارائه می‌شود. گیو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، اجرای سیستم ارزیابی عملکرد در شرکت‌های تولیدکننده برق با استفاده از BSC را بررسی کردند [۱۷]. چتیمورتادیس و پیلاوچی<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، با معرفی ۱۲ معیار و ۱۳ سناریو، به صورت کلی تأثیر ۱۰ نوع اصلی نیروگاه‌های برق بر سطح زندگی مردم را ارزیابی کردند [۷]. آتماکا و باسر<sup>۳</sup> (۲۰۱۲)، با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای<sup>۴</sup>، عملکرد شش نیروگاه مختلف کشور ترکیه در راستای تأمین انرژی پاک و مطمئن با توجه به معیارهای اصلی مانند فناوری و پایداری، مناسب بودن اقتصادی، کیفیت زندگی و تأثیرات اقتصادی - اجتماعی را ارزیابی کردند [۴]. رولدان<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، نسبت به ارزیابی انواع نیروگاه‌ها در مکزیک با استفاده از AHP و بر اساس چرخه عمر و معرفی شاخص‌های پایداری نیروگاه‌های برق اقدام کردند [۳۵]. ژائو و لی<sup>۶</sup> (۲۰۱۵)، برای ارتقای توسعه پایدار، یک چارچوب ترکیبی جدید به منظور ارزیابی عملکرد شرکت‌های تولیدکننده برق حرارتی از منظر پایداری با استفاده از SBSC ارائه دادند. در این پژوهش ۲۲ معیار نهایی با استفاده از روش دلفی فازی شناسایی شد؛ سپس وزن معیارهای ارزیابی از طریق فرآیند تحلیل شبکه‌ای محاسبه و برای اولویت‌بندی از روش تاپسیس<sup>۷</sup> فازی استفاده شد [۴۶]. جهانگشایی رضایی و همکاران (۲۰۱۵)، رویکردی یکپارچه برای اندازه‌گیری

1. Guo

2. Chatzimouratidis and Pilavachi

3. Atmaca and Basar

4. Analytic network process

5. Roldán

6. Zhao and Li

7. TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

عملکرد ساختار شبکه ارائه دادند و آن را در نیروگاه‌ها به کار گرفتند. آن‌ها با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۱</sup> و BSC، معیارها را دسته‌بندی و عملکرد را اندازه‌گیری کردند [۲۰]. اوزکوره<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، تبدیل شدن یک نیروگاه برق حرارتی در ترکیه را به یک شرکت انرژی پایدار با لحاظ کردن مفاهیم BSC بررسی و امکان‌سنجی کردند [۳۱]. ویودی و چاکرابورتی<sup>۳</sup> (۲۰۱۶)، ابزارهای مدیریت استراتژیک در نیروگاه حرارتی را با استفاده از مدل‌های هزینه‌یابی مبتنی بر فعالیت<sup>۴</sup> و BSC توسعه دادند. آن‌ها این دو مدل را به صورت جداگانه در یک نیروگاه حرارتی در هند به کار گرفته و بیان کردند که نتایج می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و تاکتیکی مفید واقع شود [۱۲]. سنجرانی‌پور<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، اجزای مؤثر بر افزایش بهره‌وری پایدار نیروگاه‌های حرارتی کشور (با تأکید بر آلودگی هوا) را با استفاده از SBSC شناسایی کردند [۴۰]. نیک‌خواه و همکاران (۲۰۱۷)، اجرای استراتژی در نیروگاه نکا را با استفاده از BSC و AHP ارزیابی کردند [۲۹]. زو و جیائو<sup>۶</sup> (۲۰۱۹)، به ایجاد و استفاده از سیستم ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی شرکت تولید برق Y بر اساس BSC پرداختند [۴۴]. دهقانی و عباسی (۲۰۲۱)، عملکرد شرکت‌های تولید برق حرارتی را با استفاده از تلفیق الگوریتم پیشنهادی BWM قابل‌اعتماد و مدل BSC در یک نیروگاه حرارتی سیکل ترکیبی کشور ارزیابی کردند [۹].

از BWM برای تعیین وزن شاخص‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند زنجیره تأمین، ارزیابی کیفیت، ارزیابی ریسک، فناوری، حمل‌ونقل و ارزیابی عملکرد استفاده شده است [۲۷]. اسماعیلیان و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده از BWM و روش تاپسیس، روش مناسبی برای تعیین استراتژی مناسب خرید بر اساس رویکرد پرتفولیوی خرید ارائه دادند [۱۵]. با توجه به اینکه محیط کسب‌وکار باعث ایجاد عدم‌اطمینان و رفتارهای آشفته در زنجیره‌های تأمین شده است، جعفرنژاد چقوشی و همکاران (۱۳۹۵)، شاخص‌های ارزیابی تاب‌آوری تأمین‌کنندگان «گروه صنعتی اورند» را با استفاده از BWM به‌عنوان روشی نوین در تصمیم‌گیری چندشاخصه شناسایی و اولویت‌بندی کردند [۱۹]. صادقی دروازه و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از تلفیق روش حداقل مربعات جزئی<sup>۷</sup>، BWM و AHP فازی به ارزیابی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در رقابت‌پذیری زنجیره تأمین در صنعت لاستیک‌سازی پرداختند [۳۷]. از روش BWM به صورت سلسله‌مراتبی نیز استفاده شده است. در این خصوص رضایی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از BWM سلسله‌مراتبی، کیفیت سیستم‌های حمل بار هواپیما را با احتساب ابعاد کیفیت خدمات

---

1. DEA: Data Envelopment Analysis

2. Özcüre

3. Dwivedi and Chakraborty

4. ABC: Activity Based Costing

5. Sanjaranipour

6. Xu and Jiao

7. PLS: Partial Least Squares

به‌عنوان شاخص اصلی و زیرشاخص‌های مربوط به این ابعاد ارزیابی کردند؛ سپس وزن نهایی هر زیرشاخص از ضرب وزن اولیه زیرشاخص در وزن نهایی شاخص اصلی مرتبط محاسبه شد [۳۴]. شهبازخان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، ریسک در مدیریت زنجیره تأمین حلال را با استفاده از BWM فازی سلسله‌مراتبی ارزیابی کردند. در این پژوهش ۴۲ عنصر خطرناک زنجیره تأمین حلال شناسایی شده با نظر گروه خبره، در هفت بُعد دسته‌بندی شد؛ سپس از طریق الگوریتم ارائه‌شده ابعاد و عناصر ریسک مرتبط اولویت‌بندی شد [۲۲]. سلیمی و رضایی (۲۰۱۸)، عملکرد بخش تحقیق و توسعه شرکت‌های کوچک تا متوسط را با استفاده از تلفیق BWM سلسله‌مراتبی و BSC ارزیابی کردند [۳۹]. ویودی و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد یک شرکت بیمه را با استفاده از ترکیب BWM و BSC، ارزیابی کردند [۱۳].

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، الگوریتم مناسبی برای دسته‌بندی و ساختاردهی عناصر مسئله‌ها و تعیین وزن قابل‌اطمینان آن‌ها با استفاده از BWM یافت نشد. در ادامه نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر و توضیحات مختصر هر نوآوری آورده شده است:

*الف) ارائه الگوریتم ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر مسئله‌ها با استفاده از BWM:* در روش شناخته شده BWM سلسله‌مراتبی، برای هر عنصر وزن‌های اولیه و نهایی محاسبه می‌شود. در این خصوص ابتدا وزن اولیه عناصر موردنظر در ساختار با استفاده از مدل BWM عادی محاسبه می‌شود؛ سپس وزن نهایی هر عنصر از طریق ضرب کردن وزن اولیه عنصر موردنظر در وزن اولیه تمامی عناصر سطوح بالادستی به‌دست می‌آید؛ از این‌رو محاسبه وزن نهایی هر عنصر در BWM سلسله‌مراتبی مستلزم داشتن وزن اولیه عنصر موردنظر و وزن اولیه عناصر سطوح بالادستی است؛ بنابراین هر چه عنصر موردنظر در سطح پایین‌تری از سلسله‌مراتب واقع باشد، محاسبه وزن نهایی مستلزم اطلاع‌داشتن از وزن اولیه تعداد بیشتری از عناصر سطوح بالادستی علاوه بر وزن اولیه عنصر موردنظر است. این موضوع به افزایش حجم محاسبات، به‌خصوص برای محاسبه وزن نهایی عناصر واقع در سطوح پایین سلسله‌مراتب، منجر خواهد شد. مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM به‌گونه‌ای طراحی شده است که با استفاده از وزن نهایی عنصر بالادستی در ساختار سلسله‌مراتبی، مستقیماً وزن نهایی عنصر موردنظر (بدون نیاز به محاسبه وزن اولیه) محاسبه می‌شود. این موضوع کاهش حجم محاسبات را به‌دنبال دارد.

