صنعت 4.0- تکامل فولادسازی هوشمند با کوره قوس الکتریکی[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

خلاصه

پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی هوشمند و تجزیه‌وتحلیل کامپیوتری با سرعت بالا، سریعا در حال تغییر وضعیت معمول فرآیند "مستقر" کوره قوس الکتریکی (EAF) با دقت کنترل شده، پیش‌بینی‌پذیرتر و بهینه شده در زمان واقعی (بلادرنگ) است. در این مقاله نمونه‌های عینی از کارخانه فولاد با استقرار مجموعه‌ای از تکنولوژی‌های نوآورانه که بهینه‌سازی دینامیک فرآیند را امکان‌پذیر کرده و باعث کاهش چشمگیر مصرف کل انرژی، افزایش بهره‌دهی و کاهش مدت زمان پاور-آن می‌شوند، ارائه گردیده‌اند. همچنین در مورد سنسورهای نوآورانه همراه با تحلیل داده‌های کامپیوتری که راه‌حل‌های خطشکن را برای مشکلات مزمن مانند تشخیص نشت آب و کنترل فرآیند دینامیک در هر مرحله از فرآیند ذوب و تصفیه ارائه می‌دهند، بحث شده است.

مقدمه

هدف صنعت 4.0 ایجاد کارخانه هوشمندی است که از ارتباط بسیار دیجیتالی شده بین تجهیزات تولید، سنسورها، شبکه‌های کنترل سطح 1 و 2، مدلهای کنترل فرآیند و رایانش ابری (cloud computing) هم در مراحل خاص فرآیند و هم در کل امکانات تولیدی استفاده می‌کند. نتیجه خالص اینکه امکان کنترل و بهینه‌سازی موثرتر هر مرحله از فرآیند را به روشی فراهم می-سازد که بصورت دینامیک با تغییر محدودیت‌های روزمره کارخانه مطابقت داشته باشد و در نتیجه هزینه‌های کل تولید و ناکارآمدی را به حداقل برساند.

این مقاله چشم‌اندازی برای صنعت 4.0 را بصورتی که از آن در ایجاد فرآیند فولادسازی "EAF هوشمند" استفاده می‌شود شرح می‌دهد. منظور این است که در این فرآیند "هوشمند" (iEAF®) کوره قوس الکتریکی بتواند بطور مداوم پایش و بصورت دینامیک کنترل گردد تا عملکرد بهینه بطور مداوم حفظ شود. علاوه بر این، iEAF با سیستم iMeltShop® صنعت 4.0 تنوا نیز تطبیق می‌کند تا اطمینان حاصل شود که تولید EAF برای تأمین محدودیت‌های تولید روزانه کارخانه هماهنگ شده و از این رو به نتیجه بهینه برای کل کارگاه فولاد دست می‌یابد [1].

هدف سیستم "گودفلو" اجرای یک راه‌حل EAF صنعت 4.0 است که بهبود مداوم صرفه‌جوئی‌ها و بهره‌دهی EAF را تامین می‌کند بر اساس:

- جایگزینی فرضیات و نادرستی‌های مربوط به آن با اندازه‌گیری‌های بلادرنگ فرآیند در مناطق بحرانی که از سنسورهای قوی و قابل‌اعتماد بدست می‌آیند.
- جایگزینی مدل‌های فرآیند آماری که مستعد انحراف بیش از حد هستند با نسل جدیدی از مدل‌های کنترل فرآیند بیشتر بر پایه ترمودینامیک و سینتیک که موازنه جرم و انرژی را به صورت بلادرنگ در بر می‌گیرند.
- ایجاد یک رابط دیجیتالی شده که تجهیزات فرآیند، سنسورها، شبکه‌های سطح 1 و 2 و مدل‌های کنترل فرآیند را به هم متصل می‌کند.

[1]- Industry 4.0 -The Evolution of Intelligent EAF Steelmaking, METEC 2019.

- استفاده از خدمات رایانش ابری برای ذخیره و تحلیل مقدار زیادی از داده‌های فرآیند از EAFها و کارخانه‌های متعدد در صورت اقتضا.
- استخدام تیمی از دانشمندان داده بسیار مجرب به همراه تکنیک‌های یادگیری ماشین برای توسعه مدل‌های کنترل فرآیند نسل 2 و 3 بهبود یافته و بهینه شده.
- نظارت مداوم بر عملکرد مدل؛ و
- فراهم آوردن تنظیم مجدد خودکار دینامیک مدل‌ها در صورت لزوم برای اطمینان از حفظ حداکثر عملکر در بلند مدت.

