

Document Type

Technical Article

فنی و ترویجی

نوع مقاله

Investigating the Effect of Using Renewable Energy on Water Resources from the Required Mineral Materials Standpoint

Z. Behniafar¹, A. Pourrajabian^{2*}

1- M.Sc., Research Department of Energy, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Research Department of Energy, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran.

* Corresponding, Author Email: a.pourrajabian@merc.ac.ir

Received 03-02-2026

Revised 08-03-2026

Accepted 11-04-2026

Available online 15-06-2026

بررسی اثر بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بر منابع آبی از منظر مواد معدنی مورد نیاز

زری بهنیا‌فار^۱، ابوالفضل پوررجیبیان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

۲- دانشیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: a.pourrajabian@merc.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

تاریخ انتشار ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

Abstract

In order to prevent global warming, climate change, and the harmful effects of fossil fuel consumption, the use of renewable energy sources (such as solar and wind energy) has become a top priority for many countries around the world. Despite significant investments, concerns over the shortage of minerals used in renewable energy technologies (such as copper and lithium) have accelerated the exploration of new mines and the extraction of mineral resources. This study, by reviewing existing research, addresses the challenges of this issue and examines the impact of renewable energy deployment on water resources from the perspective of the required minerals. The findings indicate that four major factors- global shortages of critical minerals, the location of mines in water-stressed regions, the potential for international conflicts, and supply chain control issues (due to monopolization by a limited number of countries)- have turned the secure supply of these materials into a serious challenge. According to the study, approximately half of the global production of lithium and copper - two essential elements for the advancement of renewable energy - occurs in regions with high water stress. Meanwhile, water scarcity poses a significant barrier to mineral resource development, and long-term mining operations can lead to water pollution. In this context, the activities, impacts, and risks related to water in the development of mineral resources are introduced in three areas: production, processing, and distribution. Water pollution is particularly critical in the processing phase, as grinding and concentration methods generate toxic wastewater filled with heavy metals and chemicals. To prevent and address this crisis, four effective strategies have been proposed: optimal use of minerals, groundwater management and efficiency improvement, political actions, and the adoption of economic tools. Also, a proposed model for Iran has been recommended.

Keywords: Water Resources, Water Pollution, Renewable Energy, Fossil Fuels, Minerals.

چکیده

در راستای جلوگیری از گرمایش زمین، تغییرات اقلیمی و اثرات مخرب استفاده از سوخت‌های فسیلی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، ...) در رأس برنامه‌های بسیاری از کشورهای جهان قرار گرفته است. با وجود سرمایه‌گذاری مناسب، نگرانی از کمبود مواد معدنی مورد استفاده در منابع تجدیدپذیر (مانند فلزات مس و لیتیم) سبب شده است که اکتشاف معادن جدید و استخراج مواد معدنی شتاب بیشتری بگیرد. هدف مطالعه حاضر بررسی اثرات و پیامدهای بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بر منابع آبی از منظر مواد معدنی مورد نیاز در صنایع مرتبط است. در این راستا، این پژوهش با مطالعه تحقیقات انجام گرفته به چالش‌های این موضوع پرداخته و اثر بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بر منابع آبی را از دیدگاه مواد معدنی مورد نیاز بررسی کرده است. بررسی انجام گرفته حاکی از آن است که چهار عامل کمبود مواد معدنی مورد نیاز در جهان، قرارگیری معادن در مناطق با تنش آبی، احتمال به وجود آمدن منازعات بین‌المللی و همچنین عدم کنترل زنجیره تأمین (به سبب انحصار تعداد محدودی از کشورها)، تأمین ایمن مواد مذکور را به یک چالش جدی تبدیل کرده است. بر مبنای مطالعه انجام گرفته، در حدود نیمی از تولید لیتیم و مس (به عنوان دو عنصر حیاتی جهت پیشرفت و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر) در مناطقی است که تنش آبی بالایی دارند. این در حالی است که کمبود آب یک مانع بزرگ برای توسعه منابع مواد معدنی بوده و عملیات استخراج در بلندمدت، سبب آلودگی آب می‌شود. در این راستا فعالیت‌ها، تأثیرات و خطرات ناشی از توسعه مواد معدنی مرتبط با آب در سه حوزه تولید، فرآوری و توزیع معرفی شده است. آلودگی آب به طور خاص در مرحله فرآوری خطرناک بوده، زیرا روش‌های آسیاب و تغلیظ، پساب‌های سمی مملو از فلزات سنگین و مواد شیمیایی را تولید می‌کنند. جهت پیشگیری و رفع این بحران، چهار راهکار مؤثر شامل استفاده بهینه از مواد معدنی، مدیریت آب‌های زیرزمینی و ارتقا بهره‌وری، انجام اقدامات سیاسی و همچنین بکارگیری ابزارهای اقتصادی معرفی شده است. همچنین مدل پیشنهادی برای اقلیم ایران نیز بیان شده است.

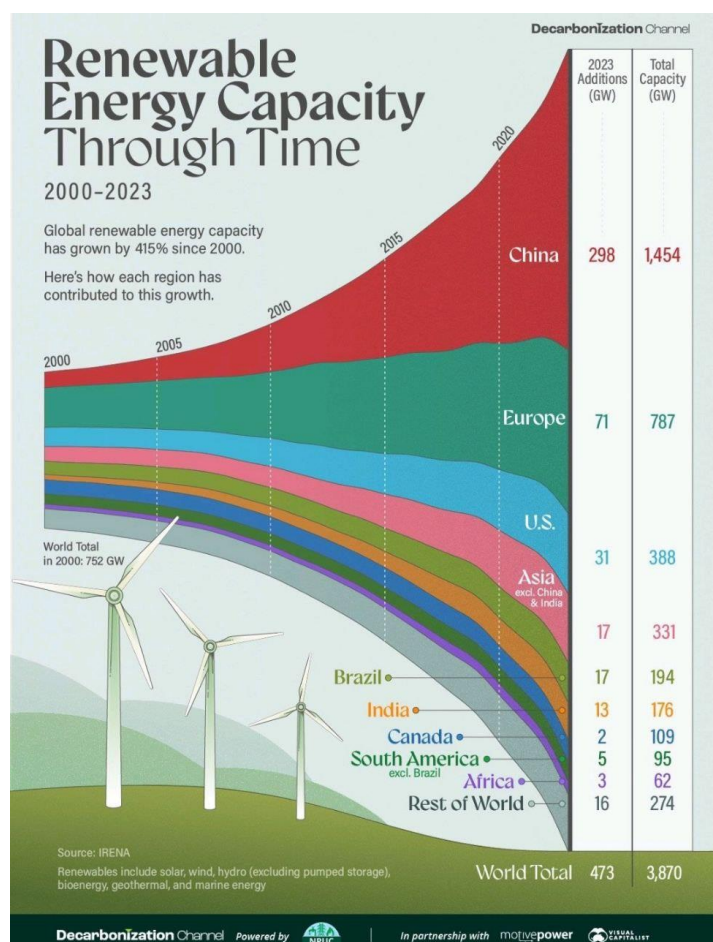
واژه‌های کلیدی: منابع آبی، آلودگی آب، انرژی‌های تجدیدپذیر، سوخت‌های فسیلی، مواد معدنی.

How to cite this article:

Behniafar, Z., & Pourrajabian, A. (2026). Investigating the Effect of Using Renewable Energy on Water Resources from the Required Mineral Materials Standpoint. Journal of Water and Sustainable Development, 13(1), 191-202. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i1.2602-1497>

تفکیک مناطق مختلف جهان شامل چین، اروپا، آمریکا، آسیا، ... را نشان می‌دهد. در حالی که ظرفیت جهانی در سال ۲۰۰۰ مقدار ۷۵۲ GW بود، این رقم پس از بیست و چهار سال و با ۴۱۵ درصد افزایش در پایان سال ۲۰۲۳ به مقدار ۳۸۷۰ GW رسیده است. این افزایش قابل توجه معادل رشد سالانه مرکب ۷/۴ درصدی می‌باشد. لازم به ذکر است که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد برق انرژی ایران تا پایان سال ۱۴۰۳، کمی بیش از ۱ GW است. این در حالی است که کشور برزیل تنها در سال ۲۰۲۳، ۱۷ GW به ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر خود افزوده است (شکل ۱).

انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بادی، آبی، بيو انرژی، زمین‌گرمایی و انرژی دریایی با پیشرفت قابل توجهی در حال رشد و توسعه در سرتاسر جهان می‌باشند. جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر با هدف رفع آلودگی و کاهش گرمایش جهانی به یکی از اولویت‌های کشورهای مختلف بدل شده است. حمایت مورد اشاره به همراه ارتقای تکنولوژی و فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر کاهش قیمت جهانی را به همراه داشته است. شکل (۱) تغییرات ظرفیت را در بازه زمانی ۲۰۲۳-۲۰۰۰ به



شکل ۱- ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق مختلف جهان در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳ (IRENA، ۲۰۲۴).

دسترسی به جهان پاک و عاری از سوخت‌های فسیلی در گرو تأمین مواد معدنی مورد نیاز آن می‌باشد (Grandell و همکاران، ۲۰۱۶). در این راستا نیاز به پیش‌بینی مقدار مواد مورد نیاز مذکور در سالیان و دهه‌های آتی و نحوه تأمین آن می‌باشد. به این منظور آژانس بین‌المللی انرژی از دو سناریوی سیاست‌گذاری‌های دولتی^۱ (STEPS) و سناریوی توسعه پایدار^۲ (SDS) بهره گرفته است (Kim و همکاران، ۲۰۲۱). سناریوی (SDS) بر مبنای توافق کنفرانس آب و هوایی پاریس

کشورهای مختلف هدف‌گذاری‌های مختلفی را برای سالیان و دهه‌های آتی با هدف فاصله گرفتن از منابع فسیلی انجام داده‌اند و به این منظور بودجه‌های مرتبط تخصیص داده شده و قانونی در نظر گرفته شده است. با این وجود چالش اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر در آینده نزدیک، تأمین مواد معدنی لازم برای اجزای مورد استفاده در تجهیزات مرتبط با منابع تجدیدپذیر (توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، ...) است. می‌توان گفت پیشرفت صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر و

(COP21) که در سال ۲۰۱۵ برگزار شد، ایجاد شده است و مسیری را مشخص می‌کند که اهداف کنفرانس مذکور برآورده شود. در این خصوص، کشورها و شرکت‌های بزرگ اهدافی را برای گذار به دهه‌های آتی (عمدتاً تا ۲۰۵۰) در نظر گرفته‌اند. در واقع این سناریو، بر مبنای برنامه‌های اعلامی کشورها/شرکت‌ها جهت بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر است. سناریوی (STEPS) بر مبنای سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های فعلی و عملکرد دولت‌ها و روند کنونی پیشرفت آن‌ها است. در این راستا، برنامه دولت‌ها و ارگان‌های مرتبط بررسی و پایش می‌شود. در واقع به کمک هر کدام از این سناریوها امکان پیش‌بینی مواد معدنی مورد نیاز جهت استفاده در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر به وجود می‌آید. پژوهش حاضر از جنبه دیگری به این موضوع مهم پرداخته و با معرفی چالش‌های تأمین ایمن تولید مواد معدنی مورد نیاز در صنایع تجدیدپذیر، اثرات استخراج آن‌ها را بر روی منابع آبی مورد بررسی قرار داده و به راهکارهای مقابله با خطرات ناشی از فعالیت‌های معدنی می‌پردازد.

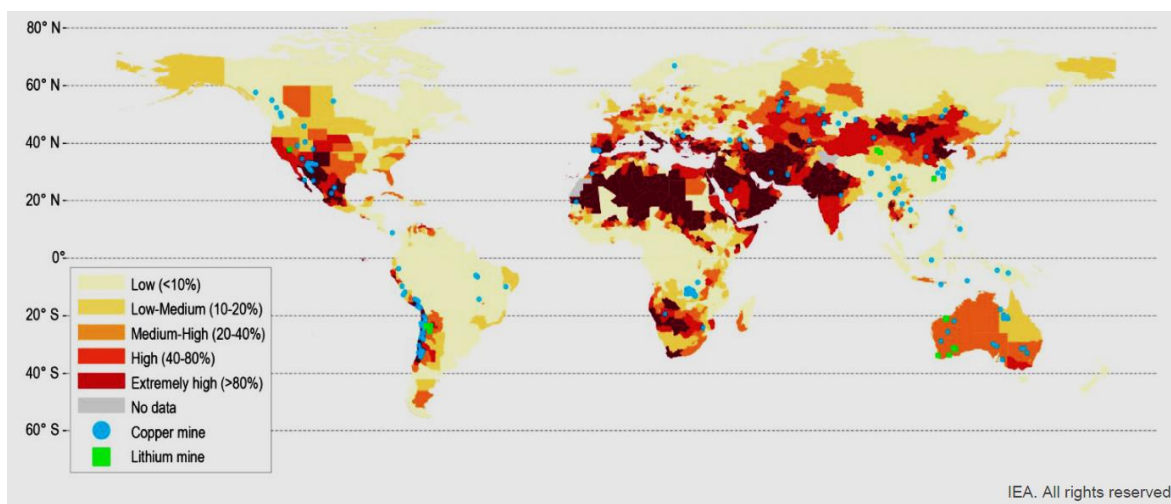
چالش‌های تأمین ایمن تولید مواد معدنی

فلزات لیتیوم و مس دو فلز حیاتی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که برای تولید آن‌ها نیاز به آب فراوانی می‌باشد. مس به لطف هدایت حرارتی و الکتریکی آن پر مصرف‌ترین ماده معدنی در فناوری‌های انرژی پاک بوده و به طور گسترده در طیف وسیعی از کاربردهای الکترونیکی و صنعتی استفاده می‌شود. تقاضا برای این فلز جهت استفاده در فناوری‌های انرژی پاک بسیار بالا بوده به گونه‌ای که سهم آن‌ها از کل تقاضای مس به ۳۰ درصد در سناریوی سیاست‌گذاری‌های دولتی (STEPS) و ۴۵ درصد در سناریوی توسعه پایدار (SDS) تا سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد. همچنین لیتیوم به خاطر وزن سبک و ویژگی‌های واکنشی بالا، یک ماده اولیه اساسی برای ساخت انواع باتری‌هایی است که نه تنها در توسعه انرژی تجدیدپذیر و افزایش سهم آن‌ها در سبد تولید برق موثر بوده، بلکه جزء کلیدی خودروهای هیبریدی و الکتریکی می‌باشد.

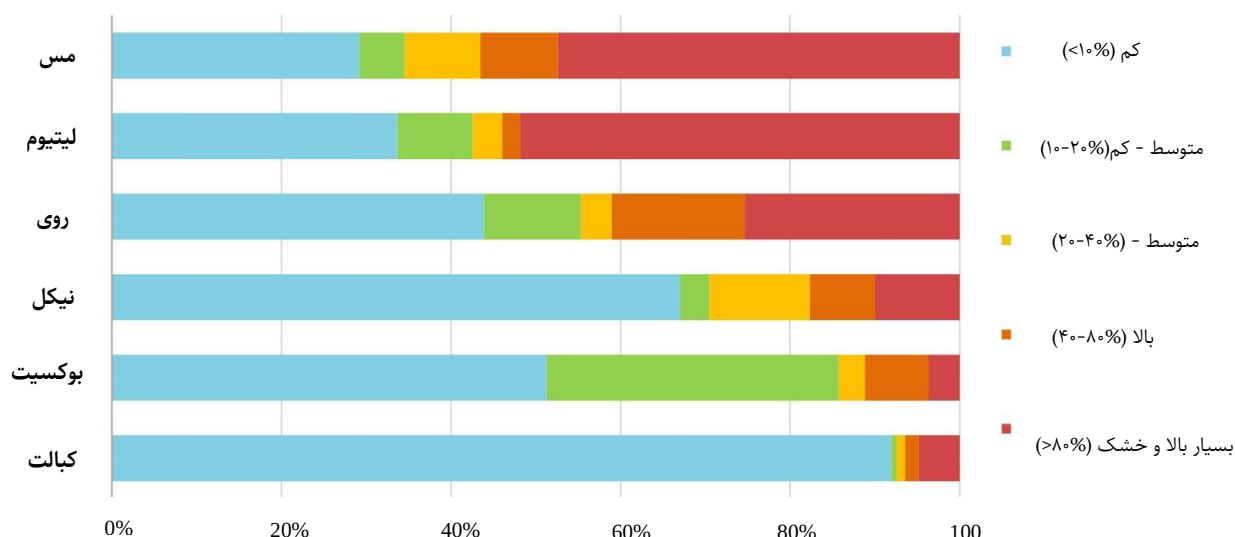
در شکل (۲) محل قرارگیری معادن لیتیوم و مس و سطوح تنش آبی در سال ۲۰۲۰ آورده شده است. شکل (۳) سهم حجم تولید تعدادی از مواد معدنی را براساس سطح تنش آبی در سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بیش از ۵۰٪ تولید کنونی لیتیوم و مس در مناطقی است که در معرض سطح بسیار بالای تنش آب قرار دارند. شایان ذکر است مناطقی با برداشت آب برابر یا بیش از ۴۰٪ از منابع قابل تجدید در گروه سطح بسیار بالای تنش آب طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین بیش از ۸۰٪ از تولید مس در کشور شیلی در مناطق خشک و تنش آبی شدید و بیابانی انجام می‌شود (Kim و همکاران، ۲۰۲۱). برای لیتیوم نیز بیش از نیمی از عرضه جهانی در مناطق بالای تنش آب قرار دارد، به‌ویژه در مثلث لیتیوم در آمریکای جنوبی (کشورهای شیلی، آرژانتین و بولیوی)، جایی که استخراج شورابه‌ها به