در الگوریتم ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر مسئله‌ها با استفاده از BWM، ابتدا با ایده‌گرفتن از مفاهیم طراحی ساختار سلسله‌مراتبی در AHP و همچنین محدودیت تعداد عناصر برای محاسبه سازگاری BWM، چهار ویژگی ساختار مطلوب کاربردی عناصر تعریف می‌شود؛ سپس برای تعیین وزن عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی از مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در



ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM استفاده می‌شود. به منظور کاهش حجم محاسبات در الگوریتم پیشنهادی، محاسبه  $CR^0$  و  $CR^1$  و مقایسه آن با حد آستانه‌های قابل قبول در نظر گرفته شده است. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند با به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی و سیستمی، ساختار سلسله‌مراتب در سطح مناسب تفصیل (خیلی مختصر یا خیلی مفصل نباشد) به همراه وزن عناصر را ارائه دهد.

ب) استخراج فهرست مناسبی از شاخص‌های تولید پایدار و سبز منطبق با نیروگاه‌های حرارتی کشور با تأکید بر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی: با استفاده از مرور مبانی نظری و نظرهای اعضای گروه خبره، فهرست مناسبی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد کاربردی متناسب با نیروگاه‌های حرارتی کشور تهیه شد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است؛ همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش هم‌زمان از داده‌های کمی و کیفی و ابزارهای مربوطه استفاده شده است، نوع روش پژوهش، روش ترکیبی کمی و کیفی است.

اطلاعات نظری پژوهش از روش کتابخانه‌ای و سایر اطلاعات موردنیاز از روش میدانی جمع‌آوری شده است. در این خصوص عناصر شامل منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها با استفاده از مرور مبانی نظری شناسایی و با استفاده از نظرهای اعضای گروه خبره نهایی شد؛ همچنین اطلاعات مرتبط با محاسبه وزن عناصر طی برگزاری چند جلسه و با استفاده از فرم استاندارد اخذ اطلاعات BWM ([۳۰ و ۳۲]) جمع‌آوری شد. تجزیه و تحلیل اطلاعات با استفاده از نرم‌افزارهای لینگو و اکسل صورت گرفت. برای تعیین اعضای گروه خبره از روش نمونه‌گیری گلوله برفی<sup>۱</sup> استفاده شد [۸]. در این خصوص پس از تعیین اعضای اولیه گروه خبره، اعضای اولیه نسبت به معرفی افراد جدید مناسب برای پژوهش اقدام نمودند. این فرآیند تا زمانی ادامه یافت که فرد جدیدی توسط اعضا معرفی نشد. در این حالت گروه خبره نهایی تلقی شد.

به‌منظور ارائه الگوریتم ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر مسئله‌ها باید برخی مفاهیم تشریح شوند. در ادامه مفاهیم موردنظر آورده می‌شود.

**طراحی ساختار سلسله‌مراتبی در AHP:** برای تجزیه و تحلیل و حل مسائل از رویکرد تحلیلی یا سیستمی استفاده می‌شود. اساساً رویکرد تحلیلی بر بخش‌ها تمرکز می‌کند؛ درحالی‌که رویکرد سیستمی بر کارکرد کل تمرکز دارد. استفاده از رویکردهای تحلیلی و سیستمی برای تفکیک

بخش‌های مختلف به بخش‌های کوچک‌تر با لحاظ کردن ارتباط منطقی بین آن‌ها، باعث شکل‌گیری سلسله‌مراتب AHP می‌شود. در بالاترین سطح سلسله‌مراتب AHP، هدف در پایین‌ترین سطح، گزینه‌ها و در سطوح میانی، معیارها قرار می‌گیرند. تشکیل ساختار سلسله‌مراتب مناسب AHP باعث سازمان‌دهی و درک دانش سازمانی و کاهش پیچیدگی‌های یک سیستم برای تصمیم‌گیری می‌شود [۳۶]. برخی پژوهشگران رویکرد تحلیلی را معادل رویکرد قیاسی و رویکرد سیستمی را معادل رویکرد استقرایی در نظر گرفته‌اند [۵].

سلسله‌مراتب، ابزاری اساسی برای ذهن انسان بوده و دربرگیرنده تشخیص عناصر مسئله و گروه‌بندی عناصر به صورت مجموعه‌هایی همسان و تنظیم این مجموعه‌ها در سطوح مختلف است. دو نوع سلسله‌مراتب ساختاری و کاربردی وجود دارد. در سلسله‌مراتب ساختاری، سیستم‌های پیچیده بر اساس خواص ساختاری مانند اندازه، شکل و رنگ به بخش‌های سازنده خود به ترتیب نزولی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ مانند سیستم ساختاری جهان که از کهکشان تا سیارات و غیره پایین می‌آید. سلسله‌مراتب کاربردی سیستم‌های پیچیده را به بخش‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها بر اساس روابط ضروری تجزیه می‌کند. در این نوع سلسله‌مراتب بالاترین سطح، «تمرکز یا کانون توجه» نامیده می‌شود که تنها از یک عنصر تشکیل شده است و هدف کلی سلسله‌مراتب را نشان می‌دهد. سطوح بعدی ممکن است دارای چندین عنصر باشند [۳۶]. در ساختار پژوهش حاضر از سلسله‌مراتب کاربردی AHP استفاده شده و گزینه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

در تعیین سلسله‌مراتب یک مسئله هیچ محدودیتی برای تعداد سطوح وجود ندارد. عناصر هر سطح باید نسبت به سطح بالاتر قابل مقایسه باشند. اگر این امر امکان‌پذیر نبود، باید سطوح میانی جدیدی در نظر گرفته شود؛ همچنین سلسله‌مراتب تشکیل شده عناصر باید انعطاف‌پذیر باشد؛ به عبارتی همیشه می‌توان آن‌ها را با معیارهای جدید تطبیق داد [۳۶].

**BWM**. مدل اصلی BWM (مدل ۱) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی است که توسط رضایی (۲۰۱۵) ارائه شد.

$\min \xi$

s.t:

$$\left| \frac{w'_B}{w'_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \quad (1)$$

$$\left| \frac{w'_j}{w'_w} - a_{jw} \right| \leq \xi, \forall j$$

$$\sum_j w'_j = 1$$

$$w'_j \geq 0, \forall j$$

گام‌های تشکیل و حل مدل اصلی BWM به شرح زیر است:

گام ۱: مجموعه شاخص‌های تصمیم‌گیری به صورت  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  تعریف می‌شود.

گام ۲: بهترین شاخص (B) و بدترین شاخص (W) مشخص می‌شود.

گام ۳: ارجحیت بهترین شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها  $(a_{Bj})$  با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود.

گام ۴: ارجحیت سایر شاخص‌ها نسبت به بدترین شاخص  $(a_{jW})$  با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود.

گام ۵: با تشکیل و حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی ۱، مقادیر بهینه وزن شاخص‌ها  $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$  محاسبه می‌شود [۳۲].

با توجه به ساده‌تر بودن حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی نسبت به برنامه‌ریزی غیرخطی، تلاش‌هایی برای ارائه روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و حل برنامه‌ریزی خطی انجام شده است. در این خصوص می‌توان به پژوهش دهقانی و عباسی (۲۰۲۱)، اشاره کرد که در آن الگوریتمی برای حل مدل غیرخطی با استفاده از حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است [۱۰]. عباسی و دهقانی (۲۰۲۲) همچنین با بهبود الگوریتم قبلی، الگوریتمی ارائه کردند که با حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی کمتر جواب مدل غیرخطی را به دست آورد [۱]. از روش‌های مزبور می‌توان در گام ۵ استفاده کرد.