EAF هوشمند – مرحله 1 سنسورهای بحرانی

نصب سنسورهای قوی اولین قدم مهم در ایجاد یک راه‌حل قابل‌استفاده EAF صنعت 4.0 است. سنسورها اندازه گیری‌های واقعی را در مناطق فرآیند بحرانی انجام می‌دهند و در نتیجه از خطاهای کنترل و نادرستی‌هائی که می‌توانند هنگام استفاده از تخمین‌ها و فرضیات ایجاد شوند، جلوگیری می‌کنند. ترکیب گاز، جریان، دما و فشار گاز خروجی، اطلاعات با ارزش بلادرنگ لازم برای برقراری بلادرنگ موازنه جرم و انرژی EAF، برای کنترل بهینه مقدار و زمان‌بندی ورود انرژی شیمیایی و الکتریکی و برای کنترل بهینه انحرافات کوره فراهم می‌کند. در حالی که سنسورهای قابل‌اطمینان گاز خروجی در گذشته بسیار کمبود داشته‌اند، اکنون مجموعه کاملی از سنسورهای قوی تجاری را تولید شده است که این اندازه گیری‌های فرآیند بحرانی را ارائه می‌دهد.

(الف) آنالیز طیف کامل گاز خروجی:

تقریباً 100 درصد گاز خروجی EAF از 6 گونه تشکیل شده است؛ CO، CO_2، O_2، H_2، بخار H_2O و N_2. همانطورکه قبلاً بحث شد، دانستن این آنالیز طیف کامل گاز خروجی اهمیت دارد: برای کنترل پتانسیل اکسیژن EAF، برای کنترل دینامیکی مکش سیستم غبارگیر، برای امکان لنس زدن O_2 و تزریق کربن به صورت کارآمد، برای برقراری بلادرنگ موازنه جرم و انرژی و برای تشخیص بلادرنگ آب که همه با هم بطور چشمگیری بازدهی انرژی EAF را بهبود می‌بخشند، هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند، بهره‌دهی و بهره‌وری را ارتقا بخشیده و ایمنی را نیز بهبود می‌دهند [2].

بطور سنتی دو دسته تکنولوژی آنالیز گاز خروجی در فولادسازی با EAF مورد استفاده قرار می‌گیرند:

1. استخراجی
2. لیزرهای دیود قابل تنظیم در محل (TDL)

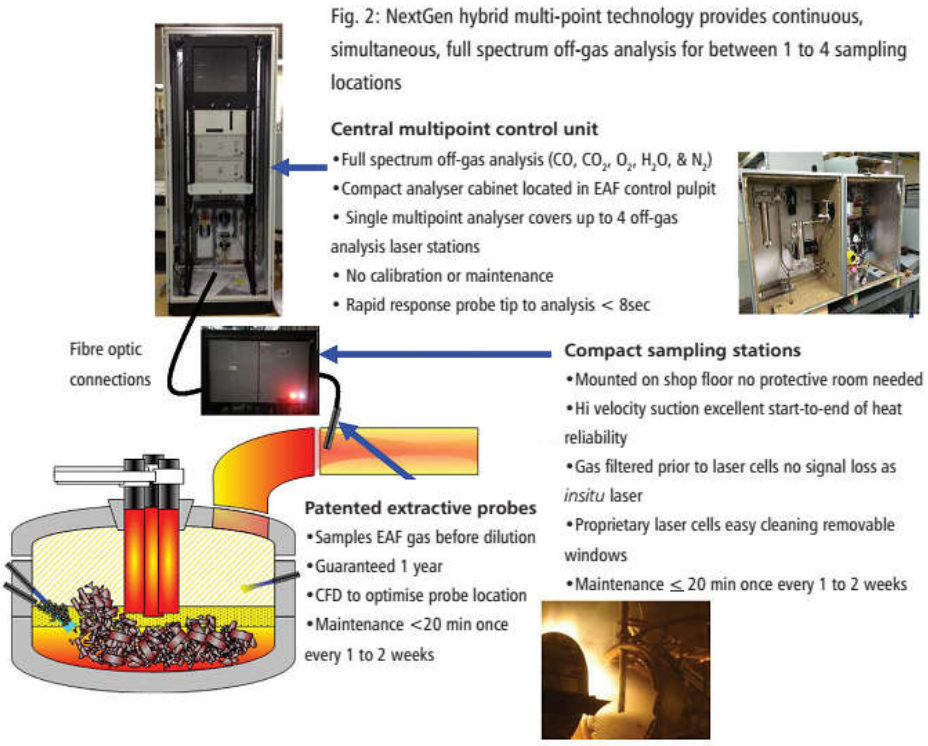
هر دو تکنولوژی حدود دو دهه قبل تجاری‌سازی شده‌اند اما هیچکدام راه‌حل کاملی برای آنالیز گاز خروجی در شرایط فرآیند فولادسازی تامین نکرده‌اند [3، 11].

