گزارش خبری

معمایِ متالورژیِ سبز

نیـکل به‌عنوان یکـی از فلـزات حیاتی در گـذار جهانی به سـمت اقتصاد سـبز و انرژی‌های تجدیدپذیـر، نقش محوری در ایـن زمینه ایفـا می‌کند. ایـن عنصر در تولیـد فولادهای پیشـرفته ازجمله فولادهای زنگ نزن، باتری‌های لیتیوم-یون خودروهای الکتریکی، آلیاژهای پیشرفته برای توربین‌های بادی و فناوری‌های نوظهور کاربرد گسترده‌ای دارد. طبق گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تقاضای جهانی نیکل تا سـال ۲۰۴۰ احتمالاً دو برابر خواهد شد و به بیش از ۵.۷ میلیون تن در سـال می‌رسد. این رشد عمدتاً ناشی از گسترش خودروهای الکتریکی و سیسـتم‌های ذخیره‌سـازی انرژی است که بخش عمـده‌ای از فناوری‌های پاک را تشـکیل می‌دهند. بااین‌حال، تولید سـنتی نیکل یکی از آلوده‌کننده‌ترین فرایندهای صنعتی به شـمار می‌رود. عملاً تولید هر تن نیکل به‌طور متوسط حدود ۲۰ تن دی‌اکسـید کربن منتشر می‌کند که این رقم حدود ۱۰ برابر انتشـار کربن در تولید یک تن فولاد اسـت. این مسـئله تناقضی جدی ایجاد کرده اسـت: اسـتفاده از نیکل برای سبز کردن حمل‌ونقل و زیرسـاخت‌ها بار زیست‌محیطی سنگینی را به بخش صنعت متالورژی منتقل می‌کند و در واقع به‌جای آنکه مشکل را حل کند آن را جابه‌جا می‌کند.

بیش از ۶۰ درصد ذخایر نیکلِ جهان در سـنگ‌های لاتریتی یا اکسیدی قرار دارند که عمدتاً در کشورهای گرمسیری مانند اندونزی، فیلیپین و استرالیا یافت می‌شوند. این سنگ‌ها حاوی عیـار پایینی از نیکل (معمولاً بین ۰.۵ تا ۲ درصد) هسـتند و نیکل در ساختارهای پیچیده سیلیکات‌های منیزیم، اکسیدهای آهـن مانند گوتیت و گارنیریت پراکنده شـده اسـت. برخلاف سنگ‌های سـولفیدی با عیار بالاتر که فراوری نسبتاً ساده‌تری دارند، سـنگ‌های لاتریتی به دلیـل پیچیدگی معدنی، فراوری دشـوارتر، پرهزینه‌تر و پرآلاینده‌تری دارند. روش‌های سـنتی استخراج شـامل مراحل متعدد خشک‌کردن، کلسیناسیون در کوره‌هـای دوار، ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی یا لیچینگ اسـیدی تحت فشار بالا (HPAL) اسـت. این فرایندها نه‌تنها بسـیار انرژی‌بر هسـتند و تا صدها گیگاژول انـرژی در هر تن مصرف می‌کنند، بلکه سـرانه انتشـار گازهای گلخانه‌ای بالایی داشـته و پسـماندهای سـمی و سـرباره‌های خطرناک به جا می‌گذارند که محیط‌زیست محلی را تهدید می‌کنند.

در این زمینه، پژوهشـگران مؤسسه ماکس پلانک برای مواد پایدار (MPI-SusMat) در آلمان، روشـی نوآورانه و انقلابی برای استحصال نیکل توسعه داده‌اند. نتایج این پژوهش در سال ۲۰۲۵ در مجله معتبر Nature منتشـر شـد و توجه جهانی را بـه خـود جلب کرد. ایـن روش با نام احیا ذوبـی مبتنی بر پلاسـمای هیـدروژن یا (HPSR) شـناخته می‌شـود و تمام مراحل کلسیناسـیون، ذوب، احیا و پالایـش را در یک مرحله واحـد و درون یک کوره قوس الکتریکی انجام می‌دهد. سـنگ معدن خشک‌شـده مستقیماً وارد کوره می‌شـود و در اتمسفر آرگون-هیدروژن، تحت پلاسـمای هیدروژن با گونه‌های فعال مانند اتم‌های هیدروژن، پروتون‌ها و رادیکال‌ها در دماهای بالای ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ساختار پیچیده کانی‌ها را به گونه‌های یونی سـاده‌تر تجزیه می‌کند. این فرایند نیکل و آهن را به‌طور انتخابی احیا کرده و آلیاژ فرونیکل با عیار بالا و ناخالصی بسیار کم تولید می‌کند.

