

تکنولوژی iEAF®: کنترل فرآیند دینامیک برای کوره قوس الکتریکی^۱

ترجمه: محمدحسین نشاطی

iEAF® یک سیستم اتوماسیون ابتکاری برای کنترل دینامیک و بهینه‌سازی کوره قوس الکتریکی (EAF) است که می‌تواند برای اهداف عملیاتی خاص کارگاه ذوب مناسب‌سازی شود. از مدل‌های ریاضی همراه با اطلاعات فرآیند در زمان واقعی برای محاسبه موازنه جرم و انرژی دینامیک استفاده می‌شود. این موارد به اپراتور اطلاعات مهم فولادسازی همانند انرژی خالص انتقالی به شارژ فلزی، درصد ذوب قراضه، ترکیب و دمای حمام و سرباره را ارائه می‌دهند. مدول‌های پیشرفته کنترل فرآیند از این اطلاعات برای بهینه‌سازی فرآیند از طریق کنترل حلقه بسته برای کنترل و سرعت EAF با توجه به کل انرژی ورودی استفاده می‌کنند.

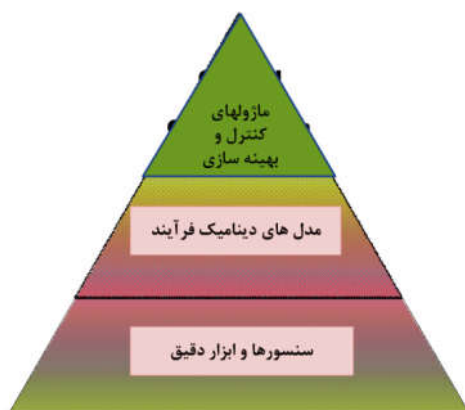
مفهوم و دید کلی فنی

کوره قوس الکتریکی هوشمند (iEAF®) یک سیستم اتوماسیون ابتکاری است که برای کنترل دینامیک و بهینه‌سازی EAF بر اساس اندازه‌گیری زمان واقعی ترکیب گاز خروجی کوره، ورودی دینامیک فرآیند و مدل‌های آنالیز فرآیند طراحی شده است. این سیستم رویکرد جامع تنوا برای کنترل و بهینه‌سازی EAF بر پایه سیستم EFSOP® آنالیز گاز خروجی در زمان واقعی را در بر می‌گیرد.

مزایای کنترل کوره و بهینه‌سازی بر اساس اندازه‌گیری گاز خروجی با استفاده از سیستم EFSOP بطور گسترده‌ای گزارش شده است [1-7]. بدون آنالیز گاز خروجی، اپراتورها باید به اطلاعات استاتیک فرآیند و مدل‌های فرآیندی بسیار ساده شده برای عملیات و کنترل EAF خود تکیه کنند. بکارگیری آنالیز زمان واقعی گاز خروجی بسیاری از تولیدکنندگان فولاد را به ابزاری برای شناخت دینامیکی فرآیند خود مجهز کرده است، اما مزایای ارائه شده توسط آنالیز گاز خروجی در اینجا تمام نمی‌شود.

iEAF از اطلاعات ارائه شده توسط سنسورهای موجود (در درجه اول ترکیب و دمای گاز خروجی)، برای تعیین اطلاعات مهم فولادسازی از قبیل سرعت اکسیداسیون و کربن‌زدائی، از مدل‌های فرآیند استفاده می‌کند. سپس این محاسبات مستقیم برای مدل‌سازی دینامیک حمام و سرباره مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اطلاعات برای دستیابی به بهبودهای فرآیند ضروری است و امکان تعیین فعالیت‌های کنترل مناسب بر اساس اطلاعات زمان واقعی فرآیند را فراهم می‌آورد.

کارگاه‌های EAF به انواع سیستم‌های مختلف اتوماسیون برای کنترل فرآیند، از جمله تنظیم الکترو، سیستم‌های کنترل بسته‌های شیمیایی و سیستم‌های کنترل سیستم غبار، مجهز شده‌اند. به ندرت یک سیستم یکپارچه برای کنترل EAF و سیستم‌های کمکی آن پیدا می‌شود. iEAF برای تلفیق کنترل و اتوماسیون کوره با هم طراحی شده است. بازخورد فرآیند ارائه شده توسط سنسورهای مختلف (برای مثال، آنالیز گاز خروجی، هارمونیک‌های الکتریکی، و جریان و ولتاژ)، برای پیش بردن فرآیند از



شکل 1- هرم مفهومی iEAF®.

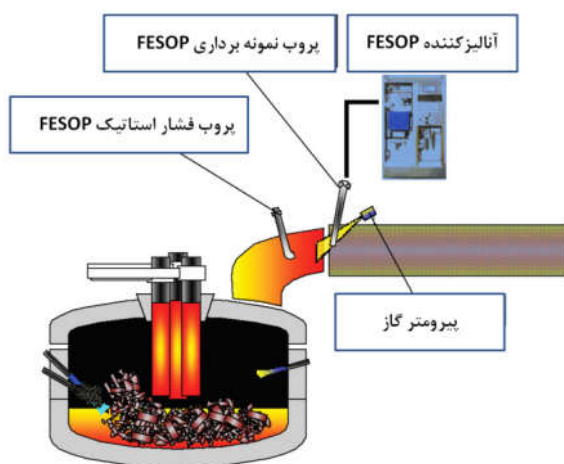
¹ - iEAF® technology: dynamic process control for the electric arc furnace, MILLENNIUM STEEL 2011.

طریق پارامترهای قابل کنترل در دسترس (مانند جریان‌های اکسیژن و سوخت مشعل، اکسیژن لسن‌زنی، تزریق کربن و تنظیم الکترو) بکار گرفته می‌شود.

از آنجا که تنوع زیادی از فرآیند EAF در بازار وجود دارد، برای مثال، روش معمولی شارژ قراضه با سبد، کوره ستونی شارژ پیوسته، کانستیل (Consteel®)، و بر پایه DRI یا بر پایه شارژ چند مذاب، مدل‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بدون توجه به نوع کوره قابل استفاده باشند؛ در عین حالی که تفاوت‌ها از طریق مدول‌های کنترل سفارشی شده که برای هر کاربرد متناسب شده‌اند، در نظر گرفته شده‌اند. در حالی که سازه اصلی کوره ثابت باقی می‌ماند، سخت افزار اتوماسیون، مدول‌های نرم‌افزار و ارتباطات با توجه به سیستم و شبکه اتوماسیون موجود هر مشتری قابل تنظیم می‌باشد.

