

## بهره‌مندی بیشتر از مواد اولیه از طریق مسیر احیای مستقیم/EAF به حداکثر رساندن بهره‌دهی واحد آهن‌دار از سنگ آهن تا فولاد مذاب<sup>1</sup>

### قسمت 3 - روش ذوب کردن

ترجمه: محمدحسین نشاطی

توضیح نویسندگان: ما می‌خواهیم مقایسه‌ای از جذب آب توسط CDRI و HBI را توضیح دهیم، همانطور که در جدول I قسمت 2 این مجموعه از مقالات آمده است. مقایسه این دو شکل از DRI وقتی که آنها با آب اشباع شده‌اند یک وضعیت "بدترین حالت" در حین حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل را نشان می‌دهند. این مقایسه برای نشان دادن آن انجام شد که HBI متراکم، کمتر مستعد جذب آب نسبت به شکل گندله متخلخل CDRI است؛ بنابراین، کمتر واکنش‌پذیر و ایمن‌تر برای حمل‌ونقل است. شرط نشان داده شده در مقایسه نماینده دو شکل DRI در شرایط معمولی حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و حمل دریائی نیست. درصدها باید حداکثر در نظر گرفته شوند.

#### مقدمه

بهره‌دهی ذوب کردن - مقدار فولاد مذابی که می‌تواند از یک تن مواد شارژ آهنی تولید شود - یکی از ملاحظات اصلی تولیدکنندگان فولاد با کوره قوس الکتریکی (EAF) است. معمولاً به این نتیجه می‌رسد که هرچه بهره‌دهی ذوب بالاتر، ارزش نسبت داده شده به مواد نیز بیشتر. بهره‌دهی قراضه آهنی بسته به گرید آن و آلودگی‌های موجود در آن می‌تواند بسیار متفاوت باشد. برای مثال، قراضه با چگالی کم تمایل به اکسید شدن سریع دارد، که منجر به بهره‌دهی پایین ذوب می‌شود. قراضه حاوی شیشه، پلاستیک، لاستیک، بتون، چوب، خاک، روغن، زنگ و روکش‌ها نسبت به قراضه تمیز به خوبی جداسازی شده در هنگام ذوب کردن بهره‌دهی کمتری می‌دهد. بهره‌دهی معمول ذوب کردن گزارش شده برای گریدهای مختلف قراضه در **جدول I** نشان داده شده است.

مانند قراضه، تمام DRI هم یکسان نیست. بهره‌دهی ذوب کردن DRI بسته به ترکیب شیمیائی سنگ آهن، میزان آهن فلزی، کربن محتوی و شیوه ذوب کردن می‌تواند متفاوت باشد. همانطور که در قسمت 1 این مجموعه بحث کردیم، هدف در هنگام انتخاب سنگ آهن برای احیای مستقیم استفاده از آنهایی است که دارای مقدار بالای آهن، گانگ کم (خصوصاً  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$ ) و ویژگی‌های احیای مناسب هستند. میزان آهن فلزی DRI به درجه احیای حاصل شده در فرآیند احیا بستگی دارد - هرچه بالاتر، بهتر. کربن موجود در DRI برای احیای هرگونه اکسید آهن باقیمانده و برای کربن‌دهی حمام مذاب و پشتیبانی از تزریق اکسیژن می‌بایستی کافی باشد.

اتلاف بهره‌دهی ناشی از جابجایی و ذخیره‌سازی مواد در اثر شکستگی، ریزش، گردوغبار کردن و زنگ‌زدگی بوده و درک آن نسبتاً ساده است، همانطور که در قسمت 2 بحث کردیم. درک بهره‌دهی پایین در هنگام ذوب کردن سخت‌تر است، اما می‌تواند بزرگترین منبع واحد اتلاف آهن از سنگ معدن تا فلز مذاب در عملیات فولادسازی بر پایه DRI باشد.