در سال 2015، گودفلو اولین سیستم آنالیز ترکیبی (هیبریدی) استخراجی/لیزری گاز خروجی "نسل آینده" را توسعه داده و ثبت اختراع کرد [NextGen®] که به‌ویژه برای فرآیندهای خشن صنعتی مانند مورد فولادسازی با EAF و BOF طراحی شده است [3، 11]. تکنولوژی NextGen برای ترکیب قابلیت‌اطمینان عالی تکنولوژی استخراجی سنتی با زمان پاسخ سریع‌تر و هزینه‌های کمتر نصب سخت افزار لیزرهای دیود قابل تنظیم طراحی شده است (**شکل 1**).

برخلاف سیستم‌های در محل، تکنولوژی ترکیبی NextGen از استخراج گاز خروجی از طریق یک پروب بازطراحی شده مستقیما قرار گرفته در مخروط گاز خروجی EAF در حفره 4 استفاده می‌کند.

استخراج مثبت همچنان بهترین روش برای تضمین قابلیت‌اطمینان بالای سیستم و جلوگیری از اتلاف سیگنال‌های تجزیه‌ای (آنالیتیکی) است. ایستگاه(های) نمونه‌گیری فشرده استخراجی مستقیماً در سطح کارگاه ذوب و بدون نیاز به اتاق محافظ محیط زیستی نصب می‌شوند. یک خط کوتاه گرم‌شده ایستگاه نمونه‌گیری را به پروب نمونه‌گیری گاز متصل می‌کند. از آنجا که ایستگاه از نظر اندازه فشرده است، می‌توان آنرا در نزدیکی پروب قرار داد و در نتیجه فاصله فیزیکی و تاخیر زمانی مرتبط با حمل نمونه گاز

خروجی به سلول‌های آنالیتیکی را کاهش داد. واحد نمونه‌گیری استخراجی دارای پمپ سرعت بالا برای استخراج سریع و مداوم نمونه گاز خروجی از طریق پروب واقع در مخروط گاز خروجی خالص EAF جاری در کانال است. سپس واحد نمونه گاز را برای زدودن ذرات معلق قبل از آنالیز کردن فیلتر می‌کند. پس از آن گاز تمیز برای آنالیز مطمئن گاز خروجی برای CO، CO_2، O_2، H_2 و بخار H_2O به انواع مختلف سلول‌های لیزری و آنالیتیکی وارد می‌شود. استفاده از گاز خروجی فیلتر شده تمیز، باعث به حداقل رسیدن تعمیرونگهداری (نت) سلول آنالیتیکی می‌شود. همچنین گاز فیلتر شده تضمین می‌کند که هیچ قطعی سیگنال آنالیتیکی همانند مورد مربوط به لیزرهای در محل وجود ندارد. هر ایستگاه نمونه‌گیری استخراجی توسط کابل‌های فیبر/کواکس به یک کابینت کنترل مرکزی چند نقطه‌ای که اغلب در اتاق کنترل EAF قرار دارد متصل می‌شود. این واحد مرکزی از نظر فیزیکی مولدهای پرتوی لیزر را در خود جای داده است. این واحد مرکزی سیگنال‌های لیزر را بطور مداوم از طریق کابل فیبر نوری به سلول‌های آنالیتیکی ایستگاه نمونه‌گیری استخراجی می‌فرستد و سیگنال‌های برگشتی را با کابل کواکس دریافت می‌کند تا بطور پیوسته طیف کامل ترکیب شیمیائی گاز خروجی را برای CO، CO_2، O_2، H_2، بخار H_2O و N_2 آنالیز کند (بر حسب اختلاف از 100 درصد).



شکل 1: تکنولوژی هیبریدی استخراجی/لیزری چند نقطه‌ای NextGen

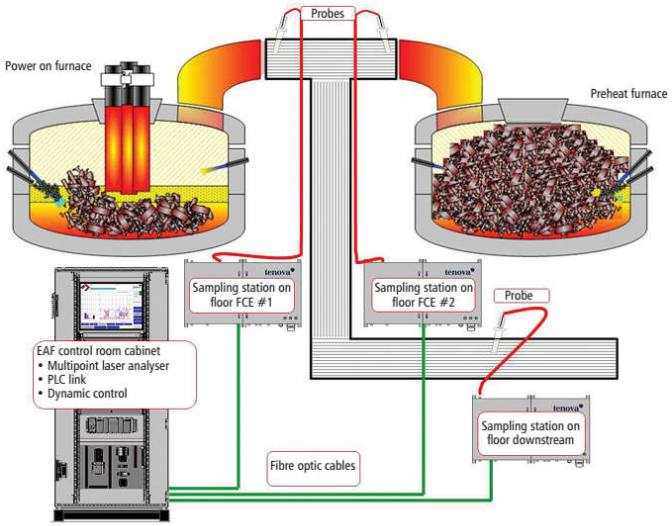
نکته مهم، این تکنولوژی از قابلیت‌های چند نقطه‌ای عالی برخوردار است و می‌تواند تا حداکثر 6 ایستگاه نمونه‌گیری استخراجی مستقل را متصل کند. از تقسیم‌کننده پرتو برای تقسیم سیگنال اصلی لیزر پرقدرت به چند پرتو پیوسته با قدرت پایین‌تر استفاده می‌کند. از آنجا که سیستم‌های لیزری در محل برای به حداقل رساندن قطع سیگنال‌ها به یک پرتو با توان کامل نیاز دارند، لازم است از یک سوئیچ نوری استفاده کنند تا بطور متوالی پرتوی اصلی با توان کامل را از یک مکان به مکان دیگر نشانه‌گذاری کند. به همین ترتیب، سیستم‌های لیزر در محل یک سری آنالیزهای جداگانه ارائه می‌دهند (8 ثانیه بین قرائت‌های جداگانه برای 2 مکان نمونه، 12 ثانیه برای 3 مکان نمونه و غیره). برای مقایسه، قدرت پرتو با NextGen جای نگرانی ندارد زیرا در هنگام استفاده از

