

ورق‌های الکتریکی فصل تازه توسعه فولاد

ورق الکتریکی غیرجهت‌دار دیگر تنها یک کالای واسطه‌ای نیست؛ این محصول در قلب موتورهای برقی، کاهش تلفات انرژی، امنیت تامین صنعتی و رقابت‌پذیری صادراتی قرار دارد. وابستگی به واردات، هم ارز می‌بلعد و هم صنعت را در برابر تحریم و اختلال زنجیره تامین آسیب‌پذیر می‌کند. تولید داخلی ورق‌های الکتریکی غیرجهت‌دار NGO می‌تواند همزمان بهره‌وری، تاب‌آوری، اشتغال و مزیت منطقه‌ای ایران را جدی تقویت کند.

در اکوسیستم صنعتی امروز جهان، ورق‌های الکتریکی نه صرفاً به عنوان یک کالای واسطه‌ای، بلکه به مثابه ستون فقرات بهره‌وری انرژی شناخته می‌شوند. در این بین ورق‌های الکتریکی غیرجهت‌دار (NGO) به عنوان حیاتی‌ترین ماده اولیه در ساخت موتورهای الکتریکی و تجهیزات دوار، نقش محوری در کاهش تلفات انرژی ایفا می‌کنند.

تحلیل داده‌های گرم‌کری مبنی بر اختصاص ۶۰ درصدی سبد واردات ورق‌های الکتریکی به این نوع خاص، گویای یک نیاز انباشته و حیاتی در صنعت است؛ نیازی که ریشه در تغییر پارادایم تجهیزات دوار، به‌ویژه ظهور خودروهای برقی و بهینه‌سازی موتورهای الکتریکی دارد.

ضرورت گذار به تولید: از تامین تا تکنولوژی

نگاهی به روند دهه اخیر، رشد مستمر تقاضا برای الکتروموتورها را تأیید می‌کند. الکتروموتورها قلب تپنده صنایع گوناگون از جمله سیمان، پتروشیمی، فولاد، خودروسازی، معادن، تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، صنایع غذایی، نساجی و ساختمان‌سازی هستند. هر پمپ، کمپرسور، فن، دمنده، نوار نقاله، آسانسور، جرثقیل و ابزار برقی صنعتی به یک یا چند الکتروموتور وابسته است. تولید سالانه ۱۰ هزار دستگاه الکتروموتور در کشور اگرچه گامی رو به جلوست اما همچنان با نیاز کشور و ظرفیت‌های بهینه فاصله دارد. این در شرایطی است که زنجیره تأمین جهانی به سمت تولید ورق‌های با اتلاف انرژی کمتر حرکت می‌کند تداوم واردات NGOها، خروج ارز را بر اقتصاد ملی تحمیل می‌کند.

در این بین، برای دستیابی به تراز مثبت تجاری، استراتژی نوسازی، بازسازی و توسعه در مجموعه‌های فولادی کشور نباید صرفاً بر توسعه کُتی متمرکز باشد. الگوبرداری از غول‌های فولادی جهان همچون «پوسکو» (POSCO) و «آرسلور میتال» (ArcelorMittal)، نه به عنوان یک انتخاب، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای انطباق با استانداردهای تکنولوژیک قرن ۲۱ است. تولید داخلی این ورق‌ها به معنای کاهش سالانه تلفات برق در شبکه کشور است که معادل کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری برای احداث نیروگاه‌های جدید و صرفه‌جویی در سوخت‌های فسیلی می‌باشد.

ورق‌های استراتژیک؛ اهرمی برای مهار خروج ارز

تولید داخلی این ورق‌ها، زنجیره‌ای از فرصت‌های اقتصادی را به همراه دارد:

کاهش ارزبری و تقویت موازنه تجاری؛ با تولید بومی، علاوه بر جلوگیری از خروج ارز برای واردات ورق خام، می‌توان از واردات سالانه حدود ۵۰ هزار تجهیزات الکتریکی (موتور و ژنراتور) که عمدتاً وابسته به همین ورق‌ها هستند، جلوگیری کرد. این یعنی با یک اقدام درست و هوشمندانه می‌توانیم شاهد جلوگیری از خروج ارز به میزان قابل توجهی باشیم؛ آن هم در شرایطی که کشور در زمینه ارزی با محدودیت‌های جدی روبرو است.

