یادداشت

اقتصاد پنهان اکتشاف معدن

سهراب حسینی
کارشناس حوزه معدن

کمبود سرمایه‌گذاری امروز در اکتشاف معدن، بحران تولید فردای معدن را رقم خواهد زد. با وجود آنکه اکتشاف نخستین حلقه زنجیره ارزش معدن است، همچنان در بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها به‌عنوان فعالیتی پرریسک و هزینه‌بر تلقی می‌شود؛ درحالی‌که تجربه کشورهای معدنی نشان می‌دهد ارزش اقتصادی یک معدن، پیش از آغاز استخراج و از زمان تولید نخستین داده‌های معتبر زمین‌شناسی شکل می‌گیرد.

ایران با برخورداری از حدود ۷درصد ذخایر معدنی شناخته‌شده جهان و تنوع کم‌نظیر مواد معدنی، از مزیتی برخوردار است که می‌تواند نقش معدن را در اقتصاد ملی به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. با این حال، سهم این بخش از تولید ناخالص داخلی همچنان در حدود ۲درصد باقی مانده است. این فاصله میان ظرفیت‌های طبیعی و عملکرد اقتصادی، بیش از هر عامل دیگری، به ضعف در سرمایه‌گذاری اکتشافی بازمی‌گردد. اکتشاف صرفا به معنای کشف یک ذخیره جدید نیست. این مرحله، ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد، عمر معادن را افزایش می‌دهد، امنیت تامین مواد اولیه صنایع را تقویت می‌کند و زمینه توسعه زنجیره ارزش را فراهم می‌سازد. مهم‌تر از همه اینکه نخستین محصول اکتشاف، ماده معدنی نیست، بلکه داده است.

داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و حفاری، دارایی‌هایی هستند که ارزش اقتصادی آنها گاه پیش از آغاز استخراج، چندین برابر هزینه تولیدشان است. اقتصاد اکتشاف در ایران اما با دو مانع اساسی مواجه است. نخست، افق بلندمدت بازگشت سرمایه است. از آغاز عملیات اکتشافی تا رسیدن به مرحله بهره‌برداری، گاه پنج تا ۱۰سال زمان لازم است. در اقتصادی که با تورم مزمن، نوسانات نرخ ارز و تغییر مداوم مقررات روبه‌روست، طبیعی است که سرمایه به سمت فعالیت‌های کوتاه‌مدت و کم‌ریسک‌تر حرکت کند. نتیجه چنین وضعیتی، کاهش سرمایه‌گذاری در بخشی است که آینده معدن به آن وابسته است.

مانع دوم، کمبود اطلاعات پایه و در نتیجه افزایش ریسک سرمایه‌گذاری است. بخش قابل‌توجهی از پهنه‌های امیدبخش کشور هنوز با فناوری‌های نوین مانند ژئوفیزیک هوایی، سنجش از دور، مدل‌سازی سه‌بعدی یا حفاری‌های عمیق مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. سرمایه‌گذار در چنین شرایطی، علاوه بر پذیرش ریسک ذاتی اکتشاف، ناچار است هزینه نبود اطلاعات پایه را نیز پرداخت کند؛ درحالی‌که در بسیاری از کشورهای معدنی، دولت با تولید و انتشار داده‌های پایه، این ریسک را کاهش داده و مسیر ورود سرمایه خصوصی را هموار می‌کند.

نباید فراموش کرد که آثار اقتصادی اکتشاف، بسیار فراتر از کشف یک معدن جدید است. هر کشف موفق می‌تواند به توسعه زیرساخت‌ها، ایجاد اشتغال، رونق مناطق کمتر برخوردار، افزایش سرمایه‌گذاری، رشد صنایع معدنی و توسعه صادرات بینجامد. به همین دلیل، بسیاری از کشورها اکتشاف را یک سرمایه‌گذاری ملی می‌دانند و از طریق مشوق‌های مالیاتی، صندوق‌های تخصصی یا مشارکت مستقیم دولت، از آن حمایت می‌کنند. در همین حال، رقابت جهانی برای دسترسی به مواد معدنی حیاتی هر روز شدیدتر می‌شود. توسعه خودروهای برقی، انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و صنایع پیشرفته، تقاضا برای موادی همچون لیتیوم، عناصر نادر خاکی، نیکل، کبالت و گرافیت را به شکل چشم‌گیری افزایش داده است. در چنین شرایطی، کشوری که امروز در اکتشاف سرمایه‌گذاری نکند، فردا نه‌تنها جایگاهی در بازار جهانی این مواد نخواهد داشت، بلکه برای تامین نیاز صنایع داخلی نیز با محدودیت مواجه خواهد شد.

