

## ضعف تقاضا

## بر ای محصولات سبز

جهان برای هم‌راستا شدن با هدف محدودسازی گرمایش جهانی به ۱.۵ درجه سلسیوس، به موجی از پروژه‌های صنعتی کم‌انتشار نیاز دارد؛ پروژه‌هایی که بتوانند در صنایع سنگین، از فولاد و سیمان گرفته تا مواد شیمیایی و حمل‌ونقل، جایگزین فناوری‌های پرکربن شوند. با این‌ حال، داده‌های تازه شتاب‌دهنده‌گذار صنعتی (ITA) نشان می‌دهد سرعت شکل‌گیری و پیشرفت این پروژه‌ها کاهش یافته است. ابتکاری که با حمایت کنفرانس تغییرات اقلیمی سازمان ملل متحد و با راهبری Mission Possible Partnership شکل گرفت، قرار بود پروژه‌های صنعتی را از مرحله برنامه‌ریزی به تصمیم نهایی سرمایه‌گذاری برساند؛ اما ضعف تقاضا برای محصولات سبز و هزینه بالای هیدروژن کم‌انتشار، بسیاری از طرح‌ها را با چالش مواجه کرده است.

شتاب‌دهنده‌گذار صنعتی یا ITA در جریان کنفرانس تغییرات اقلیمی سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۳ و با حمایت این کنفرانس، بنیاد بلومبرگ و برنامه تغییر اقلیم سازمان ملل متحد راه‌اندازی شد. هدف اصلی این ابتکار، مقابله با یکی از دشواری‌ترین بخش‌های کربن‌زایی اقتصاد جهانی است؛ صنایعی که به دلیل مصرف بالای انرژی، وابستگی به زغال‌سنگ، گاز طبیعی و کک و همچنین طولانی بودن عمر تجهیزات، تغییر فناوری در آنها بسیار پرهزینه است.

ITA تلاش می‌کند با حمایت از پروژه‌های منتخب و بهبود شرایط سیاست‌گذاری و بازار، ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهد و زمان رسیدن طرح‌ها به تصمیم نهایی سرمایه‌گذاری یا FID را کوتاه کند. این شتاب‌دهنده تحت مدیریت Mission Possible Partnership، سازمان غیردولتی و بین‌المللی فعال در حوزه کربن‌زایی صنایع انرژی، فعالیت می‌کند.

با این حال، آخرین به‌روزرسانی ردیاب جهانی پروژه‌ها که توسط MPP در اواخر سال ۲۰۲۵ منتشر شد، از کاهش سرعت اعلام پروژه‌های جدید و پیشرفت طرح‌های موجود به سمت FID حکایت دارد. این روند در شرایطی نگران‌کننده است که پروژه‌های صنعتی بزرگ معمولاً برای توسعه و بهره‌برداری به پنج تا ۱۲ سال زمان نیاز دارند و هرگونه تأخیر در تصمیم‌های اولیه می‌تواند زمان‌بندی کربن‌زایی تا سال ۲۰۵۰ را با مشکل مواجه کند.

یکی از مهم‌ترین موانع پیش‌روی پروژه‌های کم‌انتشار، ضعف تقاضای بازار است. بسیاری از طرح‌های اولیه فولاد سبز بر این فرض شکل گرفتند که بازارهای اروپا، آمریکای شمالی و بخش‌هایی از آسیا به‌سرعت برای فولاد کم‌کربن آماده خواهند شد و خریداران بزرگ حاضرند برای محصولات، آنها هیدروژن سبز یا فناوری‌های کم‌انتشار تولید می‌شوند، قیمت بیشتری بپردازند.

قراردادهای بلندمدت خرید نیز قرار بود به کاهش ریسک مالی پروژه‌ها کمک کنند. با این حال، در عمل تقاضا هنوز به حجم و اطمینان مورد انتظار نرسیده است. بسیاری از خریداران همچنان در مرحله آزمایشی یا تعهدات داوطلبانه قرار دارند و نبود الزامات قانونی یا مشوق‌های مالی کافی، آنها را از انعقاد قراردادهای بزرگ و بلندمدت بازداشته است.

در چنین شرایطی، تولیدکننده‌ای که برای احداث یک واحد فولاد سبز میلیارد‌ها دلار سرمایه‌گذاری می‌کند، با این پرسش مواجه است که آیا بازار حاضر است هزینه بالاتر تولید کم‌کربن را پرداخت کند یا خیر. همین ابهام، یکی از عوامل اصلی فاصله میان اعلام پروژه و رسیدن آن به مرحله سرمایه‌گذاری نهایی است.

