Journal of Advanced Materials and Technologies

Journal Homepage: www.jamt.ir

Materials and Energy Research Center

MERC

Original Research Article - Extended Abstract

On the Role and Importance of Mineral Materials and Rare-Earth Elements in the Wind Energy Industry

Zari Behniafar [1], **Abolfazl Pourrajabian** [2*]

[1] *Master, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.*
[2] *Assistant Professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.*

*Corresponding Author's Email: a.pourrajabian@merc.ac.ir (Abolfazl Pourrajabian)

Paper History:
Received: 2024-02-11
Revised: 2024-04-18
Accepted: 2024-06-23

Keywords:
Wind Energy,
Wind Turbine,
Mineral Materials,
Rare-earth Elements

Abstract: Wind energy plays an important role in the transition from fossil fuels to renewable energies. The study examines the role and importance of minerals and rare earth elements in the future of the wind energy industry. Following the investigation of the conducted studies and the literature survey, the required amount of minerals and also rare earth elements are predicted in the horizon of 2030 and 2040 using the two scenarios of the International Energy Agency (IEA). The investigation shows that the copper, zinc, manganese, chromium, nickel and molybdenum are the main materials required in the wind energy industry but the contribution of the zinc and copper is significant compared to other materials. In the field of rare earth elements, neodymium, praseodymium, dysprosium and terbium are of significant importance but the contribution of neodymium is higher with respect to other rare elements. In order to achieve the goals of the countries in the coming decades, the importance of research and development on new technologies with the aim of reducing the need for the mentioned materials and also their recycling is very important.

https://doi.org/10.30501/JAMT.2024.442670.1294 URL: https://www.jamt.ir/article_202318.html

1. INTRODUCTION

Nowadays, addressing the crisis of climate change and also the global warming issue is the need of hour. Although these problems threat the global community and spell trouble for coming years, they could be adequately mitigated by employing clean energy sources. In this regard, shifting the energy from fossil fuels to the renewable sources, including the solar and wind, is inevitable. Despite the undertaken efforts, conducted mainly by environmentalists throughout the world, it is argued that they are not enough and more specific steps are required to increase the share of clean energies. Also highlighted by researchers is the prompt actions that should be done by all stakeholders including the government agencies and regulators, environmental organizations, landholders, construction team, local businesses, and also local communities (IEA, 2020c; International Energy Agency, 2021).

Many countries set a specific target for years to come, increasing the share of renewable energy in their electricity sector. Such a pertinent example is India which aims to add 200 GW to its installed wind energy capacity by 2032 (Verma, 2022).

As a proven technology, wind energy has a pivotal role through the abovementioned transition as vast windy areas are available in the land, seas and also the oceans throughout the world wherein harnessing the wind energy is completely economic.

One of the main concerns that could increase the cost of the wind energy in the coming decades is the lack of mineral materials and also rare-earth elements required for different parts of wind energy systems including the generator, the inverter, the gearbox, the blade and also the tower (Pavel et al., 2017). The present research aims at investigating this issue by carrying out a review study to shed light on the status of these materials in the coming decades. The details of the study are provided in the following subsections including the method of the study, the results and findings, and also some suggestions for the future work.

2. METHODS

Two different scenarios including Sustainable Development Scenario (SDS) and Stated Policies Scenario (STEPS) proposed by International Energy Agency (IEA) were studied (IEA, 2020c; International Energy Agency, 2021). While the latter is an indication of where the energy is heading based on a sector-by-sector analysis of *today's* policies, the former implies what would be required to meet the Paris Agreement goals.

From the mineral materials and also rare-earth elements perspective, the generator is the main part of a wind turbine system. In this regard, the investigation was mainly based on the four different types of generators including the double-fed induction

Please cite this article as: Behniafar, Z. & Pourrajabian, A. (2024) On the Role and Importance of Mineral Materials and Rare-Earth Elements in the Wind Energy Industry, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 13, No. 2, 1-9. https://doi.org/10.30501/JAMT.2024.442670.1294.

2783-0829/© 2024 The Author(s). Published by MERC.
This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

generators (DFIG), the permanent-magnet synchronous generator (PMSG), the direct-drive permanent magnet synchronous generator (DD-PMSG) and finally the electrically excited synchronous generator (EESG).

3. FINDINGS AND ARGUMENT

Results of the study highlight the importance of some specific materials. Of the considered mineral materials, copper, zinc, manganese, chromium, nickel and molybdenum are the main materials required in the wind energy industry but the contribution of the zinc and copper is significant compared to other materials. The investigation also reveals that the neodymium, praseodymium, dysprosium and terbium are of significant importance in the field of rare-earth elements but the contribution of neodymium is higher with respect to other elements. Quantitalively speaking, the assessment of mineral materials and also rare-earth elements required for the wind energy industry in the coming years for the STEPS and also the SDS scenario are depicted in detail in Fig. 1 and Fig. 2 respectively.

4. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

In order to achieve the targets of the countries in the coming decades, set for the wind energy industry, the importance of research and development on new technologies with the aim of reducing the need for the mentioned materials is very important (Manberger and Stenqvist, 2018). Also would be very helpful is recycling the turbine components and bringing them back to the production process, implying the idea of circular economy.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Materials and Energy Research Center (MERC) for providing the resources involved in the study.

