Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

Vol 19, No 62, 2024, pp 39-61
DOI: 10.22034/ijme.2024.2012666.1982

Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

The Strategy of using Renewable Energies in the Mining Sector

Mahdi Pouresmaieli[1], Mohammad Ataei[1*], Ali Nouri Qarahasanlou[2], Zahra Ghiyasi[3]

1. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
mpouresmaieli@gmail.com
2. Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
ataei@shahroodut.ac.ir
3. Assistant professor, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
ali_nourieng@ikiu.ac.ir
4. Department of Construction, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Zahraghiyisi@gmail.com

Received: 2023/09/30 - Accepted: 2024/03/09

Abstract

In all mining communities, mining is one of the major economic activities affecting the gross domestic product (GDP). Energy supply plays a vital role in numerous industries, including mining, transportation, construction, and industries. With the increase in the world population, the demand for minerals is growing, and this increase in demand causes an increase in energy consumption in the activities of exploration, extraction, exploitation, processing, smelting, and refining of minerals. One of the challenges of mining today is that many mines are located in remote areas and far from urban areas, which has increased the dependence of mining on fossil energy. However, using renewable energies such as solar and wind energy in mining activities is possible, which can help reduce this dependence and provide sustainable energy in this industry. This article examines renewable energy's challenges, opportunities, and effects on sustainable development indicators in mining activities. It has also provided a strategic management plan for using renewable energy in mining using the SWOT method. The results showed that despite the many opportunities that these technologies create in mining, there is a need for more studies to introduce and implement them. Also, the results showed that the use of renewable energy in mining has a positive effect on sustainable development indicators. Therefore, an aggressive strategy (maximizing the strengths to take maximum advantage of the created opportunities) is proposed as a solution that can help achieve sustainable development goals in the mining industry. In general, using renewable energy in mining not only helps mines diversify their energy sources but also helps increase efficiency and reduce negative effects on the environment. This technology benefits the economy and society and can help achieve sustainable development in the mining industry..

Keywords

Mining; Sustainable development; Strategic management; SWOT.

* Corresponding Author

CC BY

1- Introduction

The mining industry comprises five major stages: exploration, extraction, exploitation, processing, and refining. It is one of the key and basic industries supplying raw materials for many industries, including transportation, construction, aerospace, high-tech technology, energy, and mining. Max Planck, a prominent German physicist of the 19th and 20th centuries, declares, "Mining is not everything, but without mining, everything is nothing." It is predicted that owing to the growing world population and the inclination of numerous low-income countries to reach the per capita income levels of middle-income countries, the demand for minerals will considerably be augmented (Pouresmaieli and Osanloo 2019b). Nowadays, developed countries have devoted more attention to mineral recycling. However, the critical role of the mining industry as the main source of raw material production is indisputable. (Jandieri 2022). Mineral production is regarded as one of the most significant indicators of economic growth in various countries. (Pouresmaieli and Osanloo 2019a). More energy is needed to produce the required materials because of an increase in the demand for raw materials and a decrease in high-grade resources. More energy consumption potentially boosts the amount of greenhouse gas emissions. (Strazzabosco, Gruenhagen, and Cox 2022), which signifies the adverse impacts of mining activities on the environment. Therefore, exploring and identifying and identifying these environmental effects and taking measures to eliminate them is paramount. Optimum energy consumption in the mining processes (from the extraction of minerals to the production of products), the use of renewable energy, and the absorption of carbon released from mining operations are among the influential strategies in lessening energy consumption and greenhouse gas emissions and, consequently, declining environmental pollution. To this end, combining renewable energies and overcoming the challenges of integrating this technology into the mining industry is necessary.

Energy consumption for mineral extraction is of two types: off-grid and grid-connected. In plenty of mines, most energy is supplied by off-grid plants. Depending on the kind of fossil fuels used in these mines, diesel, heavy oil, or coal is burnt to manufacture and transport minerals in the mineral extraction stage (Igogo et al. 2020). Nevertheless, grid-connected mining operations partially rely on fossil fuels. The grid provides the least costly energy source for mining operations in the mining sites where the grid is available. However, many countries with unreliable grid sources have to utilize backup energy sources generally powered by fossil fuels in mining sites, which raises production costs.

The present study investigates the opportunities and challenges of using renewable energies in mines. It also detects efficient strategies to create a suitable platform for integrating renewable energies in the mining industry using the sustainable development approach. To this end, the SWOT strategic approach was adopted to make the most appropriate decisions about applying renewable energy in mining. The second section of this study illustrates the challenges raised in the mining industry and the issues associated with energy supply. Sections 3 and 4 address the challenges and opportunities of using renewable energy in mining. Section 5 presents how the SWOT strategic management model was employed to determine the most effective strategy for incorporating renewable energy in mining operations. Section 6 discusses the results and conclusions of the investigation.

2- Methods

In this section, a strategic approach is presented to identify an appropriate strategy for the use of renewable energy in mining. To this end, the SWOT analysis was adopted to detect internal strategic factors (strengths and weaknesses) and external strategic factors (opportunities and threats). Four questions were constructed to identify internal and external strategic factors. Based on the responses to these questions, the SWOT matrix was formed. In the next step, the Internal Factor Evaluation

(IFE) and External Factor Evaluation (EFE) methods evaluated all the specified strategic factors. The strategic position for renewable energy use was then located in the Internal-External (IE) matrix. Eventually, the most appropriate strategies for using this new mining technology were introduced by considering the identified position.

The IFE matrix is a strategy tool utilized to quantitatively evaluate internal strategic factors in the SWOT method. First, the relative weight of each internal strategic factor is calculated using IFE analysis. To do this, the importance of each internal factor is initially determined on a scale of 1 to 5 (1= low importance and 5= high importance) using experts' opinions. After that, the obtained value for each factor is normalized using Eq 1 (Tahernejad, Ataei, and Khalokakaei 2013). The average score of each internal factor is then calculated as the relative weight of that factor.

$$W_{IF_i} = \frac{MVIF_i}{\sum_{i=1}^{n}(MVIF_i)} \quad (1)$$

where $MVIF_i$ Is the average value of the importance of internal strategic factor *i* and W_{IF_i} represents the relative weight of internal factor *i*. The weight of each factor reflects its importance relative to other internal factors, and the sum of these weight values is equal to 1. Based on Table 1, the experts assign 1 or 2 to each weak factor and 3 or 4 to each strong factor. The weight score of each factor is computed using Eq 2. Afterward, the overall weight of the internal factors is measured through Eq 3.

Table 1. Description of scores for internal and external strategic factors (David and David 2016)

Score	Definition of internal factors	Definition of external factors
1	Major weakness	Major Threat
2	Minor weakness	Minor Threat
3	Minor strength	Minor opportunity
4	Major strength	Major opportunity

$$WS_{IF_i} = W_{IF_i} \times S_{IF_i} \quad (2)$$

$$TWS_{IF} = \sum_{i=1}^{n}(W_{IF_i} \times S_{IF_i}) \quad (3)$$

where WS_{IF_i}, S_{IF_i}, TWS_{IF} are the weight score of internal factor *i*, the score of internal factor *i*, and the weight score of all the internal factors. As the TWS_{IF} the value ranges from 1 to 4, and the average value is 2.5. When the TWS_{IF} value is less than 2.5; weaknesses outweigh strengths. Conversely, the TWS_{IF} value above 2.5 indicates the superiority of strengths over weaknesses (David and David 2016).

The EFE matrix analyzes external strategic factors quantitatively. The calculation of EFE is similar to that of IFE. The only difference is that in EFE, external factors (e.g., opportunities and threats) are considered in the analysis. The relative weights of external factors are calculated using Eq 4.

$$W_{EF_j} = \frac{MVEF_j}{\sum_{j=1}^{n}(MVEF_j)} \quad (4)$$

where M cap V cap E cap F ,end base ,sub j is the average value of the importance of external strategic factor j,and cap W sub ,subscript base ,cap E cap F ,end base ,sub j ,end subscript represents the weight of external factor j. The weight of each factor shows its relative importance relative to other external factors. The sum of these weight values equals 1. Based on Table 1, experts give values 1 or 2 to each threat factor and 3 or 4 to each opportunity factor. The weight score of each factor is calculated via Eq 5. Then, Eq 6 is used to compute the overall weight of the internal factors.

(5) $$WS_{EF_j} = W_{EF_j} \times S_{EF_j}$$

(6) $$TWS_{EF} = \sum_{j=1}^{n} (W_{EF_j} \times S_{EF_j})$$

where WS_{EF_j}, TWS_{EF}, and TWS_{EF} denote the weight score of external factor j, the score of external factor j, and the weight score of all the external factors, respectively. The TWS_{EF} value is in the range of 1 to 4. Thus, the average TWS_{EF} value is 2.5. The TWS_{EF}value less than 2.5 reveals that threats outweigh opportunities, whereas the TWS_{EF} value above 2.5 signifies the superiority of opportunities over threats (David and David 2016).

The IE matrix is utilized to determine a suitable strategic position for renewable energy use in mines (Fig. 6). It simultaneously assesses external and internal strategic factors. TWS_{IF} and TWS_{EF} are the horizontal and vertical axes of the IE matrix, respectively.

3- Findings and Argument

After data collection from the experts, the SWOT matrix was constructed, and the TWS_{IF} and TWS_{EF} values were calculated through Eq 1 to 6. The results of the IEF and EFE matrices are reported in Table 2. Values in Table 2 were rounded to 3 decimal places.

Table 2. Results of IFE and EFE matrices for renewable energy use in mining

IFE Matrices					EFE Matrices				
IFC	W_{IF_i}	IFC	W_{IF_i}	IFC	W_{IF_i}	IFC	W_{IF_i}	IFC	W_{IF_i}
S1	0.097	4	0.387	3	O1	0.067	4	0.267	2.73
S2	0.161	4	0.645		O2	0.017	3	0.050	
S3	0.065	3	0.194		O3	0.050	4	0.200	
S4	0.129	4	0.516		O4	0.050	4	0.200	
S5	0.194	4	0.774		O5	0.083	4	0.333	
W1	0.065	1	0.065		O6	0.067	4	0.267	
W2	0.032	1	0.032		O7	0.083	4	0.333	
W3	0.129	1	0.129		T1	0.050	2	0.100	
W4	0.129	2	0.258		T2	0.067	2	0.133	
					T3	0.050	2	0.100	
					T4	0.083	2	0.167	
					T5	0.033	1	0.033	
					T6	0.083	2	0.167	
					T7	0.083	2	0.167	
					T8	0.033	2	0.067	
					T9	0.050	1	0.050	
					T10	0.050	2	0.100	

As seen in Table 2, the integration of renewable energy in mining is located in Part II, i.e., the aggressive strategy. Therefore, all the strengths of this technology should be considered in order to take advantage of the opportunities created in the mining industry.

Given the position of the strategy obtained from the SWOT analysis for including renewable energy in mining, Table 3 presents the appropriate strategies for using this technology in the mining industry.