عامل مهم دیگر، اقتصاد هیدروژن کم‌انتشار است. بخش قابل‌توجهی از پروژه‌های احیای مستقیم آهن که در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ معرفی شدند، بر این اساس طراحی شده بودند که تولید را ابتدا با گاز طبیعی آغاز کنند و در ادامه به سمت هیدروژن سبز یا کم‌کربن حرکت کنند.

اما کاهش هزینه تولید هیدروژن سبز با سرعت پیش‌بینی‌شده اتفاق نیفتاده است. از سوی دیگر، عرضه پایدار و ارزان هیدروژن در مقیاس صنعتی هنوز در بسیاری از مناطق جهان شکل نگرفته است. در نتیجه، هزینه تولید فولاد مبتنی بر هیدروژن همچنان با فناوری‌های متعارف فاصله دارد و بخشی از مدل‌های اقتصادی پروژه‌های جدید نیازمند بازنگری شده‌اند.

ترکیب ضعف تقاضا و هزینه بالای هیدروژن باعث شده برخی پروژه‌ها متوقف یا به حالت تعلیق در آیند و برخی دیگر نیز برای رسیدن به مرحله سرمایه‌گذاری نهایی، به طراحی مجدد یا حمایت‌های دولتی بیشتری نیاز داشته باشند.

در میان کشورهای مختلف، برزیل از موقعیت مناسبی برای توسعه آهن و فولاد کم‌انتشار برخوردار است. ذخایر بزرگ و باکیفیت سنگ‌آهن، ظرفیت بالای انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه خورشیدی و بادی و شبکه برقی که بیش از ۸۰ درصد آن از منابع کم‌انتشار، به‌ویژه برقی‌آبی، تأمین می‌شود، مزیت‌های مهم این کشور به شمار می‌روند.

این شرایط می‌تواند زمینه مناسبی برای تولید هیدروژن سبز از طریق الکترولیز و استفاده از آن در واحدهای احیای مستقیم فراهم کند. از سوی دیگر، قیمت نسبتاً بالای گاز طبیعی در بازار داخلی برزیل می‌تواند باعث شود نقطه سر‌به‌سر اقتصادی میان گاز طبیعی و هیدروژن سبز، زودتر از مناطقی مانند خاورمیانه یا آمریکای شمالی محقق شود. با وجود این مزیت‌ها، برزیل با چالش‌هایی نیز روبه‌رو است. بسیاری از فولادسازان سنتی این کشور همچنان از کوره‌های بلند با عمر مفید قابل‌توجه استفاده می‌کنند و به دلیل استهلاك پایین این تجهیزات و دوره طولانی بازگشت سرمایه، انگیزه محدودی برای جایگزینی سریع آنها دارند. پروژه‌های جدید احیای مستقیم و تولید آهن بریکت‌شده گرم یا HBI نیز هنوز با سرعت کافی توسعه نیافته‌اند.

دولت برزیل نیز حمایت قابل‌توجهی از گذار سبز نشان داده و وزارت توسعه، صنعت، تجارت و خدمات همکاری نزدیکی با برنامه ITA برقرار کرده است. با این حال، تجربه برزیل و سایر بازارها نشان می‌دهد فناوری به‌تنهایی نمی‌تواند مسئله را حل کند.

قیمت‌گذاری قابل پیش‌بینی کربن، سازوکارهای مرزی برای جلوگیری از نشت کربن، استانداردهای اجباری عملکرد کربنی، مشوق‌های خرید سبز و الزام به شفافیت ردیابی کربن می‌توانند بازار محصولات کم‌انتشار را تقویت کنند. در واقع، بزرگ‌ترین مانع امروز کربن‌زایی صنعت، نبود فناوری نیست؛ بلکه نبود تقاضای کافی، قابل‌اتکا و سودآور برای محصولات سبز است.

اگر دولت‌ها بتوانند با ایجاد بازارهای اولیه، کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و فعال‌سازی زنجیره ارزش سبز، این شکاف را پر کنند، پروژه‌های فولاد سبز و سایر صنایع سنگین می‌توانند از مرحله آزمایشی عبور کنند. در غیر این صورت، فاصله میان اهداف اقلیمی و واقعیت اقتصادی صنعت همچنان پارچا خواهد ماند.