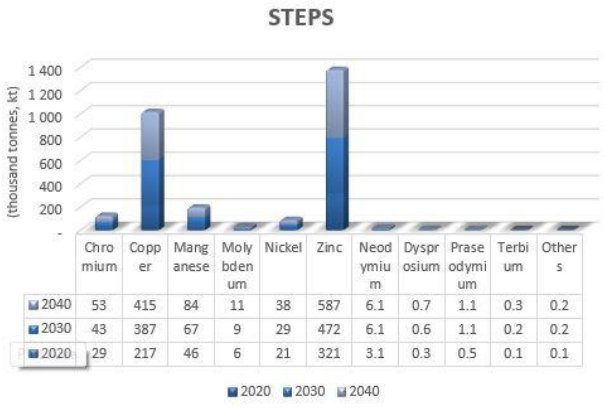


Figure 1. STEPS scenario: the assessment of mineral materials and also rare-earth elements required for the wind energy industry in the coming years.

Figure 2. SDS scenario: the assessment of mineral materials and also rare-earth elements required for the wind energy industry in the coming years.

REFERENCES

1. IEA (2020c), World Energy Outlook (2020). https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020
2. IRENA (International Renewable Energy Agency) (2019). Renewable Power Generation Costs in 2018, https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018
3. International Energy Agency.(2020). World Energy Outlook 2020. Retrieved from https://www.iea.org/weo.
4. Manberger, A. and Stenqvist, B. (2018). Global Metal Flows in the Renewable Energy Transition: Exploring the Effects of Substitutes, Technological Mix and Development. *Energy Policy*, *119*, 226-241 https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056
5. Pavel, C.C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W. and Blagoeva, D. (2017). Substitution Strategies for Reducing the Use of Rare Earths in Wind Turbines. *Resources Policy*, *52*, pp.349-357. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010
6. Verma, S., Paul, A. R., & Haque, N. (2022). Assessment of Materials and Rare Earth Metals Demand for Sustainable Wind Energy Growth in India. *Minerals*, *12*(5), 647; https://doi.org/10.3390/min12050647

فصلنامه مواد و فناوری‌های پیشرفته

Journal Homepage: www.jamt.ir

پژوهشگاه مواد و انرژی
MERC

مقاله کامل پژوهشی

بررسی نقش و اهمیت مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب در صنعت انرژی بادی

زری بهنیافر[1]، ابوالفضل پوررجبیان[2*]

[1] کارشناس ارشد، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران
[2] استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

تاریخچه مقاله:
ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰
پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

کلیدواژه‌ها:
انرژی بادی،
توربین بادی،
مواد معدنی،
عناصر خاکی کمیاب

چکیده انرژی بادی در گذار انرژی از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر سهم مهمی ایفا می‌کند. مطالعه حاضر به بررسی نقش و اهمیت مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب در آینده صنعت انرژی بادی می‌پردازد و اهمیت مواد کافی برای شتاب در گذار انرژی مورد اشاره بررسی خواهد شد. در این خصوص، ضمن بهره‌گیری از پژوهش‌های انجام‌شده، به‌کمک دو سناریوی آژانس بین‌المللی انرژی به پیش‌بینی مقدار مورد نیاز مواد معدنی و همچنین عناصر خاکی کمیاب در افق سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ پرداخته می‌شود. بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد مواد معدنی مس، روی، منگنز، کروم، نیکل و مولیبدن از مواد اصلی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی هستند، به‌گونه‌ای که سهم دو فلز روی و مس، در مقایسه با دیگر مواد، قابل‌توجه است. در زمینه عناصر خاکی کمیاب، مواد نئودیمیم، پرازئودیمیم، دیسپروزیم و تربیوم اهمیت قابل‌توجهی دارند، به‌نحوی که سهم نئودیمیم در مقایسه با سایر عناصر کمیاب بیشتر است. به‌منظور تأمین ایمن مواد مورد اشاره و نیل به اهداف کشورها در دهه‌های آتی، اهمیت تحقیق و توسعه درباره فناوری‌های جدید با هدف کاهش نیاز به مواد مذکور و همچنین بازیافت آن‌ها بسیار مهم است.

https://doi.org/10.30501/JAMT.2024.442670.1294 URL: https://www.jamt.ir/article_202318.html

۱- مقدمه

انرژی بادی به‌عنوان یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در گذار انرژی از منابع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های پاک ایفا می‌کند. ظرفیت نصب‌شده جهانی انرژی بادی، در دهه گذشته، به‌سبب کاهش هزینه‌ها (حدود ۴۰ درصد به‌طور متوسط در سطح جهانی) و همچنین سیاست‌های حمایتی بیش از ۱۳۰ کشور جهان، تقریباً چهار برابر شده است (IEA, 2020c). در این خصوص، ظرفیت توان توربین‌ها به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته، به‌گونه‌ای که میانگین وزنی جهانی از ۱/۹ مگاوات در ۲۰۱۰ به مقدار جهانی ۲/۶ مگاوات در ۲۰۱۸ برای توربین‌های بادی فراساحلی افزایش یافته است (IRENA, 2019). درحال‌حاضر، توربین‌های جدیدی با ظرفیت نامی ۱۴-۱۰ مگاوات پیشنهاد شده است و شرکت‌های سازنده وعده ساخت توربین‌های ۲۰مگاواتی را در آینده نزدیک می‌دهند. افزایش اندازه توربین عامل مهمی برای افزایش ضریب ظرفیت[1] و کاهش مصرف مواد مورد استفاده است. درواقع، برج‌های بلندتر به‌همراه روتورهای بزرگ‌تر، به‌دلیل برخورداری از سرعت بالای باد در ارتفاعات و همچنین جذب بیشتر جریان باد، ضریب ظرفیت توربین‌ها را افزایش می‌دهند.