بطور مفهومی، اجزاء هرمی را تشکیل می‌دهند که در آن هر سطح بر روی سطح قبلی برای ایجاد iEAF قرار می‌گیرد (شکل 1). سنسورهای آنلاین و مدل‌های یکپارچه ریاضی دانش فرآیندی پایه را فراهم می‌کنند که امکان کنترل پیشرفته فرآیند را ایجاد می‌نمایند. مدل‌های فرآیند اطلاعات اولیه را برای ارائه اطلاعات فرآیندی مورد استفاده برای کنترل EAF، بسط می‌دهند. جزئیات هر یک از این سطوح در بخش‌های زیر ارائه شده است.

سنسورها و ابزار دقیق



شکل 2- محل نصب سنسورهای اصلی در کوره.

اتوماسیون و کنترل EAF توسط بسیاری از چالش‌های همراه با بکارگیری سنسورهای فرآیند قابل اعتماد، با نگهداری و تعمیرات کم در محیط خشن محدود شده است. در پایه هرم iEAF سنسورها و ابزار دقیق؛ با سیستم آنالیز گاز خروجی EFSOP که یک جزء ضروری است قرار دارند. این سیستم شامل یک پروب نمونه-برداری خنک شونده با آب، یک خط نمونه گرم و آنالیزکننده EFSOP برای نمونه برداری، آماده سازی و آنالیز گاز خروجی کوره است. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده، پروب درست در پایین دست شکاف احتراق قرار گرفته و به گونه‌ای قرار دارد

که نوک آن در مخروط گازهای خروجی از EAF باشد. این امر اطمینان می‌دهد که نمونه گاز خروجی قبل از رقیق شدن و احتراق با هوای وارد شده به شکاف احتراق برداشته شده و بنابراین نماینده گازهای داخل کوره است. گازها بر پایه خشک برای CO₂، H₂ و O₂ آنالیز می‌شوند.

تعدادی سنسور دیگر برای استفاده در EAF توسعه داده شده یا تطبیق داده شده‌اند. شامل یک پیرومتر مادون قرمز که دمای گاز خروجی را در هنگام ترک کانال اولیه اندازه‌گیری می‌کند و یک پروب فشار برای اندازه‌گیری فشار استاتیک گازها در کانال اولیه. این پروب که به شیوه‌ای مشابه با پروب نمونه‌برداری EFSOP طراحی شده است، از پورت‌های معمولاً واقع در سقف کوره بسیار قابل اعتمادتر است و نیاز به نگهداری و تعمیرات کمتری دارد.

علاوه بر ابزار دقیق فوق، تعدادی از سنسورهای دیگر نیز توسعه یافته‌اند، که بالقوه می‌توانند بخشی از بسته iEAF باشند. این موارد عبارتند از:

- یک سیستم بر پایه لیزر برای تشخیص پیوسته موقعیت الکترو. از این اندازه‌گیری‌ها برای اهداف تشخیصی [عیب‌یابی] و یا برای بهبود عملکرد تنظیم استفاده می‌شود.
- یک سیستم بر پایه لیزر برای تعیین ارتفاع ته بار (پاشنه) مذاب و سرپاره کوره در شروع ذوب.

- سلول‌های وزن سنج، استاندارد در کوره‌های مجهز به تکنولوژی کانستیل، برای ارائه نشانگر دینامیک وزن کوره.
- اندازه‌گیری پیوسته سطح حمام از طریق پیرومتری.

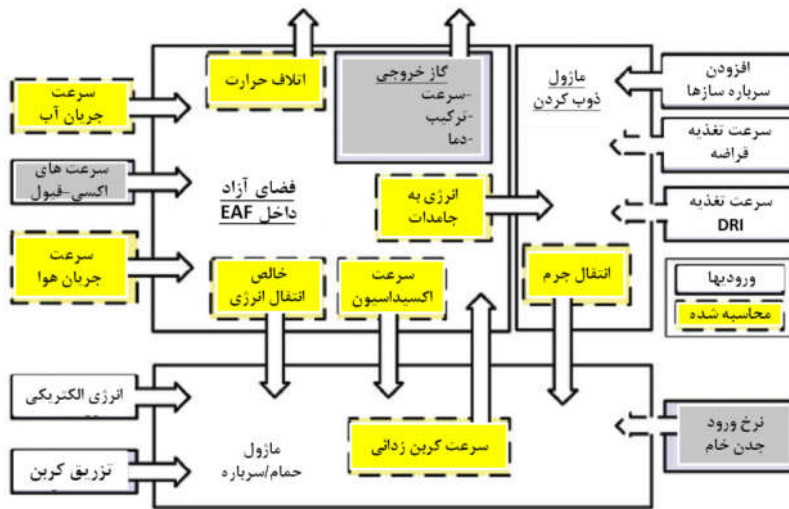
سرعت جریان جرمی گاز خروجی از EAF با استفاده از فشار استاتیک اندازه‌گیری شده در زانوئی اولیه کوره برآورد می‌شود. امکان تعیین دقیقتر سرعت جریان جرمی گاز خروجی با استفاده از آنالیزکننده ثانویه همراه با سنسور معمولی جریان قرار گرفته در کانال گاز خروجی کوره در پایین دست شکاف احتراق وجود دارد.

از موازنه کربن بین نقطه نمونه‌برداری اولیه آنالیزکننده EFSOP و نقطه نمونه‌برداری از آنالیزکننده ثانویه برای محاسبه نسبت تشکیل گاز خروجی کوره در جریان پایین دستی استفاده می‌شود. آنگاه، سرعت گازهایی که از EAF خارج می‌شوند، حاصلضرب این نسبت و سرعت جریان اندازه‌گیری شده پائین دستی است.

مدلهای دینامیک فرآیند

برای این سیستم سه مدل دینامیک فرآیند توسعه داده شده است که برای توصیف فرآیند EAF با هم کار می‌کنند. هر مدل مطابق با یکی از سه مرحله موجود در EAF است:

مدل فضای آزاد - این مدل مرحله گاز را توصیف می‌کند (شکل 3) و به عنوان ورودی‌های خود سرعت اکسیژن و سوخت وارده به فضای آزاد کوره از طریق مشعل - ها و انژکتورهای ثابت دیواره و سرعت جریان، دما و ترکیب گاز خروجی را لحاظ



شکل 3- مدل‌های دینامیک iEAF®.

