بهره‌مندی بیشتر از مواد اولیه از طریق مسیر احیای مستقیم/EAF
به حداکثر رساندن بهره‌دهی واحد آهن‌دار از سنگ آهن تا فولاد مذاب[1]

قسمت 1 – انتخاب سنگ آهن

ترجمه: محمدحسین نشاطی

این مطلب شامل سه قسمت در ارتباط با دستیابی به بیشترین بهره‌مندی از مواد اولیه را با تمرکز بر چهار عامل مرتبط به هم مؤثر بر بهره‌دهی واحد آهن دار برای تولید فولاد از مسیر DR/EAF می‌باشد:

- انتخاب سنگ آهن (قسمت 1)
- ویژگی‌های فیزیکی DRI (قسمت 2)
- حمل و نقل و ذخیره‌سازی DRI (قسمت 2)
- عملیات ذوب کردن (قسمت 3)

مقدمه

واحدهای آهن‌دار بزرگترین هزینه عملیاتی کارخانه احیای مستقیم را در بر می‌گیرند و همچنین واحدهای آهن‌دار فلزی بزرگترین بخش از هزینه عملیاتی کارخانه تولید فولاد با EAF را تشکیل می‌دهند. چند درصد اندک افزایش یا کاهش بهره‌دهی می‌تواند تأثیر بیشتری بر کل هزینه عملیاتی نسبت به 50 درصد نوسان در هزینه انرژی داشته باشد.

بهره‌دهی در هنگام ارزیابی هزینه در مرحله تولید واحد آهن‌دار فلزی، و همچنین در مرحله تولید فلز مذاب، عامل اصلی است. اما، بهره‌دهی واحد آهن‌دار از سنگ معدن تا فولاد مذاب می‌تواند در طیف گسترده‌ای متفاوت باشد. تلفات واحد آهن‌دار فلزی در طی حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و ذوب آهن اسفنجی (DRI) می‌تواند تا بیش از 15 درصد هم بالا برود.

هزینه‌های بزرگ مرتبط با تلفات واحد آهن‌دار گاهی پنهان هستند، زیرا می‌توانند در چند واحد عملیاتی پخش شوند. این هزینه-ها باید کنترل گردند تا بتوان در بازار آهن و فولاد امروزی رقابتی باقی ماند، به همین دلیل ضروری است عوامل موثر بر بهره‌دهی: انتخاب سنگ آهن، خواص فیزیکی DRI، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و روش ذوب را در نظر داشت.

در طی بیش از 100 سال، عملیات یکپارچه سنتی کوره بلند/BOF روش‌ها، تکنولوژی‌ها و روش‌های به حداکثر رساندن بهره-دهی واحد آهن‌دار را با به حداقل رساندن، گرفتن و بازیافت ضایعات اکسید در هر مرحله از فرآیند توسعه داده است. در مقابل، تولید تجاری فولاد از مسیر احیای مستقیم/EAF تنها حدود کمتر از 60 سال است که به وجود آمده و هنوز هم فرصت‌های بسیاری برای بهبود، از قبیل به حداکثر رسانی بهره‌دهی خالص واحد آهن‌دار از سنگ معدن تا فولاد مذاب وجود دارد.

قسمت 1 – انتخاب سنگ آهن

ترکیب شیمیائی سنگ آهن و خواص مکانیکی اکسید هر دو بر بهره‌دهی فولاد مذاب تأثیر می‌گذارند. سنگ آهن با ترکیب شیمیائی بهینه ممکن است دارای خواص مکانیکی بهینه برای تولید DRI نباشد. سنگ آهنی که به حداکثر بهره‌دهی منتج می‌شود احتمالاً مصالحه‌ای بین خواص شیمیایی و مکانیکی گندله‌های اکسید خواهد بود. لامپ (قلوه سنگ) سنگ آهن را نیز می‌توان در کوره‌های

[1]- Getting the Most from Raw Materials Via the Direct Reduction/EAF Route, Maximizing Iron Unit Yield from Ore to Liquid Steel (Part 1), DIRECT FROM MIDREX, FOURTH QUARTER 2019.