مزیت رقابتی در بازار جهانی؛ ورق‌های الکتریکی در زمره کالاهای «بُنا تکنولوژی بالا» (High-Tech) محسوب می‌شوند. به دلیل انحصار تولید این ورق‌ها در تعداد محدودی از کشورهای جهان، بومی‌سازی این محصول، جمهوری اسلامی ایران را به بازیگری تأثیرگذار در زنجیره تأمین منطقه‌ای تبدیل خواهد کرد و بستری پایدار برای ارزآوری از طریق صادرات فراهم می‌آورد. همچنین با توجه به مزیت کشور یعنی قرار گرفتن در مجاورت ابراهامی بین‌المللی و مسیر ترانزیت غرب آسیا، هزینه‌های حمل‌ونقل از ایران به سایر کشورها نیز به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

مزایای زیست‌محیطی و کاهش انتشارد اکسیدکربن

هر یک درصد بهبود راندمان موتورهای الکتریکی در سطح ملی، انتشار دی‌اکسید کربن را به میزان قابل توجهی در سال کاهش می‌دهد. با جایگزینی موتورهای بازده پایین با موتورهای ساخته‌شده از ورق‌های مرغوب، ایران می‌تواند به تعهدات زیست‌محیطی خود نزدیک‌تر شود و اقدامی درخور را برای کاهش آلاینده‌ها انجام دهد؛ چرا که به خاطر نبودن دسترسی به فناوری‌های سبز خارجی، این امکان یک مزیت دوچندان محسوب می‌شود.

برابر تحریم‌ها امنیت ملی و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تحریم‌ها

تولید ورق‌های الکتریکی NGO در کشور، وابستگی به واردات از چند کشور محدود (چین، ترکیه، روسیه، اتریش، آلمان) را قطع می‌کند. تجربه سال‌های تحریم نشان داده است که هر گونه فشار بر خطوط حمل‌ونقل یا مسدود شدن منابع ارزی، زنجیره تامین تجهیزات دوار حیاتی صنایع آب، برق، نفت، گاز و پتروشیمی را با بحران مواجه می‌کند. خودکفایی در این حوزه، خط دفاعی مستحکمی در برابر جنگ اقتصادی و تهدیدات ژئوپلیتیک خواهد بود. تولید ورق‌های NGO بیش از آنکه یک پروژه صنعتی ساده باشد یک تصمیم زیرساختی در مدیریت انرژی است. اگر به دنبال توسعه پایدار و گذار به حمل‌ونقل پاک نظیر خودروهای سواری برقی یا سایر وسایل نقلیه عمومی هستیم، نمی‌توانیم در بند زنجیر تأمین از طریق واردات باقی بمانیم.

با توجه به شرایط ژئوپلیتیک، صنعت کشور امروز در نقطه عطفی قرار دارد که سرمایه‌گذاری بر تولید ورق‌های کیفی و استراتژیک، می‌تواند پیوند میان امنیت تأمین، رونق تولید و اشتغال و مزیت صادراتی را برای صنعت ایران محکم‌تر کند.

صنعت در از ظرفیت تازه بازیافت باتری‌های لیتیوم‌یون گزارش می‌دهد؛

معدنی در دست مردم



کبالت سال‌ها یکی از مواد اولیه مهم زنجیره صنایع پیشرفته بوده است؛ اما رشد خودروهای برقی، تجهیزات الکترونیکی و فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، اهمیت این فلز را بیش از گذشته افزایش داده است. در عین حال، تمرکز بخش بزرگی از تولید معدنی کبالت در چند کشور و نوسان‌های شدید قیمت، تولیدکنندگان را با ریسک تامین مواد اولیه مواجه کرده است. همین شرایط باعث شده نگاه به باتری‌های پایان‌عمر تغییر کند و آنچه پیش‌تر پسماند محسوب می‌شد، به‌عنوان یک منبع ثانویه برای تامین فلزات حیاتی مورد توجه قرار گیرد.