انتظار می‌رود استفاده از انرژی بادی در دهه‌های آینده به‌لطف کاهش هزینه‌ها، سیاست‌گذاری‌های هدفمند و

[1] Capacity factor

*عهده‌دار مکاتبات: ابوالفضل پوررجبیان
نشانی: ایران، البرز، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکدهٔ انرژی، تلفن: ۰۲۶۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶۳۶۲۰۱۸۸۸
پیام‌نگار: a.pourrajabian@merc.ac.ir

افزایش اعتماد سرمایه‌گذاران رو به افزایش باشد.

توربین‌های بادی می‌توانند در مناطق بادخیز موجود در خشکی و همچنین در دریاها و اقیانوس‌ها قرار گیرند و انرژی تولید کنند. سرعت زیاد باد و مداومت وزش آن از دلایل اصلی استفاده از مناطق فراساحلی برای نصب توربین‌ها هستند که سبب افزایش ضریب ظرفیت آن‌ها در مقایسه با توربین‌های ساحلی می‌شوند و همچنین در تسریع افزایش ظرفیت سالانه در دهه‌های آینده کمک شایانی می‌کنند. برای نمونه، به‌طور میانگین، ضریب ظرفیت از ۲۷ درصد در ۲۰۱۰ به ۳٤ درصد در ۲۰۱۸ برای توربین‌های بادی ساحلی افزایش یافته است (International Energy Agency, 2021). به‌لطف تجربیات به‌دست‌آمده از نصب این توربین‌ها در دریای شمال اروپا و همچنین کاهش هزینه‌ها، فرصت‌های بزرگی در نقاط گوناگون جهان فراهم آمده و سهم این توربین‌ها در صنعت انرژی بادی رشد چشمگیری کرده است.

درحال‌حاضر، تجهیزات انرژی بادی در کشورهای چین، اروپا و امریکا متمرکز شده‌اند، اما انتظار می‌رود مناطق جنوب شرقی آسیا، هند، امریکای لاتین و خاورمیانه نیز در سالیان آتی شاهد رشد نصب تجهیزات این صنعت باشند. در این خصوص، نوآوری‌های بیشتری (مانند توربین‌های بادی شناور) در آینده وجود دارد.

با وجود چشم‌انداز روشن برای صنعت انرژی بادی در سالیان پیش‌رو، امکان تحقق نیافتن اهداف موردنظر کشورها به‌واسطه تأمین مواد معدنی در توربین‌های بادی وجود دارد و این امر یکی از چالش‌های اساسی این صنعت است (Kamran et al., 2023; Savvidou & Johnsson, 2023; Wang et al., 2023). به‌طورکلی، یک توربین بادی از یک برج، ناسل (شامل ژنراتور، جعبه‌دنده، سیستم‌های کنترلی و قطعات دیگر) که در بالای توربین قرار می‌گیرد و همچنین روتور (مجموعهٔ پره‌ها و هاب) تشکیل می‌شود. مواد متنوعی ازجمله بتن، فولاد، آهن، فایبرگلاس، پلیمرها، آلومینیم، مس، روی و عناصر خاکی کمیاب در هرکدام از تجهیزات مورد اشاره استفاده می‌شود. پرسش اینجا است که آیا منابع تأمین مواد مورد اشاره امکان تحقق اهداف بلندپروازانه کشورها را دارند؟ آیا جهان در سالیان آتی با کمبود تأمین این مواد روبه‌رو نمی‌شود؟ آیا این مسئله به منازعه‌ای بین‌المللی میان کشورهای حاوی مواد خام و سایر کشورها مانند اتحادیه اروپا، که تنها یک درصد از عناصر خاکی کمیاب را در اختیار دارند، (Bobba, 2020) در آینده تبدیل نمی‌شود؟ برای نمونه، در ۲۰۱۱، به‌واسطه تحریم‌های اعمال‌شده توسط کشور چین، قیمت عناصر خاکی کمیاب، که در ژنراتورهای توربین‌های بادی استفاده می‌شوند، جهش چشمگیری داشت (Pavel et al., 2017). اولین گام در پاسخ به این پرسش‌ها تخمین مواد مورد نیاز برای گذار انرژی (از منابع فسیلی به انرژی‌های پاک) در دهه‌های آتی است. در پژوهش حاضر، تلاش می‌شود پرسش‌های مذکور براساس دو سناریوی آژانس بین‌المللی انرژی[1] (IEA) پاسخ داده شود و نقش و اهمیت تأمین مواد معدنی و همچنین عناصر خاکی کمیاب مورد نیاز در صنعت انرژی بادی (متشکل از توربین‌های بادی محور افقی و محور عمودی) به‌طورکامل بررسی شود. به این منظور، نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه بررسی شده و تلاش شده است که چشم‌انداز و افق آتی مرتبط با نیاز به مواد معدنی و همچنین عناصر خاکی کمیاب در صنعت انرژی بادی ترسیم شود. بر این اساس و به‌منظور تخمین مواد مورد نیاز در صنعت انرژی بادی، از چهار متغیر مهم (۱) روند استقرار انرژی بادی تحت سناریوهای مختلف (IEA, 2020c; Pales & Bennett, 2020)؛ (۲) سهم زیرفناوری‌های مرتبط در صنعت انرژی بادی (IEA, 2020c; Pales & Bennett, 2020)؛ (۳) شدت[2] مواد معدنی هر زیرفناوری (Manberger & Stenqvist, 2018; Carrara et al., 2020) و (٤) همچنین ارتقا و بهبود شدت مواد معدنی (با هدف کاهش مقدار مصرف مواد معدنی) بهره گرفته شده است.