گاز فیلتر شده هیچ‌گونه وقفه‌ای در پرتو وجود ندارد. از این رو، بصورت بی‌درز آنالیز گاز خروجی را بطور مداوم و همزمان از مکان-های متعدد نمونه‌گیری فراهم می‌کند.

این تکنولوژی برای کاربردهای نمونه‌گیری متعدد مناسب است – امکانات نصب شده از سال 2015 شامل موارد زیر است:

- 4 سیستم در پوسته EAF با شارژ بالا مجهز شده به آنالیز گاز خروجی بالادست و پایین‌دست [5]
- 3 سیستم در کارگاه‌های مجهز به کنورترهای BOF و AOD
- 8 سیستم در کارگاه‌های کوره‌های EAF از نوع Consteel، دو پوسته‌ای و ستونی [6،7]

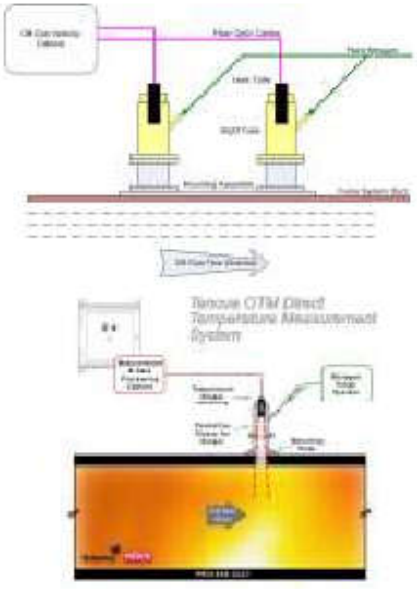
سیستم NextGen همچنین ایمنی اپراتور را به میزان قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد زیرا بصورت فیزیکی گاز خروجی در کابینت مرکزی وجود ندارد و در نتیجه نگرانی از نشت گاز CO در یک فضای محبوس مانند اتاق کنترل را از بین می‌برد.



شکل 2: تکنولوژی NextGen در کاربردهای چند نقطه‌ای

(ب) اندازه‌گیری جریان و دمای گاز خروجی:

محاسبات موازنه جرم و انرژی EAF به صورت بلادرنگ ابزار قدرتمندی برای کنترل فرآیند هستند اما به دانستن نه تنها درصد ترکیب گاز بلکه به جریان و دمای گاز خروجی نیز نیاز دارند. سنسورهای تماسی تعبیه شده در جریان گاز خروجی بطور سنتی برای نظارت بر جریان و دمای گاز خروجی استفاده می‌شوند. این سنسورهای تماسی می‌توانند متحمل سایش مکانیکی و تخریب حرارتی شوند که اغلب به موارد بیش از حد سایش، نگهداری‌وتعمیرات (نت) و خرابی سنسور منجر می‌گردند. به همین دلیل، این نوع از سنسورهای تماسی با نت زیاد اغلب بدون تعمیر رها می‌شوند که به نوبه خود در هنگامی که مقادیر فرض شده برای جایگزینی اندازه‌گیری‌های واقعی استفاده می‌شوند به خطاها و نادرستی‌های کنترل فرآیند منجر می‌گردند.



شکل 3: سنسورهای نوری تنوا OVM و OTM

برای رفع این مشکل، گودفلو اخیراً یک سری سنسورهای نوری و غیرتماسی اختصاصی را برای اندازه‌گیری جریان ("OVM") و دمای ("OTM") گاز خروجی توسعه داده و تجاری‌سازی کرده است (**شکل 2**).

OVM متشکل از دو سنسور نوری کوچک است که به درگاه‌های دید نوری در مجرای دود متصل شده‌اند. این سنسورها بطور مداوم الگوهای تابش در جریان دود را برای اندازه‌گیری سرعت گاز خروجی ردیابی می‌کنند. از آنجا که هیچ جزئی در تماس مستقیم با جریان گاز خروجی وجود ندارد، OVM به ویژه برای اندازه-گیری جریان گاز در دمای بالا ارزشمند است.