## نقد



گروه معدن

editor@smtnews.ir

## معدن

## دربرسی فرصت تازه صنعت فولاد در اقتصاد چرخشی را نمایان شد

# بحران ماسه، فرصت تازه برای فولادسازان



## بحران جهانی ماسه در حال تبدیل شدن به یکی از چالش‌های مهم زنجیره تأمین مصالح ساختمانی است؛ چالشی که تنها به محیط‌زیست محدود نمی‌شود و می‌تواند ساختار هزینه پروژه‌های عمرانی و انتخاب مواد اولیه را نیز تغییر دهد. مصرف سالانه نزدیک به ۵۰ میلیارد تن ماسه برای توسعه زیر ساخت‌ها، در کنار برداشت گسترده از بستر رودخانه‌ها و سواحل، فشار فزاینده‌ای بر منابع طبیعی وارد کرده است.

در این شرایط، اقتصاد چرخشی می‌تواند برای صنعت فولاد فرصتی تازه ایجاد کند.

تبدیل مصرف سرباره و لجن فولادسازی به مواد اولیه مورد استفاده در صنعت ساختمان،

ضمن کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند، امکان ایجاد جریان‌های درآمدی جدید و

کاهش وابستگی به منابع طبیعی را فراهم می‌کند. به این ترتیب، محصولات جانبی

فولاد می‌توانند از یک هزینه عملیاتی به بخشی از زنجیره ارزش تبدیل شوند؛

مسیری که می‌تواند مدل تولید فولاد را به سمت ساختاری چندمحصولی و پایدارتر

سوق دهد. استفاده از این گزارش، فرصت‌های اقتصادی ناشی از پیوند صنعت فولاد

با اقتصاد چرخشی و استفاده از محصولات جانبی فولادسازی در صنعت ساختمان

را بررسی می‌کند.

## بحران جهانی ماسه و اقتصاد جایگزینی

در اقتصاد پروژه‌های عمرانی و ساخت‌وسازهای کلان است. با کاهش منابع در دسترس ماسه رودخانه‌ای و اعمال محدودیت‌های قانونی سخت‌گیرانه‌تر از سوی دولت‌ها برای استخراج آن، قیمت تمام‌شده بتن سنتی در بازارهای جهانی می‌تواند با فشار افزایشی مواجه شود. این تغییر در ساختار هزینه‌های ورودی، ظرفیت آن را دارد که کفه ترازوی اقتصادی را در انتخاب مصالح ساختمانی تغییر دهد. با افزایش هزینه اجرای سازه‌های بتنی، توجیه مالی پروژه‌های انبوه‌سازی و زیرساختی می‌تواند به سمت استفاده گسترده‌تر از سازه‌های با اسکلت فولادی متمایل شود و تقاضا برای مقاطع ساختمانی فولادی را در بازارهای هدف افزایش دهد. مطالعات جامع در حوزه مدیریت انتشار کربن نهفته (Embodied Carbon) در بخش ساختمان نیز تأیید می‌کنند که بهبود کارایی مواد و بازطراحی الگوهای ساخت‌وساز، از رویکردهای مهم برای تحقق اهداف پایداری به شمار می‌روند. شکل ۱ چارچوب کلی مدل‌سازی تقاضا و فرآیندهای صنعتی مربوط به این زنجیره تأمین را نشان می‌دهد.

البته تغییر الگوی مصرف مصالح تنها به معنای افزایش سهم فولاد در ساختمان نیست. مسئله مهم‌تر، ایجاد یک زنجیره تأمین منعطف‌تر است که بتواند از منابع جایگزین برای کاهش فشار بر مواد اولیه طبیعی استفاده کند. در این مدل، محصولات جانبی صنایع سنگین می‌توانند بخشی از نیاز بازار مصالح را پوشش دهند و هم‌زمان ارزش اقتصادی جدیدی برای تولیدکنندگان ایجاد کنند.

افزون بر این، تغییر در اقتصاد مصالح ساختمانی می‌تواند رفتار سرمایه‌گذاران و پیمانکاران را نیز تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی که یک ماده اولیه با محدودیت عرضه، هزینه حمل بالا یا الزامات محیط‌زیستی سخت‌گیرانه مواجه می‌شود، جذابیت گزینه‌های جایگزین افزایش پیدا می‌کند. همین مسئله اهمیت طراحی زنجیره‌های تأمین چندمنبعی را بیشتر می‌کند؛ زنجیره‌ای که در

### لجن و سرباره؛ ترکیب جدید برای مصالح سبز

استانداردگذاری وابسته خواهد بود.