یکـی از نقـاط قوت اصلـی این فنـاوری، توانایـی پردازش سـنگ‌های کم‌عیارتر لاتریتی اسـت که بخش عمده ذخایر را تشـکیل می‌دهند، اما تاکنون به دلیل دشـواری فراوری، کمتر مـورد توجـه بوده‌انـد. در روش جدید، ذوب، احیـا و پالایش هم‌زمان رخ می‌دهد و آلیاژ فرونیکل پالایش‌شده با خلوص بالا (کمتر از ۰.۰۴ درصد سیلیسـیم، حدود ۰.۰۱ درصد فسـفر و کمتر از ۰.۰۹ درصد کلسـیم) مسـتقیماً به دست می‌آید. این خلوص بالا نیـاز به مراحل پالایش اضافـی را حذف می‌کند و آلیاژ تولیدی را برای اسـتفاده مسـتقیم در صنعت فولاد زنگ نزن مناسب می‌سـازد. با پالایش بیشتر، این محصول می‌تواند به‌عنوان ماده اولیـه برای الکترودهـای باتری‌های خودروهای الکتریکی نیز به کار رود. علاوه بر این، سرباره تولیدی در فرایند احیا ذوبی، به‌عنوان منبع ارزشمندی برای صنعت ساخت‌وساز، ازجمله تولید آجر و سیمان، قابل‌استفاده است و ازنظر اقتصادی ارزش‌افزوده ایجاد می‌کند.

نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده کاهش چشمگیر انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن در این روش تا ۸۴ درصد است، به‌ویژه هنگامی که از برق تجدیدپذیر و هیدروژن سـبز استفاده شود. همچنین ایـن روش تا ۱۸ درصد انرژی کمتـری مصرف می‌کند، زیرا از تکـرار چرخه‌های گرم کردن و سـرد کردن سـنگ معدن که در فرایندهای متداول رایج اسـت، اجتناب می‌ورزد. تست‌های مقایسـه‌ای حاکی از آن اسـت که هیدروژن مولکولی به‌تنهایی کینتیـک کندتری دارد، اما پلاسـما با ایجـاد گونه‌های فعال، پیوندهای پایدار سـیلیکاتی را به‌سـرعت می‌شـکند و واکنش را تسـریع می‌کند. ایـن رویکرد نه‌تنها برای نیـکل، بلکه برای اسـتخراج کبالت که در باتری‌ها و سیسـتم‌های ذخیره انرژی حیاتی اسـت، نیز قابل‌تعمیم است و پتانسیل تحول در زنجیره تأمین مواد معدنی حیاتی را دارد. از منظر اقتصادی، این فناوری می‌تواند وابستگی به سنگ‌های سولفیدی روبه کاهش را کم کند و استفاده از ذخایر عظیم لاتریتی را اقتصادی سازد. تحلیل‌های هزینه‌ای اولیه نشـان می‌دهد که با کاهـش قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر و سیاسـت‌های کربن‌زدایی مانند مکانیسم تنظیم مرز کربن (CBAM) در اروپا، این روش از نظر تجاری رقابتی خواهد شد. تأمین مالی این پروژه توسط گرنت پیشرفته شورای تحقیقات اروپا انجام شده که نشان‌دهنده اهمیت استراتژیک آن در سطح اتحادیه اروپاست. بااین‌حال، چالش‌های مقیاس‌پذیری همچنان وجود دارد. احیا فلزات عمدتاً در سطح فصل مشترک واکنـش رخ می‌دهد؛ بنابراین در مقیاس صنعتی باید اطمینان حاصل شـود که مذاب احیا نشـده به‌طور مداوم به این سـطح برسد. راه‌حل‌های پیشنهادی شامل استفاده از قوس‌های کوتاه با جریان‌های بالا، ادغام هم زدن الکترومغناطیسی خارجی زیر کوره یا تزریق گاز است که همگی تکنیک‌های شناخته‌شده در صنعت متالورژی هستند.