Table 3. Suitable strategies for using renewable energy in mining using results of SWOT analysis

Strength (S)	Opportunities (O)	Strategies based on (SO) approach
S5: Alignment with sustainable development indicators	O3: Creation of new jobs in the mining industry O6: Possibility of creating a two-way economy between the mining and renewable energy industries	SO1: Creating the necessary platform for training specialists and updating the educational system of universities to enhance knowledge on the benefits of renewable energy use
S4: Elimination of greenhouse gas emission S5: Alignment with sustainable development indicators	O7: Pressure from the international community to reduce greenhouse gases	SO2: Modifying management plans and setting effective policies; Granting long-term facilities with low-interest rates and providing tax exemptions for the use of this technology
S2: Cost-effectiveness of renewable energy use S3: Minimization of economic uncertainty caused by fluctuations in fossil fuel prices	O2: Possibility of selling surplus production to the national electricity grid O5: Reduction of cut-off grade in mines by removing fossil fuel energy and using renewable energy	SO3: Developing new regulations on the purchase of surplus energy by the government to support renewable energy producers; making necessary modifications in the mining laws and regulations of countries.
S1: High production capacity	O1: High capacity of the mining industry for renewable energy use O4: Possibility of using renewable energy in all stages of mining	SO4: Using all available capacities in mines to construct inclusive mining sites (operating all mining processes from extraction to processing) to make maximum use of this technology and meet the demands of consumers in case of a lack of energy.
S1: High production capacity S3: Minimization of economic uncertainty caused by fluctuations in fossil fuel prices S4: Elimination of greenhouse gas emission S5: Alignment with sustainable development indicators	O1: High capacity of the mining industry for renewable energy use O3: Creation of new jobs in the mining industry O4: Possibility of using renewable energy in all stages of mining O5: Reduction of cut-off grade in mines by removing fossil fuel energy and using renewable energy	SO5: Change attitudes in macro-policy of mining in countries and create new regulations to replace fossil energy with renewable energy in mining. SO6: Developing essential regulations to make renewable energy use obligatory for miners in the medium term

4- Conclusions

Although there is great potential for using renewable energy in mines, the ratio of renewable energy consumption to the total energy consumption in the mining industry is still very low. This issue will be thoroughly explained in this section. By discussing the opportunities and obstacles of integrating renewable energy in mining sites with mining experts and stakeholders, effective and practical solutions for eliminating this sector's challenges can be identified.

Applying renewable energy in mining operations would shift the energy consumption pattern of mines from fossil energy use to renewable energy use. This transition would alter some political and social issues at local and international levels. For example, on the one hand, using renewable energy would eliminate some traditional jobs and allow the emergence of other jobs and skills associated with renewable energy technology. This change is more tangible in countries where mining activities are more prevalent and consume more energy. In these countries whose economies heavily rely on mining operations, altering energy consumption patterns transfers substantial resources from the fossil fuel supply chain to the renewable energy supply chain. Depending on the country, the domestic fossil fuel supply chain may not be economically justifiable compared to the renewable energy supply chain that relies heavily on imports. In such cases, the political will of the countries plays a critical role in replacing fossils.

The strategic analysis of renewable energy use in the mining industry has revealed that this industry can bring internal and external benefits. Due to the strengths of this technology, its application in the mining industry can provide external opportunities. Moreover, by focusing on the strengths of renewable energy use, mining stakeholders can take advantage of the possible opportunities offered by this technology. Therefore, to make most of the strengths of renewable energy technology for the maximum use of the potential opportunities, the following strategies are suggested: establishing the necessary platform for training specialists and updating the educational system of universities to promote knowledge on the utility of renewable energy use; modifying management plans and setting suitable policies; granting long-term facilities with low interest rates and providing tax exemptions for the integration of this technology in mining operations; establishing new regulations on the purchase of excess energy by the government so as to support renewable energy producers and applying necessary changes in the mining laws of countries; using all the available capacities of mines and create inclusive mining sites (having all mining activities from extraction to processing) in order to make maximum use of this technology and meet the needs of consumers in case of a lack of energy; and changing attitudes in the macro-policy of mining in countries and making new regulations to replace fossil energy generation with renewable energy generation in mining operations and make the use of renewable energy in mines obligatory in the medium term.

Conclusions should include (1) the principles and generalizations inferred from the results, (2) any exceptions to or problems with these principles and generalizations, (3) theoretical and/or practical implications of the work, and (5) conclusions drawn and recommendations.

References

David, Fred R, and Forest R David. 2016. *Strategic management: A competitive advantage approach, concepts, and cases*: Pearson-Prentice Hall.

Igogo, Tsisilile, Travis Lowder, Jill Engel-Cox, Alexandra M Newman, and Kwame Awuah-Offei. 2020. "Integrating clean energy in mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches."

Jandieri, Gigo. 2022. "A generalized model for assessing and intensifying the recycling of metal-bearing industrial waste: A new approach to the resource policy of manganese industry in Georgia." *Resources Policy* 75:102462.

Pouresmaieli, Mahdi, and Morteza Osanloo. 2019a. "Establishing a Model to Reduce the Risk of Premature Mine Closure." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Pouresmaieli, Mahdi, and Morteza Osanloo. 2019b. "A Valuation Approach to Investigate the Sustainability of Sorkhe-Dizaj Iron Ore Mine of Iran." International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection.

Strazzabosco, Alice, Jan Henrik Gruenhagen, and Stephen Cox. 2022. "A review of renewable energy practices in the Australian mining industry." *Renewable Energy*.

Tahernejad, Mohammad Mehdi, Mohammad Ataei, and R Khalokakaei. 2013. "A strategic analysis of Iran's dimensional stone mines using SWOT method." *Arabian Journal for Science and Engineering* 38 (1):149-154.

نشریه مهندسی معدن ایران
Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

دوره ۱۹، شماره ۶۲، بهار ۱۴۰۳، صفحه ۳۹ تا ۶۱
Vol 19, No 62, 2024, pp 39-61

DOI: 10.22034/ijme.2024.2012666.1982

انجمن مهندسی معدن ایران
Iranian Society of Mining Engineering
(IRSME)

مقاله پژوهشی

راهبرد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش معدن

مهدی پوراسماعیلی[۱]، محمد عطایی[۲*]، علی نوری قراحسنلو[۳]، زهرا غیاثی[۴]

۱. دانشجوی دکتری؛ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ شاهرود؛ ایران، mpouresmaieli@gmail.com
۲. استاد دانشگاه؛ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ شاهرود؛ ایران، ataei@shahroodut.ac.ir
۳. استادیار دانشگاه؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی؛ قزوین؛ ایران، ali_nouri@eng.ikiu.ac.ir
۴. دانشجوی کارشناسی‌ارشد؛ دانشکده معماری؛ گروه ساختمان و انرژی؛ دانشگاه شهید بهشتی؛ تهران؛ ایران، zahraghiyasi819@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

چکیده

معدن‌کاری در تمام جوامع معدنی یکی از فعالیت‌های اقتصادی بسیار مهم است که تاثیر قابل‌توجهی بر تولید ناخالص داخلی دارد. تامین انرژی برای بخش معدن‌کاری، بخش بزرگی از مصرف انرژی در تمام جوامع معدنی را به خود اختصاص داده و نه‌تنها برای فعالیت‌های معدنی بلکه به‌عنوان قلب بسیاری از صنایع از جمله حمل‌ونقل، ساخت‌وساز و تولید مواد و محصولات صنعتی اساسی است. با افزایش جمعیت جهان، تقاضا برای افزایش استفاده از مواد معدنی روبه‌رشد است و این افزایش تقاضا باعث افزایش مصرف انرژی در فعالیت‌های اکتشاف، استخراج، بهره‌برداری، فراوری، ذوب و پالایش مواد معدنی می‌شود. یکی از چالش‌های معدن‌کاری امروزی این است که بسیاری از معادن در مناطق دورافتاده و دور از مناطق شهری قرار دارند که این موضوع باعث افزایش وابستگی به منابع انرژی فسیلی شده است. با این‌حال، امکان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی در فعالیت‌های معدنی وجود دارد که می‌تواند به کاهش این وابستگی و تامین انرژی پایدار در این صنعت کمک کند. مقاله حاضر چالش‌ها، فرصت‌ها و تاثیرات انرژی‌های تجدیدپذیر بر شاخص‌های توسعه پایدار در فعالیت‌های معدنی را بررسی می‌کند. همچنین به ارایه برنامه و مدیریت استراتژیک استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری با استفاده از روش SWOT پرداخته است. نتایج نشان داد که با وجود فرصت‌های زیادی که این فناوری‌ها در معدن‌کاری ایجاد می‌کنند، نیاز به مطالعات بیشتری برای معرفی و پیاده‌سازی آن‌ها وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری تاثیر مثبتی بر شاخص‌های توسعه پایدار دارد. از این‌رو، استراتژی تهاجمی (استفاده حداکثری از نقاط قوت برای بهره‌مندی حداکثری از فرصت‌های ایجاد شده) به‌عنوان یک راه‌حل پیشنهاد شده است که می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت معدن کمک کند. به‌طورکلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری نه‌تنها به معدن‌ها کمک می‌کند تا منابع انرژی خود را تنوع بخشند، بلکه به افزایش کارایی و کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست کمک می‌کند. استفاده از این فناوری به نفع اقتصاد و جامعه است و می‌توانند به تحقق توسعه پایدار در صنعت معدنی کمک شایانی کند..