شاید مهم‌ترین حلقه مغفول در اقتصاد معدن ایران، ارزش اقتصادی داده‌های اکتشافی باشد. هر نقشه زمین‌شناسی، هر پروفیل ژئوفیزیکی و هر متر حفاری، بخشی از سرمایه ملی است که ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش داده و ارزش یک محدوده معدنی را افزایش می‌دهد. در بسیاری از کشورها، این داده‌ها خود به یک دارایی اقتصادی تبدیل شده‌اند و مبنای تصمیم سرمایه‌گذاران برای ورود به پروژه‌های معدنی محسوب می‌شوند. از این منظر، می‌توان گفت بزرگ‌ترین فرصت از دست‌رفته معدن ایران، تنها ذخایر کشف‌نشده نیست، بلکه داده‌هایی است که هرگز تولید نشده‌اند. هر سال تاخیر در اکتشاف، تنها به تعویق افتادن یک پروژه معدنی نیست، بلکه به معنای از دست رفتن فرصت‌های سرمایه‌گذاری، کاهش عمر ذخایر موجود و تضعیف امنیت تامین مواد اولیه صنایع کشور است.

اگر قرار است معدن به یکی از پیشران‌های رشد اقتصادی ایران تبدیل شود، باید نگاه سیاستگذار از «استخراج‌محوری» به «اکتشاف‌محوری» تغییر کند. این تحول، مستلزم سرمایه‌گذاری گسترده در تولید داده‌های پایه زمین‌شناسی، طراحی مشوق‌های اقتصادی برای سرمایه‌گذاران اکتشاف، توسعه ابزارهای نوین تامین مالی و به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، سنجش از دور و تحلیل کلان‌داده‌ها در فرآیند اکتشاف است. واقعیت آن است که آینده معدن ایران نه در معادن فعال امروز، بلکه در ذخایری نهفته است که هنوز شناسایی نشده‌اند. ثروت معدنی، پیش از آنکه از دل زمین استخراج شود، در شناخت زمین خلق می‌شود. هر میزان سرمایه‌گذاری در اکتشاف، در حقیقت سرمایه‌گذاری برای افزایش امنیت اقتصادی، توسعه صنعتی و خلق ارزش افزوده در سال‌های آینده است.

صمت در گفت‌وگو با دکتر زهرا جعفرزاده، استاد دانشگاه، بررسی کرد

آبخوان، معیار تازه امکان‌پذیری معادن

گروه معدن
editor@smtnews.ir

توسعه فعالیت‌های معدنی در ایران در شرایطی دنبال می‌شود که محدودیت منابع آب و تغییرات اقلیمی، ضرورت توجه به ظرفیت‌های طبیعی مناطق را بیش از گذشته مطرح کرده است. آب در بسیاری از مراحل معدنکاری، از اکتشاف و استخراج تا فرآوری، نقشی تعیین‌کننده دارد و در عین حال، خود فعالیت‌های معدنی نیز می‌توانند بر کمیت، مسیر جریان و کیفیت منابع آب زیرزمینی اثر بگذارند. از این رو، بررسی ارتباط میان ساختارهای زمین‌شناسی، آبخوان‌ها و فعالیت‌های معدنی به یکی از موضوعات مهم در ارزیابی و برنامه‌ریزی پروژه‌های معدنی تبدیل شده است.