مصرف قابل توجه آب‌های زیرسطحی می‌انجامد. از آن‌جا که منابع معدنی در معرض خطرات اقلیمی زیادی قرار دارند، تولید پایدار این مواد جهت تأمین نیاز جهان به یک چالش اساسی تبدیل شده است. ریسک‌های اقلیمی مرتبط با آب (خشکسالی و سیل) تهدیدی جدی می‌باشد. برای نمونه نزدیک به ۷٪ از عرضه جهانی مس در سال ۲۰۲۴ تحت تأثیر مستقیم ریسک آب قرار گرفته است. علاوه بر این، سهم معادن واقع در مناطق پر تنش آبی به مرور زمان افزایش خواهد یافت. شیلی، استرالیا، چین و آفریقا به عنوان مناطق تولیدی این مواد در معرض گرمای شدید قرار دارند. برای نمونه حدود ۸۰ درصد تولید مس در شیلی در معادن واقع در تنش آبی بالا و مناطق خشک تولید می‌شود. در سال ۲۰۱۹ بدترین خشکسالی در بیش از شصت سال اخیر، شیلی را تحت تأثیر قرار داد به گونه‌ای که چیره‌بندی آب در معدن برای مقابله با خشکسالی اجرایی شد (CRU، ۲۰۲۰). همچنین در شیلی مواردی گزارش شده است که خشکسالی‌های چندین ساله منجر به کمبود شدید آب در مناطق معدنی شده و عملکرد معادن مس را تحت تأثیر قرار داده است. در نیمه اول سال ۲۰۲۲، معدن Los Pelambres کاهش تولید تا حدود ۲۴٪ را به دلیل کمبود آب برای فرآوری تجربه کرده است (Del Rio و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین استخراج لیتیوم در مثلث لیتیوم عمدتاً با روش تبخیری بر پایه شورابه انجام می‌شود. این روش به شکل قابل توجهی باعث استهلاک آب‌های زیرسطحی و افت سفره‌ها می‌شود. این تجربه‌ها می‌تواند برای ایران در کوبیرهای مرکزی پیامدهای مهمی، هم از منظر ریسک‌های تأمین مواد معدنی و هم از منظر رقابت بر منابع آبی، داشته باشد. خشکسالی بلندمدت عملکرد معادن مس را محدود می‌کند و نیاز به آب شیرین‌کن/آب غیرمحلّی ایجاد می‌نماید. این راه‌حل‌ها در صورتی که به مدیریت مصرف آب نپردازند، به‌تنهایی بحران آب را حل نمی‌کنند، بلکه مصرف انرژی و هزینه را افزایش می‌دهند.

علاوه بر مشکلات مورد اشاره، انحصار تعداد محدودی از کشورها (به ویژه چین) در تولید مواد معدنی نگرانی از منازعات بین‌المللی در آینده را به همراه دارد. به طور خاص در برخی موارد، تنها یک کشور مسئول، حدود نیمی از تولید جهانی می‌باشد. شیلی و پرو، بزرگترین تولیدکننده مس هستند که ۴۰ درصد از سهم تولید جهانی مس را به خود اختصاص داده‌اند. به طور خاص، شیلی ۲۸ درصد از سهم مس جهان را در سال ۲۰۱۹ به خود اختصاص داده است. چین و جمهوری دموکراتیک کنگو به ترتیب مسئول حدود ۶۰ و ۷۰ درصد از تولید جهانی عناصر کبالت و عناصر خاکی کمیاب در سال ۲۰۱۹ بودند (Kim و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۲- محل قرارگیری معادن لیتیوم و مس و سطوح تنش آبی در سال ۲۰۲۰ (WRI، ۲۰۱۹).



شکل ۳- سهم حجم تولید براساس سطح تنش آبی برای تعدادی از مواد معدنی در سال ۲۰۲۰ (WRI، ۲۰۱۹).

اختصاص داده است، همچنان محصولات مس تصفیه شده را نیز از خارج وارد می‌کند. شرکت‌های چینی همچنین سرمایه‌گذاری قابل توجهی در منابع معدنی خارج از کشور خود مانند استرالیا، شیلی، جمهوری دموکراتیک کنگو و اندونزی انجام داده‌اند. همچنین در حوزه فلز لیتیم کشور چین بر بازار جهانی تسلط دارد به گونه‌ای که نزدیک به ۶۰ درصد از مواد شیمیایی لیتیوم جهان در چین تولید شده و شرکت‌های چینی در آمریکای جنوبی سرمایه‌گذاری کرده‌اند. این در حالی است که تنها تعداد انگشت شماری از شرکت‌ها می‌توانند محصولات شیمیایی لیتیومی با کیفیت خلوص بالا تولید کنند. در سال ۲۰۱۹، بیش از ۸۰ درصد هیدروکسید لیتیوم در چین تولید شده است.

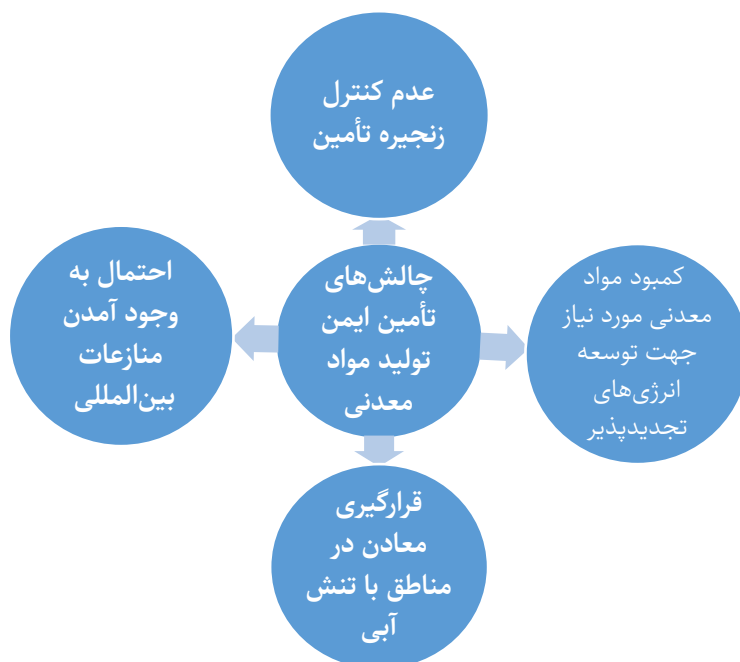
عناصر خاکی کمیاب^۳ دارای خواص مغناطیسی، نوری و الکتریکی منحصربه‌فرد بوده و به طور گسترده در صنایع مختلف به‌ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شوند. این عناصر به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابه معمولاً با هم در طبیعت یافت می‌شوند و استخراج اقتصادی آن‌ها دشوار است. نئودیمیوم (Nd) و دیسپروزیوم (Dy) دو عنصر بسیار پر کاربرد در گروه عناصر خاکی کمیاب هستند که در ژنراتورهای توربین بادی به کار می‌روند (Rybak و همکاران، ۲۰۲۴). در سال ۲۰۱۱، به واسطه تحریم‌های اعمال‌شده توسط کشور چین، قیمت این عناصر جهش چشمگیری داشت (Pavel و همکاران، ۲۰۱۷). جدول (۱) سهم کشور چین از پالایش مواد معدنی در جهان را نشان می‌دهد. پس از چین، کشورهای شیلی، ژاپن و روسیه قرار دارند. با وجود این که چین ۵۰ درصد از تقاضا جهانی مس تصفیه شده را به خود

جدول ۱- سهم کشور چین از پالایش مواد معدنی در جهان (Kim و همکاران، ۲۰۲۱).