می‌کند. با توجه به این ورودی‌ها، موازنه جرمی کربن و اکسیژن برای محاسبه، بصورت دینامیک، سرعت خالص واکنش‌های کربن و اکسیژن، نشان داده شده در شکل به صورت سرعت اکسیداسیون و سرعت کربن‌زدائی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گرچه با عنوان "سرعت کربن‌زدائی" نامگذاری شده است، این واژه برای همه منابع کربن (به استثنای متان) ورودی به فضای آزاد کوره (نه تنها کربن آزاد شده از حمام فولاد)، از جمله کربن تزریقی یا شارژ شده با سید، کربن هیدروکربن‌های وارده با قراضه، کربن از فرسایش الکتروود و کربن واکنش‌کننده با سریاره در احیای اکسید آهن در نظر گرفته می‌شود.

بطور مشابه، عبارت "سرعت اکسیداسیون" برای همه اکسیژن ورودی به فضای آزاد کوره، از جمله اکسیژن مربوط به احتراق کربن شارژ شده با سید یا تزریق شده، اکسیژن برای احتراق هیدروکربن‌های وارده با قراضه و اکسیژن مربوط به اکسیداسیون آهن و سایر فلزات برای تشکیل سریاره لحاظ می‌شود.

سرعت ورود هوا به فضای آزاد کوره با استفاده از موازنه نیتروژن محاسبه می‌شود در حالیکه سرعت ورود آب با استفاده از موازنه هیدروژن محاسبه می‌گردد. سرعت نشت آب برای تمام منابع آب از قبیل اسپری خنک‌کننده الکتروود، محصولات احتراق هیدروکربن‌های وارده با قراضه، آب یا برف وارده با قراضه و آب از نشت در پانل‌های خنک‌شونده با آب و سایر مدارهای خنک-شونده با آب در کوره در نظر گرفته می‌شود.

جزء دیگری از مدل فضای آزاد کوره موازنه انرژی است. از موازنه ورودی‌ها و مواد برای محاسبه خالص تلفات انرژی از فضای آزاد کوره استفاده می‌شود. سپس خالص انرژی بین تلفات از کوره، انتقال انرژی به ذوب و/یا مواد جامد (قراضه، DRI، سرباره-سازها، و غیره) و انتقال انرژی بین حمام/سرباره تقسیم می‌شود.

مدل حمام/سرباره- این مدل مرحله مذاب را توصیف می‌کند و بر اساس تعیین سرعت اکسیداسیون، کربن‌زدائی و تلفات انرژی ارائه شده توسط موازنه جرم/انرژی فضای آزاد کوره است. این اطلاعات امکان ارزیابی دینامیک و در زمان واقعی وضعیت حمام و سرباره (دما و ترکیب) را فراهم می‌سازد.

مدل ذوب کردن- این مدل مرحله جامد را توصیف می‌کند و بر اساس محاسبات دو مدل دیگر است. با توجه به خالص انرژی (شیمیایی و الکتریکی هر دو)، مدل ذوب کردن قادر به محاسبه توزیع انرژی بین حرارت دادن (افزایش دمای قراضه) و ذوب کردن (از قراضه جامد به فولاد مذاب) می‌باشد. به این ترتیب، پیشرفت ذوب قراضه محاسبه می‌شود. محاسبه دینامیک به نوبه خود به هر ذوب امکان گام‌برداری (بخش بعدی را ببینید) طبق سرعت ذوب شدن قراضه و نه تنها بر اساس ساعت معمول انرژی الکتریکی را می‌دهد.

رویکرد اتخاذ شده توسط شرکت تنوا گودفیلو در روش پایه با سایر رویکردهائی که در آنها از ترکیب گاز خروجی به عنوان یک پارامتر برآوردی برای تکمیل موازنه انرژی فضای آزاد کوره استفاده نمی‌شود متفاوت است، اما در این رویکرد به عنوان ورودی برای مدل‌های تعیین مستقیم دینامیکی فرآیند بکار گرفته می‌شود. این رویکرد امکان تعیین موازنه انرژی را به گونه‌ای فراهم می‌کند که تغییرپذیری فرآیند EAF را در نظر می‌گیرد. این بهبود دقت برای کنترل و بهینه‌سازی موثر فرآیند ضروری است.

گام‌برداری EAF

بطور معمول، ورود انرژی شیمیایی به EAF بر اساس تعیین پروفیل ثابت نقاط تنظیمی تزریق اکسیژن، سوخت، کربن و آهنک است. این پروفیل‌ها برای تعیین نقاط کاری بصورت تابعی از انرژی الکتریکی ویژه تامین شده برای کوره (kWh/t) مورد استفاده قرار می‌گیرند، یعنی کوره طبق یک ساعت انرژی الکتریکی گام بر می‌دارد. از همین اصل برای برنامه الکتریکی و در برخی موارد برای کنترل سیستم غبارگیر استفاده می‌شود.

یک مسئله با این استراتژی از دیدگاه عملیاتی این است که سرعت ورود انرژی الکتریکی با سرعت پیشرفت فرآیند مطابقت ندارد. ناهماهنگی بین پیشرفت ذوب و ساعت انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر بیشتر به یک مسئله تبدیل شده است، که در آن فرآیند EAF بطور فزاینده‌ای وابسته به انرژی شیمیایی شده است. امروزه پیشرفت ذوب یک کارکرد قوی‌تر کل خالص انرژی (الکتریسیته و شیمیایی) است که به کوره وارد می‌شود و تنها انرژی الکتریکی نیست.

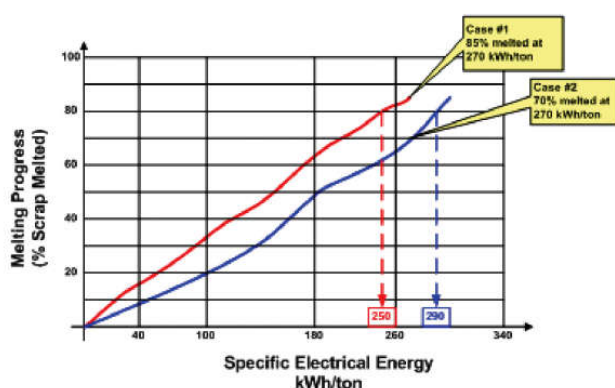
ناکارآمدی‌های وارد شده به فرآیند بواسطه گام‌برداری کوره تنها در مورد انرژی الکتریکی در **شکل 4** توضیح داده شده است، که نموداری از پیشرفت ذوب به صورت تابعی از مصرف انرژی الکتریکی ویژه است. در مورد اول، 85 درصد قراضه ذوب شده برای دو ذوب فرضی به صورت تابعی از انرژی الکتریکی ویژه وارد به کوره، ترسیم شده است. در مورد اول، 85 درصد قراضه در 270kWh/t انرژی الکتریکی ذوب شده، در حالی که در مورد دوم، تنها 70 درصد ذوب شده است. فرض کنید که از لحاظ عملیاتی، زمان ایده‌آل برای شارژ 80 درصد باشد؛ چون این ممکن است نقطه زمانی باشد که قراضه به اندازه کافی ذوب شده تا امکان حجمی برای شارژ بعدی را بدهد. ناکارآمدی‌های همراه با پروفیل ثابت پایه انرژی الکتریکی روشن می‌شود. در مورد اول، شارژ می‌تواند زودتر در 250kWh/t متوقف شده باشد، در حالی که در مورد دوم، شارژ نیاز دارد به اینکه اپراتور صبر کند تا انرژی ورودی قبل از شارژ کردن کوره به 290kWh/t رسیده باشد. اگر اپراتور اساس تصمیم را شارژ کوره در مقدار اسمی انرژی الکتریکی 270kWh/t بگذارد، او برای اولین مورد خیلی تاخیر و برای مورد دوم خیلی تعجیل خواهد داشت.