بازیافت باتری‌های لیتیوم‌یون، به‌ویژه با تولید ماده‌ای موسوم به «بلک‌مس»، امکان بازگرداندن کبالت، نیکل، لیتیوم و دیگر مواد ارزشمند به چرخه تولید را فراهم می‌کند. این روند مفهومی تازه در صنعت معدن ایجاد کرده است که از آن با عنوان «معدنکاری شهری» یاد می‌شود؛ مسیری که در آن بخشی از منابع مورد نیاز صنایع از محصولات مصرف‌شده و پسماندهای الکترونیکی استخراج می‌شود، نه از معادن سنتی.

صنعت در این گزارش، ظرفیت معدنکاری شهری برای تامین دوباره کبالت را بررسی می‌کند؛ بازاری که اگرچه هنوز با چالش‌هایی مانند جمع‌آوری باتری، هزینه‌های لجستیک، ایمنی و اقتصادی بودن فرآوری روبه‌رو است، اما می‌تواند در کنار معدنکاری سنتی به یکی از حلقه‌های مهم زنجیره تامین مواد معدنی حیاتی تبدیل شود.

معدنکاری شهری؛ بازیافت باتری و منبع تازه کبالت

باتری، حاوی لیتیوم، نیکل، منگنز و کبالت موجود در کاتد و همچنین گرافیت، آلومینیوم، مس و آهن است. جداسازی این عناصر می‌تواند به ایجاد یک منبع داخلی برای مواد معدنی حیاتی کمک کند و وابستگی به واردات را کاهش دهد.

وابستگی جهانی و نوسان بازار کبالت

بازار کبالت با یک ریسک مهم روبه‌رو است: تمرکز بالای تولید معدنی در جمهوری دموکراتیک کنگو. حدود ۷۰ درصد کبالت استخراج‌شده جهان از این کشور تأمین می‌شود؛ موضوعی که تولیدکنندگان باتری را در معرض ریسک‌های سیاسی، سیاست‌های صادراتی، مسائل کارگری و نگرانی‌های اخلاقی قرار می‌دهد.

این تمرکز بالا در گذشته نیز خود را در قیمت کبالت نشان داده است. رشد خودروهای برقی باعث شد قیمت این فلز در سال ۲۰۱۶ جهش کند، اما در سال ۲۰۱۸ سقوط کرد. موج صعودی بعدی در مارس ۲۰۲۲ به اوج رسید و سپس قیمت کبالت تا ژانویه

تقاضای جهانی برای کبالت در حال افزایش است و همزمان، توجه به بازیافت باتری‌های لیتیوم‌یون پایان‌عمر، این فلز را از یک ماده اولیه صرفاً معدنی به بخشی از اقتصاد چرخشی تبدیل کرده است. باتری‌هایی که زمانی خوراک صنایع الکترونیک و خودروهای برقی بوده‌اند، پس از پایان عمر می‌توانند به منبعی برای تامین دوباره کبالت و دیگر مواد معدنی حیاتی تبدیل شوند.

تقاضا برای کبالت در سال ۲۰۲۴ برای نخستین بار از ۲۰۰ هزار تن عبور کرد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ با نرخ رشد مرکب سالانه ۷ درصد افزایش یابد. رشد تولید خودروهای برقی و تجهیزات الکترونیکی قابل‌حمل مهم‌ترین عامل افزایش تقاضاست. در چنین شرایطی، شکاف میان عرضه و تقاضا تولیدکنندگان را به سمت منابع جدید مواد اولیه سوق داده و باتری‌های فرسوده نیز به‌عنوان یک خوراک ثانویه اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند.