شناخت رفتار آب‌های زیرزمینی، میزان دسترسی به منابع پایدار و پیامدهای احتمالی حفاری، زهکشی و استخراج بر آبخوان‌ها می‌تواند از بروز بخشی از چالش‌های آینده معادن جلوگیری کند. در همین راستا، صمت در گفت‌وگو با دکتر زهرا جعفرزاده، استاد دانشگاه، ابعاد مختلف ارتباط میان زمین‌شناسی و منابع آب، اهمیت مطالعات هیدروژئولوژیکی در مراحل مختلف معدنکاری و تأثیر فعالیت‌های معدنی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی را بررسی کرده است.

◉ از دیدگاه زمین‌شناسی، چه ارتباطی میان ساختار زمین، آبخوان‌ها و امکان استقرار و توسعه معادن وجود دارد؟

از نظر زمین‌شناسی، ارتباط مستقیمی میان ساختار زمین، آبخوان‌ها و امکان حضور و توسعه معادن وجود دارد. در واقع، محل مناسب برای توسعه معدن یا احداث یک واحد معدنی تنها بر اساس وجود کانسار تعیین نمی‌شود و عواملی مانند شرایط زمین‌شناسی، تکتونیکی و ژئومکانیکی نیز در این زمینه اثرگذار هستند.

ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، شکستگی‌ها، شکاف‌ها، چین‌ها و تماس میان واحدهای سنگی می‌توانند در شکل‌گیری و تمرکز ذخایر معدنی نقش داشته باشند. برای مثال، سامانه‌های گرمابی معمولاً در امتداد گسل‌ها و شبکه‌های شکستگی توسعه پیدا می‌کنند و این ساختارها مسیر مناسبی برای عبور سیالات گرمابی فراهم می‌کنند.

همین ساختارها از سوی دیگر می‌توانند مسیر اصلی جریان آب زیرزمینی نیز باشند. نوع سنگ، میزان شکستگی و شدت هوازدگی نیز در تعیین ویژگی‌های آبخوان اهمیت دارد. برای نمونه، در سنگ‌های آهکی کارستی، آب زیرزمینی می‌تواند از طریق حفره‌ها و شکاف‌های انحلالی با سرعت قابل توجهی جریان پیدا کند، در حالی که در توده‌های سنگی سالم و کم‌شکستگی، نفوذپذیری بسیار پایین‌تر است و جریان آب عمدتاً به شکستگی‌ها وابسته خواهد بود.

این موضوع به‌ویژه در مرحله عملیات معدنی اهمیت پیدا می‌کند. در معادن روباز و زیرزمینی، اگر سطح آب زیرزمینی بالا باشد یا معدن با یک آبخوان مهم برخورد کند، ورود آب به تونل‌ها و محدوده معدن می‌تواند مشکلات جدی برای ادامه فعالیت ایجاد کند. بنابراین، پیش از توسعه معدن باید مدل هیدروژئولوژیکی مناسبی تهیه شود و ارتباط میان کانسارسازی و گسل‌ها و شکستگی‌های اطراف به‌دقت بررسی شود.

در واقع، همان گسل‌ها و شکستگی‌هایی که در مرحله اکتشاف می‌توانند راهنمای مهمی برای کشف کانسار باشند، در مرحله استخراج ممکن است به مسیر اصلی ورود آب به معدن تبدیل شوند. از این رو، شناخت ساختارهای زمین‌شناسی باید از مرحله اکتشاف تا بهره‌برداری ادامه داشته باشد و برای هر پروژه، یک مدل یکپارچه زمین‌شناسی ـ هیدروژئولوژیکی تهیه شود.

◉ آیا مطالعات هیدروژئولوژیک در فرآیند صدور مجوزها و توسعه معادن در ایران به اندازه کافی جدی گرفته می‌شوند، یا هنوز نقش آنها در تصمیم‌گیری‌های معدنی کمتر از اهمیت واقعی‌شان است؟