پژوهشـگران تأکید دارند که ادامـه تولید نیکل به روش‌های مرسـوم، صرفاً انتقال مشـکل از بخش حمل‌ونقل به متالورژی اسـت و راه‌حـل واقعـی نیازمند چنیـن نوآوری‌هایی اسـت. چشـم‌انداز آینده این فناوری امیدوارکننده اسـت. با گسترش مقیاس‌پذیـری و بهینه‌سـازی، صنعـت نیـکل می‌توانـد از تولیدکننده عمده آلاینده‌ها به بخشی از راه‌حل بحران آب‌وهوا تبدیل شـود. پژوهش‌های آتی باید بر ادغام کامل با هیدروژن سـبز، اقتصاد چرخشـی، بازیافت باتری‌های فرسوده و کاهش هزینه‌هـا تمرکز کننـد. علاوه بر این، کاربردهای مشـابه برای سـایر فلزات حیاتی مانند کروم یا عناصـر نادر خاکی می‌تواند زنجیره تأمین مواد معدنی را برای انتقال انرژی پایدارتر سـازد. در نهایت، چنین پیشرفت‌هایی نه‌تنها اهداف اقلیمی را حمایت می‌کنند، بلکـه امنیت تأمین مواد بـرای فناوری‌های آینده را تضمین می‌سـازند. این روش اسـتخراج نیکل سـبز، نمادی از همگرایی علم پیشرفته، مهندسی متالورژی و تعهد به پایداری اسـت. با ادامه سـرمایه‌گذاری در پژوهش‌های مشابه، آینده‌ای روشـن‌تر برای صنعت معدنی و محیط‌زیست جهانی قابل‌تصور خواهد بود.

صدرت از چگونگی کاهش هزینه فرآوری فناوری‌های نوین در معدن گزارش می‌دهد؛

پایش هوشمند؛ مسیر تازه بهره‌وری در معادن

کاهش عیار ذخایر معدنی، افزایش پیچیدگی کانسـارها و رشد هزینه‌های انرژی و آب، شـرکت‌های معدنی را به سمت اسـتفاده از فناوری‌های دقیق‌تر برای شناسایی و جدایش مواد معدنی سـوق داده است. در این میان، حسگرهای پیشرفته، تشدید مغناطیسی، فناوری‌های طیفی و هوش مصنوعی می‌توانند با تشخیص سریع‌تر عیار و ترکیب سنگ معدن، از ورود مواد کم‌ارزش به چرخه فرآوری جلوگیری کنند. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، ظرفیت افزایش بازیابی فلزات و کاهش مصـرف آب و انـرژی و تولید باطله را نیـز دارد. صدرت در این گـزارش، فناوری‌های نوین غربالگری و جدایش سـنگ معدن و نقش آن‌ها در افزایش بهره‌وری و پایداری فعالیت‌های معدنی را بررسی می‌کند.

گروه معدن
editor@smtnews.ir



فناوری‌های نوین برای شناسایی دقیق‌تر سنگ معدن

از هوش مصنوعی و تشـخیص مغناطیسی تا حسگرهای طیفی؛ فناوری‌های پیشـرفته بـه کمک معدنکاران آمده‌انـد تا عیار مواد معدنی را دقیق‌تر تشخیص دهند، هزینه‌ها را کاهش دهند و اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی را محدود کنند.

صنعـت معدن بـا واقعیتی تـازه روبه‌روسـت؛ واقعیتی که طی سال‌های گذشته به‌تدریج شـکل گرفته است: عیار ذخایر معدنی در حال کاهش است، پیچیدگی کانسارها افزایش یافته و استخراج اقتصادی آن‌ها دشوارتر شده است. هم‌زمان، رقابت برای دسترسی به منابعی مانند آب و انرژی نیز شدت گرفته است. دیوید میلجاک، مدیر برنامه پژوهشـی حسگرها و جدایش مواد معدنی در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی کشـورهای مشترک‌المنافع استرالیا (CSIRO)، می‌گوید: «بسیاری از ما می‌پرسیم چگونه می‌توان از نظر فناوری با این چالش‌ها مواجه شد؟»

میلجـاک و گـروه پژوهشـی او، در کنـار شـرکت‌های نوپـا و دانشـگاهیان، به‌دنبال یافتن پاسخ این پرسش در حوزه پرمصرف انرژیِ غربالگری و جدایش سنگ معدن هستند.

سـنگ‌ها معمولاً به‌صورت ذره‌به‌ذره و با روش‌هایی مانند انتقال پرتو ایکس (XRT) جداسـازی می‌شـوند. با ایـن حال، به گفته کارشناسـانی مانند میلجاک، فناوری‌های پیشرفته می‌توانند این فرایند را بهبود دهند؛ فناوری‌هایی که تحلیل دقیق‌تر و سـریع‌تر مـواد و جمع‌آوری داده‌های بهتر را امکان‌پذیر می‌کنند. تیم او در حال توسـعه ابزارهای حسـگری مبتنی بر فرکانس رادیویی، پرتو ایکس و فناوری‌های هسته‌ای است.