مسائل مشابه با بسیاری از جنبه‌های عملیات رخ می‌دهد، برای مثال، زمان شروع پالایش، مرحله‌بندی نقاط تنظیمی مشعل، شروع تزریق کربن، نقطه شروع پالایش، تنظیمات پله (تپ) الکتریکی و کنترل دمپر سیستم غبارگیر. پیشرفت ذوب یک کارکرد قویتر درصد ذوب شدن نسبت به انرژی الکتریکی ویژه ورودی است و بنابراین کوره باید بر طبق آن گام بردارد. این مسئله خاص با گام برداری EAF توسط دیگران شناخته شده است که همچنین سعی در گام‌برداری کوره طبق کل انرژی ورودی کرده‌اند. موفقیت آنها به این واقعیت محدود شده است که بدون ترکیب گاز خروجی، مدل‌های آنها تنها انرژی شیمیایی اسمی را در نظر می‌گیرند، و نه انرژی واقعی شیمیایی ایجاد شده در کوره و تلفات واقعی با گاز خروجی.

مدول‌های کنترل، بهینه‌سازی و ایمنی

در ردیف بالای شکل 1 مدول‌های کنترل و بهینه‌سازی قرار دارند. این مدول‌ها اطلاعات ارائه شده توسط سنسورها، ابزار دقیق و مدل‌های فرآیند را ارزیابی نموده و چگونگی پیش بردن فرآیند با اقدامات کنترلی مناسب در زمان واقعی را تعیین می‌کنند. تعدادی از مدول‌های بهینه‌سازی برای کنترل و بهینه‌سازی فرآیند EAF توسعه داده شده‌اند که عبارتند از:

- تشخیص آب
- بهینه‌سازی پس‌سوزی بر پایه هزینه
- بهینه‌سازی انرژی الکتریکی
- تشخیص شروع پالایش
- بهینه‌سازی سرباره پفکی
- تشخیص نقطه پایانی



شکل 4- پیشرفت ذوب به صورت تابعی از مصرف انرژی الکتریکی ویژه.

مدول تشخیص آب - علاقه و منفعت خاص برای اپراتورها توانایی پیش‌بینی وجود آب در فضای آزاد کوره EAF است. مقادیر کم آب در گازهای خروجی معمول است و ناشی از منابع متنوعی نظیر احتراق متان، احتراق هیدروکربن‌های همراه با قراضه فولادی و آب از خنک کردن الکترودها می‌باشد. یک منبع جدی آب ورود به فضای آزاد کوره EAF به دلیل نشتی‌هایی است که در دیواره‌های جانبی و سقف کوره ایجاد می‌شود. این نشتی‌ها یک مشکل ایمنی جدی را ایجاد می‌کنند که ممکن است منجر به انفجار شود. دو روش انفجار وجود دارد: الف) انفجار بخار از مخلوط شدن آب با فولاد مذاب که منجر به پرتاب فولاد مذاب از کوره به بیرون می‌شود و ب) تجزیه آب به گاز هیدروژن که منجر به تشکیل مخلوطی از گازهای انفجاری می‌شود که می‌تواند در حضور اکسیژن منفجر شوند. صرفنظر از مکانیزم، آب در EAF موقعیت جدی و خطرناکی را نشان می‌دهد.

یک خروجی موازنه جرم و انرژی فضای آزاد کوره میزان نشت آب در کوره است. مقدار ارائه شده توسط این مدل شامل آب ورودی به فضای آزاد از همه منابع به غیر از احتراق متان است. به صورت آماری، جدا کردن منابع عمومی و تعیین یک اثر اختصاصی آب نشتی که عادی و قابل قبول لحاظ می‌شود امکان‌پذیر است. انحراف از این اثر اختصاصی نشان‌دهنده نشت آب می‌باشد. هدف از مدول تشخیص آب، تشخیص تفاوت آب عادی وارد شده به کوره از نشتی‌های خطرناک آب و هشدار دادن (زنگ) طبق آن است.

مدول پس‌سوزی - مزایای پس‌سوزی در EAF در دهه گذشته به شدت مورد بحث بوده است. ایده‌ای که اکسیژن اضافی به فضای آزاد کوره برای احتراق مونوکسید کربن وارد شود با درجات مختلفی از پیچیدگی پیاده‌سازی شده است. ساده‌ترین پیاده‌سازی براساس برآورد بازدهی (کارایی) پس‌سوزی در طی مسیر ذوب بوده است. از این مقدار برای تعیین مقدار لازم اکسیژن اضافی

استفاده می‌شود. سپس پروفیل استاندارد برای نقاط تنظیمی منطبق با آن برای اکسیژن تنظیم می‌شود. این روش نیاز به استفاده از پروفیل‌های استاتیک مشعل دارد که بطور معمول بر اساس ساعت برق kWh/t طراحی می‌شوند. رویکرد پایه EFSOP بر روی رویکرد اسمی با استفاده از ترکیب گاز خروجی برای کنترل دینامیک اکسیژن اضافی در پاسخ به ترکیب اندازه‌گیری شده گاز خروجی و میزان احتراق بهبود یافته است. این روش از پروفیل‌های ثابت بر اساس مصرف انرژی الکتریکی ویژه برای کنترل زمان-بندی برنامه مشعل استفاده می‌کند، اما کنترل حلقه بسته برای تنظیم سرعت اکسیژن (و متان) را نیز ارائه می‌دهد.