در مقررات موجود معدنی، حریم سدها و شبکه‌های توزیع آب در استعلام‌های مربوط به صدور پروانه اکتشاف مورد توجه قرار می‌گیرد و برای برخی معادن نیز ارزیابی زیست‌محیطی ضروری است. با این حال، واقعیت این است که در ایران هنوز فاصله قابل توجهی میان الزام قانونی و نقش مطالعات آب‌شناسی در تصمیم‌گیری‌های معدنی وجود دارد. مطالعات آب‌شناسی نباید صرفاً به مرحله اخذ مجوز یا تهیه گزارش زیست‌محیطی محدود شود، بلکه با توسعه پروژه معدنی، این مطالعات نیز باید گسترش پیدا کند. برای مثال، اگر یک کانسار در زون گسله یا در مجاورت یک آبخوان بزرگ قرار داشته باشد، باید مشخص شود گسل‌ها و شکستگی‌ها چه نقشی در انتقال آب دارند، سطح ایستابی در چه عمقی قرار گرفته و چه ارتباط هیدرولیکی میان واحدهای زمین‌شناسی وجود دارد. همچنین باید پیش‌بینی شود که با توسعه تونل‌های زیرزمینی، چه میزان آب ممکن است وارد معدن شود و این مسئله چه مشکلاتی برای عملیات ایجاد خواهد کرد. چنین اطلاعاتی امکان پیش‌بینی و پیشگیری از مشکلات احتمالی را فراهم می‌کند.

در واقع، مطالعات آب‌شناسی می‌تواند به‌طور مستقیم بر طراحی معدن، انتخاب روش استخراج و برآورد هزینه‌های فعالیت معدنی اثر بگذارد و حتی در نهایت، اقتصادی بودن یا نبودن یک پروژه را تحت تأثیر قرار دهد.

◉ از دیدگاه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، معدن‌کاری چگونه می‌تواند بر آبخوان‌ها و جریان آب زیرزمینی اثر بگذارد؟

بله، از نظر کارشناسی این موضوع کاملاً امکان‌پذیر است. همان‌طور که می‌دانیم، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب می‌تواند یکی از عوامل تعیین‌کننده در اقتصادی یا غیراقتصادی بودن یک پروژه معدنی باشد.

از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، صرف وجود یک ذخیره معدنی به معنای اقتصادی بودن معدن نیست؛ چراکه در بسیاری از مراحل معدنکاری، به‌ویژه در معادن فلزی، آب مورد نیاز است. در فرآیندهایی مانند خردایش و فلوتاسیون نیز آب بخش مهمی از فرآیند محسوب می‌شود. بنابراین ممکن است یک کانسار از نظر تناژ، عیار و سایر ویژگی‌های معدنی بسیار مناسب و اقتصادی باشد، اما در صورت نبود آب مورد نیاز برای استخراج و فرآوری، پروژه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از ذخایر معدنی ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند، هزینه تأمین، انتقال و تصفیه آب باید به‌طور مستقیم در ارزیابی اقتصادی پروژه‌های معدنی لحاظ شود.

به عبارت دیگر، در معدنکاری آینده، مفهوم «ذخیره اقتصادی» تنها به عیار و تناژ کانسار محدود نخواهد بود و ملاحظات آب‌شناسی و میزان آب در دسترس نیز می‌تواند در اقتصادی بودن پروژه نقش تعیین‌کننده داشته باشد. حتی ممکن است آب در آینده به یکی از عوامل محدودکننده توسعه معادن در ایران تبدیل شود. به همین دلیل، لازم است موضوع آب از نخستین مراحل اکتشاف و ارزیابی اقتصادی پروژه مورد توجه قرار گیرد.

◉ آیا ممکن است در آینده ذخیره معدنی داشته باشیم، اما به دلیل نبود آب کافی نتوانیم آن را به یک معدن اقتصادی تبدیل کنیم؟

به اعتقاد من، با توجه به کاهش منابع آبی کشور و افزایش رقابت میان بخش‌های مختلف از جمله شرب، کشاورزی، صنعت و معدن، پایداری منابع آب باید در انتخاب محل توسعه پروژه‌های معدنی مورد توجه جدی قرار گیرد و به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی تصمیم‌گیری بررسی شود.