ماده معدنی	مس	نیکل	لیتیوم	کبالت	عناصر خاکی کمیاب
سهم (درصد)	۴۰	۳۵	۷۰ تا ۵۰	۷۰ تا ۵۰	۹۰

در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که کمبود مواد معدنی مورد نیاز جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، قرارگیری معادن در مناطق با تنش آبی و همچنین احتمال به‌وجود آمدن منازعات بین‌المللی و عدم کنترل زنجیره تأمین (به سبب انحصار تعداد محدودی از کشورها)، تأمین ایمن مواد مذکور در آینده را به یک چالش جدی تبدیل کرده است (شکل ۴). علاوه بر این، بهره‌برداری از منابع معدنی پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی مختلفی را به همراه دارد که اگر به درستی مدیریت نشود، می‌تواند به جوامع محلی آسیب برساند. تولید مواد معدنی مرتبط با گذار انرژی، یک عامل مهم برای انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده و همچنین می‌تواند اثرات نامطلوبی بر تنوع زیستی گونه‌های در معرض خطر بگذارد. در زمینه

چالش‌های اجتماعی می‌توان به سلامت کارگران و تأثیرات نامطلوب بر جمعیت محلی یا کودکان کار اشاره کرد. ضمن این‌که در بسیاری از مناطق، استفاده از آب‌های زیرزمینی جهت بهره‌برداری از منابع معدنی با فعالیت‌های کشاورزی، خانگی و صنعتی در رقابت است. در این راستا این نگرانی وجود دارد تأمین این مواد بدون در نظر گرفتن ملاحظات مذکور انجام پذیرد. با وجود چالش‌های مذکور، مطالعه حاضر تنها به بررسی اثر بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر بر منابع آبی از منظر مواد معدنی مورد نیاز می‌پردازد. به این منظور اثر استخراج مواد معدنی بر روی منابع آبی و آلودگی‌های مرتبط مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و راهکارهای مربوطه جهت جلوگیری از بحران مورد اشاره ارائه می‌شود.



شکل ۴- چهار چالش تأمین ایمن تولید مواد معدنی.

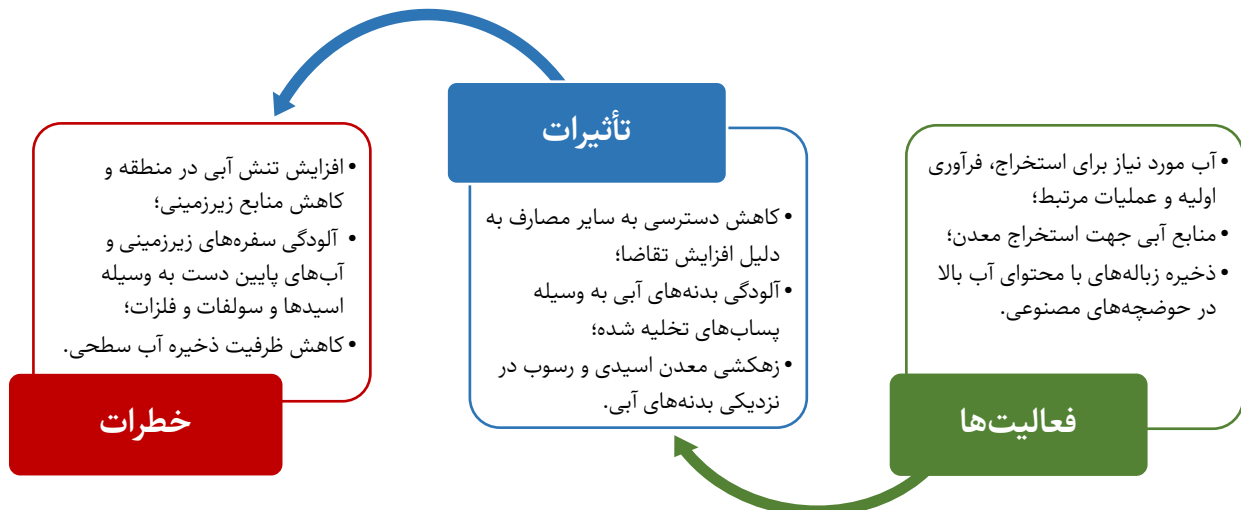
اثر استخراج مواد معدنی بر روی منابع آبی

استخراج معدن یک مصرف کننده اصلی آب بوده به‌ویژه اگر مواد معدنی مورد نیاز در صنعت انرژی مورد استفاده قرار گیرند (Northey و همکاران، ۲۰۱۴). آب در زنجیره ارزش تولید از اکتشاف تا پردازش (مانند شناورسازی برای تغلیظ سنگ‌های معدنی) و همچنین حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سایر عملیات‌ها نیز مانند تصفیه، خنک‌سازی، کنترل گردوغبار و پمپاژ نیاز به آب می‌باشد. در این راستا توسعه معدن بدون در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی می‌تواند

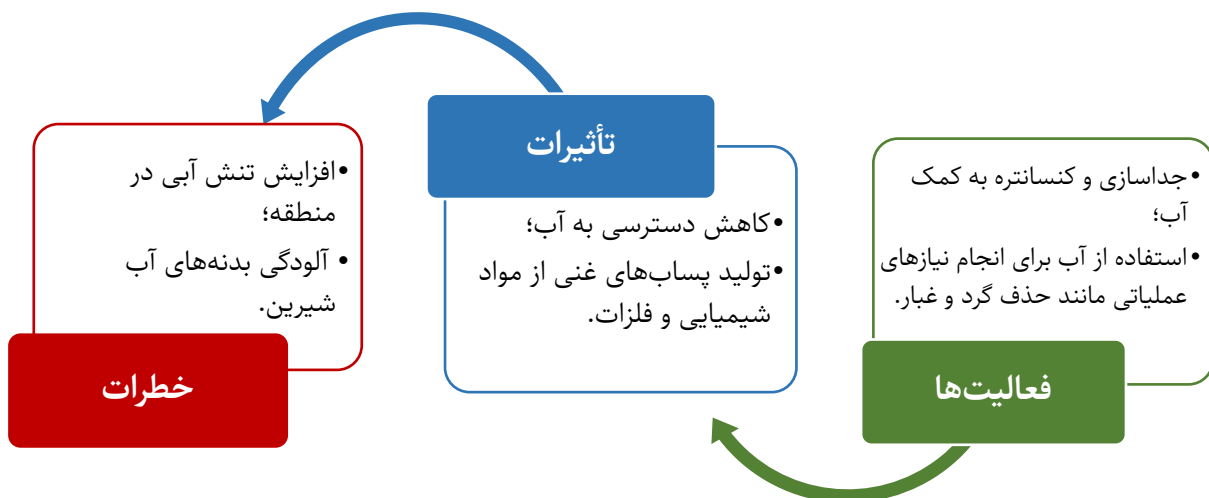
به طور بالقوه منابع آبی را به دلیل زه‌کشی اسیدی معدن، آبیگیری و دفع پساب‌ها در بلندمدت، آلوده کند. آلودگی آب به ویژه در مرحله فرآوری نگران‌کننده است، جایی که عملیات‌های آسیاب و تغلیظ، پساب‌های سمی مملو از فلزات سنگین و مواد شیمیایی، تولید می‌کنند. این پساب‌ها مانند پسماندهای فلزی و شیمیایی حاوی مواد سمی بوده و اسیدیته و سمیت آن‌ها دو پارامتر کلیدی جهت بررسی میزان خطرات آن می‌باشند (Opitz و Timms، ۲۰۱۶). علاوه بر این، حوضچه‌های پسماند نیز خطری جدی برای آب‌های زیرزمینی بوده و ریسک ناشی از نفوذ آن‌ها همیشه وجود دارد. شکست

خطرات ناشی از فعالیتهای معدنی مرتبط به آب، در سه شکل (۵) تا (۷) به تفکیک سه بخش تولید، فرآوری و توزیع نشان داده شده است.