**بررسی قابل قبول بودن نتایج BWM.** برای اطمینان از قابل قبول بودن نتایج BWM، نرخ سازگاری با استفاده از  $\xi^*$  (مقدار بهینه تابع هدف مدل ۱) و مقدار شاخص سازگاری  $\xi_{max}$  یا جدول ۱، طبق رابطه ۲، محاسبه می‌شود [۳۲]. مقدار نرخ سازگاری، عددی بین صفر و یک است. هر چه نرخ سازگاری به صفر نزدیک‌تر باشد، سازگاری بیشتر و هر چه نرخ سازگاری به یک نزدیک‌تر باشد، سازگاری کمتر است [۳۳].

$$CR^O = \frac{\xi^*}{\xi_{max}} \quad (2)$$

شاخص‌های سازگاری

جدول ۱. شاخص‌های سازگاری BWM [۳۲]

abw	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$(\xi_{max})$	۰/۱۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۶۳	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۳	۴/۴۷	۵/۲۳

در خصوص بررسی نرخ سازگاری در مدل متعارف BWM ذکر دو نکته حائز اهمیت است:

۱. اگر نرخ ناسازگاری صفر باشد، نتایج سازگار و قابل اعتماد است؛ اما اگر نرخ سازگاری صفر نباشد، آستانه قابل قبولی برای نرخ سازگاری ارائه نشده و مشخص نیست که چگونه می‌توان به صورت دقیق در خصوص سازگار بودن نتایج قضاوت کرد. در این خصوص تنها گفته شده که هر چه نرخ سازگاری به صفر نزدیک‌تر باشد، سازگاری بیشتر و هر چه نرخ سازگاری به یک نزدیک‌تر باشد، سازگاری کمتر است.

۲. بررسی سازگاری فقط بعد از تشکیل و حل مدل ۱ امکان‌پذیر است. در سال ۲۰۲۰ روش‌های بررسی سازگاری و محاسبه آستانه قابل قبول نرخ سازگاری توسط لیانگ<sup>۱</sup> و همکاران ارائه شد. در این پژوهش بیان شده است که سازگاری می‌تواند مبتنی بر ورودی ( $CR^I$ ) و یا خروجی ( $CR^O$ ) اندازه‌گیری شود.  $CR^O$  همان نرخ سازگاری در مدل BWM اصلی است.  $CR^I$  بر اساس ارجحیت‌های مقایسات زوجی محاسبه می‌شود؛ بنابراین پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مقایسات زوجی، به تعداد شاخص‌های هر مسئله،  $CR^I$  طبق رابطه ۳ محاسبه و حداکثر  $CR^I$  به عنوان  $CR^I$  آن مسئله لحاظ می‌شود.

$$CR^I = \max_j CR_j^I$$

$$CR_j^I = \begin{cases} \frac{|a_{Bj} \times a_{jw} - a_{Bw}|}{a_{Bw} \times a_{Bw} - a_{Bw}} & a_{Bw} > 1 \\ 0 & a_{Bw} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

استفاده از  $CR^I$  مزایای زیادی دارد. از جمله مزایای  $CR^I$ ، ارائه بازخورد فوری است؛ بدین معنای که برای محاسبه آن به حل مدل ۱ نیاز نیست. مزیت بعدی مستقل بودن از نوع مدل است؛ یعنی  $CR^I$  را می‌توان برای اندازه‌گیری سطح سازگاری در سایر مدل‌های BWM (علاوه بر مدل ۱) استفاده کرد.

لیانگ و همکاران (۲۰۲۰)، برای اطمینان از نتایج به دست آمده از BWM، مقادیر آستانه قابل قبول نرخ سازگاری را برای مسائل مختلف (با توجه به تعداد شاخص‌ها و مقدار ارجحیت بهترین شاخص نسبت به بدترین شاخص ( $a_{Bw}$ )) ارائه کردند. در این خصوص با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۲</sup>، مقادیر جداول آستانه قابل قبول مربوط به  $CR^O$  و  $CR^I$  مطابق جدول - های ۲ و ۳، محاسبه شده است. به منظور بررسی قابل اطمینان بودن نتایج، ابتدا نرخ سازگاری مسئله مورد نظر با توجه به روابط ۲ و ۳، محاسبه می‌شود؛ سپس مقدار محاسبه شده با آستانه

1. Liang  
2. Monte-Carlo

قابل قبول مستخرج از جدول‌های ۲ و ۳ مقایسه می‌شود. در صورتی که نرخ سازگاری کوچک‌تر از آستانه قابل قبول باشد، نتایج قابل قبول است؛ در غیر این صورت به ارزیابی مجدد مقایسات زوجی نیاز است. یادآوری این نکته لازم است که ضریب همبستگی بالایی بین  $CR^1$  و  $CR^0$  گزارش شده است [۲۴]؛ بنابراین با استفاده از  $CR^1$  می‌توان قبل از تشکیل و حل مدل  $BWM$ ، با احتمال زیاد از سازگاری نتایج اطمینان حاصل کرد. در این خصوص در صورت سازگار نبودن  $CR^1$ ، تکرار تمامی گام‌های  $BWM$  ضروری نبوده و کافی است در داده‌های ورودی تجدیدنظر شود. این ویژگی می‌تواند به کاهش حجم محاسبات منجر شود؛ همچنین استفاده از  $CR^0$  به افزایش اعتماد به نتایج منجر می‌شود.

جدول ۲. آستانه قابل قبول ترکیبات مختلف اندازه‌گیری سازگاری مبتنی بر ورودی  $CR^1$  [۲۴]

		تعداد شاخص						
		۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$BWM$	۳	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷
	۴	۰/۱۱۲۱	۰/۱۵۲۹	۰/۱۸۹۸	۰/۲۲۰۶	۰/۲۵۲۷	۰/۲۵۷۷	۰/۲۶۸۳
	۵	۰/۱۳۵۴	۰/۱۹۹۴	۰/۲۳۰۶	۰/۲۵۴۶	۰/۲۷۱۶	۰/۲۸۴۴	۰/۲۹۶۰
	۶	۰/۱۳۳۰	۰/۱۹۹۰	۰/۲۶۴۳	۰/۳۰۴۴	۰/۳۱۴۴	۰/۳۲۲۱	۰/۳۲۶۲
	۷	۰/۱۲۹۴	۰/۲۴۵۷	۰/۲۸۱۹	۰/۳۰۲۹	۰/۳۱۴۴	۰/۳۲۵۱	۰/۳۳۰۳
	۸	۰/۱۳۰۹	۰/۲۵۲۱	۰/۲۹۵۸	۰/۳۱۵۴	۰/۳۴۰۸	۰/۳۶۲۰	۰/۳۶۵۷
	۹	۰/۱۳۵۹	۰/۲۶۸۱	۰/۳۰۶۲	۰/۳۳۳۷	۰/۳۵۱۷	۰/۳۶۲۰	۰/۳۶۶۲

جدول ۳. آستانه قابل قبول ترکیبات مختلف اندازه‌گیری سازگاری مبتنی بر خروجی  $CR^0$  [۲۴]

		تعداد شاخص						
		۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
$BWM$	۳	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷	۰/۲۰۸۷
	۴	۰/۱۵۸۱	۰/۲۳۵۲	۰/۲۷۳۸	۰/۲۹۲۸	۰/۳۱۰۲	۰/۳۱۵۴	۰/۳۲۷۳
	۵	۰/۲۱۱۱	۰/۲۸۴۸	۰/۳۰۱۹	۰/۳۳۰۹	۰/۳۴۷۹	۰/۳۶۱۱	۰/۳۷۴۱
	۶	۰/۲۱۶۴	۰/۲۹۲۲	۰/۳۵۶۵	۰/۳۹۲۴	۰/۴۰۶۱	۰/۴۱۶۸	۰/۴۲۲۵
	۷	۰/۲۰۹۰	۰/۳۳۱۳	۰/۳۷۳۴	۰/۳۹۳۱	۰/۴۰۳۵	۰/۴۱۰۸	۰/۴۲۹۸
	۸	۰/۲۲۶۷	۰/۳۴۰۹	۰/۴۰۲۹	۰/۴۲۳۰	۰/۴۳۷۹	۰/۴۵۴۳	۰/۴۵۹۹
	۹	۰/۲۱۲۲	۰/۳۶۵۳	۰/۴۰۵۵	۰/۴۲۲۵	۰/۴۴۴۵	۰/۴۵۸۷	۰/۴۷۴۷

در ادامه با توجه به مطالب ذکر شده «مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در سلسله‌مراتب» برای «تعیین وزن شاخص‌های مسائل دارای ساختار سلسله‌مراتبی» ارائه می‌شود.

مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از **BWM**. در مطالعاتی که برخی شاخص‌های اصلی دارای زیرشاخص هستند، وزن هر زیرشاخص به صورت اولیه محاسبه شده است؛ سپس برای به‌دست‌آوردن وزن نهایی هر زیرشاخص از ضرب وزن اولیه زیرشاخص در وزن نهایی شاخص اصلی مرتبط محاسبه شده است [۲۲، ۳۴]. این روش «**BWM** سلسله‌مراتبی» نامیده می‌شود؛ به عبارت دیگر در این روش، وزن اولیه محاسبه‌شده شاخص‌های اصلی (سطح ۲) همان وزن نهایی شاخص مربوطه است. وزن نهایی شاخص‌های سطح سه به بعد، از حاصل ضرب وزن اولیه شاخص‌های مرتبط سطوح قبل در وزن اولیه شاخص مربوطه محاسبه می‌شود.