OTM یک سنسور نوری است که از روش نسبت طول موج برای اندازه‌گیری دمای گاز خروجی استفاده می‌کند. این طراحی به کمترین میزان نت نیاز دارد و از مشکلات نادرستی دما که غالباً با گرد و غبار بیش از حد بر روی لنزهای نوری

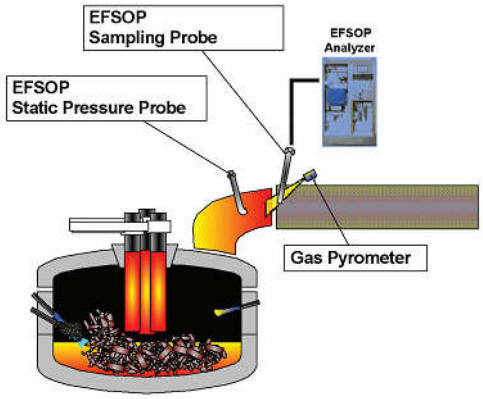
همراه است، جلوگیری می‌کند.

OTM در دو پیکربندی بصورت سنسور از راه دور یا بصورت سنسور درگاه دید در دسترس است (**شکل 3**).

(پ) اندازه گیری فشار استاتیک EAF:

فشار استاتیک EAF اندازه گیری مهمی برای کنترل مکش سیستم غبارگیر است. پروب فشار استاتیک اختصاصی ساخت گودفلو بر روی زانوئی (ال بو) کوره نصب شده و از نظر طراحی مشابه پروب آنالیز گاز خروجی NextGen است.

اثبات شده طراحی این پروب فشار بسیار مطمئن‌تر بوده و نیاز به نت کمتری نسبت به درگاه‌های فشار معمولاً نصب شده در سقف کوره دارد [4].



شکل 4: پروب فشار استاتیک اختصاصی تنوا

EAF هوشمند – مرحله 2 پایه

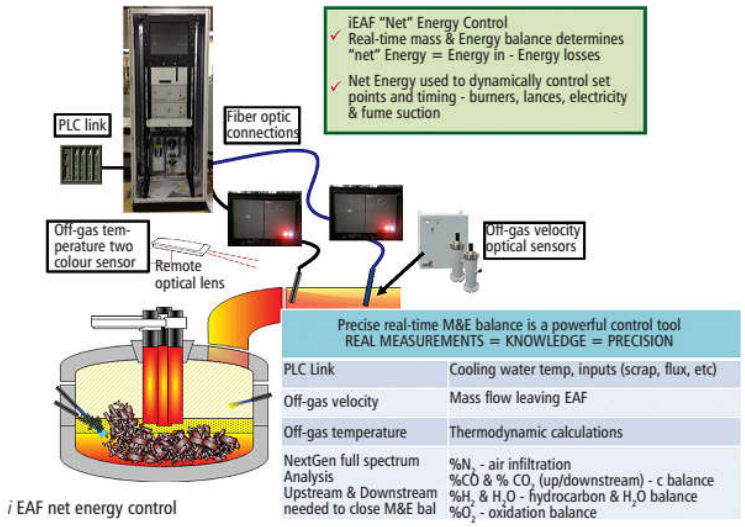
مدل‌های کنترل فرآیند موازنه جرم و انرژی (M&E)

کنترل EAF معمولی بر اساس "kWh/ton" است. با استفاده از این روش مرسوم، توالی و انتقال انرژی هر ذوب اساساً یکسان است و بدون در نظر گرفتن ورودی‌های انرژی شیمیایی، و تلفات انرژی و ناکارآمدی‌ها انجام می‌گیرد – "Kwh" توسط ترانسفورمر و "ton" توسط وزن شارژ تعیین می‌شود.

یک روش بهتر کنترل EAF با موازنه جرم و انرژی بلادرنگ است – در این حالت، زمان‌بندی و مقدار انرژی شیمیایی ("معادل kWh") و انرژی الکتریکی ("kWh") بصورت دینامیکی بر اساس حرارت ویژه [حرارت به ازای هر تن] انجام می‌شود که امکان کنترل "کل انرژی خالص واقعی" دریافت شده توسط شارژ پس از اتلاف انرژی و ناکارآمدی‌های فرآیند را می‌دهد [4،5،8].