#### قسمت 3 - شیوه ذوب کردن

DRI بیشتر در عملیات فولادسازی با EAF مصرف می‌شود. نسبت تغذیه قراضه به DRI به طور معمول بسته به فولاد تولید شده، شیوه ذوب کردن و در دسترس بودن قراضه از "70 به 30" تا "10 به 90" متفاوت است. در مناطق کمبود قراضه، مانند MENA، خوراک

گرید قراضه	بهره‌دهی ذوب (%)	
	معمول	دامنه
باندل‌های شماره 1	94.0	92-96
بوشلینگ شماره 1	93.0	92-94
شرد شده (خرد شده)	92.0	85-96
ذوبی سنگین شماره 1	91.0	90-92
ذوبی سنگین شماره 2	87.5	86-89
باندل‌های شماره 2	83.5	79-87
تراشه‌ها	80.0	80-85
قراضه داخلی کارخانه	93.0	93-94
جدول 1. بهره‌دهی ذوب کردن به طور معمول برای گریدهای مختلف قراضه فولادی.		

<sup>1</sup> -Maximizing Iron Unit Yield from Ore to Liquid Steel (Part 3), DIRECT FROM MIDREX, SECOND QUARTER 2020.

DRI می‌تواند تا 90 درصد بالا باشد. CDRI و HBI می‌توانند به صورت دسته‌ای به همراه قراضه در سید نوع دو کپه‌ای شارژ شوند و CDRI و HDRI به طور پیوسته در حین ذوب کردن تغذیه می‌شوند. معمولاً DRI به صورتی شارژ می‌شود تا اطمینان حاصل شود که در مرکز EAF ریخته می‌شود تا تمایل به اکسید شدن و انباشتگی را که می‌تواند به تلفات زیاد آهن، تأخیر در عملیات و آسیب غیرمنتظره به مواد نسوز منجر شود کاهش دهد.

هنگام شارژ پیوسته DRI، سرعت تغذیه باید به گونه‌ای باشد که دمای حمام فولاد ثابت حفظ شود. اگر سرعت تغذیه خیلی کم باشد، دمای حمام افزایش خواهد یافت و ذوب‌گرایش به جلوزدن از برنامه زمانی خود خواهد داشت و/یا واحدهای آهن کمتری از مقدار مورد نیاز خواهد داشت. اگر سرعت تغذیه خیلی بالا باشد، ریسک تشکیل "کوه‌های یخی" وجود دارد؛ دمای سرباره کاهش می‌یابد، و پوسته‌ای ضخیم ایجاد می‌کند که DRI، به ویژه به صورت گندله و لامپ، قادر به نفوذ در آن نیست [1].

چهار منبع بالقوه اتلاف واحد آهن در هنگام ذوب کردن وجود دارد:

- غبارگیر EAF
- اتلاف آهن فلزی در سرباره
- اکسید شدن آهن در سرباره (کمبود کربن)
- اکسید شدن آهن در سرباره (عملیات EAF)

### تلفات به صورت غبار در سیستم غبارگیر EAF

تلفات غبار در سیستم غبارگیر بسیار وابسته به عملیات کوره، محل قرارگیری و کنترل جمع‌آوری گاز خروجی، روش افزودن DRI و میزان گردوغبار مواد DRI است. این می‌تواند در بعضی موارد از 2 درصد مواد شارژ شده هم فراتر رود.

### تلفات قطرات فلز از کوره در هنگام سرباره‌گیری

تلفات فلز در طی سرباره‌گیری بسیار وابسته به برنامه زمانی افزودن DRI و عملیات سرباره‌گیری و همچنین حجم کل سرباره تولید شده است. هنگامی که مقدار سرباره بسیار بزرگی تولید می‌شود، مدت زمان ماند قطرات فلز در سرباره می‌تواند طولانی‌تر و مدت زمان اقامت سرباره در کوره کوتاه‌تر باشد و منجر به تلفات قابل توجهی شود.

