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

قسمت 2 - ویژگی‌های فیزیکی DRI

تأثیر خواص فیزیکی DRI بر ایجاد نرمه و افت درجه فلزی و اقدامات حفظ ارزش آن در حمل‌ونقل و ذخیره سازی

ترجمه: محمدحسین نشاطی

محصولات DRI به صورت واحدهای آهن‌دار با درجه فلزی بالا، عناصر باقیمانده کم برای عملیات فولادسازی ارزش فراهم می‌سازند. کیفیت محصول - و از این رو ارزش برای فولادساز - می‌تواند مستقیماً تحت تأثیر اتفاقات قبل از ذوب DRI قرار گیرد. میزان ارزش آن به حداکثر رساندن مقدار واحدهای آهن‌دار که به کوره ذوب می‌رسند با به حداقل رساندن نرمه و حفظ درجه فلزی محصول پس از تولید بستگی دارد.

محصولات DRI، مانند سایر اشکال آهن، قابلیت تنزل درجه در طول زمان را دارند، بخصوص اگر به طور درستی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی نشوند. فولادسازان در صورت اتخاذ اقدامات مناسب به میزان زیادی بر حفظ این کیفیت کنترل دارند. این مقاله به بررسی تأثیر خواص فیزیکی DRI بر مقاومت در برابر ایجاد نرمه و افت درجه فلزی و اقداماتی که می‌تواند برای حفظ ارزش DRI در طی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی انجام شود می‌پردازد.

خواص فیزیکی DRI

تمام اشکال DRI دارای ویژگی‌های شیمیایی مشابه هستند زیرا مستقیماً از گندله‌های اکسید آهن و کلوخه های (لامپ) سنگ آهن به دست می‌آیند. تفاوت اصلی ویژگی‌های فیزیکی آنها است (**جدول 1**) که منجر به تفاوت در رفتار در حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی و همچنین در هنگام تماس با آب می‌شود.

مشخصات	HDRI و CDRI	HBI
تراکم فله ای	1.6–1.9 t/m^3	2.4–2.8 t/m^3
تراکم ظاهری	3.5 t/m^3	5.0–5.5 t/m^3
اندازه اسمی	4–20 mm	30*50*110 mm
وزن	3–4 g	500–700 g
جذب آب (اشباع)*	12–15 درصد	3 درصد
نرمه (4- mm)*	5 درصد	1–3 درصد

* برای HDRI قابل استفاده نیست

جدول1. ویژگی‌های فیزیکی معمول محصولات DRI

اولین کارخانه‌ها فقط یک محصول DRI را تولید می‌کردند که قبل از تخلیه تا نزدیک به دمای محیط خنک می‌شد (CDRI). با افزایش تقاضا برای DRI در مناطقی که تولید DRI توجیه‌پذیر نبود، محصولی با قابلیت عالی حمل‌ونقل و ویژگی‌های حمل با مخزن مورد نیاز بود، که به عرضه آهن بریکت شده گرم (HBI) منتج شد. طی زمان، فولادسازان با EAF با کارخانه‌های DRI وابسته به خود (موارد مجاور یا نزدیک به کارگاه ذوب) خواستار راهی برای استفاده از گرمای موجود در DRI بلافاصله پس از فرآیند احیا بدون خنک‌سازی شدند، که به عرضه DRI گرم (HDRI) و راه‌هائی برای انتقال آن به کوره ذوب در نزدیکی دمای تخلیه آن منتج شد.

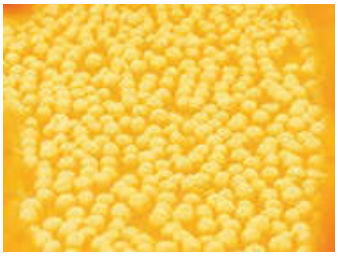
[1]- Maximizing Iron Unit Yield from Ore to Liquid Steel (Part 2), DFM 2020, Q1.

DRI سرد (CDRI)

اکثر کارخانه‌های احیای مستقیم ساخته شده تا به امروز CDRI تولید می‌کنند. پس از احیا، DRI در قسمت پایین کوره احیا تا حدود 50°C سرد می‌شود. به طور معمول، CDRI در یک کارگاه EAF در همان نزدیکی به عنوان بخشی از بار فلزی اولیه در سبد قراضه یا با تغذیه پیوسته استفاده می‌شود.

CDRI دارای ساختار اسفنج مانند (از این رو "آهن اسفنجی" نامیده می‌شود) شامل شبکه‌ای از منافذ متصل بهم، بسیاری از آنها با اندازه‌های میکروسکوپی می‌باشد، که مساحت سطح داخلی بزرگی را ایجاد می‌کنند. اندازه گیری‌ها مساحت سطح $1\ m^2/g$ را نشان می‌دهند که تقریباً 10000 برابر بیشتر از کره‌های توپر با اندازه یکسان است. این مساحت سطح بزرگ احیای سنگ آهن به DRI را تسهیل می‌کند؛ اما، مستعد ایجاد نرمه‌های قابل‌توجهی در طی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی بوده و واکنش‌پذیری با اکسیژن را در هنگام قرار گرفتن در معرض هوا و آب تقویت می‌کند. بنابراین، برای جلوگیری از اکسید شدن (زنگ زدگی) و اتلاف درجه فلزی، CDRI باید خشک نگه داشته شود.

DRI گرم (HDRI)



این شکل از DRI به فولادساز امکان می‌دهد تا از گرمای محسوس (انرژی حرارتی که انتقال آن به یا از یک ماده به تغییر دما منتج می‌شود) برای افزایش بهره‌وری و/یا کاهش هزینه‌های تولید استفاده کند. HDRI، که از قبل بالاتر از دمای اشتعال است (>200°C)، در صورت تماس با هوا می‌سوزد؛ بنابراین، هنگام حمل و انتقال آن از کارخانه DRI به کارخانه فولاد باید توجه کرد.