این تجهیزات برای استفاده در سامانه‌های نوار نقاله با ظرفیت بالا طراحی شـده‌اند و می‌توانند در مراحل ابتدایی فرایند معدنکاری، ترکیب سنگ‌ها را بررسی کنند.

میلجـاک توضیح می‌دهد: «برای مثـال، می‌خواهیم بدانیم چه مقدار مس در سنگ وجود دارد. اگر بتوانیم این مقدار را با دقت و سرعت کافی اندازه‌گیری کنیم، سنگ‌های مناسب را برای فرآوری هدایت می‌کنیم و سنگ‌های کم‌عیاری را که استخراج آن‌ها صرفه اقتصادی ندارد، کنـار می‌گذاریم.» به گفته او، این روش می‌تواند عیار خـوراک، اقتصاد پروژه و پایداری عملیـات معدنی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود دهد. با این رویکرد، سـنگ‌های کم‌عیار نیازی به خردایش ندارند؛ در نتیجـه، مصرف انرژی و آب در کل فرایند کاهـش می‌یابد و حجم مواد ورودی به سـدهای باطله نیز کمتر می‌شود.

فناوری غربالگری سنگ معدن

میلجاک که نزدیک به ۳۰ سـال در حوزه فناوری‌های مبتنی بـر فرکانس رادیویـی تجربه دارد، در توسـعه فناوری تشـدید مغناطیسـی (MRT) مشارکت داشته اسـت؛ فرایندی که طی بیش از ۱۵ سـال توسـعه یافت و از طریق شـرکت نکسـت‌اور (NextOre)، یکی از شرکت‌های منشعب‌شده از CSIRO در سال ۲۰۱۷، به مرحله تجاری رسید.

در ماه مارس، نکسـت‌اور از نخستین راهکار خود برای تحلیل سنگ معدن حمل‌شده با کامیون‌های زیرزمینی در معادن مس رونمایی کرد. این فناوری، نسخه‌ای توسعه‌یافته از کاربرد پیشین آن در نوارهای نقاله اسـت. فناوری MRT نوعی طیف‌سـنجی فرکانس رادیویی اسـت که می‌تواند تعداد اتم‌های یک فلز هدف را در نمونـه اندازه‌گیـری کنـد. در این روش، سـنگ معدن در معرض پالس‌های امواج رادیویی با فرکانسـی قرار می‌گیرد که با ویژگی فرکانسی ماده معدنی موردنظر مطابقت دارد.

سنگی که به این امواج پاسخ می‌دهد، میدان رادیویی کوتاهی موسـوم به «پژواک اسپینی» ایجاد می‌کند. حسگر این سیگنال را به‌صورت کمی اندازه‌گیری می‌کند. سـپس داده‌های تحلیلگر MRT به شکل اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای وزنی از فلز هدف ارائه می‌شـود. ترکیب ایـن اطلاعات با داده‌های توزیـن مواد، امکان محاسبه عیار لحظه‌ای فلز به‌صورت درصد وزنی را فراهم می‌کند.

به گفته نکسـت‌اور، این فنـاوری می‌تواند ۵۰ تن ماده معدنی را در کمتـر از یـک دقیقه تحلیـل کند و داده‌هـای لازم برای تصمیم‌گیری درباره مسـیر هدایت سـنگ معـدن را در اختیار بهره‌برداران قرار دهد. این فناوری در چندین عملیات معدنی، از جمله معدن کانسانشی شرکت فرست کوانتوم مینرالز در زامبیا، معدن کاندلاریـا متعلق به لوندین در شـیلی و معدن کوزامین شرکت کپستون در مکزیک آزمایش شده است. در یک آزمایش در معدن کوزامین، افزایش ۷.۵ درصدی تولید مس بدون نیاز به استخراج بیشتر گزارش شد.

> این فناوری در چندین عملیات معدنی، از جمله معدن کانسانشی شرکت فرست کوانتوم مینرالز در زامبیا، معدن کاندلاریا متعلق به لوندین در شیلی و معدن کوزامین شرکت کپستون در مکزیک آزمایش شده است

فناوری غربالگری سنگ معدن

میلجاک که نزدیک به ۳۰ سـال در حوزه فناوری‌های مبتنی بـر فرکانس رادیویـی تجربه دارد، در توسـعه فناوری تشـدید مغناطیسـی (MRT) مشارکت داشته اسـت؛ فرایندی که طی بیش از ۱۵ سـال توسـعه یافت و از طریق شـرکت نکسـت‌اور (NextOre)، یکی از شرکت‌های منشعب‌شده از CSIRO در سال ۲۰۱۷، به مرحله تجاری رسید.