البته منظور این نیست که یک ذخیره معدنی مناسب را صرفاً به دلیل کم‌آبی منطقه کنار بگذاریم، چراکه ممکن است آن ذخیره از نظر اقتصادی و استراتژیک اهمیت بالایی داشته باشد. اما باید میزان آب مورد نیاز پروژه، ظرفیت واقعی منابع موجود و امکان تأمین پایدار آب در بلندمدت از همان مراحل اولیه بررسی شود.

برای مثال، ممکن است دو کانسار از نظر زمین‌شناسی، تناژ، عیار و شرایط اقتصادی مشابه یکدیگر باشند، اما یکی از آنها در منطقه‌ای قرار داشته باشد که منابع آبی پایدارتر و دسترسی مناسب‌تری به آب وجود دارد. طبیعتاً در چنین شرایطی، آن پروژه می‌تواند گزینه مناسب‌تر و اقتصادی‌تری برای توسعه باشد؛ زیرا هزینه و ریسک تأمین آب نیز در ارزیابی اقتصادی آن پایین‌تر خواهد بود.

با این حال، راهکار تنها انتخاب مناطق پرآب نیست. در بسیاری از موارد، فناوری می‌تواند بخشی از محدودیت‌های آبی را جبران کند. استفاده از مدارهای بسته آب، افزایش بازیافت و بازچرخانی آب در کارخانه‌ها، استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه‌شده و همچنین توسعه فناوری‌های فرآوری کم‌آب و خشک، از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند مصرف آب پروژه‌های معدنی را کاهش دهند.

بنابراین باید میان «وجود آب» و «توان مدیریت آب» تفاوت قائل شد. ممکن است منطقه‌ای منابع آب محدودی داشته باشد، اما یک پروژه با فناوری مناسب و مصرف بهینه بتواند با همان منابع فعالیت کند. در مقابل، حتی در مناطقی که منابع آبی بیشتری وجود دارد، اگر مصرف بدون برنامه و بهره‌وری پایین باشد، در بلندمدت امکان تداوم فعالیت وجود نخواهد داشت.

در نتیجه، در معدنکاری آینده، میزان و پایداری منابع آب باید در کنار ارزش ذخیره معدنی و توجیه اقتصادی پروژه بررسی شود. اگر این موضوع از مراحل اولیه اکتشاف و طراحی مورد توجه قرار گیرد، می‌توان از سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی که در آینده با بحران تأمین آب مواجه خواهند شد جلوگیری کرد و در عین حال، با استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف، امکان بهره‌برداری مسئولانه از بخشی از ذخایر معدنی در مناطق خشک و کم‌آب را نیز فراهم کرد.

◉ با توجه به کاهش منابع آب، آیا باید در انتخاب محل احداث معادن جدید، ظرفیت آبی منطقه به اندازه ذخیره معدنی اهمیت داشته باشد؟

از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، اقتصادی بودن یک معدن مفهوم ثابتی نیست، بلکه حاصل مجموعه‌ای از پارامترهاست که می‌توانند در طول زمان تغییر کنند. ممکن است عیار و تناژ یک ذخیره معدنی ثابت باقی بماند، اما عواملی مانند هزینه تأمین آب، انرژی، فرآوری و زیرساخت‌ها تغییر کنند و در نهایت بر توجیه اقتصادی پروژه اثر بگذارند.

تغییرات اقلیمی نیز دقیقاً از همین مسیر می‌تواند اقتصادی بودن یک پروژه معدنی را تحت تأثیر قرار دهد. کاهش بارندگی‌های مؤثر، افزایش دما و افزایش تبخیر و تعرق در فصول مختلف می‌تواند تغذیه برخی آبخوان‌ها را کاهش دهد و در نتیجه، میزان آب قابل دسترس برای یک پروژه نیز کمتر شود. بنابراین ممکن است آبی که در زمان طراحی اولیه معدن در دسترس بوده و تأمین آن از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر محسوب می‌شده، در سال‌های آینده و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی دیگر با همان میزان در دسترس نباشد و پروژه را از نظر اقتصادی با مشکل مواجه کند.