HDRI را می‌توان از کوره ستونی میدرکس در دمای تا 650°C با یکی از سه روش زیر به کارخانه فولاد منتقل کرد: نوار نقاله محصور و عایق، مخزن حمل‌ونقل مخصوص طراحی شده یا HOTLINK®، سیستمی برای تغذیه مستقیم HDRI به EAF. برخی از کارخانه‌های HYL به سیستم انتقال پنوماتیک برای جابجائی DRI گرم مجهز شده‌اند.

آهن بریکت شده گرم (HBI)

HBI با فشرده‌سازی گندله و کلوخه (لامپ) DRI تحت فشار بسیار بالا در دماهای بیش از 650°C، هنگام خروج از کوره احیا تولید می‌شود. فشار باعث بسته‌شدن حفره‌های اصلی، افزایش چگالی و کاهش سطح داخلی DRI می‌شود. در نتیجه، HBI به میزان 75 درصد آب کمتری از CDRI جذب می‌کند و نرمه کمتری نیز ایجاد می‌کند، که آن را به محصول DRI تجاری ترجیحی مبدل می‌سازند.

ویژگی‌های فیزیکی ارتقا یافته آن به HBI قابلیت ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل بدون احتیاطات خاص تحت کد حمل‌ونقل مواد جامد فله سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) را می‌دهد. اندازه و چگالی HBI آنرا به ماده خوراک مطلوبی برای EAF، کوره بلند (BF) و کوره بازی اکسیژنی (BOF) تبدیل می‌سازد.

هر محصول DRI، بدون توجه به نحوه ساخت آن، برای حفظ ارزش آن به ملاحظات ویژه‌ای نیاز دارد. بنابراین، بهره‌دهی و درجه فلزی از عوامل اصلی تعیین ارزش DRI هستند. علاوه بر این، نگرانی‌هایی در مورد ایمنی وجود دارد که در صورت عدم توجه می‌توانند تاثیر منفی بر درآمد ویژه مصرف‌کننده بگذارند. اینها عواملی هستند که برای هر سه محصول DRI در طی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی کاربرد دارند؛ اما، راه‌های پرداختن به این موضوعات برای هر محصول خاص DRI تا حدی متفاوت است.

حمل‌ونقل DRI

انتخاب و طراحی سیستم تجهیزات حمل‌ونقل مواد تأثیر زیادی بر میزان نرمه ایجادشده در طی حمل‌ونقل دارد. هزینه ایجاد نرمه باید در هنگام ارزیابی گزینه‌های تجهیزات مورد بررسی قرار گیرد. هزینه سالانه بهره‌برداری از یک سیستم با طراحی ضعیف و با تلفات زیاد حمل‌ونقل، سرمایه‌گذاری برای کاهش تلفات بهره‌دهی را تجویز می‌کند، و برگشت سرمایه/ROI می‌تواند بسیار سریع باشد. برای نمونه، یک سیستم حمل‌ونقل DRI را در نظر بگیرید که 1.6 میلیون تن محصول در سال را منتقل می‌سازد. هر 1 درصد تلفات مواد در اثر ریزش یا شکستگی منجر به اتلاف مبلغ 5600000 دلار در سال با قیمت 350 دلار بر تن DRI خواهد شد. ایجاد نرمه در طرف حمل‌ونقل سنگ معدن یک کارخانه معمول DR می‌تواند بین 2 درصد تا بیش از 5 درصد باشد. ایجاد و ریزش نرمه‌ها در طرف حمل‌ونقل DRI می‌تواند از 3 درصد تا 7 درصد باشد. این تلفات به میزان زیادی بر هزینه‌ها می‌افزایند و فرصت قابل‌توجهی را برای سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌هایی ارائه می‌دهند که از تلفات جلوگیری نموده یا این مواد را بازیابی می‌کنند.

برای محافظت از کیفیت محصول، باید به تفاوت درجه‌ها برای هر محصول توجه کرد. به عنوان یک قاعده کلی، مصرف‌کنندگان باید سعی کنند هرگونه حمل‌ونقل غیرضروری محصول را به حداقل برسانند. سیستم حمل مواد باید برای حداقل تعداد نقاط جابجا کردن [مثلا از یک نوار به نوار دیگر] مورد نیاز برای انتقال مواد از نقطه A به نقطه B و با کمترین تعداد سقوط طراحی شود. آسانترین راه برای به حداقل رساندن تعداد نقاط جابجا کردن، حمل مواد در امتداد مستقیم‌ترین مسیر ممکن است. اما، باید مراقب بود که در تلاش برای حذف تمام نقاط جابجا کردن، اندازه‌گیری و کنترل خوراک به خطر نیفتد. ریزش از نوار نقاله‌های بیش از حد بارگیری شده ممکن است موجب تلفات مواد بیشتری نسبت به شکستگی از طریق نقاط اضافی منتقل کردن یک خوراک دهنده (فیدر) شود.

یک سیستم معمول حمل‌ونقل DRI برای کارخانه DRI وابسته به خود [داخلی] ممکن است شامل عملیات فهرست‌شده زیر باشد.

CDRI و HBI

- حمل/انتقال CDRI به سیلوهای ذخیره‌سازی
- تخلیه/برداشت CDRI از سیلوهای ذخیره‌سازی
- حمل/انتقال CDRI یا HBI به محل ذخیره کوتاه مدت در کارگاه ذوب EAF
- برداشت CDRI یا HBI از محل ذخیره کوتاه مدت
- حمل/انتقال CDRI یا HBI به EAF
- شارژ CDRI یا HBI به EAF

HDRI

- تخلیه HDRI از کوره احیا به سیستم حمل پنوماتیک، نوار نقاله عایقکاری‌شده حمل گرم یا مخازن حمل گرم عایقکاری شده
- حمل/انتقال HDRI از کوره احیا به کارگاه ذوب با EAF
- شارژ HDRI به EAF از سیستم پنوماتیک، نوار نقاله یا مخازن حمل عایقکاری‌شده
- تغذیه ثقلی مستقیم HDRI از کوره احیا به کارگاه ذوب EAF (اگر تجهیز شده باشد)

تلفات بهره‌دهی در طی حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی از نواحی زیر ناشی می‌شود:

- ریزش مواد از نوار نقاله‌ها و تجهیزات متحرک حمل‌ونقل
- شکستگی و تنزل درجه مواد در نقاط جابجا کردن و از طریق تجهیزات متحرک حمل‌ونقل

- ذخیره و برداشت مواد
- تلفات غبارگیری، شامل آتش سوزی
- تنزل درجه در طول مدت ذخیره‌سازی

شکستگی و ریزش

در طی حمل‌ونقل محصولات DRI، شکستگی و ریزش می‌تواند تلفات قابل‌توجه محصول را در بر داشته باشد. تلفات حمل‌ونقل می‌تواند بیش از تاثیر کل آهن محتوی یا گانگ محتوی بر بهره‌دهی کل از سنگ آهن تا فولاد مذاب باشد. اما، تلفات حمل‌ونقل اغلب توسط نواحی عملیاتی مختلف جذب می‌شود و در کل برای آنها حساب نمی‌شود.