تکنولوژی i EAF از سنسورهای بحرانی توصیف شده در بالا همراه با اتصال به شبکه سطح 1 و 2 کارخانه برای بدست آوردن اندازه‌گیری‌های مورد نیاز برای برقراری موازنه جرم و انرژی EAF بصورت بلادرنگ استفاده می‌کند. همانطورکه در **شکل-5** نشان داده شده است، چیدمان نصب شده معمول شامل موارد زیر است:

- یک کابینت کنترل NextGen منفرد متصل به ایستگاه‌های نمونه‌گیری بالادست و پایین‌دست
- سنسور نوری دمای گاز خروجی OTM
- سنسور نوری سرعت گاز خروجی OVM
- یک پروب فشار استاتیک EAF



شکل 5: چیدمان متداول سخت افزار i EAF®

i EAF از مدل‌های کنترل فرآیند پایه دربرگیرنده الگوریتم‌های ترمودینامیکی و سینتیکی و محاسبات موازنه جرم و انرژی استفاده می‌کند. هنگام استفاده از اندازه‌گیری‌های سنسور واقعی، تجربه نشان می‌دهد که مدل‌های پایه درجه بالاتری از دقت را نسبت به مدل‌های آماری که مستعد انحراف عملکرد با تغییر شرایط کار هستند ارائه می‌دهند.

i EAF با چند مدل کنترل فرآیند مستقل برنامه‌ریزی شده است که برای ارزیابی جنبه‌های مختلف فرآیند EAF بطور مستقل کار می‌کنند [4]. هر مدل به محاسبه کل "خالص انرژی" شیمیایی و الکتریکی تحویل شده به شارژ/حمام پس از اتلافات و ناکارآمدی‌ها کمک می کند:

مجموع سایر تلفات – مجموع تلفات گاز خروجی – مجموع انرژی الکتریکی شیمیایی + مجموع انرژی الکتریکی ورودی = کل خالص انرژی

کل خالص انرژی ثانیه به ثانیه از شروع تا پایان ذوب محاسبه می‌شود و برای کنترل دینامیک تمام ورودی‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. iEAF همچنین از کل خالص انرژی برای محاسبه پیشرفت ذوب کردن شارژ ("درصد MP") از 0 درصد MP در شروع ذوب کردن تا 100 درصد MP در شرایط حمام تخت کاملا ذوب شده استفاده می‌کند.

i EAF شامل 3 مدول کنترل است:

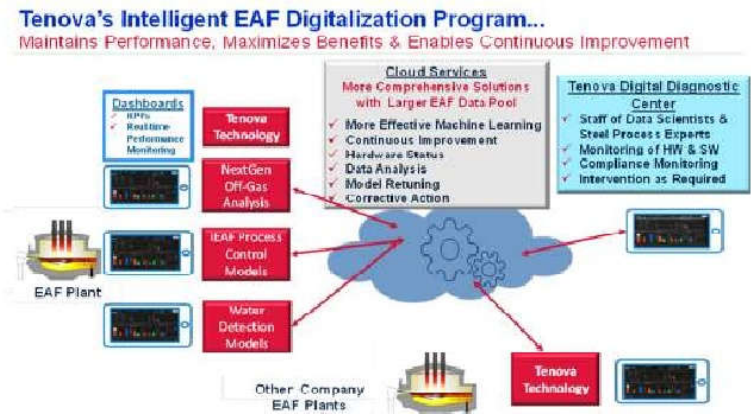
- **مدول 1**: مقدار انرژی شیمیایی ورودی در طی ذوب کردن را بر اساس آنالیز طیف کامل گاز خروجی NextGen، کنترل می‌کند.
- **مدول 2**: زمانبندی نشانه گذاری نقاط تنظیم شده انرژی شیمیایی و الکتریکی را در طی ذوب کردن بر اساس کل خالص انرژی تحویل شده به EAF پس از اتلاف کنترل می‌کند
- **مدول 3**: تحویل O_2 را در هنگامی که شرایط حمام تخت وجود دارد، تا رسیدن به نقطه هدف پایان برای درصد C، ppm O و دما کنترل می‌کند.

این کوره هوشمند شامل یک HMI تحت وب است که توسط کاربران مجاز در هر کامپیوتر شخصی، تبلت یا تلفن متصل به اینترنت قابل مشاهده است. این نرم‌افزار با معماری استثنائی باز پیکربندی شده است که امکان یک سطح بی‌نظیر سفارشی‌سازی کاربر را می‌دهد. این کوره همراه با الگوریتم‌های کنترل فرآیند تعبیه شده در آن برای تمام تجهیزات متداول EAF شامل مشعل‌ها، لنس‌ها، انژکتورها، فیدرهای پودر، کنترل الکتریکی و غیره است. این نرم افزار به کاربران مجاز در کارخانه امکان می‌دهد کد اضافی را به هر زبان برنامه‌نویسی که می‌تواند به عنوان کتابخانه گردآوری شود وارد کنند. به همین ترتیب، هر کارخانه می‌تواند نرم افزار پایه آنرا سفارشی‌سازی کند از جمله:

- اصلاح الگوریتم‌های موجود مدل کنترل فرآیند برای تأمین نیازهای خاص کاربر
- افزودن مدل‌های جدید کنترل فرآیند توسعه یافته توسط کاربر
- افزودن برنامه‌های کنترلی برای هرگونه تجهیزات EAF جدید یا غیرمعمول
- تغییر صفحه نمایش‌های موجود HMI، افزودن صفحه نمایش‌های جدید HMI، تولید گزارش و غیره برای تامین نیازهای خاص کاربر