۲- معرفی سناریوهای موردبررسی

به‌منظور بررسی نقش و اهمیت مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب در صنعت انرژی بادی از دو سناریوی آژانس بین‌المللی انرژی بهره گرفته شده است (IEA, 2020c; International Energy Agency, 2021): سناریوی توسعهٔ

[1] International Energy Agency (IEA)

[2] مقدار وزن مادهٔ معدنی موردبررسی به‌ازای توان منبع تجدیدپذیر (برای نمونه، kg/MW)

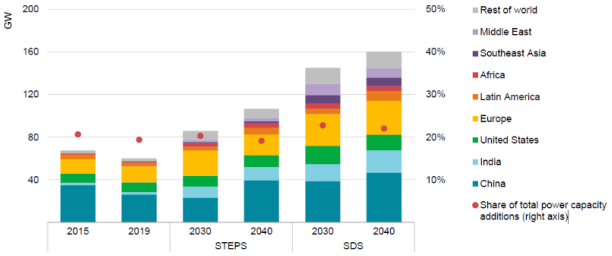
پایدار[1] (SDS) و سناریوی سیاست‌گذاری‌های دولتی[2] (STEPS) (International Energy Agency, 2021). مبنای سناریوی اول (SDS) توافق کنفرانس آب‌وهوایی پاریس (COP21) است و مسیری را مشخص می‌کند که اهداف کنفرانس مذکور برآورده شود و، هم‌زمان با بهبود کیفیت هوا، امکان دسترسی به انرژی در سرتاسر جهان فراهم شود. گفتنی است که نگه داشتن افزایش میانگین دمای کره زمین به زیر ۲ درجه سلسیوس (نسبت به دوران قبل از صنعتی شدن) هدف اصلی کنفرانس پاریس COP21 بود که در ۲۰۱۵ برگزار شد. در این خصوص، کشورها و شرکت‌های بزرگ اهدافی را برای گذار به دهه‌های آتی (عمدتاً تا ۲۰۵۰) در نظر گرفته‌اند. برای نمونه، کشور هند اضافه شدن ۲۰۰ گیگاوات ظرفیت نصب‌شده انرژی بادی را تا ۲۰۳۲ برنامه‌ریزی کرده است (Verma et al., 2022).

سناریوی SDS وابسته به عملکرد کشورها/ شرکت‌ها و برنامه‌های اعلامی آن‌ها است. به‌منظور نیل به برنامه‌های تدوین‌شده، منابع تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی و زیست‌توده) نقش بسیار مهمی دارند و حجم وسیعی از آن‌ها می‌بایست به کار گرفته شود.

برخلاف سناریوی اول، سناریوی دوم (STEPS) برمبنای سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های فعلی و عملکرد دولت‌ها و روند کنونی پیشرفت آن‌ها است. در این سناریو، برنامه دولت‌ها و ارگان‌های مرتبط پایش می‌شود و، بر اساس آن، پیش‌بینی مربوط به هریک از صنعت‌های موردنظر (مانند انرژی بادی) در سالیان پیش‌رِو انجام می‌پذیرد.

به زبانی ساده می‌توان گفت که پیش‌بینی‌های حاصل از هر دو سناریو تعیین می‌کند که وضعیت صنعت موردبررسی در دهه‌های آتی چگونه است. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از این دو سناریو نقش مهمی در تعیین احتمالات پیش‌رِو دارد.

ضعف در تدوین مناسب برنامه، نبود ثبات سیاسی، منازعات بین‌المللی، عدم‌پایبندی به سیاست‌های دولت‌های گذشته و همچنین محدودیت‌های مالی و تأمین بودجه لازم توسط دولت‌ها ازجمله عواملی هستند که سبب می‌شوند پیشرفت موردانتظار در سناریوی دوم (STEPS) از سناریوی اول (SDS) کمتر باشد. برای نمونه، شکل ۱ پیش‌بینی ظرفیت (GW) انرژی بادی در مناطق گوناگون جهان در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ برای دو سناریوی مورد اشاره را نشان می‌دهد. در سناریوی SDS، انتظار می‌رود تا ۲۰۴۰ ظرفیت نصب سالانه انرژی بادی بیش از ۲ برابر شود و به ۱۶۰ گیگاوات برسد، درحالی‌که مقدار متناظر برای سناریوی STEPS کمتر است (شکل ۱).