زمانی که مسئله‌ای بیش از ۹ شاخص داشته باشد، برای امکان استفاده از آستانه قابل قبول ارائه‌شده توسط لیانگ و همکاران (۲۰۲۰) و اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی می‌تواند مناسب باشد [۲۴]؛ همچنین برای محاسبه وزن شاخص‌ها می‌توان از **BWM** سلسله‌مراتبی استفاده کرد. در اینجا با توجه به قضیه زیر، روشی برای محاسبه وزن عناصر مسائل مانند عناصر **SBSC** (شامل منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها) توسط **BWM** در یک ساختار مشخص ارائه می‌شود.

**قضیه ۱ (مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از **BWM**):** فرض کنید تعیین وزن بهینه عناصر یک ساختار مدنظر باشد. در صورتی که وزن عنصر بالادستی عناصر موردنظر  $S$  در نظر گرفته شود ( $0 < S \leq 1$ )، وزن بهینه عناصر را می‌توان با حل مدل ۴، تعیین کرد.

$$\begin{aligned} & \min \xi \\ & \text{s.t:} \\ & \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \\ & \left| \frac{w_j}{w_w} - a_{jw} \right| \leq \xi, \forall j \\ & \sum_j w_j = S \\ & w_j \geq 0, \forall j \end{aligned} \tag{۴}$$

*اثبات قضیه ۱:* در وضعیتی که تعیین وزن عناصر سطح ۲ ساختار مدنظر باشد، وزن عنصر بالادستی یک است ( $S=1$ ). در این وضعیت با احتساب  $S=1$  و تغییر متغیر  $w_j = w'_j \forall j$  در مدل ۱، مدل ۴ حاصل می‌شود؛ از این‌رو حل آن به تعیین وزن‌های بهینه عناصر موردنظر منتج

خواهد شد. در وضعیتی که  $0 < S < 1$  باشد، مطابق BWM سلسله‌مراتبی، وزن زیرعناصر با تقسیم وزن عناصر حاصل از مدل ۱ ( $w'_j \forall j$ ) بر  $S$  حاصل می‌شود. در صورتی که وزن زیرعناصر  $w_j \forall j$  نامیده شود، داریم  $w_j = w'_j / S \forall j$ . با احتساب تغییر متغیر  $w'_j = Sw_j \forall j$  در مدل ۱ و ضرب طرفین نامساوی محدودیت آخر در مقدار مثبت  $S$ ، مدل ۴ حاصل می‌شود؛ از این رو در وضعیتی که  $0 < S < 1$  باشد نیز مدل ۴ معادل مدل ۱ است و حل آن به تعیین وزن بهینه زیرعناصر منتج خواهد شد؛ بنابراین قضیه ۱ اثبات شد.

قابل توجه آنکه با توجه به قضیه ۱، مقدار تابع هدف مدل‌های ۱ و ۴ یکسان، اما مقدار وزن‌های بهینه عناصر در مدل ۱،  $S$  برابر مقدار وزن بهینه عناصر در مدل ۴ است. محاسبه وزن عناصر ساختار با استفاده از مدل ۴، به جای استفاده از BWM سلسله‌مراتبی (مبتنی بر حل مدل ۱ است) باعث به دست آمدن وزن نهایی شاخص‌ها به صورت مستقیم شده که این امر باعث کاهش حجم محاسبات می‌شود. از طرف دیگر برخلاف BWM سلسله‌مراتبی، برای محاسبه وزن شاخص‌ها با به کارگیری مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM در هر سطح کافی است که وزن نهایی عنصر بالادستی  $S$  مشخص باشد. در این صورت نیازی به دانستن وزن اولیه عناصر سطوح بالاتر نیست. در نهایت با توجه به مطالب تشریح شده، الگوریتم ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر مسئله‌ها تشریح می‌شود.

**الگوریتم ساختاردهی و وزن‌دهی به عناصر مسئله‌ها.** هیچ قانون مطمئنی برای ساخت سلسله‌مراتب کاربردی عناصر در AHP وجود ندارد و رویکرد اشخاص برای ساخت سلسله‌مراتب به نوع تصمیم‌گیری آن‌ها بستگی دارد [۳۶]؛ با این حال می‌توان مشابه ساخت سلسله‌مراتب کاربردی AHP، برای طراحی ساختار سلسله‌مراتبی کاربردی عناصر از دو رویکرد تحلیلی و سیستمی استفاده کرد. از آنجاکه در مسئله مورد بررسی در پژوهش حاضر بررسی گزینه‌ها موضوعیت ندارد، احتساب گزینه‌ها در ساختار لازم نیست؛ همچنین از آنجاکه رویکرد افراد برای ساخت سلسله‌مراتب کاربردی عناصر به نوع تصمیم‌گیری آن‌ها بستگی دارد، ممکن است افراد مختلف ساختارهای متفاوتی را به موضوع مورد بررسی نسبت دهند. ساختار مناسب کاربردی عناصر باید چهار ویژگی اصلی زیر را داشته باشد:

۱. متناسب با قضاوت گروه خبره باشد و هدف بررسی را تأمین کند؛
۲. شامل حداقل دو سطح هدف و عناصر اصلی بوده و ارتباط‌های عناصر هر سطح/ زیرمسئله مشخص باشد. قابل توجه آنکه محدودیتی برای تعداد سطوح ساختار وجود ندارد و در صورت لزوم

برای ساختار، سه سطح یا بیشتر در نظر گرفته می‌شود. در این خصوص باید ساختار در سطح مناسب تفصیل بوده و خیلی مختصر یا خیلی مفصل نباشد؛

۳. با توجه به اینکه عناصر هر سطح/ زیرمسئله معمولاً بین ۵ تا ۹ هستند، هر زیرمسئله باید حداکثر ۹ عنصر داشته باشد (برای امکان پذیر بودن استفاده از حد آستانه‌های قابل قبول)؛

۴. در صورتی که ساختار علاوه بر عناصر اصلی شامل زیرعناصر نیز باشد، حتی‌الامکان تعداد سطوح تفصیل عناصر اصلی نزدیک به هم باشد.

در ادامه با در نظر داشتن چهار ویژگی یادشده و همچنین با بهره‌گیری از مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM و احتساب آستانه قابل قبول  $CR^I$  و  $CR^O$ ، الگوریتم پیشنهادی برای ساختاردهی و وزن‌دهی عناصر مسائل (مانند SBSC) تشریح می‌شود:

**قدم صفر: آماده‌سازی و تشکیل گروه خبره.** اگر قبلاً گروه خبره تشکیل شده و ساختار K سطحی به همراه وزن عناصر مورد تأیید گروه خبره برای مسئله موجود باشد، به قدم ۳ (برای بررسی دارا بودن چهار ویژگی ساختار مطلوب) برو؛

اگر قبلاً گروه خبره تشکیل و در ساختار K سطحی وزن عناصر محاسبه نشده یا از لحاظ گروه خبره نیاز به بازنگری در وزن عناصر باشد، به قدم ۲ (برای محاسبه وزن‌ها) برو.

در غیر این صورت (در صورتی که مسئله قبلاً ساختار نداشته باشد)، الگوریتم از قدم ۱ (برای تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی دوسطحی عناصر) ادامه خواهد یافت.

**قدم ۱: ساخت ساختار سلسله‌مراتبی کاربردی دوسطحی عناصر.** در این قدم با استفاده از مرور میانی نظری و نظرهای اعضای گروه خبره، یک ساختار سلسله‌مراتبی دوسطحی ( $K=2$ ) عناصر برای مسئله تشکیل می‌شود. در این ساختار، هدف اصلی مسئله در سطح یک و عناصر اصلی (به صورت یک زیرمسئله حداکثر ۹ عنصری در نظر گرفته می‌شود) در سطح ۲ قرار داده می‌شود. پس از تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی اولیه مورد تأیید گروه خبره (شامل ویژگی‌های اول، سوم و چهارم)، به قدم دوم رفته می‌شود.

**قدم ۲. محاسبه وزن عناصر.** در صورتی که یک زیرمسئله برای نخستین بار مورد بررسی قرار گرفته باشد، اطلاعات لازم در خصوص بهترین و بدترین عنصر و میزان ارجحیت عناصر هر کدام از زیرمسئله‌های تعریف شده اخذ و زیرمسئله‌ها به صورت جداگانه با به‌کارگیری مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM (مدل ۴، مطابق توضیحات بند ۳) حل و وزن شاخص‌های مربوطه تعیین می‌شود. بدیهی است در تکرار نخست این قدم فقط



یک زیرمسئله مربوط به عناصر اصلی وجود دارد و در تکرارهای بعد ممکن است زیرمسائل بیشتری وجود داشته باشد.