گندله‌های CDRI مستعد شکستن به خرده‌ها و ایجاد گردوغبار پرآهن در طی حمل‌ونقل و بین انواع مختلفی از انبارها (انباشته‌های پوشیده در فضای باز، سیلوها و انبارها) هستند. یک تخمین مکررا نقل شده برای شکستگی CDRI ناشی از حمل‌ونقل تلفات 0.25 درصد به ازای هر 2 متر سقوط است. این عدد می‌تواند برای مواد ضعیف‌تر، سقوط‌های طویل‌تر یا انتقالات ضعیف طراحی شده بسیار بزرگتر باشد. نرمه‌ها و خرده‌های تولیدشده در طی حمل‌ونقل خیلی سریع‌تر از محصولات سالم DRI اکسیده می‌شوند. یک عدد محافظه‌کارانه 15 درصد تلفات برای فراکسیون مواد 6.35 mm پس از قرار گرفتن در معرض ذخیره‌سازی (روباز) برای مدت یک ماه است.

تعیین آنچه که خرده‌ها، نرمه‌ها و گردوغبار را تشکیل می‌دهند اغلب جای بحث دارد. بسیاری از مصرف‌کنندگان نهایی میزان نرمه‌های درشت (~3mm)، گردوغبار یا مواد غیراصلی را جویا خواهند شد. بسته به سیستم حمل‌ونقل مواد واحد مصرف‌کننده و سیستم غبارگیر در کوره ذوب، ممکن است امکان بازیابی بسیار کم یا صفر این مواد وجود داشته باشد. موادی که کارخانه DR را به صورت "خرده و نرمه" ترک می‌کنند احتمالا به خرد شدن تا گردوغبار در سراسر حمل‌ونقل، انباشت، و برداشت بعدی ادامه مسیر می‌دهند. سرندکردن مؤثر خرده‌ها و نرمه‌ها در اندازه‌ای که در عملیات نهائی فولادسازی انجام می‌شود، عامل مهمی در تولید محصولات DRI "با کیفیت بالا" است. پس از جداسازی این مواد زیر سرندی (زیر اندازه مطلوب) توسط سرندکردن، یک روش بازیابی اقتصادی باید شناسایی و اجرا شود.

اگرچه HBI ماده‌ای بسیار با دوام‌تر از CDRI است، اما هنگامی که کیفیت آن پائین باشد و/یا اگر به صورت بسیار خشن حمل‌ونقل شود در معرض شکستگی قرار دارد. مشتریانی که HBI تجاری خریداری می‌کنند، انتظار دارند که بیشتر بریکت‌ها سالم و مقادیر خرده‌ها و بریکت‌های شکسته محدود باشند. HBI می‌بایستی پایدارتر از DRI باشد، آسانتر از آن حمل‌ونقل شود، و بسیار کمتر از DRI گردوغبار ایجاد کند. HBI همچنین تا حدی فرصتی را برای بازیافت خرده‌های فلزی، نرمه‌ها و گردوغبار برای برگشت به دستگاه‌های بریکت‌زنی گرم فراهم می‌کند. مقادیر اندک نرمه‌های فلزی سودمند است، اما مقادیر زیاد می‌تواند عملیات بریکت‌زنی را پیچیده کند و در صورت ضعف در کنترل بازچرخانی (بازیافت) نرمه‌ها می‌تواند استحکام HBI حاصل را کاهش دهد.

HDRI را می‌توان از کارخانه DRI به کارگاه ذوب توسط مخازن حمل، نوار نقاله‌های حمل گرم یا حمل پنوماتیک، بسته به فاصله بین کارخانه DRI و کارگاه ذوب یا با تغذیه ثقلی مستقیم در صورت اتصال نزدیک کوره احیا (میدرکس HOTLINK) و EAF منتقل کرد. سیستم‌های مخزن حمل گرم از مخزن‌های عایقکاری شده نوع پاتیلی استفاده می‌کنند که بر روی کامیون‌های کف تخت حمل گردیده و در صورت تأخیر کارگاه ذوب در پذیرش HDRI، می‌توانند در دمای بالا نگهداری شوند. سیستم‌های حمل پنوماتیک از گاز استفاده می‌کنند تا DRI را با سرعت بالایی از طریق لوله‌ها به EAF یا خنک‌کننده محصول بدمند. سرعت بالا و تلاطم ناشی از آن می‌تواند باعث شکستگی و فرسایش قابل‌توجه HDRI بخصوص در خم‌های موجود در خط پنوماتیک شود. این روش می‌تواند منجر به ایجاد نرمه به زیادی 10–8 درصد شود. سیستم‌های نوار نقاله گرم با استفاده از باکت‌های نقاله محصور کمتر جنجال‌برانگیز هستند و به میزان زیادی ایجاد نرمه‌های HDRI را کاهش می‌دهند.

بیشترین شکستگی در نقاط جابجا کردن و مراحل انباشت و برداشت اتفاق می‌افتد. یک تخمین مکررا بیان شده برای شکستگی در حمل‌ونقل DRI، رقم 0.25 درصد تلفات برای هر 2 متر سقوط مواد می‌باشد. این عدد می‌تواند برای مواد ضعیف‌تر، سقوط‌های طویل‌تر یا گذرگاه‌های ضعیف طراحی‌شده بسیار بزرگتر باشد. در حقیقت، امکان داشتن شکستگی به زیادی 2.5 درصد از یک نقطه جابجا کردن منفرد در صورت عدم‌توجه به این مسائل وجود دارد. همچنین مقدار شکستگی برای گذرگاه‌های خوب طراحی‌شده، تقریباً بدون در نظر گرفتن ارتفاع سقوط، می‌تواند بسیار کمتر باشد.