در ماه مارس، نکسـت‌اور از نخستین راهکار خود برای تحلیل سنگ معدن حمل‌شده با کامیون‌های زیرزمینی در معادن مس رونمایی کرد. این فناوری، نسخه‌ای توسعه‌یافته از کاربرد پیشین آن در نوارهای نقاله اسـت. فناوری MRT نوعی طیف‌سـنجی فرکانس رادیویی اسـت که می‌تواند تعداد اتم‌های یک فلز هدف را در نمونـه اندازه‌گیـری کنـد. در این روش، سـنگ معدن در معرض پالس‌های امواج رادیویی با فرکانسـی قرار می‌گیرد که با ویژگی فرکانسی ماده معدنی موردنظر مطابقت دارد.

سنگی که به این امواج پاسخ می‌دهد، میدان رادیویی کوتاهی موسـوم به «پژواک اسپینی» ایجاد می‌کند. حسگر این سیگنال را به‌صورت کمی اندازه‌گیری می‌کند. سـپس داده‌های تحلیلگر MRT به شکل اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای وزنی از فلز هدف ارائه می‌شـود. ترکیب ایـن اطلاعات با داده‌های توزیـن مواد، امکان محاسبه عیار لحظه‌ای فلز به‌صورت درصد وزنی را فراهم می‌کند.

به گفته نکسـت‌اور، این فنـاوری می‌تواند ۵۰ تن ماده معدنی را در کمتـر از یـک دقیقه تحلیـل کند و داده‌هـای لازم برای تصمیم‌گیری درباره مسـیر هدایت سـنگ معـدن را در اختیار بهره‌برداران قرار دهد. این فناوری در چندین عملیات معدنی، از جمله معدن کانسانشی شرکت فرست کوانتوم مینرالز در زامبیا، معدن کاندلاریـا متعلق به لوندین در شـیلی و معدن کوزامین شرکت کپستون در مکزیک آزمایش شده است. در یک آزمایش در معدن کوزامین، افزایش ۷.۵ درصدی تولید مس بدون نیاز به استخراج بیشتر گزارش شد.

این فناوری با دسـتگاه‌های تصویربرداری تشـدید مغناطیسی مورد اسـتفاده در پزشـکی ارتباط دارد، اما برای کار در شرایط سـخت، غبارآلود و دشـوار معادن باید متناسب‌سـازی شـود. میلجـاک می‌گوید: «این فناوری‌ها دهه‌هاسـت وجود دارند، اما تـلاش ما این اسـت که اصول فیزیکی آن‌هـا را برای کاربرد در مواد معدنی تنظیم کنیم. این کار بسـیار دشوار است و مستلزم بازطراحی روش انتقال امواج رادیویی به مواد هدف است.»

▣ فناوری حسگری فراطیفی

شرکت هایپرماین (Hypermine)، یکی دیگر از شرکت‌های نوآور در این حوزه، از دل سـازمان پژوهشی فنلاندی وی‌تی‌تی (VTT) شـکل گرفته اسـت. فناوری این شرکت، روشن‌سازی لیزری، حسـگری فراطیفی و الگوریتم‌های اختصاصی یادگیری ماشین را ترکیب می‌کند تا مواد معدنی ارزشمند را در نخستین مراحل معدنکاری شناسایی و جداسازی کند.

این شـرکت در مـاه ژوئن از تکمیـل موفقیت‌آمیز دور تأمین مالـی اولیـه خود خبر داد و مدعی اسـت فنـاوری آن می‌تواند مصرف انرژی را ۱۰ درصد کاهش دهد و مصرف اسـیدها و آب در فرایند فلوتاسـیون سنگ معدن را تا ۱۵ درصد پایین بیاورد. میخائیل مخرنگین، مدیر ارشـد فناوری شـرکت، می‌گوید این فناوری تصمیم‌گیری درباره انباشـت مواد معدنی را تا ۱۰۰ برابر دقیق‌تر می‌کند. به گفته او، این سامانه هم‌اکنون آلودگی آلومینا در معادن آهن و آلودگی سـولفاتی در معادن مس را شناسـایی می‌کند و چهار سامانه آن در عملیات مشتریان در برزیل، شیلی و آفریقای جنوبی به کار گرفته شده‌اند.