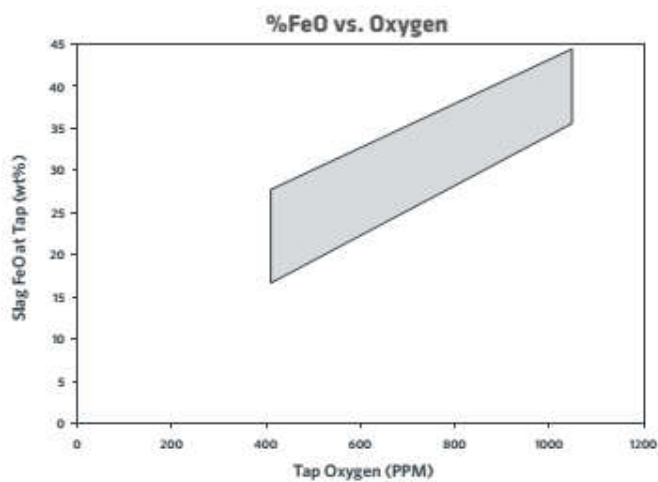
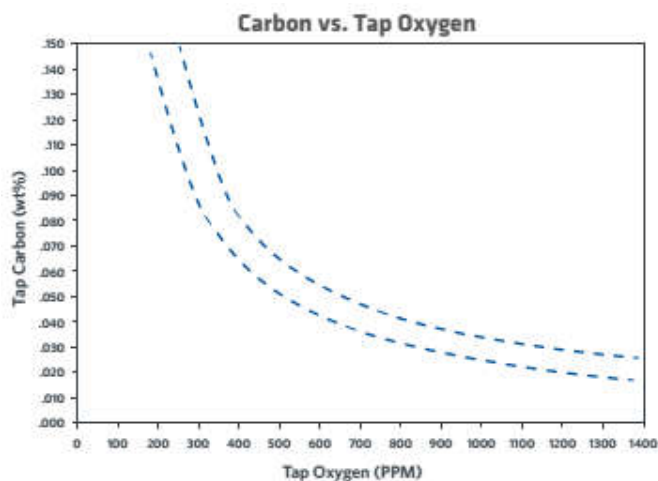
### تلفات اکسید آهن در سرباره هنگامی که DRI کمبود کربن دارد

منبع سوم اتلاف آهن در هنگام ذوب DRI/HBI که از دو مورد اول نادرتر است. ممکن است هنگامی اتفاق بیفتد که DRI دارای کربن کم و درجه فلزی کم باشد (مقادیر بیشتری از آهن احیا نشده به صورت FeO در DRI وجود دارد). تحت این سناریو، اکسیژن از لنس‌ها با آهن واکنش خواهد کرد تا کربن تمام شود و باعث اکسید شدن آهن می‌شود. این اتفاق می‌افتد زیرا کربن کافی برای محافظت و احیای FeO در DRI وجود ندارد. به طور معمول، تولیدکنندگان DRI هر دو ماده تولید واحد داخلی و تجاری یک هدف ترکیب شیمیایی محصول را خواهند داشت که دارای کربن اضافی نسبت به اکسید آهن باقیمانده در مواد است.

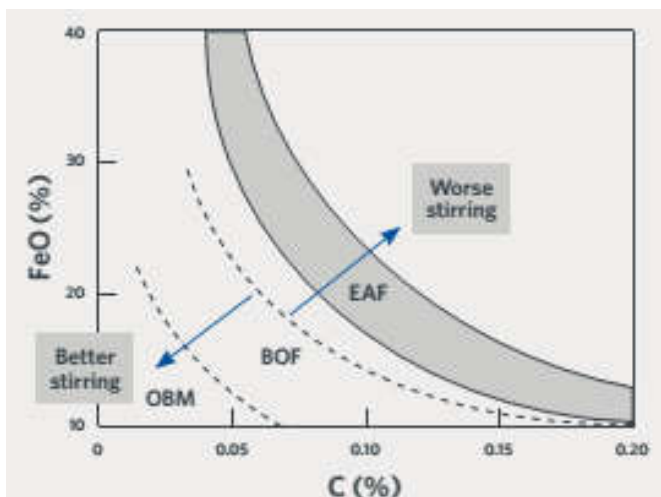
### اکسید شدن آهن در سرباره با پیش بردن توسط ترمودینامیک و سینتیک کوره