برای یک سیستم موجود حمل‌ونقل مواد گندله اکسیدی یا DRI، موارد زیر مهم است:

(1) مقدار شکستگی مواد در هر مرحله یا گذرگاه در سیستم را تعیین کنید،

(2) یک تجزیه سرندی از نمونه‌ها در سراسر سیستم حمل‌ونقل مواد انجام دهید، و

(3) از این داده‌ها برای اولویت‌بندی گذرگاه‌های مشکل و اصلاح آنها استفاده کنید.

برای یک سیستم انتقال مواد جدید، هدف طراحی باید حداقل تعداد نقاط جابجا کردن مورد نیاز برای انتقال مواد از نقطه A به نقطه B باشد. هر جا که نقاط جابجا کردن لازم باشند، ناودان‌ها یا گذرگاه‌های مواد با دقت مهندسی شده می‌توانند شکستگی، گرد-وغبار و ریزش را به حداقل برساند.

آسانترین راه به حداقل رساندن تعداد نقاط جابجا کردن، حمل مواد در مسیر مستقیم است، اما این کار همیشه هم ممکن نیست. اندازه‌گیری دقیق و کنترل خوراک برای جلوگیری از ریزش از نوار نقاله‌های بیش از اندازه بارگیری‌شده مهم هستند، حتی اگر یک نقطه جابجا کردن اضافی برای دستیابی به آن کنترل لازم باشد. انتخاب تجهیزات می‌تواند بر تعداد نقاط جابجا کردن مورد نیاز تأثیر بگذارد. یک مثال خوب انتخاب یک نوار نقاله لوله‌ای (**شکل 1**) نسبت به یک مجموعه نوار نقاله‌های مقعر (troughed) معمولی است. نوار نقاله لوله‌ای به صورت نوار نقاله مقعر معمولی در منطقه بارگیری مواد شروع می‌شود، سپس نوار نقاله درون یک لوله که کاملاً اطراف مواد را احاطه کرده است به دور خود پیچیده می‌شود. نوار نقاله در انتهای تخلیه باز می‌شود، سپس برای مسیر برگشت مجددا به دور خود پیچیده می‌شود. با پیچیده شدن نوار نقاله در لوله، برای نوار نقاله لوله‌ای امکان چرخش عمودی و افقی وجود دارد، در حالی که نوار نقاله مقعر معمولی فقط می‌تواند خمهای ساده عمودی را انجام دهد. نوار نقاله‌های لوله‌ای تکنولوژی جدیدی نیستند، اما برای انتقال مواد گردوغباری، دانه‌ای (گرانول) یا گندله‌شده مانند گندله‌های DRI و اکسید بسیار موثر هستند.

شکل 1. نوار نقاله لوله‌ای [1]، [2].

به علت اینکه نوار نقاله‌های لوله‌ای چرخش افقی دارند، می‌توانند نقاط جابجا کردن را حذف کنند. علاوه بر این، نوار نقاله‌های لوله‌ای نسبت به نوار نقاله‌های معمولی ریزش کمتری دارند. چکیدن از مواد برگشتی در طرف برگشت فقط قسمت سر و ته را در بر می‌گیرد. به دلیل اینکه ماده حمل‌شده در نوار نقاله پیچیده می‌شود، حتی در یک نوار نقاله در شرایط بیش از حد پر شده، ریزش مواد به سر و ته محدود می‌شود.

چون گندله‌های DRI سرد و گندله‌های اکسید کروی هستند، می‌توانند دچار غلتش به پائین روی قسمت‌های شیبدار نوار نقاله گردند به صورتی که مواد خوراک از ته پائین (نوار) خارج شوند. در شرایط عادی نوار نقاله پر، مواد روی قسمت شیبدار نوار نقاله توسط مواد پشت خود نگهداشته می‌شوند. هنگامی که خوراک‌دهی مواد متوقف می‌شود، آخرین بخش از مواد روی نوار نقاله دیگر در محل خود نمی‌ماند و تمایل به غلتش به پائین بر روی نوار نقاله شیبدار خواهد داشت. سرانجام، این مواد غلتان تمایل به پرش از طرفین نوار نقاله مقعر معمولی دارند. برای نوار نقاله‌ای با ظرفیت بالا که در آن خوراک‌دهی مواد به دفعات زیادی در روز شروع و متوقف می‌شود، نتیجه می‌تواند دهها یا حتی صدها تن ریزش در چند روز باشد. برای مورد نوار نقاله لوله‌ای، "غلتش به پائین" مواد

در هنگام توقف خوراک‌دهی مواد مهار می‌شود، تقریبا این مسئله ریزش را حذف می‌کند. **شکل2** انتقال CDRI در نوار نقاله لوله-ای را نشان می‌دهد.

ناودان‌های انتقال

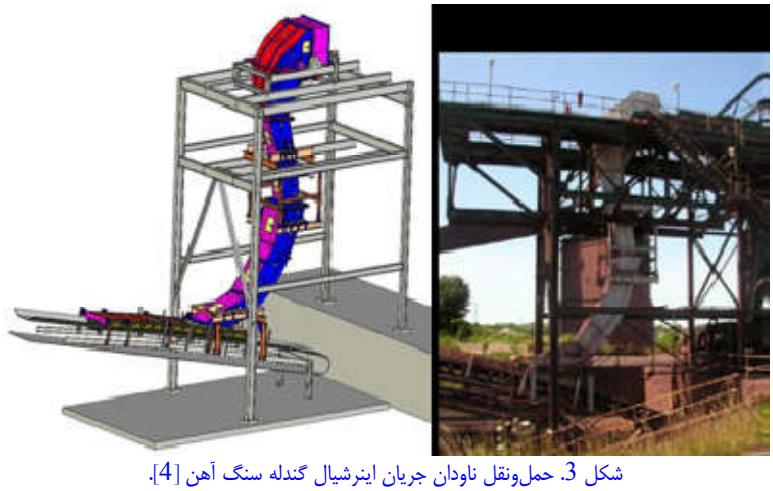
شکل 2. نوار نقاله لوله‌ای حمل CDRI [3].