کلمات کلیدی

انرژی تجدیدپذیر، معدن‌کاری، توسعه پایدار، مدیریت استراتژیک، SWOT.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

صنعت معدن‌کاری به‌طورکلی به پنج بخش اصلی اکتشاف، استخراج، بهره‌برداری، فراوری و پالایش تقسیم می‌شود. این صنعت به عنوان یکی از صنایع مادر، منبع اصلی تامین مواد خام برای بسیاری از بخش‌های اقتصادی از جمله حمل‌ونقل، ساخت و ساز، هوافضا، فناوری‌های پیشرفته، انرژی و خود صنعت معدن اهمیت بسیاری دارد. ماکس پلانک، فیزیک‌دان برجسته آلمانی قرن ۱۹ و ۲۰ میلادی، معدن و معدن‌کاری را به‌عنوان یک جزو اساسی از تمامی جوانب زندگی تعریف می‌کند زیرا بدون معدن، تامین مواد مورد نیاز برای توسعه و پیشرفت در اقتصاد، فناوری و زیرساخت‌های جامعه امکان‌پذیر نیست. با افزایش جمعیت جهان و تغییر نگرش بسیاری از کشورها به سوی توسعه اقتصادی، نیاز به منابع معدنی به ویژه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. این نیاز به تامین مواد خام و منابع معدنی برای تولید و صنعت در سطح جهانی افزایش رو به رشدی داشته و به همین دلیل، صنعت معدن‌کاری به‌عنوان یکی از پایه‌های توسعه پایدار و پیشرفت اقتصادی مطرح می‌شود [۱]. امروزه کشورهای توسعه‌یافته تمرکز بیشتری بر بازیافت مواد معدنی کرده‌اند اما نقش صنعت معدن‌کاری به عنوان اصلی‌ترین منبع تولید مواد اولیه، غیرقابل‌انکار است [۲]. تولید مواد معدنی همواره یکی از مهم‌ترین شاخص‌های رشد اقتصادی در کشورها محسوب می‌شود [۳]. افزایش تقاضا برای مواد معدنی در کنار کاهش منابع پر عیار سبب افزایش استفاده از انرژی برای تولید مواد مورد نیاز معدنی می‌شود. این مساله میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صورت بالقوه افزایش می‌دهد [۴]. اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی اهمیت بسیاری دارد. برای کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، مصرف بهینه انرژی از مرحله استخراج مواد معدنی تا تولید محصول و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار انجام جذب کربن انتشاری ناشی از فعالیت معدنی بسیار حیاتی است. دو دسته اصلی مصرف انرژی در استخراج مواد معدنی شامل انرژی خارج از شبکه و انرژی متصل به شبکه است. بسیاری از معادن، برای تامین انرژی مورد نیاز خود از منابع خارج از شبکه استفاده می‌کنند. نوعی از سوخت‌های فسیلی مانند گازوییل، نفت سنگین و زغال‌سنگ برای عملیات استخراج مواد معدنی و حمل آن‌ها به کار می‌روند [۵]. "عملیات معدنی به شبکه انرژی وابسته است اما در سایت‌های معدنی با دسترسی به شبکه، معمولا از منابع انرژی ارزان‌تری برای عملیات معدن‌کاری استفاده می‌شود ولی در کشورهایی که به شبکه اعتماد نمی‌کنند، معدن‌ها از منابع انرژی پشتیبان استفاده می‌کنند که عمدتا از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود که ممکن است هزینه‌های تولید را افزایش دهد. انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین هزینه‌های عملیاتی در صنعت معدن شناخته می‌شود و عمدتا ۱۵ تا ۴۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی را تشکیل می‌دهد. با توجه به این که تولید و تامین انرژی در فعالیت‌های معدنی نقش اساسی دارد و بخش قابل‌توجهی از این انرژی از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود، صنعت معدن به شدت تحت تاثیر نوسانات قیمت سوخت‌های فسیلی قرار دارد. به توجه به پیش‌بینی‌ها، تقاضا برای انرژی در عملیات معدنی تا سال ۲۰۳۵ نسبت به سال ۲۰۱۸ تا ۳۶ درصد افزایش خواهد یافت [۶].

وابستگی معادن به سوخت‌های فسیلی، علاوه بر مسایل اقتصادی، تاثیرات نامطلوبی بر جوامع محلی، زیرساخت‌های محلی، کیفیت هوا، آب و محیط‌زیست دارد که می‌تواند به توسعه پایدار آسیب برساند. توسعه پایدار تلاشی برای حفظ منابع طبیعی و خدمات اکوسیستم است که اقتصاد و جامعه به آن وابسته‌اند. استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم بر بسیاری از اهداف توسعه پایدار اثرات منفی بگذارد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فعالیت‌های معدنی می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و از تاثیرات منفی اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی که اساس توسعه پایدار را تشکیل می‌دهند، جلوگیری کند [۷].

صنعت معدن‌کاری به‌عنوان یکی از صنایع با بالاترین مصرف انرژی در جهان شناخته می‌شود. این صنعت تقریبا ۳۸ درصد از مصرف انرژی تمام صنایع، ۱۵ درصد از مصرف برق جهانی و ۱۱ درصد از کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین، حدود ۱۹ درصد از تولید جهانی زغال‌سنگ و محصولات زغال‌سنگی، ۵ درصد از مجموع گاز مصرفی جهان و ۲ درصد از کل مصرف نفت جهان از سوی این صنعت تامین می‌شود [۸].

مصرف انرژی در صنعت معدن‌کاری در سراسر جهان برآورد می‌شود که در سال ۲۰۲۱ حدود ۱۲٫۰۰۰ پتاژول (۱ پتاژول = ۳۱٫۶ میلیون مترمکعب گاز طبیعی یا ۲۷۸ میلیون کیلووات ساعت برق) بوده است. در کشورهایی که بخش معدن‌کاری نقش اساسی دارد، مصرف انرژی در این صنعت به نسبت بسیار

بالایی از مصرف انرژی کل کشور اختصاص داده می‌شود. به‌عنوان‌مثال، در کشور زامبیا، حدود ۵۰ درصد از کل مصرف انرژی به بخش معدن مرتبط است [۹].

مصرف بالای انرژی در صنعت معدن‌کاری باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل‌توجهی شده و تاثیرات مخربی بر آلایندگی هوا و تغییرات آب‌وهوایی دارد. به عنوان مثال، تولید کنسانتره مس جهانی مسوول تولید ۳۰ میلیون تن معادل CO_2 (CO_2-eq) است، در حالی که تولید آهن سنگ مسوول تولید ۱۷ میلیون تن معادل CO_2-eq و تولید بوکسیت مسوول تولید ۰٫۸ میلیون تن معادل CO_2-eq در سراسر جهان است [۱۰].

کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی در صنعت معدن‌کاری برای کاهش گازهای گلخانه‌ای یک هدف اساسی است. ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای معدن‌کاری نیاز به شناسایی دقیق این فرآیندها دارد که شامل انفجار مواد معدنی (در صورت نیاز)، تولید مواد معدنی، حمل و نقل، خردکردن مواد معدنی، فرآوری مواد معدنی، ذوب و پالایش می‌شود [۴, ۸].

مطالعات در زمینه استفاده از انرژی تجدیدپذیر در صنعت معدنکاری به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند. گروه اول به بررسی پتانسیل استفاده و یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن مناطق دورافتاده می‌پردازد که عمدتا از منابع انرژی خارج از شبکه استفاده می‌کند. گروه دوم به تمرکز بر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند سیستم‌های باد و خورشید اختصاص دارد. گروه آخر به مطالعه فرصت‌ها و چالش‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای خاص می‌پردازد [۱۱-۱۳].

تاکنون، تعداد محدودی از مطالعات به صورت جامع به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن پرداخته‌اند. اطلاعات نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۰، حدود ۵ گیگاوات پروژه انرژی تجدیدپذیر در معادن اجرا یا برنامه‌ریزی شده بود. این میزان انرژی سهم بسیار کمی از کل مصرف انرژی معادن را تشکیل می‌دهد [۵].

در این مقاله، چالش‌ها، فرصت‌ها و راهکارهای موثر برای ایجاد بستر مناسب به منظور انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن با تمرکز بر توسعه پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد. از رویکرد استراتژیک SWOT برای اتخاذ تصمیمات بهینه برای انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری استفاده می‌شود.

بخش دوم مقاله به بررسی چالش‌های موجود در حوزه معدن‌کاری و تامین انرژی در این صنعت و بخش‌های سوم و چهارم به بررسی چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری می‌پردازد. بخش پنج به ارایه مدل مدیریت استراتژیک SWOT برای تعیین استراتژی مناسب به منظور استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری اختصاص دارد و در نهایت، بخش ششم حاوی بحث و نتیجه‌گیری نهایی مقاله است.

۲- چالش‌های انرژی در صنعت معدن‌کاری

بخش معدن‌کاری فلزی در جهان تا سال ۲۰۲۰ حدود ۳٫۹۹۴۵ میلیون مترمکعب تولید داشته که درآمد حاصل از آن به ۶٫۲۵۲۰ میلیارد دلار می‌رسد. مواد معدنی در جهان به چهار گروه اصلی مواد معدنی صنعتی، کانی‌های فلزی، سنگ‌دانه‌ها و سوخت‌های معدنی تقسیم می‌شوند. تاریخچه قیمت مواد معدنی نشان می‌دهد که آن‌ها معمولا در چرخه‌های قیمتی قرار می‌گیرند و این موضوع بر اساس عوامل مختلفی مانند سیاست‌های دولتی، توقعات اقتصادی و شرایط زیست‌محیطی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۱۴].

بخش معدن به علت اهمیت اقتصادی و اجتماعی خود، همواره تحت نظارت‌های شدیدی قرار دارد و مسایلی مانند سلامت و ایمنی کارگران و تاثیرات زیست‌محیطی به محیط اطراف معادن همواره مورد توجه قرار گرفته‌اند. در کشورهای درحال‌توسعه، به دلیل اهمیت بخش معدن و نیاز به انرژی برای عملیات معدن‌کاری، سیاست‌های دولتی در این زمینه اهمیت ویژه‌ای دارند. این سیاست‌ها ممکن است در برخی موارد، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را محدود کنند، حتی اگر ظرفیت فنی برای استفاده از آن در دسترس باشد [۱۵].

معدن‌کاری به پنج بخش اصلی شامل حفاری و انفجار، بارگیری، حمل‌ونقل، فرآوری، ذوب و پالایش تقسیم می‌شود. این صنعت به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی شناخته می‌شود و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که نیاز به انرژی در آینده افزایش خواهد یافت. عدم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در این صنعت باعث افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۱۶].

بـه عنوان‌مثـال، اســـتخراج طلا به انرژی بالایی نیاز دارد و افزایش تولید طلا در اعماق زمین باعث افزایش انتشـــار گازهای گلخانه‌ای می‌شـود. در سال ۲۰۲۱، تقریبا ۵۲ تا ۸۱ میلیون تن CO_2 به علت استخراج طلا انتشار پیدا کرده است [۱۵].

۲-۱- کاهش عیار در معادن

کـاهش عیـار مواد معـدنی بـه عمق زمین موجـب افزایش مصـرف انرژی در معدن‌کاری شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد. همچنین، دســـترســـی دشـــوار به معادن باعث افزایش هزینـــه‌هـا برای تـامین انرژی و حمـل و بـارگیری مواد معدنی می‌شـــود و در نتیجه مصـــرف انرژی و انتشـــار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد [۱۷].

۲-۲- عدم ثبات قیمت مواد معدنی و سوخت

نوسانات قیمت‌ها در صنعت معدن به عنوان عواملی مهم مطرح می‌شـوند که می‌توانند باعث عدم‌قطعیت اقتصادی و کاهش حاشیه ســـود در فعـالیـت‌هـای معـدنی شـــوند. علاوه بر این، قیمت‌های ســـوخت‌های فســـیلی که انرژی مورد نیاز معادن را تامین می‌کند، تحـت‌تـاثیر نوســـانات مختلفی قرار می‌گیرد که این امر می‌تواند بر سودآوری پروژه‌های معدنی تاثیر منفی بگذارد. [۶].

