بهینه‌سازی پروفیل توان در کوره قوس الکتریکی

کارخانه فولاد تناریس تامسا[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

پیکربندی پروفیل الکتریکی به منظور تعادل ولتاژ، جریان و راکتانس طراحی شده است. در این مقاله توسعه ابزارهای ایجاد شده برای بهبود پروفیل‌های توان از نظر مسائل عملیاتی و ایمنی، ارائه گردیده است. این ابزار شامل یک مدل ساده برای ارزیابی پروفیل قبل از آزمایش آن، و یک روش آماری برای استفاده از مزیت اندازه‌گیری دمای واقعی پانل‌های آبگرد برای بهینه‌سازی رفتار حرارتی در کوره است. با استفاده از این ابزارها تدوین یک متدولوژی برای انجام تغییرات استراتژیک همانند افزایش توان به صورتی ایمن و سریع امکانپذیر گردیده است.

اهمیت پروفیل الکتریکی مناسب برای کوره قوس الکتریکی (EAF) کاملا معلوم شده و لازم است همبستگی بین متغیرهای الکتریکی و عملیات قوس پایدار را در نظر گرفت. عملیات ولتاژ بالا در ارتباط با مصرف کمتر الکترود می‌باشد که به طور معمول یکی از اصلی‌ترین هزینه‌های تولید است. با این وجود، ولتاژ با طول قوس متناسب است و تابش قوس به دیواره‌های کوره را افزایش می‌دهد که بستگی به نوع طراحی، شارژ فلزی و سایر ویژگی‌ها می‌تواند باعث ایجاد اثرات نامطلوب همانند فرسایش بیشتر نسوز یا خطرات ایمنی ناشی از نشت آب از پانل‌های آبگرد شود.

تحقیق حاضر ابزارهای ایجاد شده برای اصلاح و بهینه‌سازی پروفیل‌های توان EAF کارخانه تناریس تامسا (TenarisTamsa)، مکزیک، را تشریح می‌کند. جزئیات آن عبارتند از: (1) تدوین یک مدل ساده بر اساس سیستم‌های کنترل کوره که امکان ایجاد پروفیل‌ها را فراهم نموده و نحوه استفاده ترکیبی از انرژی شیمیایی و الکتریکی را برای محاسبه شاخص‌های اصلی عملکرد (KPI) را شبیه‌سازی می‌کند و (2) تعیین ویژگی‌های بار حرارتی از طریق مراحل مختلف فرآیند با استفاده از دمای آب خنک‌کننده پانل و استفاده از رویدادهای "دما بالا" برای پایش تأثیر این اثر به شیوه نماینده آماری.

این ابزارها در طی سال‌های 2016 و 2017 برای به حداکثر خود رساندن توان الکتریکی کوره این کارخانه جهت دستیابی به بیشترین بهره‌وری ممکن از ترانس نصب شده، ایجاد و بکار گرفته شدند. امروزه این ابزارها و روش‌ها برای انجام هرگونه تنظیم و پایش فرآیند ضروری هستند.

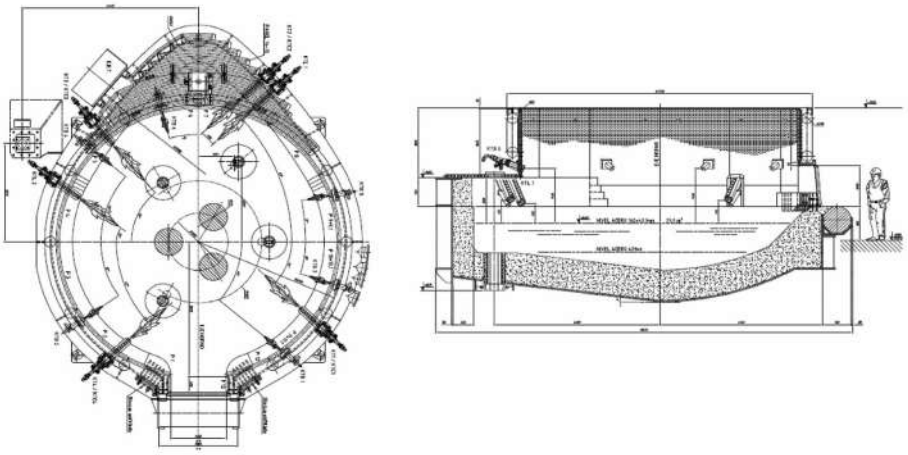
مقدمه

ویژگی‌های EAF کارخانه تناریس تامسا– این یک کوره معمول جریان متناوب سه فاز با سیستم تخلیه از کف خارج از مرکز (EBT)، ظرفیت 200 تن فولاد مذاب (40 تن برای پاشنه مذاب باقی می‌ماند و 160 تن اندازه ذوب) است. این کوره دارای یک ترانس 135 MWA، یک راکتور برای کار با ولتاژهای بالا و یک مجموعه (بسته) انرژی شیمیایی متشکل از چهار انژکتور اکسیژن، چهار انژکتور کربن، دو انژکتور آهک، شش مشعل اکسیژن–گاز و یک لنس مافوق صوت هم برای تمیزکاری درگاه سرباره و هم پشتیبانی تزریق اکسیژن می‌باشد. **شکل 1** هندسه و پیکره کوره قوس الکتریکی را نشان می‌دهد.

شارژ فلزی تقریباً 180 تن است که از این میزان حدود 70 درصد قراضه فولادی، 20 درصد چدن خام و 10 درصد آهن اسفنجی می‌باشد. شارژ از طریق دو یا سه سبد با حجم $80\,m^3$ برای قراضه فولادی و چدن خام و از طریق یک تسمه نقاله برای

[1]- Francisco Raul Aguirre Ortiz, Pablo Enoc Hernández Paredes, Power Profile Optimization in TenarisTamsa's Electric Arc Furnace, IRON & STEEL TECHNOLOGY, JAN 2020.