#### اقتصاد چرخشی؛ مزیت رقابتی جدید فولادسازان

سازمان‌هایی که بتوانند سرباره‌های خود را به‌عنوان ماده اولیه پایدار به بازار عرضه کنند، علاوه بر کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند، امکان تقویت جایگاه خود در ارزیابی‌های حاکمیتی و زیست‌محیطی (ESG) را نیز خواهند داشت. شکل ۲، پتانسیل کاهش انتشار کربن را با استفاده از استراتژی‌های مختلف، از جمله بهره‌وری مواد و جایگزینی منابع، به تصویر می‌کشد.

در این چارچوب، اقتصاد چرخشی دیگر یک برنامه جانبی زیست‌محیطی نیست، بلکه می‌تواند به بخشی از مدل اقتصادی شرکت فولادی تبدیل شود. هرچه هزینه مواد اولیه، انرژی و مدیریت پسماند افزایش پیدا کند، ارزش اقتصادی ارزیابی و استفاده مجدد از مواد نیز بیشتر خواهد شد. از این منظر، کارخانه فولاد آینده فقط محل تولید فولاد نخواهد بود؛ بلکه می‌تواند به یک مرکز تولید چندمحصولی تبدیل شود که در کنار فولاد، مواد اولیه مورد نیاز صنایع دیگر را نیز تأمین می‌کند، این تغییر مدل، به‌ویژه برای فولادسازانی اهمیت دارد که با محدودیت زمین، هزینه‌های بالای دفع پسماند یا فشارهای زیست‌محیطی مواجه‌اند. تبدیل بخشی از محصولات جانبی به کالاهای قابل فروش، می‌تواند ضمن کاهش فشار عملیاتی، انعطاف اقتصادی شرکت را نیز افزایش دهد.

#### تجاری‌سازی محصولات جانبی؛ مسیر تازه درآمذاری

از منظر مدیریت استراتژیک و آینده‌نگاری، بازنگری در جایگاه محصولات جانبی می‌تواند رویکردی هوشمندانه برای رهبران صنعت فولاد ارزیابی شود. تخصیص منابع به‌منظور توسعه زیرساخت‌های فرآوری و استانداردسازی سرباره‌ها، امکان تبدیل یک دارایی را که به یک خط درآمدی جدید را ایجاد می‌کند. با توجه به سیگنال‌های بازار، پیش‌بینی نوسانات قیمت مصالح و برنامه‌ریزی برای پاسخگویی به شیف‌ت احتمالی تقاضا به سمت مقاطع فولادی، به حفظ جایگاه رقابتی سازمان در بلندمدت کمک شایانی می‌نماید. پیوند زدن فرآیندهای تولید با مدل‌های اقتصاد چرخشی، گزینه‌ای ایدئال برای انطباق با الزامات توسعه

بحران جهانی ماسه نشان می‌دهد فشار بر منابع طبیعی می‌تواند به‌تدریج به یک مسئله اقتصادی برای صنایع مختلف تبدیل شود. در چنین شرایطی، صنعت فولاد می‌تواند با بازتعریف نگاه خود به محصولات جانبی، بخشی از این تهدید را به فرصت تبدیل کند. سرباره و لجن فولادسازی، در صورت فرآوری، استانداردسازی و ایجاد بازار مصرف، دیگر صرفاً پسماندهای پرهزینه نخواهند بود و می‌توانند به مواد اولیه‌ای برای صنایع ساختمان و زیرساخت تبدیل شوند. حرکت به سمت اقتصاد چرخشی البته نیازمند سرمایه‌گذاری در

آن صنعت ساختمان بتواند بخشی از نیاز خود را از محصولات بازیافتی و جانبی صنایع دیگر تأمین کند.

#### سرباره؛ از پسماند صنعتی تا ماده اولیه

بازخورد استراتژیک دیگر این چالش جهانی، ایجاد یک بازار اقتصادی نوین برای محصولات جانبی صنعت فولاد است. سرباره‌های تولیدی در کوره‌های ذوب به‌طور معمول در دسته پسماندهای پرهزینه طبقه‌بندی می‌شوند و انباشت این حجم عظیم از مواد، هزینه‌های عملیاتی و لجستیکی مشخصی را به کارخانه‌ها تحمیل می‌نماید. بررسی‌های کاربردی جدید نشان می‌دهند که سرباره‌های فرآوری‌شده فولاد، به دلیل برخورداری از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متمایز، می‌توانند جایگزین مناسبی برای ماسه سیلیسی در تولید مصالح ساختمانی باشند. استفاده از این محصولات جانبی در فرمولاسیون بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC)، موجب ارتقای مقاومت فشاری و بهبود خواص مکانیکی ساختار نهایی می‌شود و وابستگی پروژه‌ها به منابع طبیعی روبه‌زوال را تعدیل می‌کند.