۲-۳- افزایش نگرانی‌هـای زیســـت‌محیطی در صـــنعت معدن‌کاری

معـدن‌کـاری به دو طریق می‌تواند باعث افزایش نگرانی‌های زیســـت‌محیطی و انتشـــار گازهای گلخانه‌ای در ســـطح محلی و جهانی شود. اولین مورد، تجهیزات و سیستم‌های مکانیزه مرتبط با عملیات معدن‌کاری از اســـتخراج تا تولید محصول نهایی است که باعث انتشـــار گازهای گلخانه‌ای می‌شـــود و دوم، فعالیت‌های معـدنی مـانند انفجار و فرآوری اســـت که می‌تواند باعث ایجاد آلایندگی صوتی، گرد و خاک و تولید باطله حاوی مواد شیمیایی شـــود. این فعـالیـت‌هـا می‌توانـد در نهایت تاثیر زیادی بر روی فرســـایش خاک، تغییر کاربری زمین، آلودگی خاک، آب و هوا شـود که در نهایت برای سـلامت انسـان و موجودات زنده ایجاد خطرناک است [۱۸].

۲-۴- افزایش نگرانی‌های ســیاسی و اجتماعی در صنعت معدن‌کاری

صـــنعـت معـدن‌کاری امروزه با فشـــارهای ســـیاســـی و زیســـت‌محیطی مواجه اســـت. ســـازمان‌های بین‌المللی، دولت‌ها، فعالین محیط‌زیست و تولیدکنندگان نهایی همچون فناوری‌های الکتریکی و انرژی‌هـای تجـدیـدپـذیر از معـدن‌ها نیاز به کنترل آلودگی و کاهش وابســتگی به ســوخت‌های فســیلی دارند. برای پاسـخ به این فشارها، برخی کشورها قوانین سخت‌گیرانه‌تری در خصـــوص محیط‌زیســـت و مالیات تولید کربن ایجاد کرده‌اند. از طرفی، جوامع معـدن‌کـاری نیز به دلیل کاهش آلودگی و تداوم تولید انرژی تجدیدپذیر در زمان بسـته‌شدن معدن‌ها از استفاده از انرژی‌هـای تجـدیدپذیر حمایت می‌کنند. این تغییرات ممکن است با افزایش تقاضا برای انرژی در آینده همراه باشد [۱۹].

۳- چـالش‌هـای انرژی‌هـای تجـدیـدپذیر در صـــنعت معدن‌کاری

اسـتفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن روزبه‌روز در حـال افزایش اســـت اما چالش‌های فنی موجود باعث ایجاد موانع و محـدود شـــدن عملیـات ایجاد فناوری‌های تجدیدپذیر در ســـطح گســـترده شـده اســت. در این بخش، به برخی از چالش‌های موجود در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن اشاره می‌شود.

۳-۱- مواد مصرفی در عملیات فراوری

عملیـات معـدنی نمی‌توانـد بـه صـــورت کامل با فناوری‌های تجدیدپذیر جایگزین شـود و از انتشـار کربن صـنعت معدنکاری جلوگیری کند. زغال‌چوب به عنوان جایگزین کک مورد اســـتفاده قرار می‌گیرد امـا همچنان چالش‌هایی مانند تولید جهانی، حمل و نقل و نکات فنی وجود دارد. همچنین، هیدروژن می‌تواند به جای چوب و سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرد اما هزینه‌های تولید هیدروژن از زغال چوب و سوخت‌های فسیلی بیشتر است و نیاز به سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه دارد [۲۰].

۳-۲- گرمای مورد نیاز در عملیات فراوری مواد معدنی

استفاده از گرما در معدن‌کاری برای فراوری مواد معدنی یک چالش اســاســی اســت. نیاز به دماهای مختلف در فراوری مواد معدنی، از دماهای پایین تا بالا، تنوع بسـیاری از مصـرف‌ها را به وجود آورده اسـت. بیشـتر برای تامین این گرما از سـوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود اما فناوری‌های تجدیدپذیر نیز به تدریج وارد این عرصه می‌شوند. [۲۱].

اکثر فنـاوری‌هـا بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر توانایی تامین گرما در دماهای پایین و متوســـط را دارند. اســـتفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک گزینه امیدبخش برای تامین این گرما

مطرح شده است. تحقیقات اخیر نشان داده که تولید گرما با دماهای بالا تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز به وسیله انرژی‌های تجدیدپذیر ممکن است [۲۲].

در زمان نگارش این مقاله، تنها منبع انرژی اقتصادی که به صورت تجدیدپذیر است و توانایی تولید دمای بالای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد، استفاده از زغال چوب است. زغال چوب، توانایی تولید گرما با دمای ۱۲۶۰ درجه سانتی‌گراد را دارد اما منابع زغال چوب و خود چوب، محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند [۲۳].

۳-۳- تامین انرژی ثابت در فعالیت‌های معدن‌کاری

صنعت معدن‌کاری نیازمند انرژی پایدار و پیوسته است اما تامین این نیاز با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر چالش‌هایی ایجاد می‌کند. حتی با ترکیب فناوری‌های مختلف مانند باد و خورشید، ممکن است در ساعات پرترافیک انرژی اضافی تولید شود که نیاز به ذخیره‌سازی دارد. ذخیره‌سازی این انرژی با محدودیت‌هایی همراه است و ممکن است اقتصادی نباشد. برای حل این مساله، بسیاری از معادن به سیستم‌های هیبریدی روی آورده‌اند که مازاد انرژی خود را با ژنراتورهای دیزلی تامین می‌کنند [۲۴]. امروزه با توجه به مشکلات اشاره شده بسیاری از معادن می‌توانند بخشی از انرژی مورد نیاز خود را با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تامین کنند که میزان آن به طور متوسط ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل برق مصرفی در سایت معدنی است [۶].

۳-۴- نوسازی ساختار سرمایه‌گذاری

عمر معدن می‌تواند از ۲ تا بیش از ۵۰ سال باشد. تعیین عمر معدن یک ورودی حیاتی برای محاسبه بازده سرمایه و میزان سرمایه‌گذاری در این بخش است [۲۵]. تصمیمات اساسی در عملیات معدنی معمولا در مراحل پیش از شروع فعالیت‌ها گرفته می‌شود و تغییرات در طرح‌های توسعه معدن ممکن است پس از اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری بسیار پیچیده باشد. بسیاری از فعالیت‌های معدنی از رویکرد همه یا هیچ استفاده می‌کنند، به این معنا که تا زمانی که معدن سوددهی خود را حفظ کند، به ظرفیت خود ادامه می‌دهند و از زمان شروع پروژه تمام هزینه‌های سرمایه‌گذاری را پوشش می‌دهند. اگر هزینه‌های عملیاتی از درآمد حاصل از آن کمتر شود، فعالیت معدنی متوقف می‌شود؛ بنابراین، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن چالش‌های خاصی را ایجاد می‌کند. در برخی صنایع مانند تولید فولاد که از فناوری‌های قدیمی استفاده می‌کند، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ممکن است از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نباشد. در این حالت، افزایش بهره‌وری انرژی یا کاهش انتشار CO_2 ممکن است گزینه بهتری باشد. [۲۶]. در حال حاضر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن‌کاری ممکن است پرهزینه باشد اما ادامه تحقیقات در این زمینه می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن می‌تواند در مراحل طراحی و امکان‌سنجی پروژه‌های معدنی مورد توجه قرار گیرد. یکی از چالش‌های اصلی این تغییر، کمبود آموزش‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر برای مهندسان معدن است. برگزاری دوره‌های آموزشی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر توسط صنعت معدن، تعامل با تامین‌کنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر و ارتقا دانش مهندسان معدن می‌تواند این چالش را حل کند. برای مثال، برخی پروژه‌های معدنی در استرالیا از سیستم‌های هیبریدی خورشید- باد- باطری- ژنراتور دیزلی در مراحل طراحی و امکان‌سنجی استفاده کرده‌اند و تخمین زده‌اند که این سیستم‌ها می‌توانند میزان انتشار CO_2 را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. [۲۵].

۳-۵- تغییر زیرساخت

تغییر زیرساخت در تجهیزات معدن از سوخت‌های فسیلی به منابع انرژی تجدیدپذیر با مجموعه‌ای از چالش‌ها همراه است. یکی از موانع کلیدی ماهیت انرژی بر عملیات استخراج است که به منابع قوی و ثابت انرژی نیاز دارد. انرژی‌های تجدیدپذیر، متناوب بودن، نیازمند راه‌حل‌های نوآورانه برای تضمین تامین انرژی مداوم و قابل‌اعتماد برای ماشین‌آلات سنگین است. ادغام سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در تجهیزات معدنی موجود چالش‌های فنی ایجاد می‌کند. تطبیق این ماشین‌ها برای کار با برق یا سایر منابع انرژی پاک ممکن است نیاز به تغییرات قابل‌توجهی داشته باشد که به‌طور بالقوه بر کارایی، هزینه و عملکرد کلی آن‌ها تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، هزینه‌های اولیه مرتبط با دستیابی و اجرای فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر برای تجهیزات معدن می‌تواند قابل‌توجه باشد. سرمایه‌گذاری نه‌تنها برای زیرساخت‌های تجدیدپذیر بلکه برای ارتقا یا جایگزینی ماشین‌آلات موجود برای سازگاری با منابع انرژی پاک‌تر نیز مورد نیاز است. علاوه بر این، مکان‌های دوردست که اغلب با عملیات معدن مرتبط‌اند، می‌توانند استقرار راه‌حل‌های انرژی تجدیدپذیر

را پیچیده کنند. ایجاد و حفظ زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در این مناطق ممکن است نیازمند غلبه بر چالش‌های زیرساختی باشد. در نتیجه، چالش‌های انتقال تجهیزات معدن از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر شامل رسیدگی به نیازهای انرژی ماشین‌های سنگین، تغییرات فنی، هزینه‌های اولیه و ملاحظات لجستیکی است. غلبه بر این چالش‌ها مستلزم یک رویکرد استراتژیک، نوآوری فناوری و تعهد به شیوه‌های پایدار در صنعت معدن است.

۴- فرصت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن‌کاری

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید به دلیل کاهش هزینه‌ها و پیشرفت فناوری، اکنون به عنوان یک راه‌حل اقتصادی و برای کاهش تولید کربن در صنعت معدن مورد توجه قرار می‌گیرد. این انتخاب می‌تواند به تناسب اقتصادی عملیات معدنی کمک و از تاثیرات نوسانات قیمت سوخت جلوگیری کند. همچنین، این اقدامات می‌تواند توسعه اقتصادی، ارتقای فناوری و ایجاد ارزش مشترک را تشویق و به ارتقای پذیرش فعالیت معدنکاری توسط جوامع محلی کمک کند. [۲۷].