شکل ۱. پیش‌بینی ظرفیت (GW) سالیانهٔ انرژی بادی در مناطق جهان در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ برحسب دو سناریوی مختلف (IEA, 2020c)

پیش‌بینی برای تقاضای مواد معدنی با عدم‌قطعیت همراه است و، نه‌تنها به سناریوهای موردنظر بستگی دارد، بلکه به پیشرفت‌های فناوری موردمطالعه در طول زمان نیز وابسته است. بر این اساس، علاوه‌بر در نظر گرفتن «حالت مبنا»[3] در هر دو سناریوی SDS و STEPS، حالت دیگری نیز در نظر گرفته خواهد شد که به پیشرفت و تکامل فناوری موردنظر وابسته است و، به‌کمک این پیشرفت، علاوه‌بر دو سناریوی مذکور، تقاضای مواد معدنی نیز پیش‌بینی، تعیین و تخمین زده می‌شود. در این خصوص، در سناریوی SDS از مقدار ۱۰ درصد و در سناریوی STEPS از مقدار کم در طول زمان (بازه زمانی موردبررسی) بهره گرفته شده است (International Energy Agency, 2021). همچنین، به‌طور خاص، در مطالعه حاضر، روند پیشرفت فناوری با هدف کاهش استفاده از عناصر خاکی کمیاب نیز تخمین زده و با حالت مبنا مقایسه می‌شود.

[1] Sustainable Development Scenario (SDS)
[2] Stated Policies Scenario (STEPS)
[3] Base-case

۳- طبقه‌بندی توربین‌ها

رشد صنعت توربین‌های بادی فراساحلی در کنار توسعه توربین‌های بادی ساحلی (به پشتوانه بهبود فناوری و کاهش هزینه‌های مالی) سبب شده است که استفاده از انرژی بادی در هر دو سناریوی STEPS و SDS در مناطق گوناگون جهان روبه‌رشد باشد (شکل ۱). بر این اساس، تأمین مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب مورد نیاز صنعت انرژی بادی اهمیت بسزایی دارد. مقدار مواد معدنی مورد استفاده در توربین‌ها به اندازه و نوع توربین بستگی دارد.

توربین‌های بادی، براساس سیستم انتقال قدرت و همچنین نوع ژنراتور به‌کاررفته در آن‌ها، در چهار گروه زیر قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که دو گروه اول از سیستم انتقال قدرت (GB) بهره می‌برند، درحالی‌که دو گروه آخر فاقد این سیستم هستند و به‌صورت محرک مستقیم (DD) هستند. شایان ذکر است که، به‌کمک سیستم انتقال قدرت، سرعت دورانی محور ژنراتور بالا می‌رود و امکان تحریک ژنراتور به وجود می‌آید.

- ژنراتور القایی با تغذیه مضاعف با جعبه‌دنده (GB-DFIG)؛
- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با جعبه‌دنده (GB-PMSG)؛
- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم محرک مستقیم (DD-PMSG)؛
- ژنراتور سنکرون تحریک الکتریکی محرک مستقیم (DD-EESG).

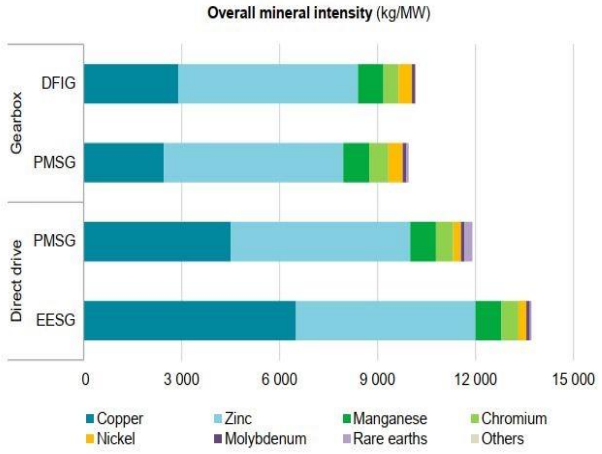
ازآنجاکه توان خروجی با افزایش ارتفاع برج توربین و طول پره‌ها افزایش می‌یابد، فناوری مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)، به‌دلیل پیکره‌بندی سبک‌تر و کارآمدتر، بیشتر مورد توجه و استقبال قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود این فناوری (PMSG) حدود ۹۵ درصد از سهم بازار توربین‌های فراساحلی و ٤٠ درصد از سهم بازار توربین‌های ساحلی را در ۲۰٤۰ به خود اختصاص دهد (International Energy Agency, 2021).