چهارمین منبع اتلاف آهن هنگام ذوب DRI/HBI در یک کوره فولادسازی، که درک آن دشوارتر است. گانگ اسیدی ( $\text{SiO}_2$ ) و ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) از گندله‌های سنگ آهن تحت تأثیر فرآیند احیای مستقیم قرار نمی‌گیرد و درون DRI وارد EAF می‌شوند. برای حفظ بازیسیته سرباره، مواد سرباره‌ساز بازی (مانند CaO) به کوره اضافه می‌شوند و به مقدار سرباره بزرگتر منتج می‌گردند. اگر درصد FeO در سرباره ثابت بماند، آنگاه وزن آهن بیشتر در سرباره تلف می‌شود.

یک مورد ساده ذوب کردن 100 kg آهن اسفنجی (DRI) حاوی 3 درصد  $\text{SiO}_2$  را در نظر بگیرید. این در ابتدا 97kg آهن مذاب و 3kg  $\text{SiO}_2$  تولید می‌کند. برای موازنه نسبت V [نسبت V به صورت درصد وزنی  $\text{CaO/SiO}_2$  تعریف می‌شود - نسبت B یا نسبت B2 نیز نامیده می‌شود] در 2.0 نیاز به افزودن 6kg CaO و 2kg MgO برای محافظت از نسوزها می‌باشد.  $\text{CaO} +$



شکل 1. رابطه بین کربن تخلیه، اکسیژن محلول و FeO سرباره.



شکل 2. رابطه بین درصد FeO در سرباره و درصد C در فولاد در هنگام تخلیه کوره [1].

MgO + SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تقریباً 65 درصد کل سرباره را تشکیل می‌دهند، بنابراین وزن کل سرباره تقریباً 17kg است. 30 درصد FeO در سرباره، اتلاف 5kg Fe یا 3.9kg Fe در سرباره (3.9 درصد تلفات بهره‌دهی در واحدهای آهن) را نشان می‌دهد.

مقدار 30 درصد FeO از موازنه بین کربن موجود در فولاد، اکسیژن محلول در فولاد و FeO در سرباره حاصل می‌شود. این موازنه توسط ترمودینامیک و شرایط همزنی در کوره (سینتیک) به پیش برده می‌شود، همانطور که در شکل 1، که با استفاده از داده‌های واقعی کارخانه‌ای تهیه شده نشان داده شده است.

مقدار بیشتر سرباره یا FeO بالاتر در سرباره منجر به آهن بیشتر در سرباره می‌گردد. این اکسید احیا نشده از محصول DRI نیست و کاملاً مستقل از درجه فلزی و کربن DRI است. این تعادل (یا عدم تعادل) سرباره با حالت اکسیداسیون فولاد مذاب در حال تولید است. EAF در مقایسه با BOF یا QBOP/OBM مخزنی با همزنی نسبتاً ضعیف است. تلاش‌ها برای بهبود همزنی در EAF باعث بهبود موازنه اکسیژن/کربن/FeO در کوره و کاهش توان برای گانگ بالاتر DRI می‌شود، همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است.

نحوه ذوب کردن می‌تواند به کاهش تلفات آهن در سرباره کمک کند. آهن را با استفاده از تزریق کربن می‌توان بازیافت کرد. اما، این کار می‌تواند گران باشد و اغلب نتایج متناقضی ارائه می‌دهد. گزینه دیگر ذوب کردن با FeO کم (کربن بالا) و سرباره‌گیری قبل از کربن‌زدائی عمیق است. دستیابی به این امر در عمل واقعی در یک کارگاه با بهره‌وری بالا دشوار است. در بیشتر موارد، ذوب شدن، کربن‌زدائی و تغذیه DRI به طور همزمان اتفاق می‌افتند.