در صورتی که یک زیرمسئله قبلاً بررسی شده و در ساختار جدید، برخی عناصر تجمیع شده در زیرمسئله وجود داشته باشد، تعیین وزن عناصر تجمیع شده بدون به کارگیری مدل ۴، میسر است. در این خصوص وزن هر عنصر تجمیع شده با جمع وزن عناصر تشکیل دهنده تعیین می‌شود. اما اگر عناصر تجزیه شده در زیرمسئله وجود داشته باشد، وزن عناصر با مدل سازی و حل مدل ۴، به دست می‌آید.

پس از تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی نهایی که شامل وزن عناصر است، برای بررسی و تأیید گروه خبره به قدم ۳ رفته می‌شود.

**قدم ۳: بررسی مورد تأیید بودن ساختار عناصر با احتساب وزن‌ها از نظر گروه خبره.** در این قدم با احتساب وزن نهایی عناصر توسط گروه خبره با استفاده از چهار ویژگی ساختار مطلوب کاربردی عناصر، مناسب بودن ساختار بررسی می‌شود. در صورتی که ساختار با احتساب وزن عناصر مورد تأیید گروه خبره باشد، ساختار K سطحی مورد نظر مطلوب حاصل شده است، پایان؛ در غیر این صورت (عدم وجود توأم چهار ویژگی مورد نظر)، برای بهبود و اصلاح ساختار عناصر به قدم ۴ رفته می‌شود.

یادآوری این نکته لازم است که پس از محاسبه وزن عناصر، امکان بررسی ویژگی دوم ساختار مطلوب امکان پذیر خواهد بود. در این خصوص عناصر فاقد زیرعنصر نباید وزن خیلی کم یا وزن خیلی زیاد داشته باشند. با توجه به نظرهای گروه خبره مشخص می‌شود که کدام یک از عناصر وزن خیلی زیاد و یا وزن خیلی کم دارند.

**قدم ۴: اصلاح ساختار عناصر با استفاده از رویکردهای تحلیلی و سیستمی.** در این قدم با استفاده از چهار ویژگی ساختار مطلوب ساختار عناصر با استفاده از رویکردهای تحلیلی و سیستمی به صورت زیر اصلاح می‌شود:

الف) در صورت وجود عناصر فاقد زیرعنصر و دارای وزن نسبتاً کم در ساختار (عدم وجود ویژگی دوم در ساختار مورد بررسی)، از رویکرد سیستمی استفاده می‌شود. در این خصوص با حفظ مفهوم، برخی عناصر مورد نظر در یک سطح تجمیع و جایگزین عناصر مورد نظر در همان سطح می‌شود.

ب) در صورت وجود عناصر فاقد زیرعنصر و دارای وزن نسبتاً زیاد در ساختار (عدم وجود ویژگی دوم در ساختار مورد بررسی)، از رویکرد تحلیلی استفاده می‌شود. در این وضعیت با حفظ مفهوم، برای عناصر مورد نظر دو یا چند زیرعنصر در نظر گرفته می‌شود. در این خصوص ممکن است

سطح جدیدی اضافه نشود و فقط عناصر هر سطح/ زیرمسئله افزایش یابد؛ همچنین ممکن است زیرعناصر در سطح بعدی آورده شده و تعداد سطح ساختار اضافه شود ( $K=K+1$ ).  
 ج) در صورت تفاوت نسبتاً زیاد تعداد سطوح تفصیل عناصر اصلی (عدم وجود ویژگی چهارم در ساختار مورد بررسی)، به‌کارگیری توأم راه‌حل‌های پیشنهادی وضعیت‌های «الف» و «ب» می‌تواند راهگشا باشد.

باید اصلاحات «الف» تا «ج» به‌گونه‌ای اعمال شوند که ساختار دارای چهار ویژگی ساختار مطلوب باشد. پس از تشکیل ساختار جدید، برای محاسبه وزن عناصر به قدم ۲ رفته می‌شود. در صورتی که در حین اجرای الگوریتم اضافه‌کردن عنصر جدیدی به ساختار لازم شد، حتی‌الامکان عنصر به زیرمسائل موجود اضافه شود (با رعایت شرط حداکثر ۹ عنصر در هر زیرمسئله). اگر ساختار شامل زیرمسائل کمتری باشد، با به‌کارگیری تعداد کمتر مدل ۴، وزن عناصر تعیین خواهد شد. در این خصوص می‌توان در صورت موافقت گروه خبره، با استفاده از رویکرد سیستمی، زیرمسئله‌هایی که تعداد عناصر کمتری دارند و از لحاظ ماهیت شبیه به یکدیگر هستند را با شرط حداکثر ۹ عنصر، در یک زیرمسئله جدید ادغام کرد و به‌جای آن‌ها، زیرمسئله ادغامی متناظر را در نظر گرفت.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی، ساختاردهی و تعیین وزن عناصر (شامل منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها) ارزیابی عملکرد مدل SBSC در نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز ارائه می‌شود. خلاصه اجرای الگوریتم پیشنهادی مطالعه موردی در جدول ۴، ارائه شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

جدول ۴. خلاصه پیاده‌سازی الگوریتم برای مطالعه موردی

توضیحات	قدم	پایین‌ترین سطح سلسله‌مراتب
تشکیل گروه خبره و مشخص شدن اینکه ساختار اولیه‌ای برای مسئله وجود ندارد.	۰	---
شناسایی منظرها یا عناصر سطح ۲ طبق جدول ۵، تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی کاربردی دوسطحی مطابق شکل ۱ (بر اساس ویژگی‌های اول، سوم و چهارم ساختار مطلوب)	۱	
محاسبه وزن منظرها (زیرمسئله ۱) با مدل‌سازی و حل مدل ۴ (با توجه به جدول‌های ۶ و ۷)	۲	K=2
بر اساس نظر گروه خبره، همه عناصر سطح ۲، نیاز به تفصیل بیشتر دارد (به‌منظور حصول ویژگی چهارم)	۳	

پایین‌ترین سطح سلسله‌مراتب	قدم	توضیحات
K=3	۴	اصلاح ساختار طبق بند ب قدم ۴ و اضافه‌شدن سطح شاخص‌ها (K=2+1) (جدول ۵ و شکل ۱)
	۲	محاسبه وزن شاخص‌های سطح ۳ (زیرمسئله‌های ۲ تا ۶) با مدل‌سازی و حل مدل ۴
	۳	بر اساس نظر گروه خبره زیرمسئله‌های ۳ و ۵ به تفصیل بیشتری نیاز دارند (در راستای تحقق ویژگی دوم) و احتساب زیرشاخص برای یک شاخص زیرمسئله ۳ و دو شاخص زیرمسئله ۵ لازم است.
K=4	۴	اصلاح ساختار طبق بند ب قدم ۴، و اضافه‌شدن سطح زیرشاخص‌ها (K=3+1) (جدول ۵ و شکل ۱)
	۲	محاسبه وزن زیرشاخص‌های سطح ۴ (زیرمسئله‌های ۷ تا ۹) با مدل‌سازی و حل مدل ۴
	۳	بر اساس نظر گروه خبره چهار ویژگی در ساختار چهارسطحی تشکیل شده (شکل ۱) وجود دارد، پایان.

با توجه به توضیحات ذکر شده در جدول ۴، در قدم صفر الگوریتم گروه خبره از پنج کارشناس و مدیر باسابقه شاغل در نیروگاه‌های حرارتی کشور تشکیل شد؛ سپس با توجه به نبود ساختار اولیه عناصر، برای طراحی ساختار سلسله‌مراتبی دوسطحی کار از قدم یک شروع گردید. یادآوری می‌شود که مطابق با الگوریتم پیشنهادی، تصمیم‌گیری به‌صورت گروهی انجام شد.