درحال‌حاضر، بیش از ۷۰ درصد از سهم بازار جهانی به توربین‌های بادی ساحلی GB-DFIGs تعلق دارد، درحالی‌که توربین‌های DD-PMSG در پروژه‌های فراساحلی انتخاب اصلی هستند و حدود ٦۰ درصد از سهم بازار جهانی را به خود اختصاص داده‌اند. گفتنی است که سهم بازار توربین‌های بادی ساحلی DD-PMSGs از ۱۰ درصد در ۲۰۱۰ به ۲۰ درصد در ۲۰۲۰ افزایش یافته است (International Energy Agency, 2021). به‌منظور داشتن توربین‌های بزرگ‌تر و بلندتر در سایت‌های فراساحلی، توربین‌های DD-PMSG به‌دلیل سبک بودن و کارایی بالا و هزینه نگهداری پایین‌تر استفاده می‌شوند. در توربین‌ها با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم – محرک مستقیم (DD-PMSGs) در مقایسه با توربین‌های با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم – با جعبه‌دنده (GB-PMSGs)، علاوه‌بر کوچک و سبک بودن و کارایی بالا، از عناصر خاکی کمیاب بیشتری استفاده می‌شود. شایان ذکر است که افزایش اندازه توربین به کاهش مقدار مصرف مواد برای برخی از مواد مورد استفاده در انرژی بادی کمک می‌کند. برای مثال، به‌ازای هر کیلوگرم بر مگاوات، یک توربین بادی ۳/۵ مگاواتی حدودا ۱۵ درصد بتن، ۵۰ درصد فایبرگلاس، ۵۰ درصد مس و ٦۰ درصد آلومینیم کمتر از یک توربین بادی با ظرفیت ۲ مگاوات دارد (Elia et al., 2020).

در ادامه، به بررسی مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب مورد استفاده در انواع ژنراتورها پرداخته می‌شود.

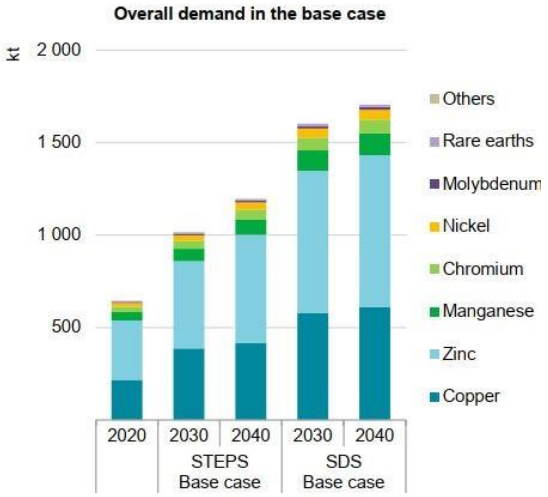
٤- بررسی اهمیت مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب در صنعت انرژی بادی

شکل ۲ مواد معدنی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی شامل مس، روی، منگنز، کروم، نیکل و مولیبدن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نیاز به مواد معدنی (مانند مس، روی و نیکل) مورد استفاده در انرژی بادی به نوع توربین بادی بستگی دارد. نکته قابل‌توجه سهم چشمگیر دو فلز روی و مس است. این دو فلز در کنار آهن و آلومینیم چهار فلز پرکاربرد دنیا هستند. از فلز روی به میزان یکسان در انواع توربین‌ها به‌عنوان پوشش محافظ در برابر خوردگی بهره گرفته می‌شود. همچنین، فلز مس در پروژه‌های توربین بادی فراساحلی دو برابر بیشتر از توربین بادی ساحلی استفاده می‌شود که دلیل آن استفاده از آن در کابل‌ها و کلکتورهای زیردریایی است.



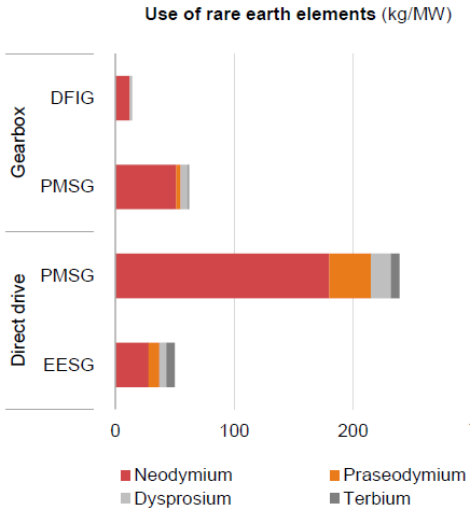
شکل ۱. مواد معدنی مورد نیاز (kg/MW) برحسب نوع توربین (IEA, 2020c)

شکل ۳ تقاضا برای مواد معدنی مورد اشاره را در «حالت مبنا» (که پیش‌تر اشاره شد) برای دو سناریوی معرفی‌شده (SDS و STEPS) در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر متناظر برای سناریوی SDS از سناریوی STEPS بیشتر است.



شکل ۲. تقاضا برای مواد معدنی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ برای دو سناریوی SDS و STEPS (IEA, 2020c)

شکل ٤ عناصر خاکی کمیاب مورد نیاز در صنعت انرژی بادی شامل نئودیمیم، پرازئودیمیم، دیسپروزیم و تربیوم را برحسب نوع توربین (معرفی‌شده در بخش ۲) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عنصر نئودیمیم سهم قابل‌توجهی در مقایسه با سایر عناصر معرفی‌شده دارد. همان‌طور که در شکل ٤ نشان داده شده است، در توربین‌هایی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSGs)، مواد نئودیمیم و دیسپروزیم استفاده می‌شوند.