با بهبود رویکرد پایه EFSOP، مدول کنترل پس‌سوزی برای کنترل و بهینه‌سازی پس‌سوزی بر اساس موازنه مزایای بازیافت انرژی در برابر هزینه‌های مصرف متان و اکسیژن طراحی شده است. امکان انجام این کار از طریق استفاده از موازنه مواد و انرژی در فضای آزاد کوره وجود دارد. در هر چرخه کنترل، مدول قادر به برآورد بازدهی انتقال حرارت پس‌سوزی در فضای آزاد کوره است و یک مزیت اقتصادی (\$/MW) به آن انرژی نسبت می‌دهد. در عین حال هزینه‌های اکسیژن و متان (\$/Nm³) نیز در نظر گرفته می‌شوند. به حداکثر رساندن مزایای خالص، نقاط تنظیمی بهینه برای اکسیژن و متان را فراهم می‌کند. کارکرد هدف تشریح شده در بالا توسط محدودیت‌های مکانیکی سیستم‌های ورود اکسیژن و متان و سایر ملاحظات عملیاتی محدود می‌شود. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، پیشرفت بیشتر نسبت به رویکرد سنتی، این است که پروفیل مشعل طبق درصد ذوب و نه kWh/t گام بردارد.

بهینه‌ساز انرژی الکتریکی - این مدول برای تنظیم دینامیک نقاط کار الکتریکی در طی دوره ذوب کار می‌کند تا از بیشترین بازدهی انتقال انرژی الکتریکی به کوره اطمینان حاصل شود. این مدول بر اساس مدل رفتار الکتریکی کوره است و برای پیش‌بینی انتقال انرژی الکتریکی به قراضه و حمام طراحی شده است. اقدامات کنترلی مدول بر اساس پایش جریان و ولتاژ از طریق نمودار الکتریکی مثلی دینامیک برای تشخیص عدم تعادل است. طول قوس هر فاز پایش می‌شود و به صورت تابعی از فرآیند (دمای پانل‌ها، سطح هارمونیک‌ها، تزریق اکسیژن و کربن و غیره) تنظیم می‌شود. جریان الکتریکی به صورت تابعی از مرحله فرآیند تنظیم می‌شود.

تشخیص شروع پالایش - در نقطه ای در طی شارژ نهایی، عملیات از حالت ذوب به حالت پالایش تغییر می‌کند. در طی مرحله ذوب، مشعل‌ها برای گرم کردن و ذوب کردن قراضه مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از گذار به پالایش، مشعل‌ها ممکن است غیرفعال شوند یا در حالت کم شعله قرار گیرند. در کوره‌های مجهز به انژکتورهای ثابت دیواره، انژکتورها از جریان اکسیژن زیر سرعت صوت (حالت مشعل) تا جریان فراتر از سرعت صوت (حالت لنس) استفاده می‌کنند. بدون نشانه مشخصی از زمان تغییر از حالت ذوب به حالت پالایش، اپراتورها بر نشانه‌هایی از فرآیند مانند مقدار ثابت kWh/t، بازدید بصری از طریق درب سرباره، صدای کوره و پایداری قوس تکیه می‌کنند. مسائل مربوط به زمان انتقال از ذوب به پالایش بر اساس تنها انرژی الکتریکی ویژه پیش از این بحث شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، انتقال از ذوب به پالایش باید بر اساس میزان ذوب شدن باشد.

در حالت ایده‌آل، کوره باید از حالت ذوب به حالت پالایش منتقل شود، در زمانی که قراضه درست به اندازه کافی ذوب شده باشد، بطوری که ارتفاع حمام برای عملیات موثر انژکتورها مکفی باشد. نقش مدول تشخیص شروع پالایش، تعیین نقطه ایده‌آل برای انتقال به پالایش است. در حالی که درصد ذوب شدن شاخص کلیدی است، نشانه‌های دیگری از فرآیند در نظر گرفته می‌شوند. نشانه‌ها از سیستم تنظیم الکتروود در صدر فهرست؛ برای مثال، تجزیه و تحلیل هارمونیک موجود در سیستم تنظیم الکتروود (TDR-H) یک نشانگر قوی است از اینکه عملیات حمام تخت فرا رسیده است.

بهینه‌ساز سرباره پفکی - سرباره EAF انواع عملیات را انجام می‌دهد: حمام فولاد را برای کاهش تلفات حرارتی عایق می‌کند، محصولات اکسیداسیون فولاد را جذب می‌کند، قوس الکتریکی را برای تسهیل انتقال انرژی الکتریکی به حمام می‌پوشاند، از پوشش نسوز و پانل‌ها در دیواره و سقف کوره محافظت کرده و از حمام فولاد در برابر جذب گازهای نامطلوب (برای مثال، نیتروژن و هیدروژن) جلوگیری می‌کند. برای عملکرد بهینه و برای اطمینان از پفکی شدن مناسب سرباره، حفظ سرباره در ترکیب شیمیایی و

دمای مناسب لازم است زیرا انحراف از محدوده ایده‌آل به سرباره‌ای منجر می‌شود که بدرستی پفکی نمی‌شود. مدل حمام/سرباره ترکیب سرباره را بصورت دینامیک در طی دوره پالایش بررسی می‌کند. این امکان وجود دارد زیرا سرعت واکنش اکسیژن در اکسیداسیون و سرعت کربن‌زدائی برای احیای آهن بصورت دینامیک تعیین می‌شود. شاخص‌های دیگری همانند پایداری قوس و هارمونیک‌های الکتریکی برای کنترل عملیات سرباره پفکی با تغییر تزریق اکسیژن، کربن و آهن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بهینه‌ساز نقطه پایان - پر بازده‌ترین روش برای کار با EAF، دستیابی همزمان به ترکیب و دمای نقطه پایانی در انتهای یک ذوب است. این مدول دوره پالایش را کنترل می‌کند بطوری که نقاط پایانی کربن و دما همزمان به دست آیند. این مدول مسیرهای مورد انتظار کربن و دما را محاسبه می‌کند و اقدامات کنترلی برای تنظیم این دو با افزایش/کاهش نرخ تزریق اکسیژن یا با تنظیم نقطه کاری الکتریکی اتخاذ می‌کند. کنترل فرآیند بطوری که کربن و دمای نقطه پایانی همزمان حاصل شوند حل یکی دیگر از ناکارآمدی‌های معمول می‌باشد. اگر کربن مورد نظر خیلی زودتر قبل از نقطه پایانی فرا برسد، حمام فولاد به احتمال زیاد بیش از حد اکسید خواهد شد، نیاز به استفاده از اکسیژن زدا یا افزودن مجدد کربن پیدا خواهد کرد. به صورتی دیگر، اگر دما خیلی زودتر قبل از نقطه پایانی کربن فرا برسد، انرژی اضافی برای حفظ دمای بالاتر برای مدت زمان طولانی مورد نیاز است.