سدهای پساب همچنین می‌تواند منجر به فاجعه زیست محیطی شود که نمونه بارز آن شکست سد برومادینیو در برزیل در سال ۲۰۱۹ بود (Rotta و همکاران، ۲۰۲۰، Thompson و همکاران، ۲۰۲۰). جهت درک بهتر، تأثیرات و



شکل ۵- فعالیت‌ها، تأثیرات و خطرات توسعه مواد معدنی مرتبط (وابسته) به آب - بخش تولید.



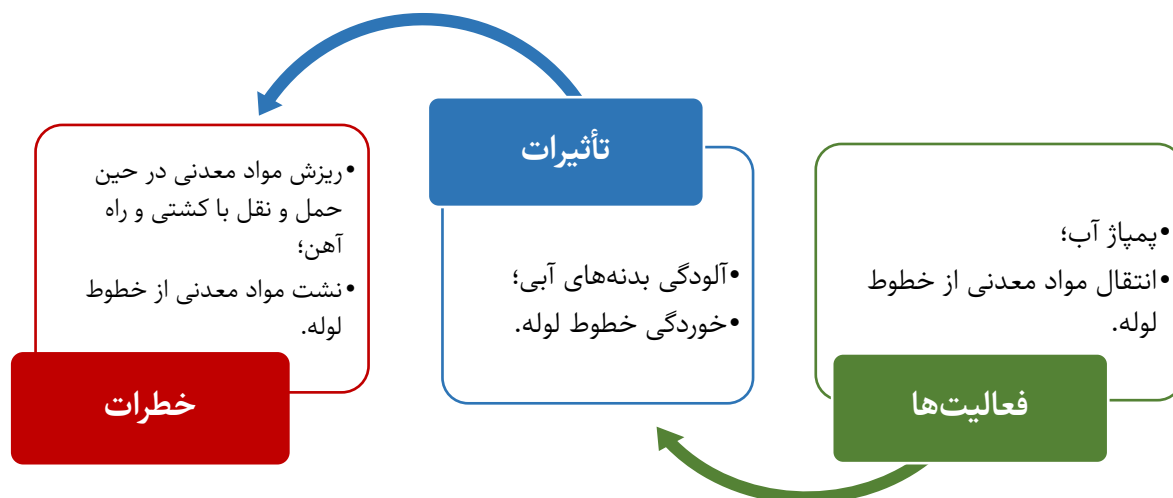
شکل ۶- فعالیت‌ها، تأثیرات و خطرات توسعه مواد معدنی مرتبط (وابسته) به آب - بخش فرآوری.

نیروگاه گازی با سیکل بخار بین ۸۰۰ تا ۱۱۷۰ می‌باشد. این در حالی است که در فناوری‌های تجدیدپذیر (مانند توربین‌های بادی و صفحات خورشیدی) بخش عملیاتی آب مصرفی (در بازه کاری نیروگاه) نزدیک صفر است. در نتیجه، در طول عمر، منابع انرژی تجدیدپذیر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای، ردپای آب عملیاتی بسیار پایین‌تر از نیروگاه‌های فسیلی دارند. در حوزه مواد معدنی، محاسبه این پارامتر به روش‌های بکار رفته در استخراج و تولید بستگی دارد (Mas-Fons و همکاران، ۲۰۲۴). برای نمونه اگر در استخراج لیتیوم از فناوری کم‌آب بر استفاده شود، مقدار پارامتر مذکور کاهش می‌یابد. در این راستا، بازه ۱۵۰-۲۰۰۰ متر مکعب به ازای هر تن برای لیتیوم و محدوده

پارامتر ارزیابی چرخه عمر^۴، ردپای آب^۵ (و یا انرژی) هر فناوری را از مهد تا گور^۶ (از استخراج مواد اولیه و ساخت تجهیزات تا بهره‌برداری و پایان عمر) اندازه‌گیری می‌کند. در این راستا مصرف مستقیم آب (مانند آب‌برداری و تبخیر در نیروگاه‌ها/معادن)، آب مجازی (مانند استخراج و فرآوری سوخت/مواد خام) در محاسبات مربوطه لحاظ می‌شود. برای نمونه نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی علاوه بر آب مورد نیاز جهت استخراج سوخت فسیلی (به همراه حفاری، فرآوری و حمل‌ونقل)، برای خنک‌سازی سیکل بخار نیز به مصرف آب بسیار بالایی نیاز دارند. نیروگاه بخار به ازای هر مگاوات ساعت به ۱۱۰۰ گالن آب نیاز داشته و رقم مشابه برای

پیشرفته کم آب بر جهت استخراج مواد معدنی می‌تواند آثار آب را در کل چرخه انرژی کاهش دهد.

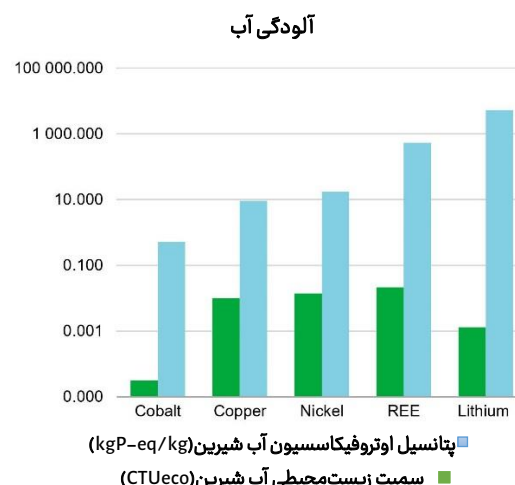
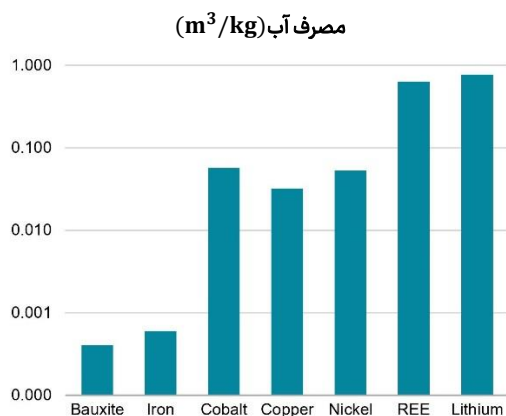
۱۰۰-۲۰۰ برای مس گزارش شده است. لازم به ذکر است که گذار به تجدیدپذیرها در صورت استفاده از فناوری‌های



شکل ۷- فعالیت‌ها، تأثیرات و خطرات توسعه مواد معدنی مرتبط (وابسته) به آب - بخش توزیع.

هر چند که تکنولوژی‌های جدید استخراج مستقیم لیتیوم (DLE) می‌توانند مؤثر بوده و فشار کمتری به منابع آبی وارد کنند، به مانند مس، افزایش تنش آبی چالش بیشتری را برای تولیدکنندگان مواد خام لیتیوم در مناطق کویری (مانند آمریکای جنوبی و استرالیا) ایجاد می‌کند. همچنین عملیات تولید لیتیوم ممکن است اثرات نامطلوبی بر تعادل آب در منطقه داشته باشد. در مطالعات اخیر یک همبستگی منفی بین گسترش مستمر فعالیت‌های استخراج لیتیوم و مقدار رطوبت خاک (به عنوان یکی از شاخص‌های خشکسالی) شناسایی شده است (Liu و همکاران، ۲۰۱۹).