جدول 1

	متوسط منفعت
برق	3.4- درصد
اکسیژن	2.2- درصد
گاز طبیعی	6.7- درصد
کربن کل	10.6- درصد
بهره وری	3.9+ درصد
بهره دهی	0.5+ درصد



شکل 6: برنامه دیجیتالی سازی تنوا برای حفظ و افزایش مزایای عملکرد طراحی شده است

از زمان معرفی، تعداد 13 سیستم iEAF نصب شده یا در حال اجرا در سراسر جهان است از جمله 7 مورد در آمریکای شمالی و 6 مورد در اروپا و خاورمیانه.

در حالی که نتایج کارخانه‌های مجزا ممکن است متفاوت باشد، متوسط منفعت عملکردی تکنولوژی iEAF در تمام واحدهای نصب شده در **جدول 1** خلاصه شده است:

EAF هوشمند – مرحله 3 دیجیتال‌سازی

آخرین مرحله در توسعه EAF هوشمند مرحله "برنامه دیجیتال‌سازی EAF" می‌باشد که توسط تیمی از دانشمندان داده‌ها و متخصصان فرآیند با استفاده از تکنولوژی ذخیره‌سازی داده‌های ابری و یادگیری ماشین برای نظارت و آنالیز عملکرد فرآیند EAF، توسعه مدل‌های بهبود یافته کنترل فرآیند و مدل‌های تنظیم مجدد دینامیک فرآیند پیاده‌سازی شده است.

مراحل 1 و 2 توضیح داده شده در بالا، یک رابط دیجیتالی در کارگاه EAF ایجاد کرده است که تجهیزات عملیاتی، سنسورهای بحرانی، شبکه‌های سطح 1 و 2 و مدل‌های کنترل فرآیند iEAF را برای دستیابی به کنترل فرآیند EAF بر پایه موازنه جرم و انرژی به هم متصل می‌کند.

NextGen Analyzer Dashboard

شکل 7: برنامه دیجیتال‌سازی تنوا بطور مداوم بر سلامت سخت‌افزار سیستم نظارت می‌کند، مثال داشبورد NextGen®

مرحله 3 دیجیتال‌سازی را با اتصال شبکه دیجیتالی شده کارخانه EAF توضیح داده شده در بالا به پلتفرم Microsoft® Azure Cloud کامل می‌کند.

در ماه مه 2017، تنوا وارد همکاری با شرکت Microsoft از جمله مشاوره استراتژیک و خدمات محاسباتی Azure cloud شد. Azure امنیت عالی داده‌ها و نیز جامع‌ترین مجموعه مورد قبول تامین-کنندگان ابر (cloud) را ارائه می‌دهد.

Water Detection Dashboard

شکل 8: برنامه دیجیتالی سازی تنوا بطور مداوم بر روی نرم افزار سیستم نظارت می کند، مثال داشبورد تشخیص آب

برنامه دیجیتال‌سازی طراحی شد برای:

- استفاده از خدمات رایانش ابری Azure برای ذخیره و آنالیز مقدار زیادی از داده‌های فرآیند و/یا تشخیص آب از چند EAF و کارخانه EAF در صورت لزوم.
- بکارگیری تیمی از متخصصان فرآیند بسیار آموزش دیده و دانشمندان علم داده‌ها برای استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای توسعه مدل‌های کنترل فرآیند بهبودیافته و بهینه شده نسل 2 و 3
- نظارت مداوم بر عملکرد مدل سخت‌افزار و فرآیند.
- تامین تنظیم مجدد دینامیک خودکار مدل‌های فرآیند در صورت لزوم، برای اطمینان از حفظ حداکثر عملکرد پایدار در طی مدت طولانی.

برنامه دیجیتال‌سازی EAF هوشمند در چهار زمینه اصلی متمرکز شده است:

1. نظارت مداوم بر سخت‌افزار سیستم NextGen برای شناسایی و هشدار سریع کارخانه در هنگامی که تجهیزات به سرویس و نت نیاز دارند (**شکل 7**)

2. نظارت مداوم و بهبود مدل‌های فرآیند iEAF برای پایداری و به حداکثر رساندن مزایای عملکرد عملیاتی در بلند مدت (**شکل 8**)

3. بهبود مداوم مدل‌های تشخیص آب NextGen برای به حداقل رساندن نشت‌های از دست رفته و هشدارهای کاذب در طی مدت طولانی [9،10]

4. تامین تنظیم مجدد دینامیک خودکار مدل‌های فرآیند و/یا مدل‌های تشخیص آب در صورت لزوم، برای اطمینان از حفظ حداکثر صرفه‌جویی پایدار در طی مدت طولانی.