ستونی احیا بر پایه گاز طبیعی احیا کرد، ولی قابلیت‌دسترسی به سنگ آهن‌های مناسب (به ویژه موارد با آهن بسیار زیاد) بیشتر و بیشتر محدود می‌شود. اما، لامپ سنگ آهن می‌تواند باعث ایجاد چالش‌هائی در کوره ستونی و سیستم انتقال مواد شود. بنابراین، سنگ آهن گندله شده در حال حاضر خوراک اصلی عملیات احیای مستقیم کوره ستونی در سراسر جهان است.

مشخصات سنگ آهن برای استفاده در احیای مستقیم (DR) باید توسط اقتصاد کلی کارخانه DR و کارخانه فولاد مرتبط با آن تعیین شود. در صورت لزوم تغییر در مشخصات، تأثیر حاصل بر هزینه تولید فولاد باید در نظر گرفته شود.

ویژگی‌های شیمیایی

مشخصات برای ترکیب شیمیایی خوراک‌های سنگ آهن به جای فرآیند احیای مستقیم معمولاً توسط مصرف‌کننده مورد نظر DRI دیکته می‌شود، زیرا تنها تغییر عمده ترکیب شیمیایی سنگ آهن در فرآیند احیای مستقیم حذف اکسیژن است – بدون ذوب و پالایش کردن. در نتیجه، بیشتر ناخالصی‌ها و گانگ موجود در خوراک اکسید در محصول DRI وجود دارد. بنابراین، میزان آهن مواد خوراک باید تا حد ممکن بالا باشد و مقدار گانگ (به ویژه اجزای گانگ اسیدی، مانند سیلیس و آلومینا) تا حد ممکن کم باشد. مقدار کل گانگ در گندله‌های اکسید و لامپ سنگ آهن بطور کلی نباید بیش از 4–3 درصد باشد. گانگ بیش از حد به انرژی الکتریکی اضافی در EAF نیاز دارد و فرسایش نسوز را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که حذف اکسیژن از گندله اکسید آهن و لامپ سنگ آهن باعث افزایش ظاهری درصد آهن و ناخالصی‌ها می‌شود، گرچه مقدار نسبی هر یک ثابت است.

در هنگام انتخاب سنگ آهن جهت استفاده در احیای مستقیم مواد تشکیل‌دهنده شیمیایی زیر باید در نظر گرفته شوند:

- آهن کل
- سیلیس و آلومینا (گانگ اسیدی)
- آهک و منیزیا (گانگ بازی)
- فسفر
- گوگرد
- مس
- تیتانیا

	محدوده عملی (٪)	محدوده ترجیحی (٪)
Fe	66.0 min.	67.0 min.
SiO_2 & Al_2O_3	3.5 max.	2.0 max.
CaO	2.5 max.	
MgO	1.0 max.	
P_2O_5	0.03 max.	0.015 max.
S	0.025 max.	0.015 max.
Cu	0.03 max.	0.03 max.
TiO_2	0.35 max.	0.15 max.

جدول 1– محدودیت‌های کیفیتی ترکیب شیمیائی اکسید آهن.

جدول I حداکثر کیفیت شیمیایی عملی مواد اکسید و همچنین محدودیت‌های ترجیحی برای تولید مناسب‌ترین DRI برای فولادسازی با EAF را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی سنگ آهن برای فرآیند احیای مستقیم (DR) اغلب مهمتر از ویژگی‌های شیمیایی است. خوراک ترجیحی DR اندازه یکنواخت است تا امکان تغذیه همگن را فراهم سازد، ویژگی‌های احیاپذیری خوب، و استحکام مکانیکی کافی برای جلوگیری از متلاشی شدن و ایجاد نرمه در طی حمل و نقل، انتقال و ذوب کردن داشته باشد. این ویژگی‌ها با استفاده از آنالیز سرندی، آزمایش سایش‌سنجی و اندازه‌گیری استحکام فشاری تعیین می‌شوند.