۴-۱- عملیات معدن‌کاری

مطابق شکل ۱ فعالیت‌های معدنی به‌طور گسترده به نیروی الکتریکی وابسته‌اند و می‌توانند با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. این تغییرات می‌توانند هم در سایت‌های متصل به شبکه[۱] و هم در سایت‌های خارج از شبکه[۲] انجام شود. در ایالات‌متحده، صنعت معدن‌کاری به طور گسترده از سوخت‌های فسیلی به ویژه در تولید فلزات برای تامین انرژی استفاده می‌کند. این مصرف انرژی به میزان زیادی از سوخت‌های فسیلی به ویژه در صنعت آهن و فولاد برخوردار است اما برنامه‌ریزی برای کاهش این وابستگی به سوخت‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک کند. [۲۸].

۴-۲- پاسخ به تقاضا

انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند در تولید انرژی برای عملیات معدن‌کاری نقش مهمی ایفا کنند. برای مثال، در بخش‌هایی از معدن‌کاری مانند سنگ‌شکنی و آسیاب، انرژی الکتریکی به عنوان منبع اصلی مصرف می‌شود و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در این بخش‌ها می‌تواند ساده‌تر باشد. همچنین، تهویه معادن زیرزمینی نیز می‌تواند از طریق انرژی الکتریکی تامین شود. در آمریکا، ۶۳ درصد از برق مورد نیاز معادن از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود که قابلیت جایگزینی آن با انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد [۲۹].

صنعت معدن‌کاری با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر خارج از شبکه و پشتیبانی برق داخل شبکه می‌تواند مزایای اقتصادی و محیطی داشته باشد. شرکت‌ها می‌توانند مازاد برق تولیدی خود را به شبکه بفروشند و از این طریق درآمدزایی کنند. موفقیت‌هایی مانند پروژه‌های خورشیدی در استرالیا و منابع انرژی زمین‌گرمایی در گینه‌نو و نیروی بادی در شمال کانادا، نقش مثبت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری را نشان می‌دهد [۳۰].

۴-۳- تامین سوخت مورد نیاز تجهیزات و حمل و نقل

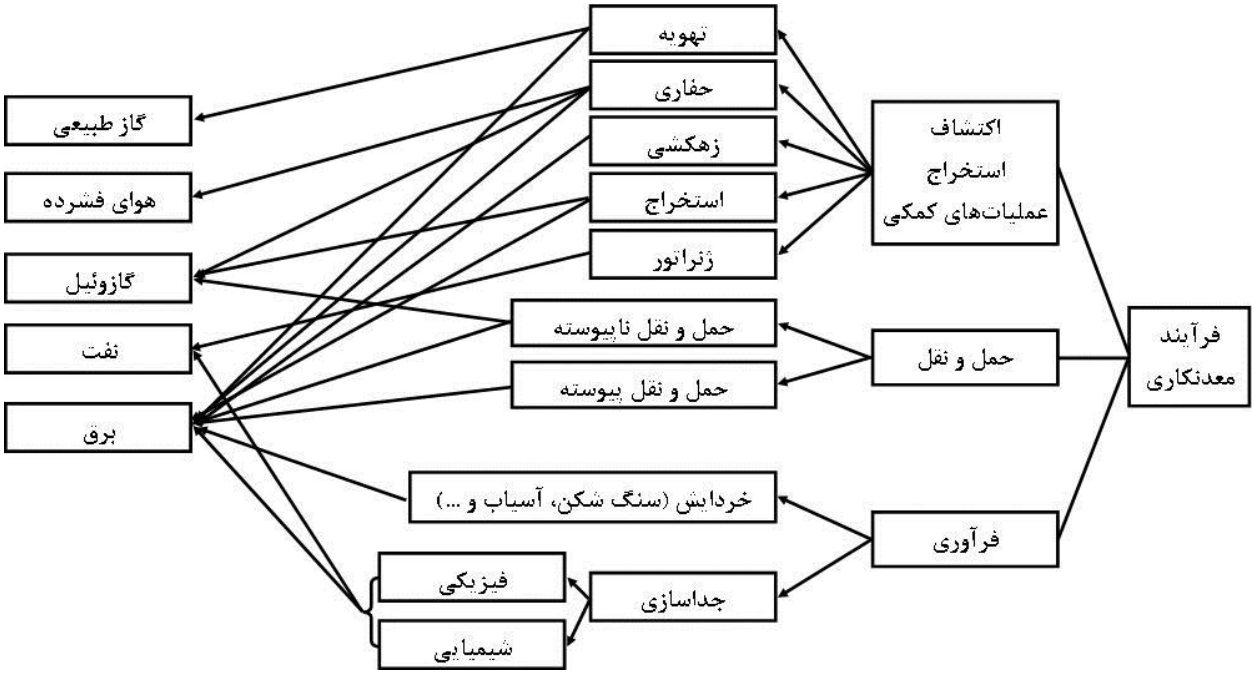
در صنعت معدن‌کاری برای بخشی از عملیات به سوخت‌های فسیلی نیاز است. با ایجاد تغییرات در تجهیزات، می‌توان از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت فسیلی استفاده کرد. علاوه بر این، در فرآیند حمل و نقل مواد معدنی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای گازوییل و سوخت‌های فسیلی به ویژه در معادن زیرزمینی برای کاهش انتشار کربن می‌تواند مزیت داشته باشد [۳۱].

۴-۴- جایگزینی در پروسه‌های فراوری مواد معدنی (جایگزین زغال‌سنگ)

در فرآیند فراوری معادن، برخی از عملیات به سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ و گاز طبیعی نیاز دارند. انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در این بخش‌ها چالشی است. مطالعات نشان می‌دهند که تا ۳۰ درصد از نیاز انرژی در فرآیند فراوری معادن می‌تواند به وسیله انرژی‌های تجدیدپذیر تامین شود. به عنوان مثال، در تولید فولاد، زغال‌سنگ به عنوان ماده اصلی استفاده می‌شود و جایگزین کردن آن با منابع تجدیدپذیر مشکل است. استفاده از زغال‌سنگ و گاز طبیعی همچنین اثرات جانبی دارد که می‌توانند با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

[۱] On-grid
[۲] Off-grid

کاهش یابند [۳۲].



شکل ۱- فرآیندهای عملیات معدنی و منابع انرژی مورد نیاز

۴-۵- فرصت آفرینی برای جوامع معدنی و اقتصاد دایره‌ای

رشد سریع فناوری‌های تجدیدپذیر فرصت‌های هم‌افزایی بین صنعت، معدن، دولت‌ها و فناوری‌های تجدیدپذیر ایجاد می‌کند. برخی از این فناوری‌ها به موادی مانند کبالت، لیتیوم، نیکل و فلزات خاکی کمیاب وابسته‌اند که برای زنجیره تامین مواد اولیه‌حیاتی‌اند. تامین این مواد با ریسک‌هایی ناشی از بی‌ثباتی سیاسی و نگرانی‌های زیست‌محیطی مواجه است. به اشتراک‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر با جوامع محلی می‌تواند اشتغال و توسعه کشاورزی را ترویج کرده و تاثیرات اجتماعی و ثبات سیاسی را افزایش دهد. کاهش هزینه‌های معدن از طریق کاهش هزینه‌های انرژی می‌تواند رقابت‌پذیری اقتصادی جوامع معدنی را افزایش دهد و برای کشورهای معدنی استراتژیک اهمیت داشته باشد [۳۳].

۴-۶- استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن‌کاری و توسعه پایدار

با توجه به این که یکی از ارکان توسعه پایدار، بهره‌مندی از فناوری‌های روز دنیا است؛ ارتباط بین توسعه پایدار و انرژی‌های تجدیدپذیر انکارنشدنی است. مفاهیم توسعه پایدار در مقالات مختلف ارایه شده توسط محققان این مقاله به صورت مفصل بحث شده است و خوانندگان می‌توانند برای مطالعه مفاهیم توسعه پایدار، مقالاتی که در اینجا به آن‌ها ارجاع داده شده است را مطالعه کنند [۳۴, ۳۵]. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی توسعه پایدار تاثیر بگذارد. در این بخش اثرات انرژی‌های تجدیدپذیر بر روی شاخص‌های توسعه پایدار بررسی می‌شود.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری می‌تواند بهبود شرایط محیط زیستی منطقه معدنی را محقق سازد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. این اقدام به جلوگیری از تغییرات اقلیمی نیز کمک می‌کند.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری می‌تواند آگاهی جامعه را افزایش داده و مشاغل جدید را در منطقه مناطق معدنی ایجاد کند. همچنین، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود سلامتی جامعه از دیگر مزایای این فناوری است. با این حال، پذیرش جامعه و ایجاد زیرساخت‌ها و قوانین مناسب از چالش‌هایی است که نیاز به اقدامات فرهنگی و سیاسی دارد.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند در شاخص اقتصادی به افزایش درآمد معادن از طریق فروش برق مازاد تولیدی و ایجاد کسب‌وکار دایره‌ای در صنعت معدن‌کاری منجر شود. با این حال، هزینه‌های بالا برای ایجاد زیرساخت‌های فناوری‌های تجدیدپذیر و نیاز به نگهداری تجهیزات ممکن است چالش‌هایی باشند که نیاز به مدیریت دقیق دارند.

۵- تعیین استراتژی مناسب برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن‌کاری

هدف این بخش، توسعه یک رویکرد استراتژیک برای تعیین استراتژی مناسب به منظور بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن است. این رویکرد بر اساس تجزیه و تحلیل ماتریس SWOT انجام می‌شود. در این مرحله، ابتدا عوامل استراتژیک داخلی شامل نقاط قوت و ضعف مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس عوامل استراتژیک خارجی که شامل فرصت‌ها و تهدیدها است، بررسی و تحلیل می‌شود. تحلیل SWOT به تصمیم‌گیری در مورد استراتژی‌های آتی در معدن کمک می‌کند. در مرحله بعد تمامی عوامل استراتژیک مشخص شده با روش‌های ارزیابی عامل داخلی[۱] و ارزیابی عامل خارجی[۲] ارزیابی می‌شوند. در نهایت موقعیت استراتژیک استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ماتریس داخلی-خارجی[۳] مشخص شده است و با توجه به موقعیت به دست‌آمده استراتژی مناسبی برای استفاده از این فناوری جدید در معدن‌کاری اتخاذ خواهد شد. چارچوب استفاده از این روش در بررسی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری به شرح زیر است:

- جمع‌آوری و آماده‌سازی بانک داده.
- شناسایی فاکتورهای استراتژیک چهارگانه (SWOT).
- شناسایی امتیاز وزنی ماتریس فاکتورهای داخلی و خارجی.
- تشکیل ماتریس IE.
- تعیین استراتژی‌های مناسب برای کاربری انرژی تجدیدپذیر در معدن.