نتیجه گیری

این مقاله چشم‌انداز تنوا برای صنعت 4.0 را بصورتی که این شرکت برای ایجاد یک فرآیند فولادسازی "EAF هوشمند" بکار می‌گیرد توصیف می‌کند. این برنامه برای ارائه بهبود مداوم و همترازی بهتر تکنولوژی/عملکرد بین کارخانه‌های جدا در شرکت‌های دارای چند سایت تولیدی طراحی شده است.

راه‌حل EAF هوشمند صنعت 4.0 شامل چند مرحله است:

- توسعه و نصب مجموعه‌ای از سنسورهای قوی و قابل‌اعتماد که اندازه‌گیری داده‌های فرآیند در مناطق بحرانی EAF شامل آنالیز طیف کامل گاز خروجی، جریان گاز خروجی، دمای گاز خروجی و فشار استاتیک EAF را ارائه می‌دهند.
- جایگزینی مدل‌های آماری فرآیند مستعد انحراف بیش از حد با نسل جدیدی از مدل‌های کنترل فرآیند ترمودینامیکی و سینتیکی پایه که موازنه جرم و انرژی در زمان واقعی را در بر می‌گیرند.
- ایجاد یک رابط دیجیتالی‌شده که تجهیزات فرآیند، سنسورها، شبکه‌های سطح 1 و 2 و مدل‌های کنترل فرآیند را به هم متصل می‌کند.
- استفاده از خدمات رایانش ابری برای ذخیره و آنالیز مقادیر زیادی از داده‌های فرآیند از چند EAF و سایت‌های تولیدی؛
- بکارگیری تیمی متشکل از متخصصان فرآیند بسیار آموزش‌دیده و دانشمندان داده که از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای ایجاد مدل‌های کنترل فرآیند نسل 2 و 3 بهبود یافته و بهینه‌شده استفاده می‌کنند
- نظارت مداوم بر عملکرد مدل؛
- تامین تنظیم مجدد دینامیک خودکار مدل‌ها در صورت لزوم، برای اطمینان از حداکثر عملکرد پایدار در طی مدت طولانی.

منابع:

[1] Vittorio Scipolo and Doug Zuliani: “Industry 4.0 Leading to the Evolution of Intelligent EAF Steelmaking”, AISTech 2018, Philadelphia Pa., May 7-10, 2018. https://www.researchgate.net

[2] Douglas J. Zuliani and Vittorio Scipolo; “The Importance of Full Spectrum Off-Gas Analysis for EAF Process Control, Optimization & Safety”, European Electric Steelmaking Conference, Venice May 2016. https://www.researchgate.net

[3] Doug Zuliani; “Next Generation Off-Gas Analysis” Steel Times International 41(3):33, April 2017. https://www.researchgate.net

[4] Joe Maiolo, Vittorio Scipolo and Paolo Clerici; “i EAF® Technology: Dynamic Process Control for the Electric Furnace”, Millennium Steel 2011, pages 60-68.

[5] Harish Iyer, Babak Babaei, Vittorio Scipolo and Cameron Cossette; “EAF Optimization using realtime Heat and Mass Balances at Nucor Steel Seattle”, AISTech 2017, Nashville Tn., May 8-11, 2017.

[6] Doug Zuliani, Vittorio Scipolo, Kyle Shoop and Paolo Stagnoli; “i Consteel® - A Top Charge EAF Revamping Strategy for Reducing Operating Costs, Energy & Particulate Emissions while Increasing Yield & Productivity”, ”, AISTech 2018, Philadelphia Pa., May 7-10, 2018. https://www.researchgate.net

[7] Andrew Spencer, Doug Zuliani, Avishekh Pal, Igor Todorovic and Vittorio Scipolo; NextGen® Multipoint Off-Gas Analysis at Steel Dynamics Inc. Butler In.”, AISTech 2017, Nashville Tn., May 8-11, 2017, https://www.researchgate.net

[8] Babak Babaei Ravandi, Vittorio Scipolo, Marcello Leali and Angelo Radoani; “i EAF® Technology: Recent Development and Result in IRO Italy”, AISTech 2016, Pittsburgh Pa., May 16-19, 2016.

[9] M. Luccini, V. Scipolo, D. Zuliani and L. Poli; “Water Leak Detection in EAF based on Tenova’s Off-Gas Technology: Recent Developments and Results in Lucchini RS, Lovere, Italy”, AISTech 2017, Nashville Tn., May 8-11, 2017. https://www.researchgate.net
[10] Harish Iyer, Vittorio Scipolo and Cameron Cossette; “EAF Water Detection at Nucor Steel Seattle using Tenova’s NextGen® Off-Gas Analysis Technology”, AISTech 2018, Philadelphia Pa., May 7-10, 2018
[11] D.J. Zuliani and V. Scipolo; “Advancements in Tenova’s NextGen® Off-Gas based Process Control Technology”; METEC 2019 Dusseldorf, Germany, June 25-29, 2019. https://www.researchgate.net