مخرنگین می‌گوید: «هایپرمایِن برای هر محموله بارگیری‌شده توسـط بیل مکانیکی یا کامیون، داده‌های قابل اسـتفاده فراهم می‌کنـد. این فناوری همچنین می‌تواند با جلوگیری از هدررفت مواد ارزشـمند در باطله، کاهش ورود مواد بی‌ارزش به کارخانه و یکنواخت‌تـر کردن خوراک، سـودآوری معدن را بین ۳ تا ۱۰ درصد افزایش دهد.» شرکت آلمانی اشتاینرت (Steinert) نیز فنـاوری جدایش مبتنی بر حسـگر را برای شناسـایی لحظه‌ای ترکیب سـنگ معـدن ارائه می‌کنـد. این فنـاوری در عملیات اسـتخراج بوکسـیت ترا گوایانا در برزیل به کار گرفته شـده و آزمایش‌های موفق آن نشـان داده است که می‌توان آلاینده‌ها را با کارایی بیشتری از مواد معدنی جدا کرد.

▣ راهکارهای مکمل برای جدایش مواد معدنی

به گفته کارشناسان، این فناوری‌ها می‌توانند در کنار روش‌های مبتنی بـر پرتو ایکس بـه کار گرفته شـوند. مخرنگین توضیح می‌دهد که فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بر تحلیل عناصر برای ارائه اطلاعات مربوط به عیار سـنگ معدن متکی است، در حالی که طیف‌سـنجی لیزری و حسگری فراطیفی، فناوری‌هایی نوری هستند که اطلاعات مولکولی مواد، از جمله نوع و مقدار کانی‌ها، سنگ‌شناسی، نوع سنگ و ترکیب شیمیایی آن را ارائه می‌کنند.

او می‌گوید: «چرا کانی‌شناسی و نوع سنگ اهمیت دارند؟ زیرا فلزات در طبیعت به شـکل خالص وجود ندارند و درون کانی‌ها جای گرفته‌اند. تبدیل اطلاعات عنصری به داده‌های کانی‌شناسی دشـوار و گاهی ناممکن اسـت. در حالت ایـده‌آل، به هر دو نوع اطلاعـات نیـاز داریم.» او اضافـه می‌کند که عـلاوه بر XRF، شـناخت کانی‌شناسـی برای تعیین روش مناسب فرآوری مواد استخراج‌شده ضروری است.

یکی از نمایندگان نکسـت‌اور نیز توضیـح می‌دهد که فناوری XRT عمدتاً در جدایش ذره‌به‌ذره سـنگ‌ها اسـتفاده می‌شود، هزینه بالایی دارد و در ظرفیت‌های بیش از ۲۰۰ تن در سـاعت می‌تواند پیچیده و گران تمام شـود. در مقابل، فناوری تشـدید مغناطیسـی برای کاربردهای حجیم مناسـب‌تر است و در حال حاضـر ظرفیت‌هایی تا حدود ۶۵۰۰ تن در سـاعت را پوشـش می‌دهـد؛ ظرفیتی که به گفته این شـرکت، احتمـالاً در آینده افزایش خواهد یافت.

بهبود عملکرد کارخانه‌های فرآوری

CSIRO و میلجاک علاوه بر جدایش سنگ معدن، از فناوری‌های مشابه بـرای اندازه‌گیـری ترکیب مـواد در کارخانه‌های فلوتاسـیون و در جریان فرایند استخراج استفاده می‌کنند. میلجاک می‌گوید فناوری‌هایی که قادرند تغییـرات فازهای معدنی را در زمان واقعـی اندازه‌گیری کنند، می‌توانند به بهره‌برداران کمک کنند اختلالات فرایند فرآوری را که ممکن است عملکرد کل عملیات را مختل کنند، زودتر تشـخیص دهند و کاهش دهند. یکی از اقدامـات اصلاحی می‌تواند تغییر ترکیب خوراک ورودی باشـد تا اثر کانی نامطلوب خنثی شود.