تجزیه و تحلیل SWOT هسته مرکزی فرآیند انتخاب استراتژی مناسب برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری است. این فرآیند از تحلیل دسکتاپ[۴]، مشاوره تخصصی و تحلیل سایت بهره می‌برد [۳۶]. برای شناسایی عوامل استراتژیک داخلی و خارجی، از ترکیب این سه روش استفاده می‌شود [۳۷]. همچنین، تجزیه تحلیل سایت با مشارکت تخصصی افراد دارای دانش کافی انجام می‌شود. این روش‌ها، تضمین می‌کنند که نظرات خبرگان و تخصص‌ها به طور کامل در مطالعه لحاظ شوند. سوالات زیر برای شناسایی عوامل استراتژیک تاثیرگذار بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری مطرح شد:

- چه مزایایی در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری وجود دارد؟
- چه عوامل ضعفی باید در مورد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری در نظر گرفته شوند؟
- چه فرصت‌هایی به عنوان نتیجه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن به وجود خواهند آمد؟
- چه تهدیداتی باید در نظر گرفته شوند که ممکن است در راه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری پیش آید؟

ماتریس‌های SWOT پس از شناسایی عوامل استراتژیک عوامل داخلی و خارجی ایجاد می‌شود. این ماتریس دارای ۴ بخش است. ۲ بخش از این ماتریس شامل عوامل داخلی و دو بخش آن به عوامل خارجی می‌پردازد. با توجه به جدول ۱ بر اساس نتایج به دست آمده از این ماتریس، می‌توان به ۴ نوع استراتژی کلی دست یافت که در مراحل بعدی می‌توان از نتیجه استراتژی حاصل شده برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری و توسعه اهداف زیر از آن استفاده کرد [۳۸]:

- به حداکثر رساندن استفاده از نقاط قوت.
- توقف، حذف و یا به حداقل رساندن نقاط ضعف.
- بیشترین استفاده از فرصت‌های ایجاد شده در نتیجه اجرای پروژه.
- جلوگیری از تهدیدات احتمالی ناشی از اجرای پروژه.

جدول ۱- دسته‌بندی انواع استراتژی حاصل از روش SWOT [۳۹]

شناسه (ID)	نوع استراتژی	عنوان استراتژی	تعریف
SO	استراتژی بر پایه قوت - فرصت[۵]	تهاجمی[۶]	استفاده حداکثری از نقاط قوت برای بهره‌مندی از فرصت‌ها
ST	استراتژی بر پایه قوت - تهدید	رقابتی[۷]	استفاده حداکثری از نقاط قوت برای جلوگیری از تهدیدات احتمالی و تلاش برای از بین بردن تهدیدات
WO	استراتژی بر پایه ضعف - فرصت	محافظه‌کارانه[۸]	استفاده از فرصت‌های ایجاد شده برای کاهش نقاط ضعف

[۱] Internal Factor Evaluation (IFE)
[۲] External Factor Evaluation (EFE)
[۳] Internal-External
[۴] Desktop analysis
[۵] Strength-Opportunities
[۶] Aggressive
[۷] Competitive
[۸] Conservative

WT	استراتژی بر پایه ضعف - تهدید	تدافعی[1]	جلوگیری از آسیب‌دیدگی به دلیل نقاط ضعف در برابر تهدیدها و عوامل خارجی

۵-۱- ساخت ماتریس IFE

ماتریس IFE یک ماتریس تجزیه تحلیل کمی عوامل استراتژیک داخلی برای روش SWOT است. ابتدا وزن نسبی هر یک از عوامل استراتژیک داخلی با استفاده از IFE محاسبه می‌شود. برای این کار، با استفاده از نظر خبرگان اهمیت هر یک از عوامل داخلی در مقیاس ۱ تا ۵ (۱: اهمیت کم و ۵: اهمیت زیاد) تعیین می‌شود. در قدم بعد میانگین امتیاز هر عامل محاسبه شده و این مقادیر با استفاده از رابطه۱ وزن نسبی برای هر عامل داخلی نرمال می‌شود [۴۰].

$$W_{IF_i} = \frac{MVIF_i}{\sum_{i=1}^{n}(MVIF_i)} \quad (۱)$$

که در آن:

$MVIF_i$: میانگین مقدار اهمیت فاکتور استراتژیک داخلی i.

W_{IF_i}: وزن فاکتور داخلی i.

وزن هر عامل نشان‌دهنده اهمیت نسبی عامل مورد نظر نسبت به سایر عوامل داخلی است و مجموع این وزن‌ها برابر با ۱ است. سپس با توجه به جدول ۲، کارشناسان به هر یک از عوامل ضعف عدد ۱ و ۲ و برای هر یک از عوامل قدرت عدد ۳ و ۴ اختصاص می‌دهند. امتیاز وزنی هر عامل با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. سپس، وزن کلی عوامل داخلی با استفاده از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

جدول ۲- تشریح امتیازات برای عوامل استراتژیک داخلی و خارجی [۳۸]

امتیاز	تشریح برای عوامل استراتژیک داخلی	تشریح برای عوامل استراتژیک خارجی
۱	ضعف عمده	تهدید عمده
۲	ضعف جزئی	تهدید جزیی
۳	قوت جزئی	فرصت جزیی
۴	قوت عمده	فرصت عمده

$$WS_{IF_i} = W_{IF_i} \times S_{IF_i} \quad (۲)$$

$$TWS_{IF} = \sum_{i=1}^{n}(W_{IF_i} \times S_{IF_i}) \quad (۳)$$

که در آن:

WS_{IF_i}: امتیاز وزنی عامل داخلی i.

S_{F_i}: امتیاز عامل داخلی i.

TWS_{IF}: امتیاز وزنی کل عوامل داخلی.

امتیاز TWS_{IF} در بازه ۱ تا ۴ قرار دارد. بنابراین مقدار میانگین آن ۲/۵ است. اگر TWS_{IF} کمتر از ۲/۵ باشد، نشان‌دهنده برتری نقاط ضعف نسبت به نقاط قوت است؛ در حالی که TWS_{IF} بالای ۲/۵ نشان‌دهنده برتری نقاط قوت نسبت به نقاط ضعف است [۳۸].

۵-۲- ساخت ماتریس EFE

ماتریس EFE به طور کمی عوامل استراتژیک خارجی را تجزیه تحلیل می‌کند. EFE مشابه IFE محاسبه می‌شود. تفاوت EFE این است که عوامل خارجی (فرصت‌ها و تهدیدها) در آن لحاظ می‌شود. وزن نسبی عوامل خارجی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$W_{EF_j} = \frac{MVEF_j}{\sum_{j=1}^{n}(MVEF_j)} \quad (۴)$$

که در آن:

$MVEF_j$: میانگین مقدار اهمیت فاکتور استراتژیک خارجی j.

W_{EF_j}: وزن فاکتور خارجی j.

وزن هر عامل نشان‌دهنده اهمیت نسبی عامل مورد نظر نسبت به سایر عوامل خارجی است و مجموع این وزن‌ها برابر با ۱ است. سپس با توجه به جدول ۴، کارشناسان به هر یک از عوامل تهدید عدد ۱ و ۲ و برای هریک از عوامل فرصت عدد ۳ و ۴ اختصاص می‌دهند. امتیاز وزنی هر عامل با استفاده از رابطه۵ محاسبه می‌شود. سپس، وزن کلی عوامل داخلی با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$WS_{EF_j} = W_{EF_j} \times S_{EF_j} \quad (۵)$$

$$TWS_{EF} = \sum_{j=1}^{n}(W_{EF_j} \times S_{EF_j}) \quad (۶)$$

که در آن:

WS_{EF_j}: امتیاز وزنی عامل خارجی j.

S_{EF_j}: امتیاز عامل خارجی j.

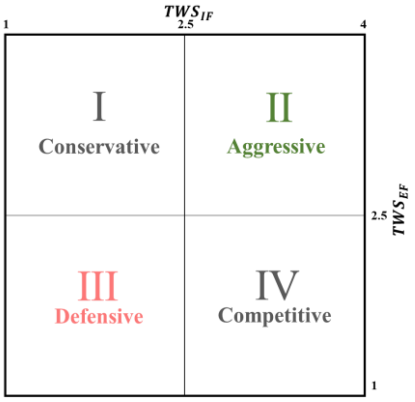
TWS_{EF}: امتیاز وزنی کل عوامل خارجی.

[1] Defensive

امتیاز TWS_{EF} در بازه ۱ تا ۴ قرار دارد. بنابراین مقدار میانگین آن ۲٫۵ است. اگر TWS_{EF} کمتر از ۲٫۵ باشد، نشان‌دهنده برتری تهدیدها نسبت به فرصت‌ها است؛ در حالی که TWS_{EF} بالای ۲٫۵ نشان‌دهنده برتری فرصت‌ها نسبت به تهدیدها است [۳۸].

۵-۳- ساخت ماتریس IE

از ماتریس IE برای تعیین موقعیت استراتژی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن استفاده خواهد شد (شکل ۵). ماتریس IE عوامل استراتژیک خارجی و داخلی را هم‌زمان بررسی می‌کند. TWS_{IF} و TWS_{EF} به ترتیب محورهای افقی و عمودی ماتریس IE را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، ماتریس IE به چهار بخش (بلوک) تقسیم شده است که هر یک از این بخش‌ها نشان‌دهنده یک موقعیت استراتژیک است. ویژگی‌های هر یک از بخش‌های نشان داده شده در شکل ۲، در جدول ۳ قابل‌ملاحظه است.



شکل ۲- ماتریس IE

جدول ۳- توضیحات مربوط به بخش‌های مختلف ماتریس IE

شماره بخش (بلوک)	جایگاه استراتژیک	توضیحات	نوع مناسب استراتژی
I	Conservative	$TWS_{IF} < 2.5$ & $TWS_{EF} \geq 2.5$	استراتژی محافظه‌کارانه (WO)
II	Aggressive	$TWS_{IF} \geq 2.5$ & $TWS_{EF} \geq 2.5$	استراتژی تهاجمی (SO)
III	Defensive	$TWS_{IF} < 2.5$ & $TWS_{EF} < 2.5$	استراتژی تدافعی (WT)
IV	Competitive	$TWS_{IF} \geq 2.5$ & $TWS_{EF} < 2.5$	استراتژی رقابتی (ST)

۵-۴- تعیین استراتژی مناسب

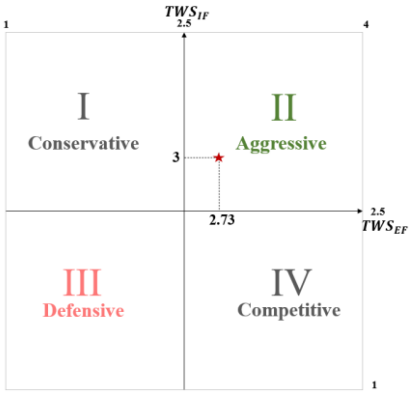
برای بررسی استراتژی مناسب در جهت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن ابتدا مهم‌ترین عوامل خارجی و داخلی شناسایی شد. سپس فرم‌های نظرسنجی برای تکمیل توسط خبرگان طراحی شد. فرم‌های تکمیل شده به ۲۰ خبره واجد شرایط ارسال شد که ۸ خبره با ویژگی‌های یاد شده در جدول ۴ فرم‌های طراحی شده را تکمیل کردند. در جدول ۵ عوامل استراتژیک تاثیرگذار برای استفاده در روش SWOT قابل‌مشاهده است.