کنترل دقیق ترکیب شیمیایی سرباره نیز می‌تواند در به حداقل رساندن تلفات آهن در سرباره کمک کند. بازیابته سرباره تأثیر شدیدی بر فعالیت FeO در سرباره دارد. با هدف‌گذاری درست بازیابته سرباره، می‌توان به اکتیویته اکسیژن معادل در سرباره در غلظت پایین‌تر FeO در سرباره دست یافت.

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، کاهش نسبت V از 2.5 به 1.8، می تواند "قدرت" FeO در سرباره را دو برابر کند. به لحاظ نظری، سرباره ای با 18 درصد FeO در  $V=1.8$  دارای پتانسیل اکسیدکنندگی همسان با 36 درصد FeO در  $V=2.5$  می باشد.

تولید گریدهای فولاد با فسفر محدود با DRI دارای فسفر بالاتر می تواند در تعارض با این تلاش باشد. در این شرایط، کنترل مؤثر فسفر به طور معمول نیاز به نسبت V سرباره بالاتر و به طور معمول اکسیژن تخلیه (و FeO سرباره) بالاتر دارد. نسبت V بالاتر منجر به مقدار سرباره بالاتر و ضریب اکتیویته پایین تر FeO در سرباره می شود. هدف اکسیژن تخلیه بالاتر و ضریب اکتیویته پایین تر FeO منجر به غلظت بالاتر FeO در سرباره و اتلاف بیشتر آهن در سرباره می گردد.

از مثال قبلی، توجه داریم که سرباره باید برای انجام فسفرزدایی اصلاح شود. به جای نسبت  $V=2$  و  $FeO=30$ ، نسبت  $V=2.8$  و  $FeO=35$  را در نظر بگیرید. وزن کل سرباره به این ترتیب به دست می آید:  $3 \text{ kg SiO}_2$  (از DRI) +  $8.4 \text{ kg CaO}$  (برای نسبت  $V=2.8$ ) +  $2 \text{ kg MgO}$  (برای نسوز) که جمع وزن تا اینجا می شود  $13.4 \text{ kg}$  و از آنجا که مجموع  $SiO_2+CaO+MgO$  تقریباً 60 درصد سرباره را تشکیل می دهند لذا با تقسیم آن بر 0.6 وزن کل سرباره  $kg/100 \text{ kg DRI} = 22.3$  یا  $7.8 \text{ kg FeO}$  در سرباره، به معنی 35 درصد FeO در سرباره، به معنی 6.1 Fe تلف شده در سرباره است. (توجه: در این مثال، یک تغییر نسبتاً اندک در تطبیق با حذف فسفر تلفات آهن را از 3.9 درصد به 6.1 درصد افزایش داد).

### خلاصه مجموعه

بهردهی کلی واحد آهن از سنگ معدن تا فلز مذاب از طریق مسیر احیای مستقیم/فولادسازی با EAF می تواند در گستره وسیعی تغییر کند. اتلاف واحد آهن کاملاً آسان می تواند تا بیش از 15 درصد بالا رود. علت اصلی این اتلاف عبارتند از:

- خواص فیزیکی سنگ آهن که بر شکستگی در هنگام جابجایی اکسید تأثیر می گذارد
- تلفات حمل و نقل اگر DRI/HBI به تکه ها و نرمهائی خرد شوند؛ گرچه در مورد HBI بسیار کمتر نقش دارد.

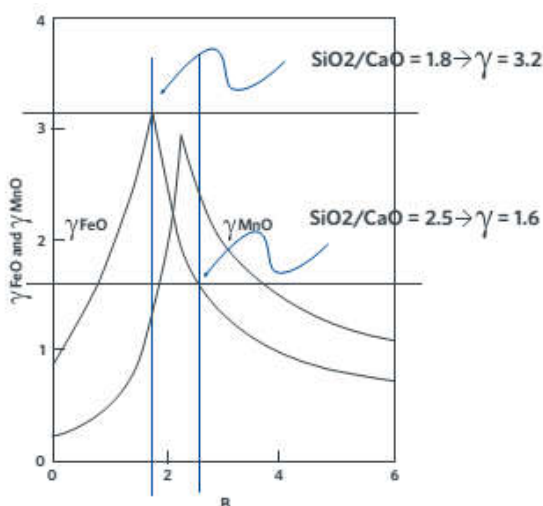
تلفات حمل و نقل را می توان با طراحی و انتخاب دقیق تجهیزات جابجایی مواد و بازیافت/بازچرخانی گردوغبار و نرمه های تولید شده، کنترل کرد.