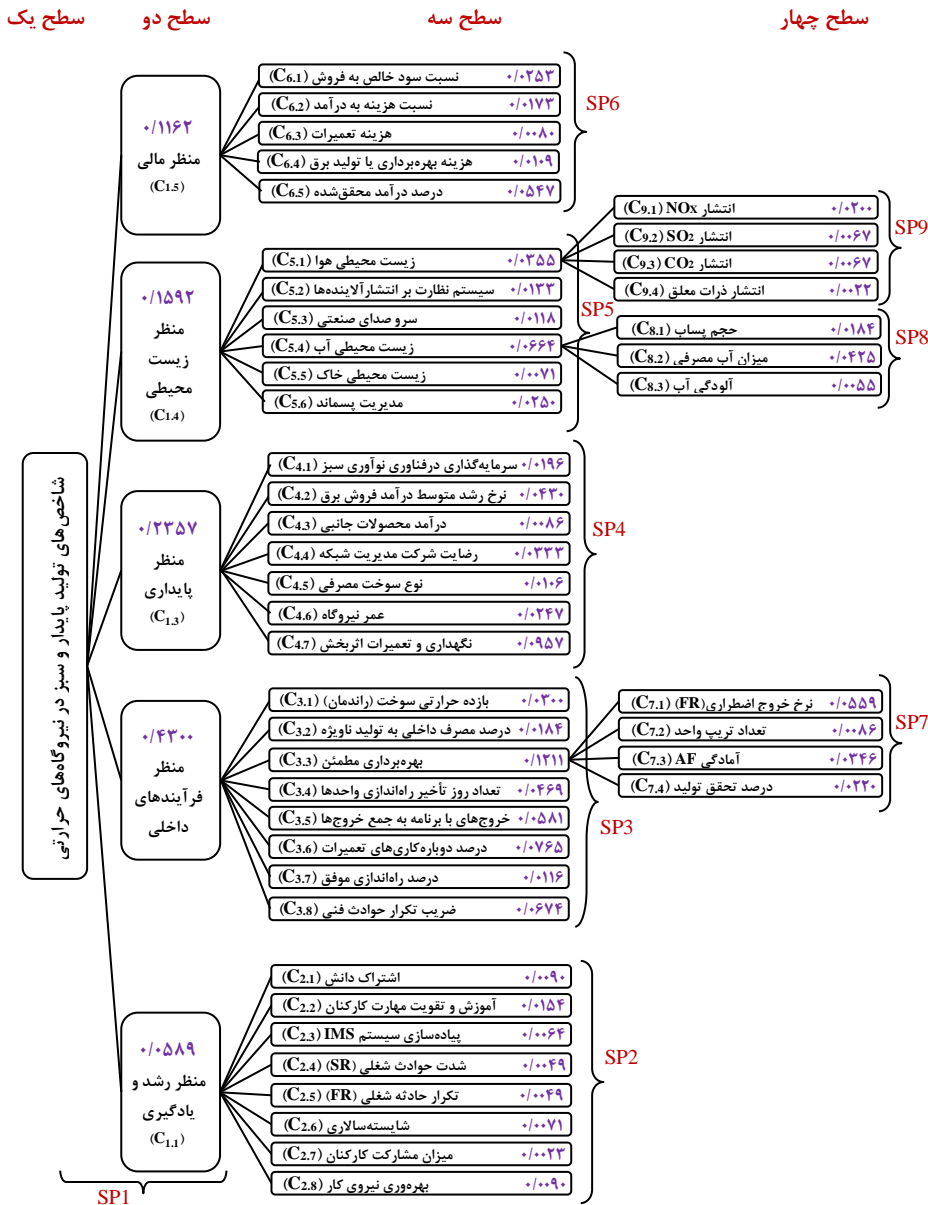
در قدم ۱، بر اساس نظرهای گروه خبره و مرور ادبیات، عناصر سطح دو طبق جدول ۵ شامل ۵ منظر مدل SBSC تعریف شد. از آنجا که تعداد عناصر سطح دو کمتر از ۹ است (ویژگی سوم)، ساختار سلسله‌مراتبی کاربردی دوسطحی مسئله طبق شکل ۱، طراحی شد.

جدول ۵. عناصر ارزیابی عملکرد مدل SBSC نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز در سطح K

K=2
منظرهای مالی، زیست‌محیطی، پایداری، فرآیندهای داخلی و رشد و یادگیری [۴۶]
K=3
نسبت هزینه به درآمد، تعداد روز تأخیر در راه‌اندازی واحدها، شدت حوادث شغلی (SR)، تکرار حادثه شغلی (FR)، شایسته‌سالاری، میزان مشارکت کارکنان در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری [۲۹]
سروصدای صنعتی، نرخ رشد متوسط درآمد فروش برق، درآمد محصولات جانبی، رضایت شرکت مدیریت شبکه، آموزش و تقویت مهارت کارکنان، بهره‌وری نیروی کار [۴۶]
نسبت سود خالص به فروش [۲۹، ۴۶]
سیستم نظارت بر انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، نوع سوخت مصرفی، عمر نیروگاه، اجرای سیستم IMS [۴۰]
سرمایه‌گذاری در فناوری نوآوری سبز، اشتراک دانش [۴۰، ۴۶]
زیست‌محیطی آب، زیست‌محیطی خاک، زیست‌محیطی هوا [۳۵]

بازده حرارتی خالص سوخت (کارایی) [۴۰، ۳۵]
هزینه تعمیرات، هزینه بهره‌برداری یا تولید برق [۴۰، ۴]
گروه خبره: درصد درآمد محقق شده، مدیریت پسماند، نگهداری و تعمیرات اثربخش، بهره‌برداری مطمئن، درصد مصرف داخلی نسبت به تولید ناویژه نیروگاه، خروج‌های با برنامه به جمع خروج‌ها، درصد دوباره‌کاری‌های تعمیرات، درصد راه‌اندازی موفق، ضریب تکرار حوادث فنی
<b>K=4</b>
نرخ خروج اضطراری (FR)، تعداد تریپ واحد [۳۹]
حجم پساب، میزان آب مصرفی [۴۶]
انتشار ذرات معلق [۷]
انتشار دی‌اکسید کربن CO <sub>2</sub> [۴۰، ۷]
آمادگی AF [۳۹، ۴]
انتشار NO <sub>x</sub> [۴۶، ۴۰، ۳۹، ۷]
انتشار دی‌اکسید گوگرد SO <sub>2</sub> [۴۶، ۴۰، ۷]
گروه خبره: درصد تحقق تولید، آلودگی آب

از آنجا که ساختار سلسله‌مراتبی کاربردی دوسطحی (شکل ۱) دارای ویژگی‌های اول، سوم و چهارم ساختار مطلوب هستند، مورد تأیید گروه خبره واقع شد؛ سپس برای تعیین وزن منظرها بایستی به قدم ۲ رفت.



شکل ۱. ساختار نهایی ۴ سطحی عناصر ارزیابی عملکرد مدل SBSC نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز

در قدم ۲ با توجه به اینکه زیرمسئله عناصر سطح ۲ (زیرمسئله ۱) برای نخستین بار بررسی شده است، اطلاعات مربوط به بهترین و بدترین منظر و ارجحیت مقایسات زوجی منظرها از گروه خبره اخذ و وزن منظرها با مدل‌سازی و حل مدل ۴، محاسبه شد. در این خصوص مقادیر  $CR^0$ ,  $CR^1$ ، آستانه قابل‌قبول نرخ سازگاری و نتیجه بررسی قابل‌اعتماد بودن وزن‌ها در



جدول ۷. بررسی سازگاری CR<sup>o</sup> زیرمسائل مطالعه موردی (مرتبط با سطوح مختلف ساختار)

نتیجه	آستانه قابل قبول	CR <sup>o</sup>	تعداد شاخص	abw	شاخص سازگاری	ξ*	سطح	زیر مسئله
قابل قبول	۰/۳۷۳۴	۰/۰۸۰۰	۵	۷	۳/۷۳	۰/۲۹۸۴	۲	SP <sub>1</sub>
قابل قبول	۰/۴۱۶۸	۰/۲۷۹۲	۸	۶	۳/۰۰	۰/۸۳۷۷	۳	SP <sub>2</sub>
قابل قبول	۰/۴۵۸۷	۰/۲۷۱۰	۸	۹	۵/۲۳	۱/۴۱۷۴	۳	SP <sub>3</sub>
قابل قبول	۰/۴۴۴۵	۰/۴۰۶۷	۷	۹	۵/۲۳	۲/۱۲۷۰	۳	SP <sub>4</sub>
قابل قبول	۰/۴۲۳۰	۰/۳۰۱۳	۶	۸	۴/۴۷	۱/۳۴۶۷	۳	SP <sub>5</sub>
قابل قبول	۰/۳۵۶۵	۰/۲۷۹۲	۵	۶	۳/۰۰	۰/۸۳۷۷	۳	SP <sub>6</sub>
قابل قبول	۰/۲۹۲۲	۰/۱۵۲۹	۴	۶	۳/۰۰	۰/۴۵۸۶	۴	SP <sub>7</sub>
قابل قبول	۰/۲۰۹۰	۰/۱۸۳۲	۳	۷	۳/۷۳	۰/۶۸۳۴	۴	SP <sub>8</sub>
قابل قبول	۰/۳۴۰۹	۰/۲۲۳۷	۴	۸	۴/۴۷	۱/۰۰۰	۴	SP <sub>9</sub>