خواص مکانیکی اکسید همانند استحکام خرد شدن یا استحکام سقوط بر بهره‌دهی کلی کارخانه DR تأثیر می‌گذارند، زیرا نرمه‌ها و غبارهای اکسید در حین حمل و نقل و ذخیره‌سازی ایجاد می‌شوند. بسیاری از مفاهیم حمل و نقل و ذخیره‌سازی اکسیدها برای DRI نیز کاربرد دارند.

در هنگام انتخاب سنگ آهن جهت استفاده در احیای مستقیم ویژگی‌های فیزیکی زیر باید در نظر گرفته شوند:

- **اندازه**- حدود 95 درصد گندله‌ها باید در دامنه اندازه 9–16 mm باشند. لامپ سنگ آهن باید دارای محدوده اندازه 10–35 mm و 85 درصد آن در این محدوده باشد. اندازه (فراکسیون) زیر 3 mm باید به حداقل برسد.
- **استحکام مکانیکی**- استحکام سایش برای گندله‌ها باید 90–95 درصد 6.73 mm+ و برای لامپ سنگ آهن باید 85–90 درصد 6.73 mm+ باشد. استحکام فشاری سرد برای گندله‌ها باید 250 kg یا بیشتر باشد. استحکام سایش و استحکام فشاری سرد نشانه‌هایی هستند از اینکه گندله‌های اکسید چقدر خوب سخت شده‌اند. پائین بودن استحکام سایش و استحکام فشاری سرد، به معنی ایجاد نرمه بیشتر در حین حمل‌ونقل است.
- **چگالی فله‌ای**- چگالی فله‌ای کم به معنای کاهش وزن واحد یا ظرفیت یک قیف یا سایر دستگاه‌های حجمی همانند کوره احیا می‌باشد. گندله‌ها و لامپ سنگ آهن باید دارای چگالی فله‌ای حداقل 2.2 t/m^3 باشند.

ویژگی‌های احیا

احیاپذیری را می‌توان با زمان اقامت مورد نیاز در منطقه احیا برای رسیدن به درجه فلزی معینی (درصد) در دمای مشخصی اندازه‌گیری کرد. اندازه کوره احیا در یک کارخانه میدرکس برای مدت 4–6 ساعت اقامت موثر بار در منطقه احیا تعیین می‌شود. بیشتر گندله‌های اکسید و لامپ سنگ آهن مورد استفاده برای احیای مستقیم، دارای احیاپذیری کافی در دامنه 4 ساعت در دمای کمتر از دمای همجوشی می‌باشند.

این بدان معناست که رابطه مستقیمی بین دمای احیا، احیاپذیری و بهره‌وری وجود دارد (هرچه دمای احیا بیشتر، احیاپذیری و بهره وری بیشتر). اما، دمای احیا توسط نقطه آگلومره شدن (دمای همجوشی) درون کوره احیا محدود می‌شود. تمایل به آگلومره شدن (درصد گندله‌هایی چسبیده به هم در خوشه در طی احیا) می‌تواند با روکش کردن گندله ها برای کنترل بازیسیته (نسبت $CaO+MgO / SiO_2+Al_2O_3$) بهبود یابد.

	لامپ سنگ آهن		گندله‌های اکسید	
کیفیت فیزیکی	قابل قبول	ترجیحی	قابل قبول	ترجیحی
اندازه:				
اسمی	5x35 mm	10x25 mm	5x18 mm	6x16 mm
9x16 mm	N/A	N/A	85% min.	95% min.
- 5 mm	8% max.	5% max.	5% max.	3% max.
استحکام سایش:				
+ 5 mm	85% min.	90% min.	92 min.	95% min.
- 28 mesh	10% max.	7% max.	6% max.	4% max.
استحکام فشاری:				
متوسط	N/A	N/A	150kg min.	250kg min.
< 50 kg	N/A	N/A	5% max.	2% max.
ویژگی‌های احیائی	**قابل قبول**	**ترجیحی**	**قابل قبول**	**ترجیحی**
آزمایش .... میدرکس (760°C)				
درجه فلزی (متالیزاسیون)	90% min.	92% min.	91% min.	93% min.
متلاشی شدن (-3 mm)	10% max.	5% max.	5% max.	2% max.
آزمایش بار گرم (815°C):				
استحکام سایش (+3 mm)	85% min.	90% min.	90% min.	95% min.
فشار متوسط	N/A	N/A	50 kg min.	100kg min.
خوشه‌بندی	0	0	0*	0

*آگلومره شدن در دمای بالاتر از 760°C قابل قبول است اگر متالیزاسیون در دمای 760°C حداقل 93٪ باشد.