سلول‌های باتری را می‌توان خرد و آسیاب کرد تا ماده‌ای موسوم به «بلک‌مس» به دست آید. این ماده بسته به ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی باتری‌ها تعیین کننده است

باتری‌های پایان‌عمر ابتدا بر اساس ترکیب شیمیایی دسته‌بندی می‌شوند تا از آلودگی متقابل جلوگیری شود. سپس بسته‌های باتری باز شده و به ماژول و در نهایت سلول تفکیک می‌شوند. سلول‌ها پس از پایدارسازی خرد می‌شوند و محصولی به نام بلک‌مس به دست می‌آید.

مرحله بعد، جداسازی فلزات است. هیدرومتالورژی معمولاً برای فرآوری بلک‌مس گزینه مطلوب‌تری محسوب می‌شود، زیرا امکان بازیابی فلزاتی مانند کبالت، نیکل، منگنز و لیتیوم را با گرینش‌پذیری و خلوص بالاتر فراهم می‌کند.

در مقابل، پیرومتالورژی با استفاده از دماهای بالا انجام می‌شود و در آن کبالت و نیکل با گرینش‌پذیری کمتری بازیابی می‌شوند. بخشی از لیتیوم و منگنز نیز ممکن است وارد سرباره شود و برای دستیابی به مواد با گرید مناسب باتری، فرآوری و پالایش بیشتری لازم باشد.

شرکت بریتانیایی Altium از هیدرومتالورژی برای استخراج مواد معدنی حیاتی از باتری‌های خردشده استفاده می‌کند. این فرآیند با لیچینگ اسیدی آغاز می‌شود و سپس ناخالصی‌ها به‌صورت مرحله‌ای حذف می‌شوند. مس، آهن، آلومینیوم، فلورایدکا و فسفات‌ها در این مراحل جدا شده و مواد اصلی با روش‌هایی مانند استخراج حلالی پالایش می‌شوند. در ادامه، جریان‌های جداگانه منگنز، کبالت و نیکل تولید می‌شود و لیتیوم نیز در مرحله پایانی به شکل کربنات لیتیوم بازیابی می‌شود.

اقتصاد جمع‌آوری؛ حلقه ضعیف زنجیره

باشند. این حداقل‌ها از سال ۲۰۲۶ به ۲۶ درصد برای کبالت، ۱۲ درصد برای لیتیوم و ۱۵ درصد برای نیکل افزایش می‌یابد.

چین نیز در سال ۲۰۲۶ مقررات جدیدی برای مدیریت باتری‌های خودروهای پایان‌عمر وضع کرد. بر اساس این مقررات، خودروهای پایان‌عمر باید همراه با باتری خود از رده خارج شوند. همچنین یک سامانه ملی ردیابی دیجیتال، مسیر باتری را از تولید تا مرحله جداسازی دنبال می‌کند و مسئولیت تولیدکنندگان در مدیریت پسماند افزایش یافته است. در آمریکا اما شرایط متفاوت است. این کشور یک نظام فرآگیر مشابه EPR ندارد و بیشتر بر مقررات ایالتی تکیه می‌کند. اعتبار مالیاتی خودروهای پاک نیز که پیش‌تر تولیدکنندگان را به استفاده از مواد معدنی حیاتی استخراج‌شده، فرآوری‌شده یا بازیافت‌شده در آمریکای شمالی و کشورهای دارای توافق تجارت آزاد تشویق می‌کرد، برای خودروهای خریداری‌شده پس از ۳۰ سپتامبر ۲۰۲۵ لغو شده است.