شکل (۸) شاخص‌های مصرف و آلودگی آب را بر اساس مواد معدنی پر کاربرد در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهد. پتانسیل آلودگی به طور قابل توجهی برای مواد معدنی مختلف، نحوه و فرآیند تولید و همچنین چگونگی دفع متفاوت است. مشاهده می‌شود که لیتیوم و عناصر خاکی کمیاب، بیشترین آلودگی و همچنین مصرف آب را دارند. تولید لیتیوم شامل ریسک بالای زیست‌محیطی است که غالباً ناشی از فرآیند شست‌وشو می‌باشد. علاوه بر این، تغییر در روش تولید لیتیوم از روش سنتی مبتنی بر آب نمک به روش مبتنی بر سنگ معدن، منجر به افزایش تقریباً ده برابری ریسک‌های زیست‌محیطی می‌شود (Jiang و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۸- شاخص‌های مصرف آب (چپ) و آلودگی آب (راست) برای مواد معدنی پر کاربرد در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر
 CTUeco: واحد سمی مقایسه‌ای برای اکوسیستم‌ها، kgP-eq/kg: کیلوگرم از فسفر معادل بر هر کیلوگرم (Tost و همکاران (۲۰۱۸) و Marx و همکاران (۲۰۱۸) و Farjana و همکاران (۲۰۱۹) و Jiang و همکاران (۲۰۲۰)).

راهکارهای مقابله با خطرات ناشی از فعالیت‌های معدنی

با وجود خطرات ذکر شده ناشی از فعالیت‌های معدنی، روند گذار انرژی و جلوگیری از گرمایش زمین به کمک انرژی‌های تجدیدپذیر از سالیان پیش آغاز شده و در بسیاری از کشورهای جهان با شتاب ادامه دارد. به منظور به حداقل رساندن اثرات و جنبه‌های منفی این روند، انجام فعالیت‌ها و اقدامات ذیل به عنوان راهکارهای مهم جهت مقابله با خطرات ناشی از فعالیت‌های معدنی پیشنهاد می‌شود (Kim و همکاران، ۲۰۲۱):

استفاده بهینه از مواد معدنی: بدون تردید کاهش استفاده از مواد معدنی مورد نیاز در صنایع تجدیدپذیر، نقشی مهمی در به تأخیر انداختن معضل مورد اشاره داشته و فرآیند استخراج معدن می‌تواند ردپای آبی خود را با کاهش نیازهای آبی و به کمک روش‌های جایگزین بهبود بخشد (Dutta و همکاران، ۲۰۱۶). در سلسله مراتب مدیریت پسماند، بازیافت^۸ و بازیابی^۹ از مراحل مهم می‌باشد به گونه‌ای که بیشترین پژوهش‌ها به نسبت سایر مراحل مدیریت پسماند بر روی آن‌ها متمرکز شده است. بسته به هدف مورد نظر، فناوری‌های بازیافت به کمک سه روش مکانیکی، حرارتی و شیمیایی انجام می‌شود (Delaney و همکاران، ۲۰۲۱). با پیشرفت و ارتقای تکنولوژی (Hsu و همکاران، ۲۰۱۹) امکان بازیابی مواد معدنی (به ویژه عناصر خاکی کمیاب) به کمک روش‌های مبتنی بر بیومتالورژی و بیولوژی که توسط Zhuang و همکاران (۲۰۱۵) و همچنین Nancharai و همکاران (۲۰۱۶) در حال انجام است، وجود دارد. در حوزه بازیافت، پژوهش‌های مرتبط جهت بهره‌برداری تجهیزات مورد استفاده در انرژی‌های تجدیدپذیر پس از پایان عمر کاری و برگرداندن آن‌ها به چرخه تولید در حال انجام است. برای نمونه می‌توان به مطالعات انجام گرفته در حوزه پنل‌های خورشیدی توسط Xu و همکاران (۲۰۱۸) و Chowdhury و همکاران (۲۰۲۰) و همچنین حوزه توربین‌های بادی توسط Alavi و همکاران (۲۰۲۴) و Gentilini و همکاران (۲۰۱۸) نام برد. لازم به ذکر است با وجود پژوهش‌های در حال انجام، اما این روش‌ها هنوز فاصله زمانی قابل توجهی تا عملیاتی شدن و رسیدن به مرحله بلوغ فنی دارند.

مدیریت آب‌های زیرزمینی و ارتقا بهره‌وری: استفاده بهینه از آب‌های زیرزمینی به همراه استفاده از آب حاصل از آبیگری معدن و روان‌آب سطحی از راهکارهای اصلی مدیریت آب می‌باشد. کشور شیلی، به عنوان بزرگترین تولیدکننده مس در جهان، بیشترین تنش آبی را در قاره آمریکا دارد و از این نظر در رتبه هجدهم جهان قرار دارد، به گونه‌ای که معادن مس در کنار یکی از خشک‌ترین کویرهای زمین قرار دارند (WRI، ۲۰۲۱). با این وجود بیش از ۷۸ درصد از آب مورد استفاده خود را بازیافت کرده و با بهره‌گیری و ارتقاء سیستم حمل و نقل آب از یک مدار خودکار برای گردش مجدد آب استفاده می‌کند (Copper Alliance، ۲۰۲۱). بهره‌وری را همچنین می‌توان با کاهش تلفات آب بدست آورد. از آنجا که در

عملیات معدنی می‌توان از آبی که کیفیت پایین دارد بهره برد، استفاده از فاضلاب تصفیه شده یکی از راهکارهای مهم است. برای کاهش آلاینده‌ها و رعایت استانداردهای تعیین شده، تأسیسات معدنی می‌توانند حجم آب آلوده را با مدیریت روان‌آب یا پوشاندن ضایعات سنگ‌ها و توده‌های سنگ معدن با اجرای سیستم زه‌کشی (جهت جلوگیری از تماس با آب‌های زیرزمینی) کاهش دهند. همچنین به کمک تکنولوژی‌های تصفیه، امکان حذف آلاینده‌های مختلف موجود در پساب وجود دارد. اقداماتی مانند تصحیح pH و استفاده از منعقدکننده‌ها (برای رسوب دادن فلزات)، استفاده از فناوری‌های پیشرفته (مانند فیلتراسیون غشایی یا اکسیداسیون فتوشیمیایی) از جمله این فعالیت‌ها است.

اقدامات سیاسی: تدوین و تنظیم مقررات جدید و الزامات مربوطه توسط دولت‌مردان و تصمیم‌گیرندگان از ابتدایی‌ترین راهکارها می‌باشد. الزام شرکت‌های معدنی به داشتن بیمه برای جبران خسارت‌های ناشی از آلودگی یا تخریب منابع آب زیرزمینی سبب می‌شود که شرکت‌ها مسئولیت‌پذیرتر شوند و خسارت‌ها کاهش پیدا کند. همچنین تعریف استانداردها برای بهره‌وری استفاده از آب‌های سطحی و زیرزمینی و نظارت بر خطوط لوله از دیگر اقدامات سیاسی می‌باشد. به این منظور کنترل برداشت آب از طریق مجوزهای دولتی جهت استفاده بهینه، بسیار حائز اهمیت است. برای نمونه انجمن معدن کانادا، یک چارچوب و پروتکل نظارت دارد که معیارهایی را برای برنامه‌های مدیریت آب شرکت‌ها تعیین می‌کند. چین با وضع مقررات سخت‌گیرانه در حال برداشتن گام‌هایی برای جلوگیری از منابع مولد آلودگی است.

ابزارهای اقتصادی: تعیین مقررات، قیمت‌گذاری (با هدف جلوگیری از ارائه آب رایگان یا ارزان) و همچنین تعیین بازار برای حقوق آب از جمله ابزارهای اقتصادی است. در این راستا، قیمت‌گذاری واقعی منابع آب سبب صرفه‌جویی و استفاده بهینه‌تر خواهد شد. ضمن این‌که مقررات مورد اشاره می‌بایست همراه با سیستم‌های نظارتی بوده و تمامی ذینفعان مرتبط با استخراج معادن را در دوره‌های زمانی از پیش تعیین شده پایبند کند. همچنین اعمال مالیات و اخذ عوارض زیست‌محیطی منجر به فشار بر روی شرکت‌هایی که آب زیرزمینی را بیش از حد برداشت یا آلوده می‌کنند، می‌شود. در نظر گرفتن مشوق‌های مالی مانند ارائه یارانه، وام‌های کم‌بهره یا معافیت‌های مالیاتی برای شرکت‌هایی که از تکنولوژی‌های پاک‌تر و بازیابی آب بهره می‌برند، از جمله ابزارهای اقتصادی جهت مقابله با خطرات ناشی از فعالیت‌های معدنی می‌باشد. در طرف مقابل، تعیین جریمه‌های سنگین مالی برای شرکت‌هایی که مقررات مربوط به حفاظت از منابع آب را نقض می‌کنند نیز بازدارنده بوده و مؤثر و حائز اهمیت است.