از سوی دیگر، اگر برای تأمین آب یک پروژه مجبور به احداث خط انتقال یا ایجاد زیرساخت‌های جدید باشیم، این موضوع می‌تواند سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جاری پروژه را به شکل قابل توجهی افزایش دهد. به همین دلیل، هزینه و ریسک تأمین آب باید از همان مراحل اولیه ارزیابی اقتصادی مورد توجه قرار گیرد. البته تغییر اقلیم فقط از مسیر کمبود آب بر هزینه‌های معدنکاری اثر نمی‌گذارد. افزایش دما نیز می‌تواند مصرف انرژی را در برخی عملیات معدنی افزایش دهد. برای نمونه، در معادن زیرزمینی ممکن است نیاز به تهویه و خنک‌سازی افزایش پیدا کند و تجهیزات نیز برای فعالیت در دماهای بالاتر به انرژی بیشتری نیاز داشته باشند. این عوامل در مجموع می‌توانند هزینه‌های عملیاتی معدن را افزایش داده و بر اقتصادی بودن پروژه در بلندمدت اثر بگذارند.

بنابراین، ارزیابی اقتصادی یک معدن نباید صرفاً بر اساس شرایط فعلی انجام شود، بلکه لازم است تغییرات احتمالی اقلیمی و آثار آن بر آب، انرژی و سایر هزینه‌های پروژه نیز از ابتدا در نظر گرفته شود.

◉ آیا تغییرات اقلیمی می‌تواند در آینده توجیه اقتصادی برخی معادن، به‌ویژه معادن واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، را تغییر دهد؟

در شرایط فعلی، معدن یکی از زیرساخت‌های مهم اقتصادی کشور محسوب می‌شود و از نظر اشتغال‌زایی، تأمین مواد اولیه صنایع و توسعه مناطق کمتر برخوردار اهمیت قابل توجهی دارد. از یک سو، ایران از ذخایر معدنی ارزشمندی برخوردار است که بهره‌برداری از آنها برای توسعه اقتصادی کشور ضروری است و از سوی دیگر، با محدودیت منابع آب و کاهش ذخایر آبی مواجه هستیم. بنابراین، مکان‌یابی و امکان‌سنجی پروژه‌های معدنی باید بر اساس یک ارزیابی چندمعیاری انجام شود. در این ارزیابی، در کنار پتانسیل زمین‌شناسی و عواملی مانند حجم و عیار ذخیره، باید ظرفیت منابع آب، وضعیت آبخوان، نرخ تغذیه و میزان برداشت از آن نیز مورد توجه قرار گیرد. همچنین ملاحظات زیست‌محیطی، دسترسی به انرژی، زیرساخت‌های موجود و هزینه تأمین آنها از دیگر مؤلفه‌هایی هستند که می‌توانند بر امکان‌پذیری یک پروژه معدنی اثرگذار باشند. نکته مهم این است که نباید میزان آب موجود در یک منطقه را با میزان آب قابل برداشت پایدار یکسان در نظر گرفت. ممکن است یک آبخوان در ظاهر ذخیره آب قابل توجهی داشته باشد، اما اگر برداشت از آن بیش از میزان تغذیه طبیعی باشد، این منابع در بلندمدت پایدار نخواهند بود و می‌توانند به یک محدودیت جدی برای ادامه فعالیت معدن تبدیل شوند.

در عین حال، راهکار مواجهه با محدودیت‌های آبی صرفاً محدود کردن فعالیت‌های معدنی نیست، بلکه باید فناوری‌های معدنکاری نیز با شرایط آبی کشور تطبیق پیدا کنند. افزایش بازچرخانی آب، استفاده از مدارهای بسته در کارخانه‌های فرآوری، کاهش تلفات آب، آبگیری مؤثرتر باطله‌ها و استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه‌شده معدنی، از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند میزان مصرف آب را کاهش دهند.

در مجموع، ذخیره معدنی شرط لازم برای ایجاد یک معدن است، اما در شرایط امروز کشور به‌تنهایی کافی نیست. ظرفیت واقعی و پایدار منابع آب، ملاحظات زیست‌محیطی و توان سرزمین نیز باید به‌عنوان شروط امکان‌پذیری توسعه فعالیت معدنی در نظر گرفته شوند. چنین رویکردی می‌تواند میان ضرورت توسعه معدن و محدودیت‌های منابع طبیعی کشور تعادل ایجاد کند.