جدول II. کیفیت فیزیکی و ویژگی‌های احیائی اکسید آهن.

اگر گندله خاصی تمایل بالاتری به خوشه‌بندی داشته باشد، اغلب با مخلوط کردن آن با لامپ سنگ آهن می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. بیشتر لامپ‌های سنگ آهن به صورت روان‌کننده بار کوره عمل می‌کنند و از خوشه‌بندی به دلیل تمایل آنها به شکفتن (شکستن در اثر حرارت) جلوگیری می‌کنند.

جدول II ویژگی‌های فیزیکی و احیائی مطلوب برای لامپ سنگ آهن و گندله‌های اکسید مورد استفاده در کاربردهای احیای مستقیم را نشان می‌دهد.

در احیای مستقیم، اول خرد شدن حرارتی با گرم شدن سنگ آهن و به دنبال آن خرد شدن احیائی ناشی از شروع احیای هماتیت به مگنتیت در سنگ آهن رخ خواهد دهد. هر دو در 30 دقیقه اول احیا انجام می‌شوند. نرمه‌های تولید شده توسط خرد شدن بیشتر

به صورت نرمه‌های فلزی شده قابل بازیافت هستند که می‌توانند برای استفاده‌های بعدی در واحد فولادسازی با EAF بریکت شوند. گندله‌های اکسید با کیفیت خوب بطور کلی دچار خرد شدن بسیار کمی می‌شوند.

بیشتر لامپ‌های سنگ آهن در معرض خرد شدن حرارتی که در هنگام گرم شدن سنگ آهن در محدوده دمای 375–425°C رخ می‌دهد هستند. به نظر نمی‌رسد سرعت گرمایش مهم باشد. اما، هنگامی که سنگ آهن به این محدوده دما می‌رسد، مقداری از سنگ آهن به تکه‌هائی متلاشی می‌شوند. لامپ‌های سنگ آهن با خرد شدن احیای کم، 4–3 درصد نرمه 4 mm– ایجاد می‌کنند، در حالی که سنگ آهن‌های با خرد شدن احیای بالا می‌توانند به میزان تا 15 درصد نرمه 4 mm– منجر گردند.

ترکیب بهینه گندله اکسید

تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و آزمایش در سطح کارخانه برای تعیین ترکیب بهینه گندله اکسید درجه DR انجام شده است. پاسخ به شرایط خاص کارخانه و بازار سنگ آهن بستگی دارد. در بازار فعلی، گندله‌های درجه DR به عنوان گندله با بالاترین کیفیت شناخته می‌شوند و از اضافه قیمت (پریمیوم) قابل‌توجهی برخوردارند.

چند عامل کلیدی گندله درجه DR را از گندله معمولی درجه کوره بلند متمایز می‌کنند. به طور کلی، میزان آهن گندله درجه DR به میزان 67 درصد یا بالاتر است، در حالی که گندله درجه کوره بلند معمولاً دارای 65 درصد آهن یا پایین‌تر می‌باشد. محتوای بالای آهن برای به حداقل رساندن گانگ، به ویژه اجزای اسیدی مثل SiO_2 و Al_2O_3 در محصول DRI (DRI سرد، CDRI؛ DRI گرم، HDRI؛ و آهن بریکت گرم، HBI) مهم است. از آنجا که بیشتر DRI مستقیما در کوره فولادسازی اکسیدکننده ذوب می‌شود، گانگ اسیدی بالاتر منجر به سرباره بیشتر در کوره فولادسازی و تلفات بیشتر آهن به صورت FeO زیاد در سرباره می‌گردد. نگرانی از این مسئله در هنگام استفاده از HBI در کوره بلند با شرایط بسیار احیائی آن کمتر است. اما، ممکن است مقدار آهن محتوی بالاتری برای رسیدن به چگالی مورد نیاز برای حمل‌ونقل دریائی مورد نیاز باشد.