مدل پیشنهادی برای ایران

ایران یکی از کشورهای با تنش آب بسیار بالا بوده و بخش اعظم معادن مس در مناطق خشک و کم‌آب استان کرمان (سرچشمه و میدوک) قرار دارند. تولید سالانه مجتمع‌های مس سرچشمه و میدوک در حدود ۳۰۰-۳۵۰ هزار تن می‌باشد. با مصرف ۱۰۰-۲۰۰ مترمکعب آب به ازای هر تن مس، مصرف سالانه آب در محدوده ۳۵ تا ۶۰ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود. این موضوع چالشی جدی در مدیریت منابع آبی ایجاد می‌کند، زیرا اغلب منابع آب زیرزمینی و سطحی، محدود و آسیب‌پذیر هستند. اگر ایران بتواند تولید خود را پایدارتر، کم‌آب‌تر و کم‌انرژی‌تر کند، می‌تواند نقشی حیاتی در تأمین بازار جهانی مس و حتی لیتیوم ایفا نماید، هرچند که ذخایر شناسایی‌شده لیتیوم محدود بوده و ذخایر جدید (به‌ویژه در شورابه‌های کویری) در حال اکتشاف است.

در برنامه هفتم توسعه ایران، تأمین حداقل ۱۰ گیگاوات برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. همچنین سهم ۳۰٪ در سبد برق تا سال ۱۴۱۰ برای منابع تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) هدف‌گذاری شده است. یکی از دلایل اصلی این برنامه‌ریزی‌ها، کاهش وابستگی به منابع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است که آب زیادی مصرف می‌کنند. برای نمونه، هر گیگاوات برق فسیلی نیاز به ۸۰-۱۱۰ هزار مترمکعب آب دارد، در حالی که این بازه برای برق خورشیدی و برق بادی به ترتیب ۵/۹-۰/۱ و ۳-۰/۳ هزار مترمکعب است. با توجه به برنامه ایران برای افزایش سهم منابع تجدیدپذیر، تولید مس می‌تواند مستقیماً به کمک صنایع تجدیدپذیر کشور بیاید. برای نمونه، یک نیروگاه خورشیدی به ازای هر ۱ مگاوات، به ۳-۵ تن مس نیاز دارد. با در نظر گرفتن ظرفیت ۱۰ گیگاواتی برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی، به ۳۰-۵۰ هزار تن مس نیاز می‌باشد که معادل حدود ۱۰-۱۵٪ تولید سالانه کشور است. از این رو، توسعه و افزایش نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در رؤس کار دولت قرار گرفته است. این در حالی است که تحریم‌های بین‌المللی، محدودیت‌های قابل توجهی را برای خرید و واردات تجهیزات مرتبط با این منابع اعمال کرده است. اگرچه بهره‌گیری از ظرفیت معادن، صنایع و شرکت‌های داخلی می‌تواند راهگشا باشد، اما محدودیت آب‌های زیرزمینی و قرارگیری معادن ایران در مناطق با تنش آبی بالا (مانند کویر مرکزی، کرمان و یزد) نیازمند مدیریت ویژه در سطح کلان ملی است. در واقع، تنش در منابع آب زیرزمینی، محدودیت دسترسی به تکنولوژی‌های نوین و همچنین تحریم‌های بین‌المللی، از چالش‌های اساسی ایران در زنجیره تأمین مواد معدنی بوده که رفع هر یک، استراتژی مربوط به خود را نیاز دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

توسعه فناوری استخراج مستقیم لیتیم (DLE) به دلیل نیاز به آب کمتر و بازیابی سریع‌تر لیتیم، گزینه عملیاتی مناسب برای ذخایر شورابه‌ای ایران (در صورت وجود ذخایر قابل بهره‌برداری) بوده و وابستگی کمتر به چین در تأمین لیتیم خام را به همراه

دارد. کاهش شدید فشار آب محلی، افزایش بازده استخراج و مناسب برای ذخایر کم‌آب یا با شوری بالا، از جمله مزایای این فناوری است. هر چند که نیاز به سرمایه‌گذاری فناوری و آزمایش پایلوت و نیاز به برق پایدار (که می‌تواند از انرژی تجدیدپذیر تأمین شود) از محدودیت‌های آن است. در واقع با در نظر گرفتن فناوری‌های استخراج کم‌آب‌بر و همچنین اصلاح قیمت آب، ایران می‌تواند لیتیوم را در اقلیم خشک خود توسعه دهد. روش DLE روشی است که به‌جای تبخیر چندماهه برینه^{۱۰} در حوضچه‌ها، لیتیوم را با رزین تبادل یونی، جاذب‌ها یا غشاها در چند ساعت بازیابی می‌کند. در مقایسه با روش تبخیری سنتی، به کمک روش DLE، مصرف آب ۷۰٪-۹۰٪ کاهش می‌یابد. جهت عملیاتی کردن این موضوع، مناطق شورابه‌ای کویری (شورابه‌هایی با $Li > 100 \text{ ppm}$) می‌تواند به عنوان پایلوت صنعتی در نظر گرفته شود. در این راستا نیاز به سنجش مصرف واقعی آب (و بازیافت آن) به همراه تست رسوب‌گذاری و گرفتگی غشاها است. از آنجا که روش DLE برق‌بر است (انرژی مورد نیاز برای پمپ‌ها)، بهره‌گیری از نیروگاه خورشیدی محلی (با توجه به پتانسیل انرژی خورشیدی در مناطق مرکزی ایران) می‌تواند مؤثر باشد. به صورت موازی، اصلاح قیمت آب و سیاست‌گذاری مرتبط با هدف اقتصادی کردن این طرح نیز می‌بایست صورت پذیرد. به این منظور، راه‌اندازی بازار حق‌آبه، در نظر گرفتن سهمیه مشخص آب برای معادن، امکان خرید و فروش حق‌آبه به همراه جریمه برداشت مازاد، ضروری می‌باشد.

بازیافت مواد ارزشمند از پسماند محصولات الکترونیکی و انرژی‌های تجدیدپذیر به کمک فناوری‌های بازیافت پیشرفته (مانند هیدرومتالورژی) می‌تواند بخشی از تأمین داخلی ایران را پوشش دهد. کاهش وابستگی به استخراج جدید، کاهش فشار بر منابع آب و ایجاد زنجیره ارزش داخلی پایدار از جمله مزایای این موضوع می‌باشد. ضمن این‌که هزینه اولیه بالاتر نسبت به بازیافت سنتی و نیاز به سرمایه‌گذاری و نیروی انسانی متخصص از محدودیت‌های آن است. با این وجود یک برنامه ملی بازیافت، می‌تواند بخشی از تقاضا در بلندمدت را پوشش داده و در کنار فناوری استخراج مستقیم لیتیم و واردات استراتژیک، به خودکفایی نزدیک‌تر شود.

ایران همچنین می‌تواند از طریق توافق‌های بلندمدت تأمین، مشارکت سرمایه‌گذاری و مشارکت‌های فناوری از کشورهای که منابع معدنی غنی دارند و کمتر در معرض کم‌آبی هستند (مانند بخش‌هایی از آفریقا و آمریکای جنوبی) بهره‌برد. این کشورها به‌طور فزاینده‌ای به دنبال سرمایه‌گذاری خارجی هستند و می‌توانند پروژه‌های پایدار را تعریف کنند. تنوع منابع معدنی، کاهش وابستگی به مناطق تنش آب بالا و کاهش ریسک سیاسی نسبت به تحریم‌ها و جنگ‌های تجاری از جمله مزایای این استراتژی است. با این وجود نیاز به زیرساخت‌های مناسب و قراردادهای بلندمدت و مخاطرات ژئوپلیتیک و نیاز به مکانیزم‌های حقوقی قوی برای تضمین قرارداد از محدودیت‌های آن است. نتیجه این رویکرد می‌تواند