او توضیح می‌دهد: «ممکن است یک کانی مشخص باعث اختلال در فرایند بازیابی شود. فناوری ما می‌تواند این تغییرات را بسیار سریع شناسایی کند؛ قابلیتی که طی پنج تا ۱۰ سال گذشته توسعه داده‌ایم.» به گفته میلجاک، اگر بهره‌بـرداران از انحراف‌های مهم در فرایند آگاه نباشـند، میزان بازیابی کاهش می‌یابد. شناسـایی زودهنگام این اختـلالات می‌تواند بازده تولید را افزایش دهـد. حتی افزایش چنددرصدی بازیابـی در یک معدن بزرگ، در بلندمدت ممکن اسـت هزاران تن محصول بیشـتر ایجاد کند؛ افزایشی که بسته به نوع ماده معدنی، ارزش اقتصادی قابل‌توجهی خواهد داشت.

CSIRO در حال اجرای طرح‌های آزمایشی این فناوری‌ها با چند شرکت است و به‌دنبال همکاری با شرکای معدنی بیشتر نیز هست.

▣ نوآوری در غربالگری

در مراحـل بعـدی جدایش و خردایش، شـرکت ویـر (Weir) به‌تازگی دستگاه ETX۲۵۰ را معرفی کرده است؛ تجهیزی که به گفته این شرکت، بزرگ‌ترین سـرند موزی دوطبقه جهان برای جداسازی سنگ‌های درشت و ریز محسوب می‌شود. ویر اعلام کرده است که این سرند با استفاده از تنها دو محرک ارتعاشـی می‌تواند مصرف انرژی را ۴۰ درصد کاهش دهد؛ موضوعی که هم به اهداف پایداری شرکت‌های معدنی کمک می‌کند و هم هزینه‌های فزاینده انرژی را کاهش می‌دهد.

کورنِه کلاین، مدیر جهانی محصول در گروه ویر، توضیح می‌دهد: «استفاده از دو محرک به‌جای سه محرک، نیاز مشتری به نگهداری موجودی قطعات یدکی و تعمیرات را کاهش می‌دهد. همچنین می‌توان محرک را با سـرعت بیشتری به کار انداخت و در نتیجه، بازده غربالگری ذرات ریز را بهبود داد.» این شـرکت اخیراً ۱۲ دسـتگاه از این سـرند را به یکی از عملیات معدنی شناخته‌شده در پاکستان فروخته است.

▣ ورود هوش مصنوعی به غربالگری و جدایش مواد معدنی

گام بعدی در توسـعه فناوری‌های مبتنی بـر داده، ترکیب آن‌ها با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین اسـت. اگرچه این موضوع محور اصلی فعالیت میلجاک و تیمش نیسـت، او معتقد اسـت ظرفیت زیـادی برای پیوند این فناوری‌هـا وجود دارد. میلجاک می‌گوید: «حجـم قابل‌توجهی داده در این فرایند تولید می‌شـود که می‌توان آن را با هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی ترکیب کرد تا فرایندها بر اساس داده‌های تاریخی بهبود یابند و مشکلات احتمالی پیش‌بینی شوند.»

او اضافـه می‌کند که صنعـت معدن هنوز به دریافـت داده‌های لحظه‌ای دربـاره فازهـای معدنی عادت نکرده اسـت؛ بنابراین، اسـتفاده مؤثر از این جریان داده‌ها برای بهبود بیشـتر عملیات، خود به یک حوزه پژوهشی تازه تبدیل خواهد شـد. نیکلاس استین‌کمپ، مشاور مستقل و زمین‌شناس، نیز معتقد اسـت هوش مصنوعی می‌تواند در بهبود ایـن فرایندها نقش مهمی داشـته باشـد. او می‌گویـد فناوری‌های انتقـال پرتو ایکس کـه امروزه در صنعت معدن اسـتفاده می‌شوند، برای هر ذره محاسبات بسیار زیادی انجام می‌دهند، اما داده‌های حاصل معمولاً دور ریخته می‌شوند و در فرایند تولید بـه کار نمی‌روند. بـه گفته او، پردازش این داده‌هـا در فضای ابری می‌تواند شـناخت بسـیار دقیق‌تری از روند تولید فراهم کند. این اطلاعات می‌توانند به کارخانه فرآوری نشـان دهند چه نوع ماده‌ای در راه اسـت و بر اسـاس آن، مـواد شـیمیایی موردنیاز برای هر چرخه فرآوری تنظیم شـوند. با این حال، استین‌کمپ تأکید می‌کند که بسیاری از این کاربردها هنوز در مرحله مفهومی یا آزمایشی قرار دارند.