ناودان‌های انتقال از اجزای ضروری سیستم حمل‌ونقل مواد هستند زیرا مواد باید بر روی آن بارگذاری شده و در برخی نقاط از نقاله ها تخلیه شوند. ناودان‌های انتقال با تغییر جهت تند و تأثیرات زیاد بر مصرف انرژی اغلب به صورت ضعیفی مهندسی شده‌اند. این مسئله عمده‌ای برای بسیاری از مواد فله نیست و گذرگاه‌های عملیاتی که یک نوار نقاله را به دیگری متصل می‌کنند کاملاً مقبول هستند. اما، نقاط جابجا کردن خشن منجر به شکستگی DRI، سایش سریع ناودان و ایجاد بیش از حد گردوغبار می‌شوند.

عقل متعارف در مورد ناودان‌های انتقال، "کم و آهسته"، به معنی حرکت آهسته نقاله با حداقل ارتفاع سقوط در انتقال نقاله به نقاله را دیکته کرده است. متاسفانه، این موضوع می‌تواند سبب برخی مشکلات شود، زیرا ارتفاع انتقال بسیار اندک، جای کمی را برای سیستم‌های تمیزکاری نوار نقاله (اسکریپر یا برس) باقی می‌گذارد. نقاط جابجا کردن کوتاه همچنین جای کمی برای جمع-آوری موادی که قرقره سر نقاله را ترک می‌کنند بر جای می‌گذارند و آنرا در جهت حرکت نوار نقاله دریافت‌کننده تغییر جهت می-دهند. نتیجه یک نقطه جابجا کردن است که در آن مواد به شکلی کاملاً نامنظم روی نوار نقاله گیرنده پرت می‌شوند. این می‌تواند مقدار زیادی فشار جانبی بر سیستم صفحات محافظ منطقه بارگیری وارد کند. حتی هنگامی که هدف رسیدن به کمترین ارتفاع ریزش ممکن از طریق یک انتقال است، یک حداقلی وجود دارد که اندازه آن توسط اندازه قرقره سر، ارتفاع سیستم صفحات محافظ نوار نقاله دریافت‌کننده و سایر ملاحظات تعیین می‌شود.

مواد با تنها 4.5 ft سقوط تا سرعت عمودی 1000 ft/min شتاب می‌گیرند. با تنها 4.5 ft ارتفاع برای کار با آن، دیگر فرصتی برای جمع‌آوری مواد در یک ناودان و کنترل سرعت و جهت آن وجود ندارد. در اکثر موارد، بهتر است از سقوط مواد کمی بلندتر استفاده شود تا فضای به خوبی مهندسی شده را برای سیستم تمیزکاری نوار نقاله و ناودان انتقال برای نوار نقاله دریافت کننده فراهم کند.

هدف از ناودان‌های مهندسی شده یا "جریان اینرشیال" کنترل سرعت و جهت جریان مواد از طریق نقطه جابجا کردن است (**شکل3**). کلیه "برخوردهای" مواد با پوشش ناودان زاویه بسیار کم و بنابراین انرژی کمی دارند. این هم شکستگی مواد و هم سایش ناودان را به حداقل می‌رساند. هدف از ناودان‌های جریان اینرشیال بارگیری مواد روی نوار نقاله دریافت-کننده، نزدیک به همان سرعت نوار نقاله دریافت-کننده و در همان جهت حرکت نوار نقاله است. این امر عملاً ریزش را حذف می‌کند و ایجاد گرد-وغبار در حوزه بارگیری را بسیار کاهش می‌دهد، همچنین باعث کاهش سایش و پارگی در خود



شکل 3. حمل‌ونقل ناودان جریان اینرشیال گندله سنگ آهن [4].

نوار نقاله می‌شود.

یکی از مهمترین عوامل دخیل در ایجاد گردوغبار در نقاط جابجا کردن، "جریان ایجاد شده از هوا" است. وقتی ذرات مواد در حالت سقوط آزاد قرار دارند، ذرات از یکدیگر جدا می‌شوند و هوا را به فضای بین ذرات می‌کشانند. هنگامی که مواد در داخل سیلوی دریافت‌کننده، بر روی نوار نقاله دریافت‌کننده یا روی ذخیره مواد انباشته برخورد می‌کنند، فضای بین ذرات از بین می‌رود و هوایی را که در هنگام سقوط آزاد با خود وارد کرده بود را بیرون می‌زند. این می‌تواند حجم هوای بیش از 10 برابر حجم هوای جابجا شده از حجم خود مواد ایجاد کند. این موضوع اغلب منبع اصلی خطا در تعیین اندازه تجهیزات جمع‌آوری گردوغبار است. کنترل سرعت و شکل جریان ماده از طریق ناودان انتقال خوب مهندسی شده می‌تواند مقدار جریان هوای ایجاد شده توسط نقطه جابجا کردن را به طور چشمگیری کاهش دهد.

ذخیره‌سازی و برداشت مواد

محصولات DRI تا حدودی شبیه میوه تازه هستند. گرچه آنها تاریخ انقضا ندارند، اما بهترین موقع مصرف آنها وقتی است که "تازه" باشند. مانند میوه، این کار ممکن است همیشه هم امکان‌پذیر نباشد، بنابراین احتمال دارد نیاز باشد محصولات برای حفظ کیفیت و ارزش خود در انبار قرار گیرند.

HDRI برای ذخیره‌سازی طولانی مدت در نظر گرفته نشده است اما در صورت نیاز می‌تواند بخش زیادی از گرمای خود را حفظ کند تا منتظر چرخه شارژ یا انتقال به کوره ذوب در همان مجاورت باشد. این یک گزینه موقتی در هنگام استفاده از مخازن حمل گرم است و در واقع گزینه‌ای در هنگام استفاده از حمل گرم با سیستم‌های پنوماتیک یا نوار نقاله‌های باکتی نیست.