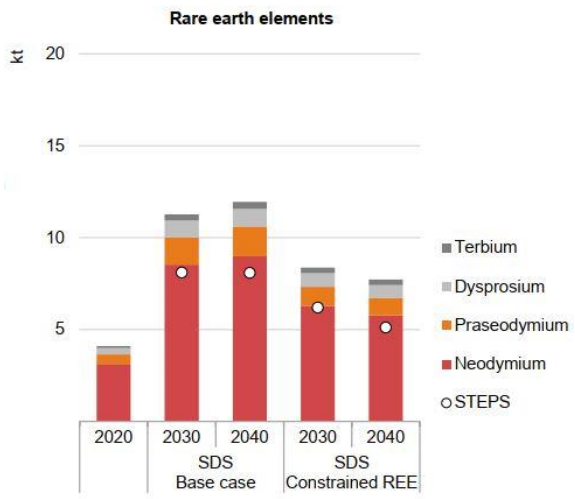


شکل ۳. میزان عناصر خاکی کمیاب مورد نیاز (kg/MW) برحسب نوع ژنراتور توربین (IEA, 2020c)

افزایش تقاضا برای عناصر خاکی کمیاب به‌منظور بهره‌گیری در صنعت انرژی بادی و همچنین دیگر فناورهای پاک (مانند خودروهای الکتریکی) همراه با نگرانی‌هایی درباره قیمت و رویدادهای ژئوپلیتیکی است. درواقع، گسترش بازار برای توربین‌ها با آهنربا (مغناطیسِ) دائم، به‌خصوص در پروژه‌های توربین فراساحلی، باعث افزایش تقاضا برای عناصر خاکی کمیاب در دهه‌های آینده خواهد شد. این موضوع پژوهشگران را ترغیب می‌کند که به‌سمت فناورهایی با مصرف کمتر عناصر خاکی کمیاب (مانند فناورهای بدون آهنربا و پروژه‌های هیبریدی با جعبه‌دنده و مغناطیس کوچک‌تر) روی آورند. برای نمونه، در پروژه‌های ساحلی (خشکی) از توربین‌های DD-EESGs و در پروژه‌های فراساحلی (دریایی) از توربین‌های DD-PMSGs استفاده می‌شود. شایان ذکر است که تنها بخشی از سهم بازار به توربین‌های DD-EESGs، که از عناصر خاکی کمیاب کمتری استفاده می‌کنند، اختصاص می‌یابد. بااین‌حال، با توجه به تناسب فنی توربین‌های DD (توربین‌های محرک مستقیم) در توربین‌های فراساحلی و تلاش‌های گسترده صنعت برای کاهش مصرف عناصر خاکی کمیاب در توربین‌های DD، تغییر چشمگیری در توربین‌های GB (توربین‌های با جعبه‌دنده) وجود نخواهد داشت.

اهمیت این موضوع به میزانی است که باید حالت تأمین محدود عناصر خاکی کمیاب[1] (با توجه به پیشرفت فناوری در سال‌های آینده) نیز در کنار دو سناریوی معرفی‌شده مطالعه شود. پیش‌بینی می‌شود با افزایش تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی بادی مواد نئودیمیم و دیسپروزیم نقشی حیاتی در صنعت انرژی بادی ایفا کنند (Elshkaki & Graedel, 2014; Van Nielen et al., 2023). در این خصوص، تغییر استراتژی با هدف کاهش مصرف این نوع مواد در گذار انرژی بسیار حائز اهمیت است و از اولویت‌های این صنعت به شمار می‌رود (Barteková, 2016; Pavel et al., 2017; Golroudbary et al., 2022). در شکل ۵، تقاضا برای عناصر کمیاب خاکی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ برای سناریوی SDS آورده شده است. بسته به نوع فناوری به‌کاررفته در توربین‌های بادی، تقاضا برای عناصر خاکی کمیاب، تا سال ۲۰۴۰، چهار برابر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در این حالت (Constrained REE)، تقاضا برای نئودیمیم در سناریوی توسعه پایدار (SDS) حدود ۴۰ درصد در سال ۲۰۴۰ در مقایسه با مورد پایه کاهش یافته است. همچنین، مقدار متناظر برای پرازئودیمیم و دیسپروزیم به‌ترتیب ۱۵ و ۳۲ درصد در مقایسه با مورد پایه در سال ۲۰۴۰ کمتر شده است.

گزینه دیگر، برای کاهش مصرف عناصر خاکی کمیاب در آهنربای دائم، استفاده از ابررسانا با دمای بالا (HTS) است. این کار باعث کاهش اساسی در اندازه و حجم می‌شود و به چگالی جریان زیادی دست می‌یابد. این فناوری درحال‌حاضر در مرحلهٔ تحقیق و توسعه است و چندین نمونه اولیه طراحی شده و تنها یک توربین در مقیاس صنعتی ۳ مگاوات توسعه یافته است. علی‌رغم نتایج امیدوارکننده، مزارع بادی با ابررساناهای دما بالا (HTS) در رقابت با فناورهای بادی موجود فاصله زیادی دارند و انتظار نمی‌رود که در دهه‌های آتی سهم مهمی داشته باشند (International Energy Agency, 2021).