▣ چشم‌انداز آینده

اسـتین‌کمپ می‌گوید محرک اصلـی پذیرش این فناوری‌هـا در نهایت، کاهش حجم سـنگ معدن موردنیاز برای تولید محصول با عیار بالاتر است؛ هدفـی کـه با کاهش مصرف آب، برق و مواد شـیمیایی مورد اسـتفاده در لیچینگ و همچنین کاهش حجم باطله همراه خواهد بود. رندی اسمال‌وود، رئیس و مدیرعامل شرکت ویتون پریشس متالز (Wheaton Precious Metals)، که از نوآوری در صنعت معدن حمایت می‌کند، نیز این عوامل را محرک‌های مهم پذیرش فناوری می‌داند.

چالش آینده معدنکاری این شرکت، یک میلیون دلار کانادا معادل حدود ۱.۳۷ میلیون دلار کانادا به پروژه فناوری‌های آسیاب‌کاری شرکت ری‌تینک میلینـگ (ReThink Milling) اختصـاص داد. بـرآورد می‌شـود ایـن فناوری‌ها مصرف انرژی در خردایش و آسـیاب‌کاری را بیش از نصف کاهش دهند. با این حال، همان‌طور که اسـتین‌کمپ اشاره می‌کند، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشـرفته برای شـرکت‌های بزرگ معدنی همیشـه اولویت اصلی نیسـت؛ زیرا حاشیه سود بسـیاری از آن‌ها هنوز به اندازه‌ای است که الزام فوری برای خرید تجهیزات گران‌قیمت ایجاد نمی‌کند. در شـرکت‌های کوچک و متوسط نیز هزینه بالا اغلب مانع پذیرش این فناوری‌ها می‌شود.

بـه گفته او، برخی صنایع مانند صنعت الماس به اسـتفاده از فناوری‌های مختلف عادت بیشـتری دارند و احتمالاً با اطمینان بیشتری آن‌ها را به کار خواهند گرفت. اسـتین‌کمپ می‌گوید: «در نهایت، باید کسـی حاضر باشد در این مسـیر مشـارکت کند و داده‌های خود را در اختیـار بازار قرار دهد. همین موضوع می‌تواند شرکت‌های بزرگ‌تر را نیز به استفاده از فناوری‌های جدید ترغیب کنـد.» میلجاک نیز می‌پذیرد که صنعت معدن در پذیرش و آزمایش فناوری‌های تازه با نوعی اینرسی و کندی مواجه است؛ با این حال، تیم‌ها و افراد نوآوری در این صنعت حضور دارند که برای ایجاد تغییر تلاش می‌کنند. او در پایان می‌گوید: «اگر بتوانیم مجموعه‌ای از فناوری‌ها و نوآوران را وارد صنعـت معـدن کنیم، این ابزارها می‌تواننـد اهرمی مهم برای آینده باشند. چشـم‌انداز بلندمدت CSIRO این است که معدنکاری به فرایندی شبیه تولید صنعتی تبدیل شود؛ جایی که داده‌های لحظه‌ای به حفظ ایمنی کارکنان و افزایش بهره‌وری کمک کنند.»

سخن پایانی

آینده رقابت در صنعت معدن تنها به دسترسـی به ذخایر غنی‌تر وابسـته نیسـت؛ توانایی شناسـایی دقیق مواد معدنی، جداسازی هدفمند سنگ‌های کم‌ارزش و اسـتفاده مؤثر از داده‌های عملیاتی نیـز به عاملی تعیین‌کننده تبدیل شـده اسـت. فناوری‌هایی مانند تشدید مغناطیسی، حسگرهای فراطیفی و هوش مصنوعی می‌توانند با افزایش دقت تصمیم‌گیری در مراحل اولیه اسـتخراج و فرآوری، زمینه کاهش هزینه‌ها و مصـرف منابع را فراهم کنند. با این حال، تجاری‌سـازی این راهکارها به سـرمایه‌گذاری، آزمون در شـرایط واقعی معدن، دسترسـی بـه داده‌های معتبر و پذیـرش فناوری از سـوی بهره‌برداران نیاز دارد. هزینه بالای تجهیزات و کندی تغییر در فرایندهای سـنتی نیز همچنان از موانع گسـترش آن‌هاسـت. در نهایـت، موفقیت فناوری‌های نویـن زمانی معنا پیدا می‌کند که دسـتاوردهای آن‌ها از مرحله آزمایش فراتـر رود و به بهبود پایدار بازیابی فلزات، کاهـش مصرف آب و انرژی و مدیریت بهتر باطله‌ها منجر شـود؛ مسـیری که می‌تواند بهره‌وری را به یکی از مزیت‌های اصلی معدنکاری آینده تبدیل کند.