آینده کبالت: معدن در کنار بازیافت

با وجود ظرفیت بالای بازیافت، اقتصاد این صنعت به تغییر ترکیب شیمیایی باتری‌ها نیز حساس است. برای نمونه، باتری‌های LFP فاقد نیکل و کبالت هستند و رشد سهم آنها می‌تواند ارزش اقتصادی بازیافت

هزینه بالای جمع‌آوری تنها به باتری خودروهای برقی محدود نیست. تجهیزات الکترونیکی مصرفی نیز منبع مهمی از کبالت هستند، اما وزن پایین این باتری‌ها باعث می‌شود جمع‌آوری آنها از نظر اقتصادی دشوارتر باشد. بسته باتری خودروهای برقی معمولاً ۳۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم وزن دارد، در حالی که باتری یک ساعت هوشمند ممکن است تنها حدود ۲ گرم وزن داشته باشد و باتری لپ‌تاپ نیز معمولاً کمتر از ۶۰۰ گرم است. بنابراین، در نبود شبکه‌های گسترده و حمایت مالی، هزینه جمع‌آوری و فرآوری باتری‌های کوچک می‌تواند از ارزش مواد بازیابی‌شده بیشتر شود. با این حال، باتری‌های تلفن همراه و لپ‌تاپ از نظر محتوای کبالت جذاب‌اند. حجم بالای این تجهیزات در زندگی روزمره به این معناست که بخش قابل‌توجهی از کبالت در پایان عمر این محصولات، در خانه‌ها و مراکز پسماند باقی می‌ماند.

بر اساس گزارش Global E-waste Monitor سازمان ملل، در سال ۲۰۲۲ حدود ۲۲.۳ درصد از ۶۶ میلیون تن پسماند الکترونیکی تولیدشده در جهان به‌طور رسمی جمع‌آوری و بازیافت شد. این حجم معادل حدود ۳۴ هزار تن کبالت برآورد شده است.

سیاست‌گذاری: موتور توسعه بازیافت

توسعه صنعت بازیافت باتری تنها به فناوری وابسته نیست و سیاست‌های دولتی و مشوق‌های اقتصادی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. اتحادیه اروپا در این زمینه سیاست‌های گسترده‌ای را اجرا کرده است. نظام «مسئولیت توسعه‌یافته‌تولیدکننده» یا EPR، تولیدکنندگان و واردکنندگان باتری را در قبال مدیریت پسماند مسئول می‌کند.

مقررات بازنگری‌شده باتری اتحادیه اروپا که در سال ۲۰۲۳ معرفی شد نیز حداقل میزان استفاده از مواد بازیافتی را افزایش می‌دهد. از اوت ۲۰۳۱، باتری‌های جدید خودروهای برقی، باتری‌های صنعتی و باتری‌های استارت‌ر فروخته‌شده در اتحادیه اروپا باید حداقل حاوی ۱۶ درصد کبالت بازیافتی، ۶ درصد لیتیوم بازیافتی و ۶ درصد نیکل بازیافتی

۲۵ حدود ۷۰ درصد کاهش یافت.

از این منظر، بازیافت باتری تنها یک فعالیت زیست‌محیطی نیست، بلکه می‌تواند بخشی از راهکار تامین مواد اولیه و حتی امنیت اقتصادی و صنعتی کشورها باشد. پژوهش‌های آزمایشگاه ملی آرگون در قالب مدل AMUSE نیز نشان داده‌اند که در فرآیندهای مناسب، نرخ بازیابی کبالت می‌تواند از ۹۹ درصد فراتر رود. داده‌های GlobalData بر پایه اطلاعات آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد عرضه ثانویه و استفاده مجدد از کبالت در سال ۲۰۲۴ حدود ۲۶ هزار تن بوده است. این میزان در سناریوی سیاست‌های اعلام‌شده آژانس بین‌المللی انرژی می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ به ۳۹ هزار تن و تا سال ۲۰۴۰ به ۸۲ هزار تن برسد. در همین سناریو، تقاضای کل کبالت از ۲۲۱ هزار تن در سال ۲۰۲۴ به ۳۱۴ هزار تن در سال ۲۰۳۰ و ۳۳۰ هزار تن در سال ۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت. بنابراین، مسئله اصلی تنها وجود منبع کبالت نیست؛ بلکه قابلیت توسعه بازیافت در مقیاس صنعتی اهمیت دارد.

چالش اصلی: جمع‌آوری باتری‌ها

با وجود پیشرفت فناوری، بزرگ‌ترین مانع توسعه بازیافت کبالت در مرحله‌ای پیش از فرآوری قرار دارد: جمع‌آوری باتری‌ها.