شکل ۵. تقاضا برای عناصر کمیاب خاکی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ برای سناریوی SDS (IEA, 2020c)

۵- نتیجه‌گیری

انرژی بادی مسئولیت مهمی در گذار انرژی از منابع فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر بر عهده دارد. مطالعه حاضر به بررسی نقش و اهمیت مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب در صنعت انرژی بادی پرداخت. به این منظور، از مطالعات انجام‌شده بهره گرفته شد و به‌کمک دو سناریوی تعریف‌شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی به پیش‌بینی مقدار مواد مورد نیاز برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ پرداخته شد. توربین‌های بادی براساس سیستم انتقال قدرت و همچنین نوع ژنراتور به‌کاررفته در دو بخش مجهز به سیستم انتقال قدرت و همچنین به‌صورت محرک مستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. علاوه بر دو بخش مذکور، مقدار مواد مورد اشاره (مواد معدنی و عناصر خاکی کمیاب) به اندازه توربین بستگی دارد. بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد مواد معدنی مس، روی، منگنز، کروم، نیکل و مولیبدن از مواد اصلی مورد نیاز در صنعت انرژی بادی هستند، به‌گونه‌ای که سهم دو فلز روی و مس در مقایسه با دیگر مواد قابل‌توجه است. در زمینه عناصر خاکی کمیاب، مواد نئودیمیم، پرازئودیمیم، دیسپروزیم و تربیوم اهمیت چشمگیری دارند، به‌گونه‌ای که نقش نئودیمیم در مقایسه با سایر عناصر معرفی‌شده بیشتر است. به‌منظور تأمین ایمن مواد و جلوگیری از تنش‌های بین کشورها در سال‌های آتی، بازیافت مواد مورد اشاره بسیار حائز اهمیت است و انتظار

[1] Constrained REE Supply

می‌رود صنعت بازیافت این مواد رشد قابل‌توجهی داشته باشد. به‌طور خاص، برگشت این مواد به ابتدای زنجیره تولید صنعت انرژی بادی نوید اقتصاد چرخشی را می‌دهد. علاوه‌براین، تحقیق درباره موضوعات کلیدی مانند کاهش نیاز به مواد حیاتی مورد اشاره، ارتقای فناورهای مرتبط و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به استخراج و استحصال این مواد اهمیت بسیاری دارد.

مراجع

1. Barteková, E. (2016). The role of rare earth supply risk in low-carbon technology innovation. In *Rare Earths Industry* (pp. 153-169). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00010-3
2. Bobba, S. Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study. https://iris.polito.it/handle/11583/2974405
3. Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C. (2020). Raw Materials Demand for Wind and Solar PV Technologies in the Transition Towards a Decarbonised Energy System. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*. https://doi.org/10.2760/160859
4. Elia, A., Taylor, M., Gallachóir, B. Ó., & Rogan, F. (2020). Wind Turbine Cost Reduction: A Detailed Bottomup Analysis of Innovation Drivers. *Energy Policy*, *147*, 111912. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111912
5. Elshkaki, A., & Graedel, T. E. (2014). Dysprosium, the Balance Problem, and Wind Power Technology. *Applied Energy 136*, 548-559. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.064
6. Golroudbary, S. R., Makarava, I., Kraslawski, A., & Repo, E. (2022). Global Environmental Cost of Using Rare Earth Elements in Green Energy Technologies. *Science of The Total Environment*, *832*, 155022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155022
7. IEA (2020c). World Energy Outlook 2020. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020
8. International Energy Agency (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Retrieved from https://www.iea.org
9. IRENA (International Renewable Energy Agency) (2019). Renewable Power Generation Costs in 2018. https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018
10. Kamran, M., Raugei, M., & Hutchinson, A. (2023). Critical Elements for a Successful Energy Transition: A Systematic Review. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 100068. https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100068
11. Manberger, A., & Stenqvist, B. (2018). Global Metal Flows in the Renewable Energy Transition: Exploring the Effects of Substitutes, Technological Mix and Development. *Energy Policy*, *119*, 226-241. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056
12. Pales, A. F., & Bennett, S. (2020). Energy technology perspectives 2020. Tech. Rep.). International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020
13. Pavel, C. C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Jenseit, W., & Blagoeva, D. (2017). Substitution Strategies for Reducing the Use of Rare Earths in Wind Turbines. *Resources Policy*, *52*, 349-357. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010
14. Savvidou, G., & Johnsson, F. (2023). Material Requirements, Circularity Potential and Embodied Emissions Associated with Wind Energy. *Sustainable Production and Consumption*, *40*, 471-487. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.012
15. Van Nielen, S. S., Sprecher, B., Verhagen, T. J., & Kleijn, R. (2023). Towards neodymium recycling: Analysis of the Availability and Recyclability of European Waste Flows. *Journal of Cleaner Production*, *394*, 136252. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136252
16. Verma, S., Paul, A. R., & Haque, N. (2022). Assessment of Materials and Rare Earth Metals Demand for Sustainable Wind Energy Growth in India. *Minerals*, *12*(5), 647. https://doi.org/10.3390/min12050647
17. Wang, S., Hausfather, Z., Davis, S., Lloyd, J., Olson, E. B., Liebermann, L., Núñez-Mujica, G. D., & McBride, J. (2023). Future Demand for Electricity Generation Materials Under Different Climate Mitigation Scenarios. *Joule*, *7(2)*, 309-332. https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.01.001