در قدم ۴ با استفاده از رویکرد تحلیلی و نظر گروه خبره با حفظ مفهوم، نسبت به تجزیه منظرهای سطح ۲ به چند شاخص و اضافه کردن یک سطح به ساختار (K=2+1) (طبق بند ب قدم چهار) اقدام شد؛ بنابراین با استفاده از مرور مبنای نظری و نظرهای اعضای گروه خبره، شاخص‌های سطح سوم با لحاظ حداکثر تعداد ۹ عنصر برای هر زیرمسئله طبق جدول ۵، شناسایی و ساختار سه‌سطحی اصلاح‌شده طبق شکل ۱، تهیه شد؛ سپس برای تعیین وزن شاخص‌های سطح ۳، مجدداً به قدم ۲ رفته و پس از محاسبه وزن شاخص‌ها و تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی سه‌سطحی وزن‌دار، برای بررسی و تأیید ساختار توسط گروه خبره بایستی به قدم ۳ رفت. با توجه عدم تأیید ساختار سه‌سطحی توسط گروه خبره و نیاز به تفصیل بیشتر شاخص‌های «بهره‌برداری مطمئن» در زیرمسئله ۳، «زیست‌محیطی آب» و «زیست‌محیطی هوا» در زیرمسئله ۵، مجدد به ترتیب قدم‌های ۴، ۲ و ۳ الگوریتم تکرار و زیرشاخص‌های مرتبط به شاخص‌های مربوطه شناسایی شد؛ در ادامه ساختار سلسله‌مراتبی چهارسطحی عناصر (منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها) ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز با استفاده از مدل SBSC که دارای چهار ویژگی ساختار کاربردی شاخص‌ها و مورد تأیید گروه خبره بود، تشکیل شد (شکل ۱).

با توجه به ساختار سلسله‌مراتبی (شکل ۱)، مهم‌ترین منظر سطح ۲، منظر فرآیندهای داخلی، مهم‌ترین شاخص سطح ۳، شاخص بهره‌برداری مطمئن و مهم‌ترین زیرشاخص سطح ۴، نرخ خروج اضطراری است.

چنانچه ساختار شامل زیرمسائل کمتری باشد، با مدل‌سازی و حل تعداد کمتری از مدل‌های ۴، وزن عناصر تعیین خواهد شد؛ از این‌رو در مطالعه موردی به اعضای گروه خبره پیشنهاد شد که

به‌جای احتساب عناصر در ۹ زیرمسئله، از ۸ زیرمسئله استفاده شود. به این صورت که سه زیرشاخص شاخص «زیست‌محیطی آب» (زیرمسئله ۸) با شش شاخص منظر زیست‌محیطی (زیرمسئله ۵) ادغام و یک مسئله ۸ عنصره معادل در نظر گرفته شود؛ البته این پیشنهاد موردقبول گروه خبره واقع نشد. آن‌ها بیان کردند که تفکیک عناصر به این صورت برای درک ساختار نهایی مطلوب‌تر است.

**بحث:** در این قسمت نتایج پژوهش حاضر با نتایج چند تحقیق مشابه مقایسه می‌شود: با توجه به نتایج پژوهش ژائو و لی (۲۰۱۵)، اولویت منظرها به‌ترتیب پایداری، رشد و یادگیری، مالی، زیست‌محیطی و فرآیندهای داخلی به‌دست‌آمده و منظرهای مزبور به‌ترتیب نقش مهمی در توسعه و بهبود عملکرد نیروگاه‌های حرارتی داشته است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، اولویت منظرها به‌ترتیب فرآیندهای داخلی، پایداری، زیست‌محیطی، مالی و رشد و یادگیری مؤثر در عملکرد نیروگاه‌های حرارتی کشور در راستای تولید پایدار و سبز تعیین شده است. مقایسه نتایج دو پژوهش نشان می‌دهد که منظر پایداری دارای رتبه اول یا دوم است و این موضوع اهمیت منظر پایداری در بهبود عملکرد نیروگاه‌های حرارتی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج پژوهش‌های زو و جیائو (۲۰۱۹) و دهقانی و عباسی (۲۰۲۱)، مهم‌ترین منظر، منظر فرآیندهای داخلی تعیین شده است. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که منظر فرآیندهای داخلی دارای رتبه اول اهمیت است. مقایسه نتایج حاصل از سه پژوهش نشان‌دهنده اهمیت تمرکز بر این منظر در نیروگاه‌های حرارتی در راستای بهبود عملکرد است؛ بنابراین با توجه به مفهوم پایداری، توسعه‌ای که نیازهای فعلی را بدون به‌خطرانداختن توانایی نسل‌های آینده برآورده می‌کند، با بهبود شاخص‌های ارزیابی عملکرد این منظر باعث استفاده بهتر از منابع طبیعی و در نتیجه تولید پایدار و سبز در نیروگاه‌های حرارتی شده است.

با توجه به نتایج پژوهش دهقانی و عباسی (۲۰۲۱)، مهم‌ترین شاخص ارزیابی عملکرد در یکی از نیروگاه‌های حرارتی سیکل ترکیبی کشور، نرخ خروج اضطراری در منظر مشتریان است. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که بهره‌برداری مطمئن و نرخ خروج اضطراری از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد است. مقایسه نتایج دو تحقیق اهمیت شاخص نرخ خروج اضطراری در بهبود عملکرد نیروگاه‌های حرارتی را نشان می‌دهد.

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده، الگوریتم ارائه‌شده در این پژوهش، الگوریتمی مناسب برای دسته‌بندی و ساختاردهی عناصر مربوط به مسائل برای دانستن جزئیات مناسب از مسئله است و باعث کاهش پیچیدگی و درک مناسب‌تر مسائل می‌شود. از طرف دیگر مدل محاسبه وزن نهایی



عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM روش مناسبی برای محاسبه وزن عناصر در حالت ساختار سلسله‌مراتبی مسئله است؛ همچنین تلفیق الگوریتم ارائه‌شده با رویکرد SBSC به شناسایی شاخص‌ها، تشکیل یک ساختار سلسله‌مراتب مناسب و تعیین وزن‌های قابل‌اطمینان عناصر (منظرها، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها) در راستای تولید پایدار و سبز در نیروگاه‌های حرارتی کشور منجر شده است.

از طرف دیگر ساختار سلسله‌مراتبی وزن‌دهی شده عناصر می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان برای ارزیابی و بهبود عملکرد نیروگاه‌های حرارتی کمک زیادی کند. در این خصوص باید در استراتژی و ارزیابی عملکرد سازمان به عناصر دارای وزن بیشتر، اهمیت بیشتری داده شود تا با تمرکز بر هدف‌گذاری و تحقق اهداف در راستای آن عناصر سازمان بتواند نسبت به بهبود عملکرد خود اقدام کند. در صورتی که استراتژی سازمان با عناصری که دارای وزن زیادی هستند متناسب و هم‌خوان نباشند، ممکن است استراتژی‌های سازمان به‌درستی تدوین نشود یا ساختار نهایی تشکیل شده مناسب نباشد؛ بنابراین باید با نظر گروه خبره نسبت به به‌روزرسانی و بازنگری آن‌ها به‌گونه‌ای اقدام کرد که ساختار نهایی وزن‌دار و استراتژی‌های سازمان در جهت ارزیابی عملکرد سازمان در یک راستا باشند.

پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آتی از سایر مدل‌های BWM و همچنین از روش‌های گروهی آن برای تعیین وزن عناصر در الگوریتم استفاده شود؛ همچنین خطی کردن مدل محاسبه وزن نهایی عناصر در ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از BWM برای سهولت حل و استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی برای به‌کارگیری روش سیستمی در الگوریتم می‌تواند در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد. از طرف دیگر با توجه به مقایسه تطبیقی نتایج پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه (موارد ذکر شده در قسمت بحث)، پیشنهاد می‌شود نیروگاه‌ها برای ارزیابی عملکرد در راستای تولید پایدار و سبز به دو منظر فرآیندهای داخلی و پایداری توجه ویژه کنند؛ همچنین شاخص نرخ خروج اضطراری از مهم‌ترین شاخص‌ها است و پیشنهاد می‌شود برای بهبود عملکرد به این شاخص نیز توجه ویژه شود؛ همچنین پیشنهاد می‌شود هدف‌گذاری‌های کلان و خرد، اجرای استراتژی و ارزیابی عملکرد در نیروگاه‌های حرارتی کشور بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد تولید پایدار و سبز شناسایی و وزن‌گذاری شده بر اساس نتایج پژوهش، با توجه بیشتر به شاخص بهره‌برداری مطمئن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها، انجام پذیرد. به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در پالایشگاه، کارخانه فولاد و سایر صنایع مرتبط نیز می‌تواند در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرد. تکمیل شاخص‌های ارزیابی عملکرد تولید پایدار و سبز مرتبط با نیروگاه حرارتی کشور با تأکید بر دیگر نیروگاه‌های حرارتی از جمله نیروگاه‌های گازی و بخاری نیز می‌تواند در پژوهش‌های آتی لحاظ شود.