علاوه بر آهن کل در گندله، احیاپذیری آن نیز بر بهره‌دهی کلی تأثیر می‌گذارد. چند عامل اثرگذار بر رفتار احیائی گندله اکسید در کوره ستونی احیای مستقیم وجود دارند. کانی‌شناسی خاص سنگ آهن و نیز بازیسته گندله (نسبت ترکیبات بازی به اسیدی) به صورت فلاکس‌شده [افزودن روانسازها به گندله] درجه احیای قابل‌دستیابی را تعیین می‌کند. آزمایش کردن آزمایشگاهی اغلب بهترین روش برای ارزیابی احیاپذیری گندله مورد نظر است.

علاوه بر احیاپذیری گرم، ترکیب شیمیائی گندله اکسید تمایل گندله به چسبیدن و تشکیل خوشه در کوره ستونی احیای مستقیم را تعیین می‌کند. شرایط آشفته در کوره ستونی می‌تواند باعث اتلاف قابل‌توجه واحد آهن‌دار به محصول نارس شود که ممکن است برای بازیافت از طریق کوره ستونی مناسب باشد یا نباشد.

سرانجام، گوگرد و فسفر سنگ آهن می‌توانند تأثیر غیرمستقیمی بر بهره‌دهی واحد آهن‌دار داشته باشند. سطح بالاتر S و/یا P در DRI ممکن است به روش‌های مختلف سرباره در EAF نیاز داشته باشد تا آلودگی‌ها را از بین ببرد [از جمله بازیسته سرباره بالاتر]. سرباره با بازیسته بالاتر منجر به حجم سرباره بزرگتر و در نتیجه تلفات بیشتر FeO در سرباره می‌شود. این موضوع با جزئیات بیشتر در قسمت 3 – شیوه ذوب کردن – این مجموعه مقالات مورد بحث قرار خواهد گرفت.

نتیجه‌گیری

دانستن ویژگی‌های عملیاتی سنگ آهن‌های گرید احیای مستقیم در بهینه‌سازی عملکرد یک کارخانه و کنترل هزینه‌های عملیاتی آن، بسیار ارزشمند است. هزینه خرید سنگ آهن تا دو سوم (2/3) از کل هزینه عملیاتی را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین، ارزیابی و انتخاب سنگ آهن برای سلامت عملیاتی و مالی و طول عمر یک کارخانه احیای مستقیم بسیار مهم است.

ویژگی‌های احیائی، همانند احیاپذیری، تمایل به آگلومره شدن، و متلاشی شدن در طی احیا باید در مشخصات مواد اولیه لحاظ شوند. اما، هیچ روش آزمایش داخلی پذیرفته‌شده‌ای برای ارزیابی این خواص برای کاربردهای احیای مستقیم وجود ندارد. بنابراین،

مجاب کردن تامین‌کنندگان سنگ آهن به لحاظ کردن این خواص در مشخصات بسیار دشوار است، به خصوص اگر جریمه در کار باشد.

علاوه بر این، تمام مواد اولیه اکسید آهن همه ویژگی‌های مطلوب شیمیایی، فیزیکی و احیائی را با هم ندارند. بنابراین، مخلوط مواد مختلف، به ویژه ترکیبی از گندله‌های مرغوب و لامپ سنگ آهن، اغلب توسط کارخانه های احیای مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزایا و معایب هر نوع گندله اکسید یا لامپ سنگ آهن را باید در نظر گرفت برای تعیین اینکه کدام ترکیب کمترین هزینه عملیاتی را در عین حال به حداکثر رساندن تولید و حفظ کیفیت محصول تأمین خواهد کرد.