> مطالعات آب‌شناسی نباید صرفاً به مرحله اخذ مجوز یا تهیه گزارش زیست‌محیطی محدود شود، بلکه با توسعه پروژه معدنی، این مطالعات نیز باید گسترش پیدا کند

> ذخیره معدنی شرط لازم برای ایجاد یک معدن است، اما در شرایط امروز کشور به‌تنهایی کافی نیست. ظرفیت واقعی و پایدار منابع آب، ملاحظات زیست‌محیطی و توان سرزمین نیز باید به‌عنوان شروط امکان‌پذیری توسعه فعالیت معدنی در نظر گرفته شوند

◉ در شرایط فعلی ایران، آیا می‌توان همچنان توسعه معدن را دنبال کرد یا باید میان «توسعه معدنی» و «ظرفیت آبی» توازن جدیدی ایجاد شود؟

به نظر من، در آینده ممکن است محدودیت اصلی توسعه پروژه‌های معدنی دیگر نبود ذخیره، فناوری یا حتی سرمایه نباشد، بلکه دسترسی به آب پایدار و قابل تأمین باشد. این موضوع به‌ویژه در مورد معادنی که فرآوری آب‌بر دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

اگر یک پروژه برای فرآوری به حجم قابل توجهی آب نیاز داشته باشد، محدودیت منابع آبی می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تأمین یا انتقال آب را افزایش دهد. از سوی دیگر، افزایش هزینه‌های عملیاتی نیز می‌تواند در نهایت باعث شود یک پروژه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیری خود را از دست بدهد و ادامه فعالیت آن با مشکل مواجه شود.

به همین دلیل، در مطالعات اکتشافی جدید ضروری است مدل هیدروژئولوژیک منطقه از همان مراحل اولیه، در کنار مدل زمین‌شناسی کانسار قرار گیرد و این دو مدل به‌صورت همزمان توسعه پیدا کنند. شناخت وضعیت آبخوان‌ها، میزان آب قابل دسترس و پایداری منابع آب باید همزمان با شناخت ذخیره معدنی پیش برود تا از همان ابتدا امکان توسعه واقعی پروژه مشخص باشد.

در واقع، یک ذخیره زمانی می‌تواند یک ذخیره معدنی ارزشمند و قابل توسعه محسوب شود که بتوان آن را با شرایط آب، انرژی، فناوری و ملاحظات زیست‌محیطی منطقه سازگار کرد و در نهایت به یک معدن پایدار تبدیل شود.

◉ آیا ممکن است در آینده مهم‌ترین عامل محدودکننده توسعه برخی معادن ایران نه ذخیره معدنی، نه فناوری و نه سرمایه، بلکه دسترسی به آب باشد؟

فناوری‌های جدید معدنی می‌توانند بخش قابل توجهی از مشکل آب در معدنکاری را کاهش دهند، اما نمی‌توانند محدودیت طبیعی منابع آب را به‌طور کامل برطرف کنند. به نظر من، فناوری می‌تواند بهره‌وری مصرف آب را افزایش دهد، اما نمی‌تواند جایگزین یک منبع آب پایدار و قابل دسترس شود.

امروز در بسیاری از نقاط دنیا، صنایع معدنی تلاش می‌کنند به جای آنکه در هر مرحله آب جدیدی وارد فرآیند شود، آب را تا حد امکان در مدار بسته نگه دارند و پس از بازیافت، دوباره مورد استفاده قرار دهند. یکی دیگر از راهکارها برای کاهش فشار بر منابع آب متعارف، استفاده از منابع آب نامتعارف است؛ برای مثال می‌توان از پساب‌های تصفیه‌شده معدنی یا آب شور دریا استفاده کرد. در مناطقی که دسترسی به آب دریا وجود دارد، امکان نمک‌زدایی و استفاده از آن برای فعالیت‌های معدنی وجود دارد، هرچند این روش نیز هزینه و مصرف انرژی بالایی دارد و باید از نظر اقتصادی برای پروژه توجیه‌پذیر باشد.