در این میان، فرآوری سرباره اهمیت ویژه‌ای دارد. سرباره خام لزوماً قابلیت استفاده مستقیم در تمام کاربردهای ساختمانی را ندارد و تبدیل آن به یک محصول استاندارد، نیازمند فرآیندهای مناسب جداسازی، دانه‌بندی و آماده‌سازی است. بنابراین، فرصت اقتصادی اصلی نه فقط در فروش سرباره، بلکه در ایجاد یک زنجیره ارزش جدید پیرامون فرآوری و استانداردسازی آن شکل می‌گیرد. این فرآیند می‌تواند به ایجاد واحدهای تخصصی در مجاورت مجتمع‌های فولادی نیز منجر شود؛ واحدهایی که سرباره را دریافت، فرآوری و به محصولی با مشخصات مشخص برای بازار ساختمان تبدیل کنند. چنین مدل‌ی علاوه بر کاهش هزینه انتقال پسماند، امکان نزدیک‌تر شدن محل تولید ماده اولیه به محل مصرف را فراهم می‌کند و از این مسیر می‌تواند بخشی از هزینه‌های لجستیکی زنجیره تأمین را کاهش دهد.

پایدار است و چشم‌اندازهای روشنی برای خلق ثروت و پایداری عملیاتی پیشنهاد می‌دهد.

طراحی برنامه‌های تجاری‌سازی برای سرباره‌ها، در این میان اهمیت ویژه‌ای دارد. فولادساز باید بازار هدف، مشخصات فنی محصول، هزینه فرآوری، الزامات حمل‌ونقل و استانداردهای مصرف را هم‌زمان در نظر بگیرد. به بیان دیگر، ایجاد ارزش از محصولات جانبی زمانی محقق می‌شود که میان تولید صنعتی و نیاز واقعی بازار ارتباطی پایدار شکل گیرد.

#### فولاد در مسیر بازتعریف مدل تولید

بحران ماسه نشان می‌دهد فشار بر منابع طبیعی می‌تواند هم‌زمان تهدید و فرصت ایجاد کند. از یک سو، افزایش هزینه و محدودیت دسترسی به مصالح طبیعی، هزینه پروژه‌های زیرساختی را تحت فشار قرار می‌دهد و از سوی دیگر، برای صنایع سنگین فرصتی ایجاد می‌کند تا مواد جانبی خود را وارد چرخه اقتصادی جدیدی کنند.

برای صنعت فولاد، این تحول می‌تواند به معنای بازتعریف مدل تولید باشد؛ مدلی که در آن سرباره و لجن دیگر صرفاً هزینه‌های جانبی فرآیند تولید محسوب نمی‌شوند، بلکه بخشی از سبد محصولات و منابع درآمدی کارخانه خواهند بود. حرکت به سمت چنین مدلی، نیازمند سرمایه‌گذاری در فرآوری، استانداردسازی، تحقیق و توسعه و ایجاد بازار مصرف است. اما در صورت تحقق، می‌تواند پیوند میان صنعت فولاد و اقتصاد چرخشی را عمیق‌تر کند.

در نهایت، آینده رقابت‌پذیری فولاد تنها به میزان تولید یا قیمت تمام‌شده محصول اصلی وابسته نخواهد بود. توانایی کارخانه‌ها در کاهش اتلاف، استفاده مجدد از منابع و تبدیل محصولات جانبی به کالاهای قابل فروش نیز می‌تواند به یکی از معیارهای مهم عملکرد صنعتی تبدیل شود. در این چارچوب، بحران جهانی ماسه نه فقط یک تهدید برای صنعت ساختمان، بلکه سیگنالی برای بازطراحی زنجیره ارزش فولاد و حرکت از مدل خطی تولید به سمت اقتصادی چرخشی و چندمحصولی است.

## سخن پایانی

فناوری، ایجاد استانداردهای مشخص و شکل‌گیری بازار پایدار برای محصولات ثانویه است. اما در صورت تحقق این الزامات، فولادسازان می‌توانند هم‌زمان هزینه‌های مدیریت پسماند را کاهش دهند، منابع طبیعی کمتری مصرف کنند و جریان‌های درآمدی تازه‌ای ایجاد کنند. از این منظر، آینده رقابت‌پذیری صنعت فولاد تنها به میزان تولید و قیمت تمام‌شده وابسته نخواهد بود؛ بلکه توانایی تبدیل پسماند به محصول و ایجاد ارزش از منابعی که پیش‌تر دورریختنی تلقی می‌شدند نیز به یکی از شاخص‌های مهم مزیت رقابتی تبدیل خواهد شد.