- ریزش

- هوازدگی در طی ذخیره سازی

• اتلاف ناشی از ذوب کردن با مقدار زیاد سرباره. اتلاف در سرباره در طی ذوب کردن در واقع از خواص شیمیایی سنگ آهن شروع می شود.

شیوه ذوب کردن نیز نقش ایفا می کند و شناخت ترکیب شیمیایی سرباره ایجاد شده در کوره فولادسازی مهم است. هزینه های بزرگ مرتبط با تلفات واحد آهن گاهی پنهان است، زیرا در چندین واحد عملیاتی پخش می شوند. این هزینه ها باید در یک بازار رقابتی آهن و فولاد کنترل شوند. توجه دقیق به کلیه مراحل مورد توجه قرار گرفته در این مجموعه از مقالات می تواند به بهبود قابل توجه بهره دهی و در نتیجه کاهش عمده هزینه عملیاتی منتج شود.



شکل 3. تأثیر بازیسته سرباره بر اکتیویته FeO [2].

## اصطلاحات احیای مستقیم مورد علاقه فولادسازان

**کربن محتوی (%)**: کل کربن موجود در DRI به صورت درصدی از وزن کل DRI. کربن موجود در DRI می‌تواند هم به صورت آزاد و هم به صورت سمنتیت ( $Fe_3C$ ) باشد.

**درجه احیا (%)**: اکسیژن ترکیب شده با آهن در طی احیا.

**گانگ محتوی (%)**: اجزای سنگ آهن که در محصولات DRI باقی مانده اند ( $P, TiO_2, MnO, MgO, CaO, Al_2O_3, SiO_2$ ). گانگ محتوی به طور معمول 3-5 درصد است.

**بازرسیته گانگ (%)**: نسبت وزن اجزای بازی گانگ ( $CaO+MgO$ ) به اجزای اسیدی گانگ ( $SiO_2+Al_2O_3$ ).

**بهره‌دهی آهن (%)**: کل آهن موجود در DRI که با ذوب کردن می‌تواند به فولاد مذاب تبدیل شود.

**نسبت فولاد مذاب به شارژ فلزی یا بهره‌دهی ذوب کردن (%)**: وزن کل DRI که با ذوب کردن به صورت فولاد مذاب حاصل می‌شود.

**آهن فلزی (%)**: کل وزن DRI موجود به صورت آهن فلزی، که شامل آهن ترکیب شده با اکسیژن نیست.

**درجه فلزی (%)**: آهن کل موجود در DRI به صورت آهن فلزی.

**فسفر (%)**: مقدار فسفر موجود، بیان شده به صورت درصد از کل وزن DRI. فسفر به طور معمول به صورت  $P_2O_5$  موجود است.

**آهن پیش احیا شده**: مواد آهن احیا شده با درجه فلزی زیر 85 درصد (برای فولادسازی مناسب نیست).

**عناصر باقیمانده (residual elements)**: فلزات غیرآهنی که در طی ذوب کردن که یا تبخیر می‌شوند یا در حمام فولاد مذاب باقی می‌مانند (مس، نیکل، کروم، قلع، مولیبدن، سرب و روی). مقدار کل عناصر باقیمانده DRI به طور معمول زیر 0.02 درصد است.

**آهن کل (%)**: آهن فلزی + آهن ترکیب شده با اکسیژن به صورت درصدی از وزن کل DRI.

**عناصر ناخواسته (tramp elements)**: عناصر باقیمانده + گوگرد و فسفر.