ذخیره‌سازی رو باز

HBI به طور معمول روباز در انباشته‌های روباز ایجاد شده بر روی سطح محکم و به خوبی زهکشی شده انبار می‌شود. انباشته‌های فله HBI به دلیل ویژگی‌های خوب هدایت حرارتی و شکل و ریخت آن که حفراتی را در انباشته ایجاد می‌کند، تمایل دارد به سرعت حرارت از دست بدهد. HBI مانند آهن قراضه می‌تواند زنگ بزند. مشاهده شده است که زنگ‌زدگی درجه فلزی آنرا حتی در شرایط پرنمک، هوای مرطوب و بارندگی مکرر و سنگین باران تا کمتر از یک درصد در ماه کاهش می‌دهد.

CDRI در صورت عدم جابجایی تا زمانی که در کارگاه ذوب مصرف شود، می‌تواند به صورت ایمنی در انباشته‌های رو باز و به خوبی زهکشی‌شده انبار شود. باران تنها می‌تواند تا عمق معینی، به طور معمول کمتر از یک متر، در پشته نفوذ کند. گرچه خوردگی حاصل از آن، درجه فلزی را کاهش می‌دهد، همانطورکه در این مقاله توضیح داده شد، پشته نمی‌بایستی بیش از حد گرم شود مگر اینکه مواد اضافی منطقه مرطوب را بپوشاند. این پوشاندن به صورت لایه عایق برای آهن مرطوب عمل خواهد کرد و از خروج گرمای جمع‌شده جلوگیری می‌کند، که می‌تواند باعث بیش از حد گرم شدن انباشته و احتراق منجر شود.

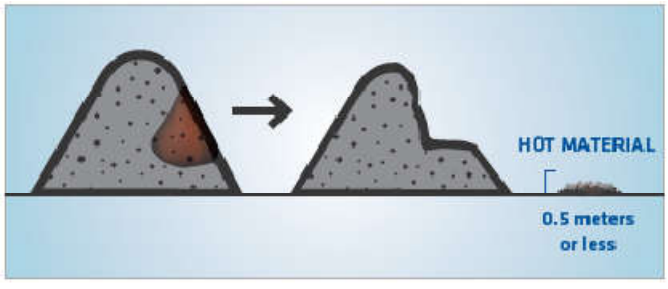
در هنگام ذخیره سازی روباز محصولات DRI باید اقدامات احتیاطی زیر را رعایت کرد:

- انباشته را روی سطح پایه محکمی مانند بتن ایجاد کنید و از زهکشی مناسب برای جلوگیری از نفوذ آب به زیر انباشته اطمینان حاصل نمائید. سطح پایه می‌بایستی محافظت از رطوبت موجود در زمین را فراهم سازد. یک طرح آب‌بندی با قطران، قیر یا سایر مواد غیرقابل نفوذ به آب می‌بایستی قبل از بتن‌ریزی، در کف اجرا شود.
- از نرمه زیاد در انباشته خودداری کنید.
- در مورد DRI سرد (CDRI)، انباشته را برای خشک نگهداشتن DRI و جلوگیری از جمع شدن هوا در انباشته بپوشانید.
- هر مقداری از DRI را که خیس شده یا دمای آن بیش از 65°C شده باشد جدا کنید و همان احتیاطات مربوط به مخازن و سیلوها را رعایت کنید.

یک انباشته DRI تا حدود 60°C/140°C گرم خواهد شد به طوری بخار آب تولید می‌کند اما با تبخیر آب دوباره تا دمای هوا سرد می‌شود. به طور معمول اگر انباشته در حال بخار کردن است تا زمانی که دما از 100°C تجاوز نکند، لازم نیست که اقدام اضافی انجام شود.

در موردی که انباشته DRI تا دماهای فراتر از 100°C گرم می‌شود، مواد باید از انباشته خارج شده و در لایه‌ای در حدود 0.5 متر با استفاده از بولدوزر یا لودر، همانطورکه در **شکل 4** نشان داده شده است، روی زمین خشک پخش شوند. روش دیگر دفن انباشته زیر ماسه یا مواد مناسب دیگر برای قطع تامین اکسیژن به آن است.

نکته مهم: در شرایط عادی آب نباید روی یک انباشته DRI بیش از حد گرم شده پاشیده شود. اما، به عنوان آخرین راه‌حل در صورت بروز آتش‌سوزی غیرقابل‌کنترل، انباشته باید با جریان آب قوی غرق آب شود. آتش‌نشانان باید برای بخار کردن شدید آب و شعله‌وری ناگهانی هیدروژن ناشی از چنین عملیاتی آماده باشند.



شکل 4. روش کنترل مواد گرم در یک انباشته ذخیره سازی.

مخزن‌ها و سیلوهای ذخیره‌سازی

مخزنها و سیلوهای ذخیره سازی برای محافظت از محصولات DRI در هنگام تاخیر زمانی بین ورود و زمانی که می توانند مصرف یا حمل شوند مورد استفاده قرار می گیرند. سیلوهای بد طراحی شده می توانند مشکلات عملیاتی ایجاد کنند و کیفیت محصول را کاهش دهند. طراحی سیلوها باید همیشه بر اساس خصوصیات جریان مواد جامد فله ای که ذخیره‌سازی می‌شوند، تعیین شود. هزینه آزمایش و طراحی سیلو در مقایسه با هزینه‌های تولید از دست رفته، مشکلات کیفیت و مقاوم‌سازی که ممکن است به دلیل الگوهای جریان نامنظم مورد نیاز باشد اندک است.