از سوی دیگر، استفاده از هوش مصنوعی و فناوری‌های دیجیتال نیز می‌تواند نقش مهمی در مدیریت مصرف آب داشته باشد. این فناوری‌ها امکان کنترل و پایش لحظه‌ای میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف معدن را فراهم می‌کنند و می‌توانند به شناسایی نقاط هدررفت و افزایش بهره‌وری مصرف کمک کنند.

اگر بخواهیم موضوع را خلاصه کنیم، فناوری می‌تواند میزان آب مورد نیاز در بخش معدن را به شکل قابل توجهی کاهش دهد، اما نمی‌تواند ظرفیت طبیعی منابع آب را جایگزین کند. بنابراین معدنکاری در مناطق کم‌آب، علاوه بر استفاده از فناوری‌های به‌روز و کم‌آب‌بر، به مدیریت دقیق و پایدار منابع آب نیز نیاز دارد.

◉ آیا فناوری‌های جدید می‌توانند مشکل آب در معدن‌کاری را تا حد زیادی حل کنند یا محدودیت منابع آب در نهایت یک محدودیت طبیعی و غیرقابل‌چشم‌پوشی باقی خواهد ماند؟

عملیات معدنکاری از طریق تغییراتی که در توده سنگ ایجاد می‌کند، می‌تواند بر منابع آب زیرزمینی، آبخوان‌ها و مسیر جریان آب تأثیر بگذارد. ایجاد حفرات، قطع و زهکشی آب‌های زیرزمینی و همچنین تغییر شرایط ژئوشیمیایی از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند هم بر کمیت و کیفیت آبخوان و هم بر مسیر جریان آب زیرزمینی اثرگذار باشند.

این آثار معمولاً در معادن عمیق و معادن روباز که سطح استخراج آنها به زیر سطح ایستابی می‌رسد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، آب زیرزمینی وارد تونل‌ها یا محدوده‌های استخراج می‌شود و برای خشک نگه داشتن معدن، ناچار به پمپاژ و تخلیه آب هستیم. اگر میزان پمپاژ قابل توجه باشد، می‌تواند یک مخروط افت در سطح آب زیرزمینی اطراف معدن ایجاد کند. در این حالت، افت سطح آب ممکن است بسیار فراتر از محدوده معدن گسترش پیدا کند و بر چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌های اطراف که به آبخوان وابسته هستند، تأثیر بگذارد. یکی دیگر از پیامدهای مهم، تغییر مسیر طبیعی جریان آب زیرزمینی است. تونل‌های اکتشافی و تونل‌هایی که برای عملیات معدنکاری ایجاد می‌شوند، همراه با عملیات زهکشی داخل آنها، می‌توانند مانند یک زهکش مصنوعی عمل کنند. در نتیجه، گرادیان هیدرولیکی منطقه تغییر می‌کند و ممکن است مسیر جریان آب زیرزمینی، محل تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها و حتی دبی یا وضعیت چشمه‌های اطراف نیز تحت تأثیر قرار گیرد.

از سوی دیگر، فعالیت‌های معدنی می‌توانند بر کیفیت آب زیرزمینی نیز اثر بگذارند. برای مثال، در معادن دارای کانسارهای سولفیدی، تماس کانی‌های سولفیدی با اکسیژن و آب می‌تواند موجب اکسیداسیون سولفیدها و تشکیل زه‌آب اسیدی شود. این فرآیند با افزایش اسیدیته آب، تحرک برخی فلزات را افزایش می‌دهد و در صورتی که این عناصر وارد جریان آب شوند، می‌توانند منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و حتی موجب آلودگی آنها شوند.

بنابراین، اثر معدنکاری بر منابع آب تنها به میزان مصرف آب محدود نمی‌شود، بلکه تغییر سطح آب زیرزمینی، تغییر مسیر جریان و احتمال تغییر کیفیت آب نیز باید از مراحل اولیه طراحی و ارزیابی پروژه مورد توجه قرار گیرد.