## منابع

1. Abbasi, M., & Dehghani, M R. (2022). Determining and Estimating the Weights of Best-Worst Method Criteria through Solving Linear Programming or Mixed Integer Linear Programming Models. *Journal of New Researches in Mathematics*. Article in press. (In Persian)
2. Ahmed, W., & Sarkar, B. (2018). Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel. *Journal of Cleaner Production*, 186, 807-820.
3. Asgharpour, M J. (2019). *Multiple Criteria Decision Making*. Tehran. University of Tehran Press, Seventeenth edition. (In Persian)
4. Atmaca, E., & Basar, H. B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). *Energy*, 44(1), 555-563.
5. Azar, A., & Rajabzadeh, A. (2017). *Applied Decision Making: Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. Tehran. Negahe Danesh Publication, Seventh edition. (In Persian)
6. Bahrololoum M M, & Bakhtiar S. (2020). Comparative Analysis of Financing Methods in Thermal Power Plants in Iran. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 6(3), 221-250. (In Persian)
7. Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2012). Decision support systems for power plants impact on the living standard. *Energy conversion and management*, 64, 182-198.
8. Cohen, N., & Arieli, T. (2011). Field research in conflict environments: Methodological challenges and snowball sampling. *Journal of Peace Research*, 48(4), 423-435.
9. Dehghani, M R., & Abbasi, M. (2021). Performance Evaluation of Thermal Power Generation Companies using Integrated Proposed Trustable BWM Algorithm and BSC Model (A Real Case Study). *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 10 (4), 64-72. (In Persian)
10. Dehghani, M R., & Abbasi, M. (2021). Estimating the Solution of the Best-Worst Method Non-Linear Programming Model by solving the Mixed Integer Linear Programming Model Solutions. *Journal of New Researches in Mathematics*. Article in press. (In Persian)
11. Dizaji, M., Mazdeh, M., and Makui, A. (2018). Performance evaluation and ranking of direct sales stores using BSC approach and fuzzy multiple attribute decision-making methods. *Decision Science Letters*, 7(2), 197-210.
12. Dwivedi, R., & Chakraborty, S. (2016). Development of a strategic management tool in a thermal power plant using ABC and BSC models. *Serbian Journal of Management*, 11(1), 81-97.
13. Dwivedi, R., Prasad, K., Mandal, N., Singh, S., Vardhan, M., & Pamucar, D. (2021). Performance evaluation of an insurance company using an integrated Balanced Scorecard (BSC) and Best-Worst Method (BWM). *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(1), 33-50.
14. Eshikumo, S. M., & Odock, S. O. (2017). Green manufacturing and operational performance of a firm: Case of cement manufacturing in Kenya. *International Journal of Business and Social Science*, 8(4), 106-120.
15. Esmaelian, M., Khalili, A., & Tavakoli, M. (2020). Proposing a Method for Determining the Appropriate Purchasing Strategy Based on the Purchasing

- Portfolio Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 10 (2), 55-82. (In Persian)
16. Figge, F., Hahn, T., Schaltegger, S., & Wagner, M. (2002). The sustainability balanced scorecard—linking sustainability management to business strategy. *Business Strategy and the Environment*, 11(5), 269-284.
  17. Guo, Y., Yu, Z., & Feng, L. (2009). Implementation of BSC Performance Evaluation System in Power Generation Enterprises. In *2009 International Conference on Management and Service Science*, 1-5. IEEE
  18. Hristov, I., Chirico, A., & Appoloni, A. (2019). Sustainability value creation, survival, and growth of the company: A critical perspective in the Sustainability Balanced Scorecard (SBSC). *Sustainability*, 11(7), 2119.
  19. Jafarnejhad Chaghooshi, A., Kazemi, A., & Arab, A. (2016). Identification and Prioritization of Supplier's Resiliency Evaluation Criteria Based on BWM. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(3), 159-186. (In Persian)
  20. Jahanagoshai, R. M., Moini, A., & Bakhshour, F. (2015). An Integrated Approach for Measuring Performance of Network structure: Case study on power plants. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 26(4), 255-268.
  21. Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). Using the Balanced Scorecard as a Strategic Management System. *Harvard Business Review*, 74(1), 75- 85.
  22. Khan, S., Haleem, A., & Khan, M. I. (2021). Assessment of risk in the management of Halal supply chain using fuzzy BWM method. In *Supply Chain Forum: An International Journal*, 22(1), 57-73.
  23. Li, Y. (2021). Evaluation of Backfill Operation Models Using SBSC and IFAHP Approach. *Advances in Civil Engineering*.
  24. Liang, F., Brunelli, M., & Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. *Omega*, 96, 1-11.
  25. Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Guarino, M. (2020). A review on dairy cattle farming: Is precision livestock farming the compromise for an environmental, economic and social sustainable production?. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121409.
  26. Lu, M. T., Hsu, C. C., Liou, J. J., & Lo, H. W. (2018). A hybrid MCDM and sustainability-balanced scorecard model to establish sustainable performance evaluation for international airports. *Journal of Air Transport Management*, 71, 9-19.
  27. Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019). The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*, 87, 205-225.
  28. Mishra, U., Wu, J. Z., & Sarkar, B. (2020). A sustainable production-inventory model for a controllable carbon emissions rate under shortages. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120268.
  29. Nikkhah, M., Nikkhah, A., & Afsahi, A. (2017). Evaluating the Implementation of Strategies in Plants Using Balanced Scorecard (BSC): A Case Study. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 6(1), 39-50.
  30. Nispeling, T. (2015). Multi-Criteria Supplier Selection in the Edible Oil Industry: The Case of a New Oils & Fats Plant in China.
  31. Özcüre, G., Demirkaya, H., & Eryiğit, N. (2015). Is it Possible to be a Sustainable Energy Company in Turkey? A Case Study of OMV's Thermal

- Electric Power Plant in Samsun. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 181, 97-106.
32. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
33. Rezaei, J. (2016) Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
34. Rezaei, J., Kothadiya, O., Tavasszy, L., & Kroesen, M. (2018). Quality assessment of airline baggage handling systems using SERVQUAL and BWM. *Tourism Management*, 66, 85-93.
35. Roldán, M. C., Martínez, M., & Peña, R. (2014). Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 154-160.
36. Saaty, T. L. (1990). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
37. Sadeghi Darvazeh, S., Shoul, A., & Rasouli, N. (2019). A Hybrid Approach to Assess Contributing Factors in Supply Chain Competitiveness in Rubber Industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(4), 185-212. (In Persian)
38. Saeedi, M., Karbasi, A., Tika, S., & Samadi, R. (2006). *Environmental Management of Power Plants*: Tehran. Ministry of Energy- Iran Energy Productivity Organization (SABA). (In Persian)
39. Salimi, N., & Rezaei, J. (2018). Evaluating firms' R&D performance using best worst method. *Evaluation and program planning*, 66, 147-155.
40. Sanjaranipour, N., Atabi, F., Momeni, M., Ghodousi, J., & Lahijanian, A. A. M. (2018). Identification of Effective Components for Increasing the Sustainable Efficiency of Thermal Power Plants (with emphasis on Air Pollution) Using the SBSC Technique. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(4), 57-68.
41. Tavanir. (2021). *Detailed Statistics of Iran's Electricity Industry for Strategic Management in 1399*. Tehran. Tavanir Specialized holding Company. (In Persian)
42. Tiwari, S., Ahmed, W., & Sarkar, B. (2018). Multi-item sustainable green production system under trade-credit and partial backordering. *Journal of Cleaner Production*, 204, 82-95.
43. Veleva, V., Hart, M., Greiner, T., & Crumbley, C. (2001). Indicators of sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, 9(5), 447-452.
44. Xu, X., & Jiao, J. (2019). The Building and Application of Environmental Performance Evaluation System of Y Electricity Generation Enterprise Based on Balanced Scorecard. In *2nd International Seminar on Education Research and Social Science*, 290-293. Atlantis Press.
45. Zarte, M., Pechmann, A., & Nunes, I. L. (2019). Indicator framework for sustainable production planning and controlling. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(3), 149-158.
46. Zhao, H., & Li, N. (2015). Evaluating the performance of thermal power enterprises using sustainability balanced scorecard, fuzzy Delphic and hybrid multi-criteria decision making approaches for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 108, 569-582.