اقدامات احتیاطی زیر برای هنگام ذخیره‌سازی محصولات DRI در مخزن‌ها و سیلوها توصیه می‌شوند:

- DRI در دمای بیش از 65°C نباید به مخزن یا سیلوی ذخیره‌سازی فرستاده شود. باید آنرا از تمام مواد دیگر جدا کرد و در ارتفاعی که از یک متر بیشتر نباشد [روی زمین] انباشته کرد.
- مخزن‌ها و سیلوها را باید دمش گاز بی‌اثر از پائین عاری از هوا نگهداشت.
- دریچه‌های کشویی بالائی باید بسته باشند بجز زمانی که DRI دریافت می‌شود.
- دریچه‌های کشویی پایینی باید بسته باشند بجز زمانی که DRI تخلیه می‌شود.
- گاز بی‌اثر باید در طی مدت‌های طولانی ذخیره‌سازی به بالای مخزن یا سیلو وارد شود تا از فشار کمی مثبت در زمان بسته بودن دریچه‌های کشویی بالا و پایین اطمینان حاصل شود.
- برای اطمینان از اینکه سطح اکسیژن زیر 3 درصد است و هیدروژن تولید نمی‌شود، باید آنالیز دوره‌ای گاز [درون مخازن] انجام شود.
- دمای درون مخزن یا سیلو باید پایش شود. در صورت مشاهده دمای بالا (65–75°C)، مخزن یا سیلو باید درزبندی شده و از بالا گاز بی‌اثر دمیده شود تا خنک گردد. اگر دما از 90°C فراتر رود، DRI باید از مخزن یا سیلو بیرون برده شود.

کنترل گردوغبار و جلوگیری از آتش‌سوزی گردوغبار

جمع‌آوری گردوغبار برای عملیات ایمن و مطمئن سیستم‌های انتقال سنگ معدن و DRI ضروری است. در برخی مناطق ممکن است الزام مقرراتی نیز وجود داشته باشد. گردوغبار فراری DRI خطر بروز آتش‌سوزی را نشان می‌دهد و می‌تواند به آتش‌سوزی تجهیزات، آسیب به یاتاقان‌ها، آسیب به تجهیزات الکتریکی و غیره منجر شود. گردوغبار DRI قابل احتراق است و بایستی یک تجزیه‌وتحلیل دقیق از خطر گردوغبار برای اطمینان از رسیدگی درست به خطرات مرتبط با گردوغبار فراری و تجهیزات جمع‌آوری

گردوغبار انجام شود. مقررات مورد اجماع در آمریکا تدوین‌شده توسط NFPA [5]، [6]، [7]، دید کلی مفیدی را در مورد نحوه ارزیابی و کنترل گردوغبارهای قابل احتراق ارائه می‌دهند.

با جمع‌آوری گردوغبار در سیستم غبارگیر، آن سیستم ممکن است به محتمل‌ترین مکان برای بروز آتش‌سوزی یا انفجار گردو-غبار تبدیل شود. بسته به جانمائی سیستم، موادی که غبارگیری می‌شوند و پرتکاپوئی سیستم غبارگیر، سیستم ممکن است چند درصد از محصول را به صورت گردوغبار جمع کند. گردوغبار جمع‌آوری‌شده را می‌توان به محصول ارزشمندی تبدیل کرد، اگر خشک گرفته شود و سرد یا گرم بریکت گردد. بازیافت گردوغبار و نرمه‌های اکسید چالشی‌تر است و نیاز به تفکر خلاقانه دارد.

انواع مختلف تجهیزات غبارگیر وجود دارند که می‌توانند برای سیستم‌های حمل‌ونقل DRI/HBI و اکسید استفاده شوند. سیستم‌های جمع‌آوری مرطوب از قبیل گازشوی آبی (اسکرابر) از نوع ونتوری برای حمل‌ونقل گردوغبار DRI به طور کلی ذاتا ایمن تلقی می‌شوند، زیرا انفجار در سیستم ممکن نیست. آن روی سکه، مواد گرفته شده به شدت تخریب می‌شوند، زیرا به دوغاب یا لجن تبدیل می‌گردند. جداکننده‌های سیکلون خشک برای ذرات بسیار ریز (کمتر از 20 میکرون) بازدهی نسبتاً ضعیفی دارند، اما از آنها می‌توان همراه با اسکرابر مرطوب برای پیش-فیلتر کردن درصد زیادی از ذرات به صورت گردوغبار خشک استفاده کرد. جمع-آوری معمولی خشک (بر پایه فیلتر کردن) دارای بالاترین بازدهی فیلتر است و امکان گرفتن تقریبا 100 درصد گردوغبار را به صورت ماده خشک و قابل بازیافت فراهم می‌کند. جمع‌آوری بر پایه فیلتر کردن، در صورت استفاده نادرست در سیستم‌های DRI، قابلیت بالاتری برای آتش‌سوزی و انفجار دارد. یکی از تغییرات جمع‌آوری بر پایه فیلتر کردن، جمع‌آوری گردوغبار "الحاق‌پذیر" است. در این حالت، هر نقطه جابجا کردن مجهز به یک مخزن کوچک داخلی، با توان گرفتن گردوغبار است که گردوغبار گرفته شده در آن به جریان اصلی مواد تخلیه می‌شود. به دلیل اینکه این روش، کانال‌کشی، محصور کردن خود غبارگیر و تجمع یک جریان جداگانه گردوغبار را حذف می‌کند، ریسک انفجار بسیار کاهش می‌یابد. به علت اینکه گردوغبار به صورت یک جریان مواد جداگانه گرفته نمی‌شود، این روش بیشتر به عنوان مهار گردوغبار محسوب می‌شود تا جمع‌آوری گردوغبار. لازم به ذکر است که اگر همه گردوغبار فقط به کوره ذوب رانده شود، بازیابی آن گردوغبار ممکن است بسیار ضعیف باشد. تجزیه‌وتحلیل خطر گردوغبار ممکن است نشان دهد که برای مکان‌های مختلف راهکارهای متفاوتی مناسب هستند. برای مثال: تخلیه کوره و کنترل گردوغبار قبل از غیرفعال‌سازی ممکن است نیاز به اسکرابر مرطوب داشته باشد. جمع‌آوری بر پایه فیلتر کردن خشک ممکن است برای حمل-ونقل محصول CDRI پس از غیرفعال‌سازی یا برای حمل‌ونقل HBI مناسب باشد. جمع‌آوری الحاق‌پذیر ممکن است در نقاط جابجا کردن دور و مراحل حمل‌ونقل برای راندن گردوغبار به محلی که گردوغبار بتواند ایمن‌تر جمع‌آوری و کنترل شود مناسب باشد.