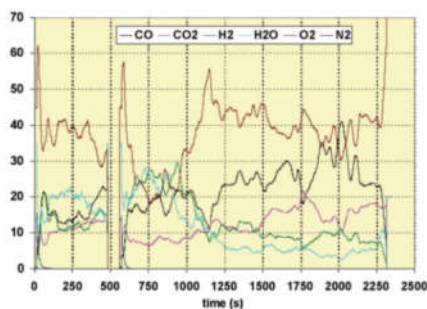
نتایج نصب iEAF

	کارگاه ذوب 2		کارگاه ذوب 1
	کنترل شیمیایی و الکتریکی، داده های یک ماه		فقط کنترل شیمیایی
	iEAF®#2	iEAF®#3	iEAF® #1
	درصد تفاوت	درصد تفاوت	درصد تفاوت
kWh/t	-3.4	-3.5	-2.1
O ₂ (Nm ³ /t)	0.5	-4.4	0.3
متان (Nm ³ /t)	-18.5	-7.8	0

جدول 1- مقایسه نتایج برای تاسیسات iEAF® (درصد تفاوت از خط پایه ثابت شده)

اولین نصب این سیستم در سال 2008 در کارخانه تناریس دالمین، ایتالیا، با هدف انجام تحقیق و توسعه انجام شد [8]. پس از نصب سنسورها و توسعه مدل‌های فرآیند و الگوریتم‌های کنترل، آنگاه کنترل بسته مشعل اکسیژن-سوخت (اکسی-فیول) با استفاده از iEAF مورد آزمایش قرار گرفت. الگوریتم کنترل برای بسته احتراق به موازات نقاط تنظیمی موجود اکسیژن و متان کارخانه توسعه داده شد، اما زمانی را

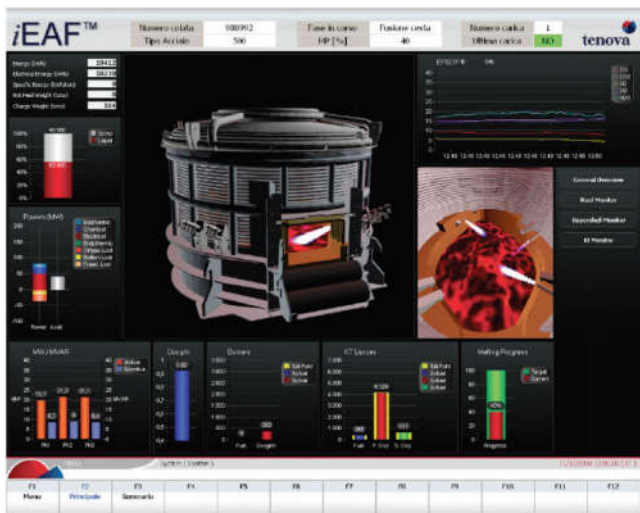
که در آن نقاط تنظیمی با استفاده از کل انرژی خالص بجای kWh/t شارژ شده یا kWh کل به دست می‌آیند را تغییر می‌دهد. نتایج این آزمایشها در **جدول 1** تحت عنوان کارگاه ذوب 1 ارائه شده است. در سال 2010، نصب دوم در یک کارگاه ذوب در ایتالیا با دو EAF صورت گرفت. نتایج حاصل از ماه اول عملیات در جدول 1 تحت عنوان کارگاه ذوب 2 ارائه گردیده است. برای کارگاه ذوب 2، الگوریتم‌های کنترل برای لحاظ کردن تنظیم الکتریکی و نیز بسته شیمیایی گسترش یافتند و دوباره به موازات نقاط تنظیمی موجود، اما تغییر زمان بر اساس انرژی خالص کل توسعه داده شد. این نتایج اولیه قابلیت بهینه‌سازی کامل کوره از نظر مصرف برق در زمانی که الگوریتم‌های کنترل شیمیایی و الکتریکی وابسته به انرژی خالص کل است را نشان می‌دهد.



شکل 6- پروفیل گاز خروجی یک ذوب بطور معمول.

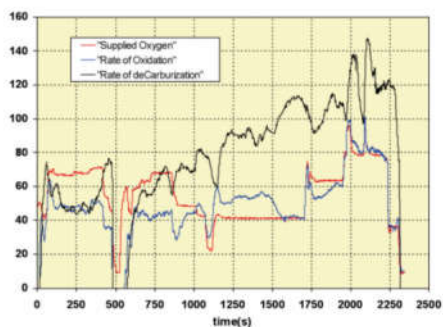
نمونه‌هایی از نمایشگرهای عملیاتی SCADA پیاده شده در **شکل 5** نشان داده شده است. نمایشگرها، بطور دینامیک در طی مسیر (دوره) ذوب به روز شده، اپراتور کوره را به اطلاعات فرآیند زمان واقعی ارائه شده توسط سنسورها و مدل‌های تشریح شده در بالا مجهز می‌کنند. مدل‌های فرآیند iEAF اجرا شده و در حال تبدیل به سطح عملیات کارخانه هستند. ترکیب گاز خروجی برای یک ذوب معمولی در **شکل 6** نشان داده شده است. سیستم آنالیز گاز خروجی EFSOP آب را مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌کند، بلکه بصورت ریاضی بر اساس فرض تعادل شیمیایی تعیین می‌نماید. غلظت آب طبق انتظارات تغییر می‌کند. در طی

ذوب کردن، توجه می‌شود که غلظت آب 15 تا 30 درصد، در حالی که در طی پالایش حدود 5 درصد است. مقادیر بالا به احتمال زیاد ناشی از تبخیر آب ورودی با قراضه و پاشش آب خنک‌کننده الکترودها و احتراق هیدروکربن‌ها است، در حالی که مقادیر پایین در طی پالایش، تنها ناشی از تبخیر آب پاشش آب خنک‌کننده الکترودها می‌باشد.