پس از تشکیل ماتریس SWOT، TWS_{IF} و TWS_{EF} با استفاده از نظر خبرگان و با استفاده از روابط ۱ تا ۶ محاسبه شد. نتیجه ماتریس IEF و EFE در جدول ۸ قابل مشاهده است. ارقام در جدول ۶ به ۳ رقم اعشار گرد شدند.

با توجه به جدول ۶ مشخص شد که نتیجه حاصل از ارزیابی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری در بخش II قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه نتیجه استراتژی تهاجمی است باید از تمام نقاط قوت این فناوری برای استفاده از فرصت‌های ایجاد شده در صنعت معدن‌کاری استفاده کرد (شکل ۳) [۴۱]. جایگاه استراتژی به دست آمده برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری به روش SWOT و استراتژی‌های مناسب برای استفاده از این فناوری در صنعت معدن‌کاری در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۴- ویژگی گروه خبرگان

توانایی	تحصیلات	تعداد
افراد دانشگاهی	PhD	۴
افراد غیردانشگاهی	PhD	۱
دانشجو	PhD	۱
	MSc	۲



شکل ۳- نتیجه حاصل از ارزیابی استراتژیک استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری به روش SWOT

جدول ۵- عوامل استراتژیک مشخص شده برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری

عامل	شماره	تعریف
نقاط قوت (S)	S1	توان تولید بالا
	S2	مقرون‌به‌صرفه بودن مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر
	S3	به حداقل رساندن عدم‌قطعیت اقتصادی نسبت به سوخت‌های فسیلی
	S4	عدم تولید گاز گلخانه‌ای
	S5	منطبق بودن با شاخص‌های توسعه پایدار
نقاط ضعف (W)	W1	نبود سیستم مدیریتی و پشتیبانی از جمله زیرساخت مناسب، آموزش و نظایر آن
	W2	نیاز به فضای گسترده برای استفاده
	W3	هزینه تعمیر و نگهداری بالا
	W4	عدم تضمین در برآورده کردن انرژی ثابت
فرصت‌ها (O)	O1	وجود ظرفیت بالای استفاده در صنعت معدن‌کاری
	O2	امکان فروش مازاد تولید به شبکه برق سراسری
	O3	ایجاد مشاغل جدید در صنعت معدن‌کاری
	O4	امکان استفاده در تمام مراحل معدن‌کاری
	O5	کاهش عیار حد در معادن در نتیجه عدم استفاده از انرژی‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
	O6	امکان ایجاد اقتصاد دوطرفه بین معدن و صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر
	O7	فشار جوامع بین‌المللی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای
تهدیدها (T)	T1	تحریم توسط کشورها برای وارد کردن تجهیزات باکیفیت و عدم وجود تعامل موثر جهانی
	T2	ضعف قوانین موجود در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
	T3	بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
	T4	بالا بودن نرخ تسهیلات بانکی
	T5	عدم توازن تسهیلات اعطایی و سرمایه‌گذاری لازم
	T6	وابستگی به فناوری کشورهای خارجی
	T7	محدود بودن خدمات پس از فروش
	T8	وجود انرژی هیدروژنی به‌عنوان جایگزینی برای انرژی‌های بادی و خورشیدی
	T9	تغییر زیرساخت ماشین‌آلات از سوخت‌های دیزلی به سوخت‌های انرژی پاک
	T10	کمبود افراد متخصص در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر

جدول ۶- نتیجه ماتریس IFE و EFE برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری

IFE Matrices					EFE Matrices				
Internal FC	W_{IF_i}	S_{IF_i}	WS_{IF_i}	TWS_{IF}	External FC	W_{EF_i}	S_{EF_i}	WS_{EF_i}	TWS_{EF}
S1	0.097	4	0.387	3	O1	0.067	4	0.267	2.73
S2	0.161	4	0.645		O2	0.017	3	0.050	
S3	0.065	3	0.194		O3	0.050	4	0.200	
S4	0.129	4	0.516		O4	0.050	4	0.200	
S5	0.194	4	0.774		O5	0.083	4	0.333	
W1	0.065	1	0.065		O6	0.067	4	0.267	
W2	0.032	1	0.032		O7	0.083	4	0.333	
W3	0.129	1	0.129		T1	0.050	2	0.100	
W4	0.129	2	0.258		T2	0.067	2	0.133	
					T3	0.050	2	0.100	
					T4	0.083	2	0.167	
					T5	0.033	1	0.033	
					T6	0.083	2	0.167	
					T7	0.083	2	0.167	
					T8	0.033	2	0.067	
					T9	0.050	1	0.050	
					T10	0.050	2	0.100	

جدول ۷- استراتژی‌های مناسب برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری با نتیجه روش SWOT

قوت‌ها (S)	فرصت‌ها (O)	استراتژی (SO)
S5: منطبق بودن با شاخص‌های توسعه پایدار	O3: ایجاد مشاغل جدید در صنعت معدن‌کاری O6: امکان ایجاد اقتصاد دوطرفه بین معدن و صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر	SO1: ایجاد بستر لازم برای آموزش افراد متخصص و به‌روز کردن نظام آموزشی در دانشگاه‌ها در جهت مزایای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
S4: عدم تولید گاز گلخانه‌ای S5: منطبق بودن با شاخص‌های توسعه پایدار	O7: فشار جوامع بین‌المللی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای	SO2: تغییر در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری مناسب؛ اعطای تسهیلات کم‌بهره و بلندمدت و معافیت‌های مالیاتی در جهت استفاده از این فناوری
S2: مقرون به صرفه بودن مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر S3: به حداقل رساندن عدم‌قطعیت اقتصادی نسبت به سوخت‌های فسیلی	O2: امکان فروش مازاد تولید به شبکه برق سراسری O5: کاهش عیار حد در معادن در نتیجه عدم استفاده از انرژی‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	SO3: تدوین مقررات جدید برای حمایت از تولیدکننده انرژی تجدیدپذیر برای خرید مازاد انرژی توسط دولت و اعمال تغییرات لازم در قوانین معدنی کشورها
S1: توان تولید بالا	O1: وجود ظرفیت بالای استفاده در صنعت معدن‌کاری O4: امکان استفاده در تمام مراحل معدن‌کاری	SO4: استفاده از ظرفیت‌های موجود در معادن برای ایجاد یک سایت معدن‌کاری کامل (از استخراج تا فراوری) برای استفاده حداکثری از این فناوری و رفع نیاز مصرف‌کننده در صورت کمبود انرژی مورد نیاز
S1: توان تولید بالا S3: به حداقل رساندن عدم‌قطعیت اقتصادی نسبت به	O1: وجود ظرفیت بالای استفاده در صنعت معدن‌کاری O3: ایجاد مشاغل جدید در صنعت	SO5: تغییر نگرش در سیاست‌های کلان معدن‌کاری در کشورها و ایجاد مقررات جدید برای تغییر نسل استفاده از انرژی‌های فسیلی به

سوخت‌های فسیلی S4: عدم تولید گاز گلخانه‌ای S5: منطبق بودن با شاخص‌های توسعه پایدار	معدن‌کاری O4: امکان استفاده در تمام مراحل معدن‌کاری O5: کاهش عیار حد در معادن در نتیجه عدم استفاده از انرژی‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	انرژی‌های تجدیدپذیر در معدن‌کاری SO6: ایجاد مقررات لازم برای الزام‌آور کردن استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در معادن در دوره زمانی میان‌مدت

۶- بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن هنوز به میزان کافی جاافتاده نیست اما با مشارکت متخصصان صنعت معدن و ذی‌نفعان معدن، می‌توان بهترین راهکارها برای از بین بردن چالش‌های این مسیر را پیدا کرد.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند معدن‌کاری نه‌تنها الگوی مصرف انرژی را تغییر می‌دهد، بلکه اثرات سیاسی و اجتماعی نیز به همراه دارد. این تغییر می‌تواند مشاغل سنتی را تغییر دهد و منجر به ایجاد مشاغل و مهارت‌های جدیدی در ارتباط با فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر شود. این تحول، در کشورهایی که به فعالیت‌های معدنی وابسته‌اند به دلیل مصرف بالای انرژی، تاثیرات بیشتری خواهد داشت. در این اقتصادها، تغییر الگوی مصرف انرژی از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. این چالش، به توجه به وابستگی به تامین محلی سوخت‌های فسیلی یا وابستگی به واردات انرژی‌های تجدیدپذیر، در کشورهای مختلف تفاوت‌هایی دارد. برای انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد زیرساخت‌های مورد نیاز، اراده سیاسی کشورها بسیار حیاتی است.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن، عدم هماهنگی بین اهداف تجاری و مالی معادن و انرژی‌های تجدیدپذیر است. عمر اغلب معادن می‌تواند تا چند دهه ادامه پیدا کند، در حالی که پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر معمولا عمر کمتری دارند. این عدم تطابق ممکن است، مذاکرات برای قراردادهای انرژی میان شرکت‌های ارایه‌دهنده انرژی و معادن را دچار چالش کند.

علاوه بر این، بسیاری از شرکت‌ها و معادن در فرآیند برنامه‌ریزی برای توسعه معدن‌ها از انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر نمی‌گیرند. مهندسان معدن به طور معمول مهارت‌های لازم برای ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی معادن را ندارند و دولت‌ها نیز به دلیل نداشتن آگاهی کافی در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر و نقش آن در صنعت معدن، اغلب محدودیت‌هایی در راه توسعه این فناوری ایجاد می‌کنند.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن، محدودیت در دسترسی به مناطق مناسب برای نصب تجهیزات انرژی‌های تجدیدپذیر است. اغلب مهندسان معدن به اشتباه فرض می‌کنند که سایت‌های معدنی مناسبی برای نصب پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی ندارند. این نادرستی می‌تواند استفاده از این فناوری‌ها را با چالش‌هایی روبه‌رو کند.