تنوع جغرافیایی تأمین را افزایش داده و ریسک‌های هم‌زمان آب در ایران و وابستگی سیاسی/تجاری را کاهش دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با مطالعه تحقیقات انجام گرفته به بررسی اثر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر منابع آبی از منظر مواد معدنی مورد نیاز پرداخته است. برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش سهم آن‌ها در سبد تولید برق کشورها، نیاز به سرمایه‌گذاری عظیمی می‌باشد. تجهیزات مورد نیاز انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، ژنراتورهای توربین‌های بادی و آبی از مواد معدنی مختلف (مانند مس، کبالت، ...) و عناصر خاکی کمیابی تشکیل شده‌اند که سبب شده سرمایه قابل توجهی به حوزه اکتشاف و استخراج معدن در سراسر جهان وارد شود. با این وجود، چهار عامل کمبود مواد معدنی مورد نیاز در جهان، قرارگیری معادن در مناطق با تنش آبی، امکان شکل‌گیری منازعات بین‌المللی و همچنین عدم کنترل زنجیره تأمین به دلیل انحصار تعدادی از کشورها، تأمین این مواد را به یک چالش جدی تبدیل کرده است. مهم‌تر آن‌که فرآیند استحصال مواد معدنی نه تنها نیاز به آب زیادی داشته، بلکه نگرانی جدی از آلودگی منابع آبی زیرزمینی در مراحل اکتشاف و استخراج معدن وجود دارد؛ زیرا فرآیندهای آسیاب و تغلیظ، پساب‌های سمی (مملو از فلزات سنگین و مواد شیمیایی) تولید می‌کنند. در این راستا فعالیت‌ها، تأثیرات و خطرات توسعه مواد معدنی مرتبط به آب در سه بخش تولید، فرآوری و توزیع معرفی شده است. در ادامه راهکارهای مؤثر جهت رفع چالش مذکور در چهار بخش شامل استفاده بهینه از مواد معدنی (مانند استفاده از روش‌های بازیافت و بازیابی برای بهره‌گیری مجدد از مواد معدنی)، انجام اقدامات سیاسی (مانند تدوین استانداردها برای بهبود بهره‌وری استفاده از آب‌های سطحی)، بکارگیری ابزارهای اقتصادی (مانند تعیین مقررات و قیمت‌گذاری برای منابع آبی زیرزمینی) و همچنین مدیریت آب‌های زیرزمینی و ارتقا بهره‌وری (مانند استفاده از یک مدار خودکار برای گردش مجدد آب جهت استفاده در فرآیندهای معدنی) مورد بررسی قرار گرفته است.

منابع

- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., ... & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- Copper Alliance. (2021). Best Practices: Copper Mining, Water and the United Nations' SDGs, <https://sustainablecopper.org/bestpractices/copper-mining-water-and-the-united-nations-sdgs>
- CRU. (2020). Water - a major disrupter to copper supply. <https://www.crugroup.com/knowledge-andinsights/insights/2020/water-a-major-disrupter-to-copper-supply>
- Delaney, E. L., McKinley, J. M., Megarry, W., Graham, C., Leahy, P. G., Bank, L. C., & Gentry, R. (2021). An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105601. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105601>
- Del Rio, J. I., Fernandez, P., Castillo, E., & Orellana, L. F. (2023). Assessing climate change risk in the mining industry: a case study in the copper industry in the Antofagasta Region, Chile. *Commodities*, 2(3), 246-260. <https://doi.org/10.3390/commodities2030015>
- Dutta, T., Kim, K. H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B. H., Deep, A., & Yun, S. T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, 150, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.052>
- Farjana, S. H., Huda, N., and Mahmud, M. A. P. (2019). Life cycle assessment of cobalt extraction process. *Journal of Sustainable Mining*, 18(3), 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.002>
- Gentilini, L., Colledani, M., & Melià, P. (2018). Assessing the use of neodymium alloys in wind turbines from a Life Cycle Assessment perspective: a literature review. *XII Convegno della Rete Italiana LCA*, 367-375.

- Alavi, Z., Khalilpour, K., & Florin, N. (2024). Forecasting End-of-Life Wind Turbine Material Flows in Australia under Various Wind Energy Deployment Scenarios. *Energies*, 17(4), 914. <https://doi.org/10.3390/en17040914>

- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., & Walachowicz, F. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(5), 5858–5867.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04165>
- Mas-Fons, A., Arduin, R. H., Loubet, P., Pereira, T., Parvez, A. M., & Sonnemann, G. (2024). Carbon and water footprint of battery-grade lithium from brine and spodumene: A simulation-based LCA. *Journal of Cleaner Production*, 452, 142108.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142108>
- Nanchaiah, Y. V., Mohan, S. V., & Lens, P. N. L. (2016). Biological and bioelectrochemical recovery of critical and scarce metals. *Trends in biotechnology*, 34(2), 137-155.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.11.003>
- Northey, S. A., Haque, N., Lovel, R., & Cooksey, M. A. (2014). Evaluating the application of water footprint methods to primary metal production systems. *Minerals Engineering*, 69, 65–80.
<http://doi:10.1016/j.mineng.2014.07.006>
- Opitz, J. and Timms, W. (2016). Mine water discharge quality – a review of classification frameworks, *Proceedings of the International Mine Water Association, IMWA 2016, Leipzig*, 11-15.
https://www.imwa.info/docs/imwa_2016/IMWA2016_Opitz_58.pdf
- Pavel, C. C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüller, 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>
- Rotta, L. H. S., Alcantara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., ... & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International journal of applied earth*
- Grandell, L., Lehtilä, A., Kivinen, M., Koljonen, T., Kihlman, S., & Lauri, L. S. (2016). Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies. *Renewable energy*, 95, 53–62.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.102>
- Hsu, E., Barmak, K., West, A. C., & Park, A. H. A. (2019). Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies. *Green chemistry*, 21(5), 919–936.
<https://doi.org/10.1039/C8GC03688H>
- Kim, T. Y., Gould, T., Bennet, S., Briens, F., Dasgupta, A., Gonzales, P., ... & Lagelee, J. (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. *International Energy Agency: Washington, DC, USA*, 70–71.
<https://doi.org/10.1787/f262b91c-en>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). Renewable energy capacity through time (2000–2023) [Infographic].
<https://www.irena.org>
- Jiang, S., Zhang, L., Li, F., Hua, H., Liu, X., Yuan, Z., & Wu, H. (2020). Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in lifecycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 262(January), 110253.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110253>
- Kim, T. Y., Gould, T., Bennet, S., Briens, F., Dasgupta, A., Gonzales, P., ... & Lagelee, J. (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. *International Energy Agency: Washington, DC, USA*, 70–71. Kim, T. Y., Gould, T., Bennet, S., Briens, F., Dasgupta, A., Gonzales, P., ... & Lagelee, J. (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. *International Energy Agency: Washington, DC, USA*, 70–71.
- Liu, W., Agusdinata, D. B., & Myint, S. W. (2019). Spatiotemporal patterns of lithium mining environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 145–156.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>

WRI (World Resources Institute). (2021). Aqueduct Country Rankings (database), <https://www.wri.org/applications/aqueduct/country-rankings/>, (accessed 30 April 2025)

Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste management*, 75, 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>

Zhuang, W. Q., Fitts, J. P., Ajo-Franklin, C. M., Maes, S., Alvarez-Cohen, L., & Hennebel, T. (2015). Recovery of critical metals using biometallurgy. *Current opinion in biotechnology*, 33, 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.03.019>

پىنوشتها

- 1-Stated Policies Scenario (STEPS)
- 2-Sustainable Development Scenario (SDS)
- 3-Rare Earth Elements (REEs)
- 4-Life Cycle Assessment (LCA)
- 5-Water Footprint
- 6-Cradle-to-Grave
- 7-Direct Lithium Extraction (DLE)
- 8-Recycling
- 9-Recovery
- 10-Brine

observation and geoinformation, 90, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

Rybak, A., Rybak, A., & Kolev, S. D. (2024). Development of wind energy and access to REE. The case of Poland. *Resources Policy*, 90, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104723>

Thompson, F., de Oliveira, B. C., Cordeiro, M. C., Masi, B. P., Rangel, T. P., Paz, P., ... & de Rezende, C. E. (2020). Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*, 705, 135914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>

Tost, M., Bayer, B., Hitch, M., Lutter, S., Moser, P., & Feiel, S. (2018). Metal mining's environmental pressures: A review and updated estimates on CO2 emissions, water use, and land requirements. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8), 2881. <https://doi.org/10.3390/su10082881>

WRI (World Resources Institute). (2019). Aqueduct 3.0 dataset, accessed in March 2025, <https://www.wri.org/publication/aqueduct-30>