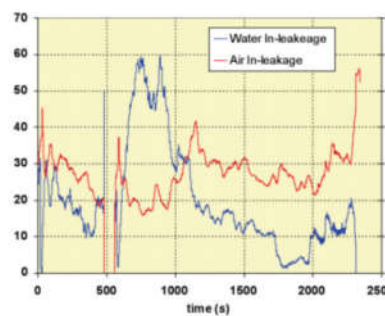


شکل 5- نمایشگرهای عملیاتی SCADA

iEAF براساس پروفیل گاز خروجی، موازنه جرم و انرژی فضای آزاد کوره را به صورت دینامیک و در زمان واقعی محاسبه می‌کند. انجام موازنه بر روی هیدروژن و نیتروژن امکان محاسبه سرعت ورود آب و هوا به فضای آزاد کوره را فراهم می‌سازد. نتیجه همان ذوب در شکل 7 ارائه شده است. مقادیر نسبتا بالای آب ناشی در ابتدای شارژ سبد دوم (600~ ثانیه از شروع ذوب) مربوط به افزایش غلظت آب در گاز خروجی در طی این دوره است.



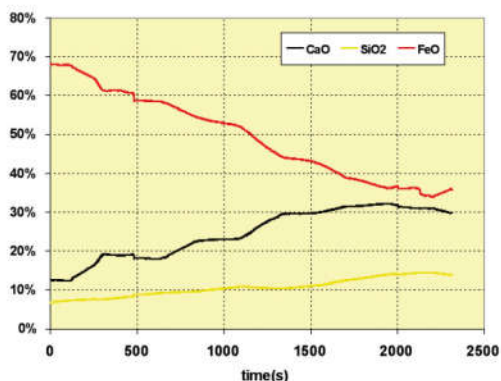
شکل 8- سرعت اکسیداسیون (بدون کربن) و کربن زدائی در مقایسه با سرعت تزریق اکسیژن.



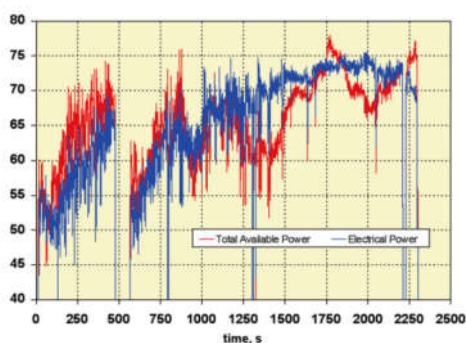
شکل 7- پروفیل سرعت محاسبه شده آب و هوای ورودی به EAF.

با توجه به واکنش‌های حمام/سرباره، مدل فضای آزاد کوره یک شاخص دینامیک از سرعت اکسیداسیون و کربن‌زدائی در زمان واقعی ارائه می‌دهد. شکل 8 پروفیل محاسبه شده برای همان ذوب معمولی در مقایسه با سرعت اکسیداسیون و کربن‌زدائی با سرعت تزریق اکسیژن است. در طی اولین شارژ سبد، حدود 70 مول بر ثانیه اکسیژن به کوره از طریق آنژکتورهای اکسیژن تامین می‌شود. شکل نشان می‌دهد که 50 مول بر ثانیه O_2 را می‌توان به اکسیداسیون آهن (و سایر فلزات)، در حالی که 20 مول بر ثانیه باقیمانده به احتراق کربن شارژ شده و هیدروکربن‌ها نسبت داده می‌شوند. برای مقایسه، در ابتدای پالایش (1200~ ثانیه از

شروع ذوب)، اکسیژن با سرعت 40 مول بر ثانیه تامین می‌شود. اکسیژن تامین شده همراه با اکسیژن ورودی از هوا به فضای آزاد کوره، اکسید آهن با سرعت 55 مول بر ثانیه معادل اکسیژن تولید می‌کند. از این کل اکسیژن وارد شده به حمام/سرباره حدود 45 مول بر ثانیه به صورت مونوکسید کربن (90 مول بر ثانیه CO) به فضای آزاد کوره بر می‌گردد که نشان می‌دهد اکسید آهن با سرعت حدود 10 (55-45=10) مول بر ثانیه تولید می‌شود.



شکل 9- پروفیل محاسبه شده ترکیب سرباره.



شکل 10- مقایسه کل انرژی قابل دسترس و انرژی الکتریکی.

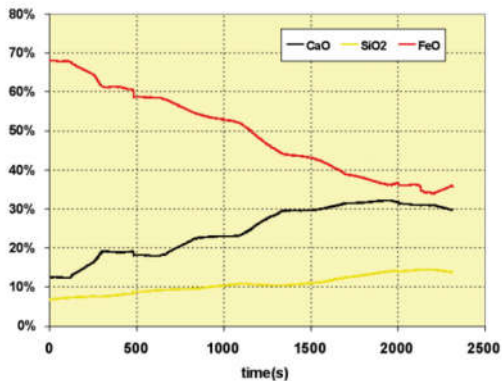
در طی مراحل بعدی پالایش، سرعت اکسیداسیون تقریباً برابر با سرعت تزریق اکسیژن (80 مول بر ثانیه) است. در طی همین دوره، 140 مول بر ثانیه (70 مول بر ثانیه معادل O₂) از CO تولید می‌شود که شاخصی از سرعت احیای سرباره توسط تزریق کربن را ارائه می‌دهد. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که چگونه iEAF قادر به استفاده از اهرم اندازه‌گیری ترکیب گاز خروجی و دما برای کمی کردن پارامترهای مهم فولادسازی همانند اکسیداسیون و کربن‌زدائی است.

با بسط موازنه جرمی مدل فضای آزاد کوره به حمام/سرباره امکان محاسبه (از طریق مدول حمام/سرباره) ترکیب سرباره در طول دوره ذوب فراهم می‌شود، همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است. در آینده، این اطلاعات، همراه با نمودارهای ایزوسالوبیلیتی یا هم انحلالی (ISD) سرباره برای تامین یک شاخص، در زمان واقعی از قابلیت پفکی شدن سرباره مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این اطلاعات، به نوبه خود، پایه ای را برای تصمیم‌گیری‌های کنترلی در مورد تزریق کربن یا آهک برای پفکی‌سازی بهینه سرباره تشکیل خواهد داد.