بسیاری از شرکت‌های معدنی، به جای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، قراردادهای خرید برق از شبکه برق سراسری را منعقد می‌کنند. با این حال، برخی از معادن کوچک و متوسط به دلیل عدم انعطاف‌پذیری انرژی‌های تجدیدپذیر، مردد به سرمایه‌گذاری در این زمینه‌اند. حمایت از ساختارهای توسعه برای خرید برق اضافی تولیدی، می‌تواند یکی از راه‌های ترغیب شرکت‌ها به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر باشد. این تعامل میان صنایع انرژی و معدنی می‌تواند اقتصاد محلی را تحریک کند، درآمدهای مالیاتی را افزایش دهد و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن، به‌ویژه در معادن کوچک و متوسط، نیازمند ابزارها و آموزش مناسب است. این ظرفیت‌ها می‌توانند توسط شرکت‌های ارایه‌دهنده انرژی تجدیدپذیر، مهندسان متخصص، موسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌ها فراهم و انتقال داده شوند. همچنین، نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن وجود دارد. تبدیل دستگاه‌های دیزلی به دستگاه‌های برقی و بهبود بازدهی انرژی در حمل و نقل مواد، از مسایل اساسی است. همچنین، تعامل با جامعه محلی می‌تواند راه‌حلی موثر برای معادن کوچک و متوسط باشد زیرا این تعامل می‌تواند به تامین انرژی جوامع محلی نیز کمک کند. همچنین، تعامل میان

معدن و دولت میزبان نیز اهمیت دارد.

تعامل میان جوامع و معادن برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، همچنین سیاست‌ها و مقررات دولتی، نقش مهمی در موفقیت استفاده از این منابع در معادن دارد. این تعامل‌ها در سطح جهانی در حال افزایش‌اند اما می‌تواند در سطح محلی، به ویژه در کشورهای غنی از منابع معدنی، متوقف شود. در بسیاری از کشورهای غنی، مقررات مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر به اندازه کافی توسعه‌نیافته است. در کشورهای در حال توسعه، تشویق شرکت‌ها به تهیه مواد و کالاهای واسطه‌ای از منابع داخلی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند به توسعه اقتصادی و کاهش هزینه‌ها کمک کند. تلاش‌های مشترک بین صنایع معدن و انرژی، سازمان‌های بین‌المللی و دولت‌ها برای تدوین سیاست‌ها و مقررات مناسب اساسی است.

برای حمایت از معادن در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، دولت‌ها می‌توانند اقداماتی همچون معافیت‌های مالیاتی، وام‌های با نرخ بهره کم، ایجاد زیرساخت‌هایی برای تضمین خرید برق مازاد تولیدی و ایجاد شرایطی برای تشویق شرکت‌ها و صاحبان معادن به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اتخاذ کنند.

تحلیل استراتژیک استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت معدن نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند مزیت‌های داخلی و خارجی ایجاد کرده و به ذی‌نفعان معدنی فرصت‌های ارزشمندی ارایه دهد. برای دستیابی به این اهداف، توسعه آموزش متخصصان و به‌روزرسانی نظام آموزشی در دانشگاه‌ها، تغییر در سیاست‌ها و مدیریت مناسب، اعطای وام با بهره کم و معافیت‌های مالیاتی، تدوین مقررات جدید برای حمایت از تولیدکننده انرژی تجدیدپذیر، توسعه سایت‌های معدن‌کاری کامل با استفاده از ظرفیت‌های موجود و تغییر نگرش در سیاست‌های کلان معدن‌کاری در کشورها اقدامات موثری است.

منابع

1. Pouresmaieli, M. and M. Osanloo. *A Valuation Approach to Investigate the Sustainability of Sorkhe-Dizaj Iron Ore Mine of Iran*. in *International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection*. 2019. Springer.
2. Jandieri, G., *A generalized model for assessing and intensifying the recycling of metal-bearing industrial waste: A new approach to the resource policy of manganese industry in Georgia.* Resources Policy, 2022. 75: p. 102462.
3. Pouresmaieli, M. and M. Osanloo. *Establishing a Model to Reduce the Risk of Premature Mine Closure*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. IOP Publishing.
4. Strazzabosco, A., J.H. Gruenhagen, and S. Cox, *A review of renewable energy practices in the Australian mining industry*. Renewable Energy, 2022.
5. Igogo, T., Lowder, T., Engel-Cox, J., Newman, A. M., & Awuah-Offei, K. (2020). Integrating clean energy in mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches.
6. Maennling, N. and P. Toledano, *The renewable power of the mine.* Available at SSRN 3661616, 2018.
7. N., L. *Favorable renewable-energy economics are now too attractive to ignore*. 2019 8/24/2022]; Available from: https://internationalbanker.com/brokerage/favourablerenewable-energy-economics-are-now-too-attractive-to-ignore/,.
8. Levesque, M., D. Millar, and J. Paraszczak, *Energy and mining–the home truths.* Journal of cleaner production, 2014. 84: p. 233-255.
9. *MINING ENERGY CONSUMPTION* [cited 2022 7/30/2022]; Available from: https://www.ceecthefuture.org/resources/mining-energy-consumption-2021.
10. Norgate, T. and N. Haque, *Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations.* Journal of cleaner production, 2010. 18(3): p. 266-274.
11. Klass, A.B. and A. Mitchell, *The Energy Transition and Mining: Reconciling the Growth of Renewable Energy with the Need for New Mineral Development.* 2022.
12. Röben, F. T., Liu, D., Reuter, M. A., Dahmen, M., & Bardow, A. (2022). The demand response potential in copper production. *Journal of Cleaner Production*, *362*, 132221.
13. Sitorus, F. and P.R. Brito-Parada, *The selection of renewable energy technologies using a hybrid subjective and objective multiple criteria decision making method.* Expert Systems with Applications, 2022. 206: p. 117839.
14. Zeng, A., Chen, W., Rasmussen, K. D., Zhu, X., Lundhaug, M., Müller, D. B., ... & Liu, G. (2022). Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages. *Nature communications*, *13*(1), 1341.
15. Elgqvist, E., Castillo, R., Newes, E., Engel-Cox, J., & Zorrilla, L. (2022). *Integration of Clean Energy into Oil Field Operations* (No. NREL/TP-6A50-

81107). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

16. Chau, K. Y., Moslehpour, M., Tu, Y. T., Tai, N. T., Tien, N. H., & Huy, P. Q. (2022). Exploring the impact of green energy and consumption on the sustainability of natural resources: Empirical evidence from G7 countries. *Renewable energy*, *196*, 1241-1249.
17. Lezak, S., C. Cannon, and T.K. Blank, *Low-carbon metals for a low-carbon world: a new energy paradigm for mines.* Rock Mountain Institute, 2019: p. 6.
18. Ekrami, E., Pouresmaieli, M., sadat Hashemiyoon, E., Noorbakhsh, N., & Mahmoudifard, M. (2022). Nanotechnology: a sustainable solution for heavy metals remediation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *18*, 100718.
19. T, K. *Path to net zero: Miners are starting to decarbonize as investor pressure mounts*. 2020 8/24/2022]; Available from: https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/path-to-net-zero-miners-are-startingto-decarbonize-as-investor-pressure-mounts-59583837.
20. Papadis, E. and G. Tsatsaronis, *Challenges in the decarbonization of the energy sector.* Energy, 2020. 205: p. 118025.
21. Birol, F., *The future of hydrogen: seizing today's opportunities.* IEA Report prepared for the G, 2019. 20.
22. Jacob, R., Belusko, M., Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2019). Using renewables coupled with thermal energy storage to reduce natural gas consumption in higher temperature commercial/industrial applications. *Renewable Energy*, *131*, 1035-1046.
23. Cheng, Z., Yang, J., Zhou, L., Liu, Y., & Wang, Q. (2016). Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore sintering performance. *Applied Energy*, *161*, 364-374.
24. Behar, O., D. Sbarbaro, and L. Moran, *Which is the most competitive solar power technology for integration into the existing copper mining plants: Photovoltaic (PV), Concentrating Solar Power (CSP), or hybrid PV-CSP?* Journal of Cleaner Production, 2021. 287: p. 125455.
25. Igogo, T., Awuah-Offei, K., Newman, A., Lowder, T., & Engel-Cox, J. (2021). Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. *Applied Energy*, *300*, 117375.
26. Pee, A. D., Pinner, D., Roelofsen, O., & Somers, K. (2018). Decarbonization of industrial sectors: the next frontier.
27. Lazard, *Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage*. 2020.
28. Wang, K., Song, Y., Huang, Z., Sun, Y., Xu, J., & Zhang, S. (2022). Additive manufacturing energy consumption measurement and prediction in fabricating lattice structure based on recallable multimodal fusion network. *Measurement*, *196*, 111215.
29. Katta, A.K., M. Davis, and A. Kumar, *Development of disaggregated energy use and greenhouse gas emission footprints in Canada's iron, gold, and potash mining sectors.* Resources, Conservation and Recycling, 2020. 152: p. 104485.
30. J, D. *Mining giants embrace renewables, but decarbonization remains a steep climb*. 2020 8/28/2022]; Available from: https://www.greentechmedia.com/articles/read/mininggiants-embrace-renewables-but-decarbonization-remains-a-steep-climb.
31. Terblanche, P. J., Kearney, M. P., Hearn, C. S., & Knights, P. F. (2018). Technology selection and sizing of on-board energy recovery systems to reduce fuel consumption of diesel-electric mine haul trucks. *Energy efficiency in the minerals industry: best practices and research directions*, 301-333.
32. IRENA, *A background paper to "Renewable Energy in Manufacturing"*. 2015, International Renewable Energy Agency Abu Dhabi.
33. Patterson, S., & Wexler, A., *Despite Cleanup Vows, Smartphones and Electric Cars Still Keep Miners Digging by Hand in Congo*, in *Wall Street Journal*. 2018.
34. Pouresmaieli, M., Ataei, M., Forouzandeh, P., Azizollahi, P., & Mahmoudifard, M. (2022). Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 108482.
35. Pouresmaieli, M., M. Ataei, and A. Taran, *Future mining based on internet of things (IoT) and sustainability challenges.* International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2022: p. 1-18.
36. Smyth, C. and V. Krebs, *Application of SWOT-C analysis and state-and-transition modeling to the design of reclamation plans for abandoned or operating mines in British Columbia*. 2019.
37. Manero, A., Kragt, M., Standish, R., Miller, B., Jasper, D., Boggs, G., & Young, R. (2020). A framework for developing completion criteria for mine closure and rehabilitation. *Journal of*

Environmental Management, *273*, 111078.

38. David, F.R. and F.R. David, *Strategic management: A competitive advantage approach, concepts and cases*. 2016: Pearson-Prentice Hall.

39. Shahba, S., et al., *Application of multi-attribute decision-making methods in SWOT analysis of mine waste management (case study: Sirjan's Golgohar iron mine, Iran).* Resources Policy, 2017. 51: p. 67-76.

40. Tahernejad, M.M., M. Ataei, and R. Khalokakaei, *A strategic analysis of Iran's dimensional stone mines using SWOT method.* Arabian Journal for Science and Engineering, 2013. 38(1): p. 149-154.

41. Pouresmaieli, M., Ataei, M., Qarahasanlou, A. N., & Barabadi, A. (2023). Integration of renewable energy and sustainable development with strategic planning in the mining industry. *Results in Engineering*, *20*, 101412.