باتری‌ها از مصرف‌کنندگان، اپراتورهای ناوگان و تولیدکنندگان خودرو و تجهیزات جمع‌آوری می‌شوند، اما شبکه‌های موجود همچنان پراکنده و محدود هستند. حجم جهانی باتری‌های لیتیوم‌یون پایان‌عمر در سال ۲۰۲۵ حدود ۹۰۰ هزار تن برآورد شده، در حالی که نرخ بازیافت کمتر از ۱۰ درصد باقی مانده است.

هزینه‌های لجستیک، کمبود زیرساخت، مسائل ایمنی و فاصله زمانی میان رشد استفاده از خودروهای برقی و رسیدن باتری‌ها به پایان عمر، از عوامل اصلی این وضعیت هستند.

یکی از مهم‌ترین مشکلات، خطر «فرار حرارتی» در باتری‌های آسیب‌دیده با معیوب است. این باتری‌ها در گروه کالاهای خطرناک قرار می‌گیرند و حمل‌ونقل آنها نیازمند تجهیزات و استانداردهای ویژه است. باتری‌هایی که وضعیت آنها مشخص نیست نیز باید با فرض وجود شارژ بالا جابه‌جا شوند.

باتری‌های آسیب‌دیده را نمی‌توان مانند سلول‌های سالم مستقیماً وارد خط خردایش کرد. شارژ باقی‌مانده، آسیب پوسته و ناپایداری شیمیایی می‌تواند خطر آتش‌سوزی مجدد یا انفجار را هنگام خردایش افزایش دهد. از این رو، این باتری‌ها نیازمند جداسازی، نگهداری و فرآوری ویژه هستند.

برخی باتری‌ها را کاهش دهد. به همین دلیل، فعالان صنعت معتقدند حمایت دولتی باید متناسب با ترکیب باتری‌ها، قیمت مواد معدنی و هزینه‌های جمع‌آوری تنظیم شود.

فناوری بازیابی کبالت از بلک‌مس در حال حاضر آمادگی ورود به مقیاس تجاری را دارد و سرمایه‌گذاری نیز در این حوزه ادامه دارد. با این حال، توسعه زیرساخت جمع‌آوری و ایجاد مدل اقتصادی پایدار همچنان شرط اصلی رشد این صنعت است.

بازیافت نمی‌تواند به‌تنهایی جایگزین معدنکاری سنتی شود، زیرا رشد تقاضای کبالت همچنان از ظرفیت عرضه ثانویه بیشتر است. با این حال، هر تن کبالت بازیابی‌شده می‌تواند معادل تن یک استخراج معدنی باشد که از استخراج آن جلوگیری شده یا دست‌کم برای مدتی به تعویق افتاده است.

از این منظر، «معدنکاری شهری» را می‌توان حلقه مکمل معدنکاری سنتی دانست؛ حلقه‌ای که با بازگرداندن فلزات موجود در باتری‌ها و تجهیزات الکترونیکی به چرخه تولید، هم فشار بر منابع معدنی را کاهش می‌دهد و هم به کشورها امکان می‌دهد بخشی از مواد اولیه راهبردی مورد نیاز صنایع خود را از منابع داخلی تأمین کنند.

سخن پایانی

شهری» به فناوری فرآوری محدود نمی‌شود. ایجاد شبکه منسجم جمع‌آوری، تامین زیرساخت‌های ایمن، کاهش هزینه‌های لجستیک و طراحی مشوق‌های اقتصادی، حلقه‌هایی هستند که موفقیت این صنعت را تعیین می‌کنند. آینده تامین کبالت احتمالاً نه در رقابت میان معدنکاری سنتی و بازیافت، بلکه در ترکیب این دو مسیر شکل خواهد گرفت؛ جایی که معدن و منابع ثانویه در کنار یکدیگر، امنیت و پایداری بیشتری برای زنجیره مواد اولیه صنایع فراهم می‌کنند.