در نهایت، اگر گردوغبار چند درصد از کل مواد محصول را تشکیل دهد، باید طرحی برای بازیافت یا بازچرخانی آن مواد تدوین و اجرا شود. نرمه‌های فلزی DRI یا HBI می‌توانند مواد با ارزشی باشند در صورتی که بتوانند به طور اثربخشی بازیافت شوند. زمان برگشت سرمایه‌گذاری تجهیزات سرمایه‌ای برای بازیافت نرمه‌ها معمولاً بسیار سریع است. برای یک کارخانه HBI، بازچرخانی خرده‌ها و نرمه‌ها (حداکثر تا یک حدی) در فرآیند بریکت‌زنی گرم ممکن است. برای یک کارخانه تولیدکننده CDRI، نرمه‌های DRI می‌توانند به صورت مکانیکی یا پنوماتیکی به داخل کوره ذوب اگر در همان محل باشد تزریق شوند، اما می‌تواند فرآیند چالش‌برانگیزی باشد و در صورت انجام نادرست ممکن است به بازیافت زیاد نرمه‌ها به صورت فولاد مذاب منتج نشوند.

بریکت‌سازی سرد یک روش اثبات شده و اثربخش بازچرخانی گردوغبار و نرمه DRI به شکل مفید یعنی آهن بریکت شده سرد (CBI) است. بریکت‌سازی سرد مستلزم سرمایه‌گذاری است و با هزینه عملیاتی همراه می‌باشد. چالش‌های فنی برای تولید مداوم بریکت‌های سرد مستحکم با کیفیت بالا، از جمله انتخاب چسب وجود دارد. به دلیل اینکه بریکت‌های سرد به طور معمول از مقدار آهن کل پایین‌تری از DRI سرد یا HBI هم منشاء از همان سنگ معدن دارند، CBI به طور معمول نسبت به DRI یا HBI اولیه ارزش استفاده (VIU) کمتری برای فولادساز دارد.

بازچرخانی نرمه‌های اکسید در کارخانه DR چالشی‌تر از بازیافت/بازچرخانی نرمه‌های فلزی است. گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه زیادی برای بازچرخانی نرمه‌های اکسید در محل وجود ندارد. در بسیاری از موارد، نرمه‌های اکسید با کسری از قیمت خرید اصلی به طرف ثالث فروخته می‌شوند. برخی تلاش‌ها برای فشردن نرمه‌های اکسید (برای مثال بریکت) و به جریان انداختن آنها از طریق کوره ستونی احیای مستقیم انجام شده است، اما گزارش مفصلی در مورد اثربخشی این روش با انتشار عمومی در دسترس نیست.

تلفات بهره‌دهی در حین ذخیره‌سازی و برداشت مواد

انباشته‌های استاتیک HBI و DRI در هنگام قرار گرفتن در معرض عوامل بیرونی، دچار تخریب یا هوازدگی می‌شوند؛ آهن فلزی تمایل به بازگشت به اکسید و پوسته‌شدن دارد. تلفات زنگ‌زدگی بیشتر به لبه‌های انباشته محدود می‌شود: مطالعات نشان داده‌اند که مرکز انباشته HBI حتی پس از 6 ماه دچار تخریب زیادی نمی‌شود.

آب به صورت باران یا مه دریائی (ocean spray) قوی‌ترین تأثیر را خواهد داشت. توصیه می‌شود هرگاه که ممکن باشد DRI را در سیلوها یا ساختمان‌های سرپوشیده نگه دارید. حتی در یک ساختمان سرپوشیده، رطوبت زمین می‌تواند باعث اکسیدشدن DRI شود.

ذخیره‌سازی و برداشت سنگ آهن و DRI هر دو می‌توانند منبع عمده شکستگی و تلفات مواد باشند. لودرها تمایل به خرد کردن سنگ معدن و DRI دارند. دستگاه‌های برداشت نوع چرخ بیل (Bucket wheel) یا کشش زنجیری (drag chain) برای محوطه سنگ معدن گزینه بسیار بهتری هستند. برداشت ثقلی DRI بهترین گزینه، با کمترین میزان حمل‌ونقل است. عملیات پر کردن سیلوی DRI یا انبار مواد اولیه اغلب می‌تواند مستلزم سقوط آزاد بسیار بزرگ باشد. برای به حداقل رساندن خسارت در حین انجام عملیات پر کردن و تخلیه باید دقت ویژه ای بکار گرفته شود.

جمع‌بندی

ارزش DRI به بهترین وجه توسط نحوه کمک آن به تامین اهداف عملیاتی و بهره‌وری کسانی که از آن استفاده می‌کنند تعیین می‌شود. DRI باید دارای درجه فلزی بالا و کیفیت یکنواخت باشد. بنابراین، ضروری است که محصولات DRI در شرایط فیزیکی و شیمیایی تا حد ممکن نزدیک به تولید خود وارد کوره ذوب شوند.

آهن واکنش‌پذیر است و هنگام تماس با هوا (اکسیدشدن) و هنگام تماس با آب (خوردگی) زنگ می‌زند. در صورت عدم رعایت شیوه‌های مناسب، زنگ‌زدگی درجه فلزی DRI را ضایع می‌کند و می‌تواند در طی ذخیره‌سازی به موقعیت‌های خطرناک و ناایمن منجر شود.

خبر خوب این است که با اتخاذ برخی اقدامات احتیاطی کاملا مستند و رعایت شیوه‌های تدوین شده از چند دهه تجربیات صنعت، می‌توان این مواد را با حفظ کیفیت آنها – و در نتیجه ارزش آنها – حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی کرد.

منابع

[1] www.overlandconveyor.com/consulting/conveyor- consulting-services/pipe-conveyor.aspx
[2] www.pipeconveyor.com/Papers/History/History.htm
[3] www.dimisa.com/dm/Projects.html
[4] documentlibrary.flexco.com/W011_enUS_011_TWT_0114.pdf
[5] NFPA 652: Standard on the Fundamentals of Combustible Dust - 2019
[6] NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids - 2017
[7] NFPA 484: Standard for Combustible Metals- 2019