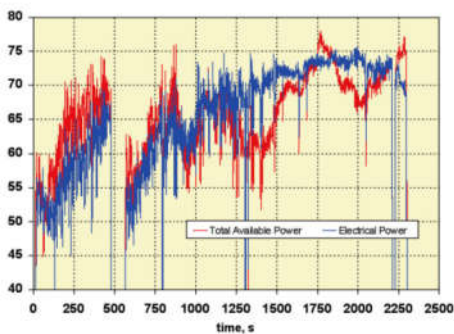
مدول فضای آزاد کوره نیز یک موازنه انرژی دینامیک در زمان واقعی محاسبه می‌کند. پروفیل برای همان ذوب معمولی در شکل-

10 نشان داده شده است که در آن انرژی قابل دسترس برای گرم و ذوب کردن با سرعت ورود انرژی الکتریکی به کوره مقایسه می‌شود. انرژی قابل دسترس، کل انرژی تامین شده (شیمیایی و الکتریکی) منهای تلفات از طریق پانل‌های خنک‌کننده و انرژی خارج شده از EAF با گاز خروجی می‌باشد. همانطور که نشان داده شد، در طول دوره ذوب اولین سبب شارژ، انرژی قابل دسترس بیشتر از سرعت انرژی الکتریکی تامین شده در حدود 5 مگاوات است؛ که مزایای پس‌سوزی در فضای آزاد کوره را نشان می‌دهد. به صورتی دیگر، در طی پالایش، انرژی قابل دسترس در حدود 10 مگاوات کمتر از برق ورودی شروع می‌شود و تا جایی افزایش می‌یابد که با حدود 1700 ثانیه از شروع ذوب برابر شود. از آنجا، انرژی قابل دسترس شروع به کاهش می‌کند. بطور کلی، در طول این دوره، انرژی قابل دسترس برای فولاد کمتر از انرژی الکتریکی تامین شده است، که نشان‌دهنده فرصت‌های بهینه‌سازی EAF با به حداقل رساندن این موارد اتلاف می‌باشد.

یکی دیگر از ویژگی‌های ارائه شده توسط مدول حمام/سرباره، محاسبه دینامیک دما و کربن حمام در زمان واقعی است. نتایج این محاسبه در شکل 11 نشان داده شده است. این محاسبه پایه بهینه‌ساز نقطه پایان را تشکیل می‌دهد. هدف آزمایش مسیر



شکل 11- تغییرات دما و کربن برآورد شده حمام.



شکل 12- مقایسه دمای تخلیه محاسبه شده و اندازه‌گیری شده.

پروفیل‌های کربن و دما و انجام تنظیمات فرآیند برای اطمینان از حصول همزمان دما و کربن می‌باشد، که توسط آن به حل ناکارآمدی‌های مربوط به تعیین نقطه پایان EAF می‌پردازد.

دمای پیش‌بینی شده با دمای واقعی اندازه‌گیری شده در تخلیه کوره برای 100 ذوب متوالی مقایسه شده است (شکل 12). مدل حمام/سرباره تعیین منطقی دمای تخلیه را به خوبی از یک ذوب تا ذوب بعدی انجام می‌دهد. از 100 ذوب مورد بررسی تنها یک مورد خطا لحاظ شد که در آن خطا در دمای پیش‌بینی شده بیشتر از 20°C بود.

خلاصه و کارهای آینده

مدلهای فرآیند دینامیک iEAF در کارگاه ذوب 1 پیاده‌سازی شده و تلاشها برای اعتبارسنجی نتایج، با هدف پیاده سازی کامل کنترل دینامیک نقاط تنظیمی شیمیایی و الکتریکی هر دو ادامه می‌یابد.

در کارگاه ذوب 2، کار بر روی اعتبارسنجی مدول‌های کنترل برای بسته‌های الکتریکی و شیمیایی همچنان ادامه دارد. در حالی که نتایج گزارش شده در جدول 1 پس از یک ماه بهره‌برداری بود، ماه‌های بعدی کاهش قابل توجه مصرف انرژی الکتریکی، اکسیژن و متان را نشان داده‌اند. هنگامی که مدول‌های باقیمانده کنترل، بهینه‌سازی و ایمنی بطور کامل اجرا شوند، iEAF مزایای متنوع دیگری

شامل بازدهی عملیاتی بیشتر EAF، تلفات کمتر، کاهش مواد مصرفی و ایمنی بیشتر کارخانه ارائه می‌دهد.

نصب این سیستم در کارخانه‌های دیگری در مکزیک، کانادا و ایتالیا نیز انجام شده است. با هر نصب، توسعه و شناخت بیشتر از فرآیند و مدل‌های کنترل به علت پارامترهای عملیاتی مختلف و تجهیزات موجود در کارگاه‌های مختلف ذوب به دست می‌آید. همچنین تعیین تفاوت‌ها در جریان گاز خروجی، تلفات مربوط به انرژی و عملیات سیستم غبارگیر، یکی از مهمترین مراحل برای کنترل و بهینه‌سازی خواهد بود.

یکی از تغییرات کلیدی با نصب‌های جدید، ادامه توسعه اندازه‌گیری دینامیک گاز خروجی از طریق انجام آزمایش یک سنسور جدید برای جریان گاز خروجی است. این سنسور امکان اندازه‌گیری مستقیم جریان گاز خروجی از محل سوراخ چهارم کوره به جای استفاده از سایر سنسورهای فشار و سایر سنسورهای ترمودینامیکی و دینامیک سیالات برای مشخص کردن جریان گاز خروجی را فراهم می‌سازد.

مراجع:

- (1) J A Maiolo, E J Evenson and O I Negru, "Goodfellow EFSOP[®] successes at TAMSA, Veracruz," *AISTech 2004*, Nashville, TN, Sept 2004.
- (2) J Kelleher and M I Khan, "Yield and productivity savings using Goodfellow EFSOP[®] at MacSteel Arkansas," *AISTech 2006*, Cleveland, OH, May 2006.
- (3) D Vensel and M I Khan, "EAF performance improvement at Nucor Steel Auburn using Goodfellow EFSOP[®]," *AISTech 2006*, Cleveland, OH, May 2006.

- (4) K Nikkanen, M I Khan and J Gaviña, "Furnace water leak detection and reduced cost efforts at Aceria Compacta de Bizkaia, Spain, using the Goodfellow EFSOP[®] System," *AISTech 2007*, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
- (5) J A Maiolo, M Boutazakhti, C W Li and C Williams, "Developments towards an Intelligent Electric Arc Furnace at CMC Texas using Goodfellow EFSOP[®] Technology," *AISTech 2007*, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
- (6) M Pozzi, J A Maiolo, D Masoero, V Scipolo and N Veneri, "Operating results of Goodfellow EFSOP[®]," *METEC 2007*, Dusseldorf, Germany, June 2007.
- (7) V Scipolo, M I Khan and S Patil, "Optimisation of the EAF process at CAPE GATE (PTY) LTD (Davsteel Division) using Goodfellow EFSOP[®] Technology," *9th European Electric Steelmaking Conference*, Krakow, Poland, June 2008.
- (8) V Scipolo, S Gillgrass, P Clerici, P Galbiati, P Giugliano, M Pustorino, "iEAF[®] Technology: Recent developments and results at TenarisDalmine, Italy," *AISTech 2010*, Pittsburgh, PA, May 2010.