آهن اسفنجی انجام می‌شود (در مطالعه حاضر، ذوب‌های سه سبدی لحاظ نشده‌اند زیرا آنها کمتر از 1 درصد از تولید را تشکیل می‌دهند). فرآیند در طی مدت پاور–آن به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود: ذوب کردن سبد اول، ذوب کردن سبد دوم و پالایش.

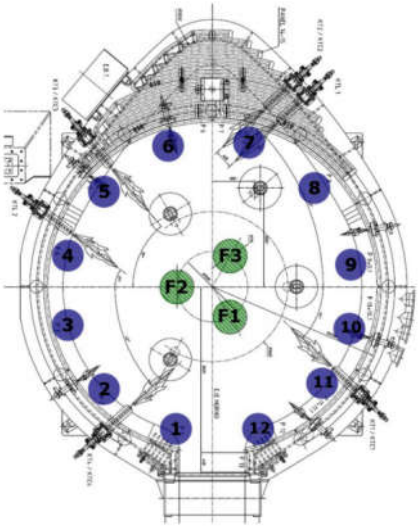


شکل 1– کوره قوس الکتریکی کارخانه تناریس تامسا.

مجموعه پانل‌های خنک-کننده– کوره مجموعه‌ای از پانل‌های آبگرد دارد که به 12 موقعیت در اطراف محیط آن و سه موقعیت عمودی (A، B، C) تقسیم می‌شود (**شکل‌های 2 و 3**).

هر پانل یک حسگر دمای نصب شده در خروجی مدار آب دارد و به یک سیستم هشدار (آلارم) متصل است که هنگام رسیدن به یک مقدار حد، اقدامات محافظتی متفاوتی را آغاز می‌کند. سه سطح مختلف هشدار وجود دارند که می‌توانند مشعل‌ها را غیرفعال کنند، یک فاز یا هر سه فاز کوره را به طور کامل قطع کنند.

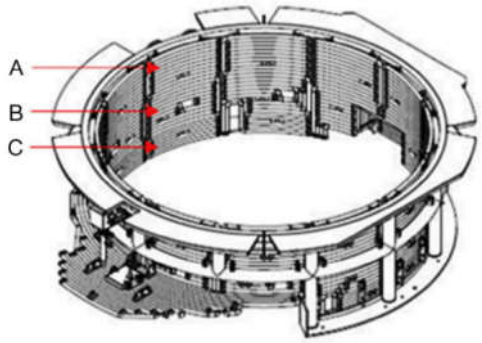
هر یک از این زنگ هشدارها به عنوان یک رویداد (حادثه) نیز ثبت می-شوند که از این طریق امکان گردآوری اطلاعات آماری ارزشمندی فراهم می‌شود.



شکل 2– پانل‌های آبگرد.

کنترل عملیات – پروفیل‌های توان توسط یک سیستم خودکار کنترل می-شوند که در آن کاربر می‌تواند هر یک از حالت‌های عملیاتی را برای تنظیم شیمیایی و الکتریکی مرتب نموده، فرآیند را به مراحل کنترل شده توسط مصرف ویژه انرژی کل (الکتریکی + شیمیایی) تقسیم کند. پارامترهای زیر توسط پروفیل‌های خودکار کنترل می‌شوند:

- پله (تپ) ترانس.
- پله (تپ) راکتور.
- جریان.
- جریان‌های مشعل گاز و اکسیژن.
- جریان انژکتور اکسیژن.
- جریان کربن.
- کل آهک (انژکتورهای آهک).



شکل 3– موقعیت‌های عمودی پانل‌های آبگرد.

زمینه

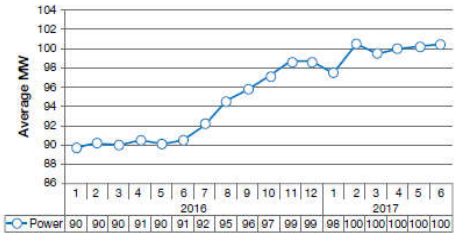
کوره‌ای که هم اکنون در کارگاه فولادسازی این کارخانه کار می‌کند، در

سال 2012 نصب شده و در سال 2013 به متوسط توان ذوب 90MW رسید، زمانی که لازم شد چرخه‌های تولید بین ذوب و ریخته‌گری در ماشین ریخته‌گری پیوسته متوازن شوند.

در طی اولین افزایش توان، اغلب نشت آب از پانل‌های آبگرد رخ می‌داد. علت آن ترک‌های خستگی حرارتی ناشی از تابش قوس شناسائی شد (**شکل 4**). تلاش‌های هماهنگی برای غلبه بر این بحران با اقدامات مختلفی از جمله آنها افزایش فشار آب، اصلاح پروفیل توان و تغییر مواد پانل از فولاد به مس در مناطق بحرانی به عمل آمد.

شکل 4- ترکهای عرضی ناشی از تابش قوس.

در سال 2016، ماشین ریخته‌گری پیوسته بازسازی شد و یک ایستگاه جدید تنظیم نهائی ذوب (trimming station) برای افزایش بهره‌وری کارگاه ذوب نصب شد. با این اصلاحات، لزوم بیشترین استفاده از توان ترانس نصب شده و رسیدن به متوسط توان طراحی 97 MW بوجود آمد. **شکل 5** سیر تحول متوسط توان در طی سال‌های 2016 و 2017 را نشان می‌دهد.



شکل 5- سیر تحول متوسط توان الکتریکی.

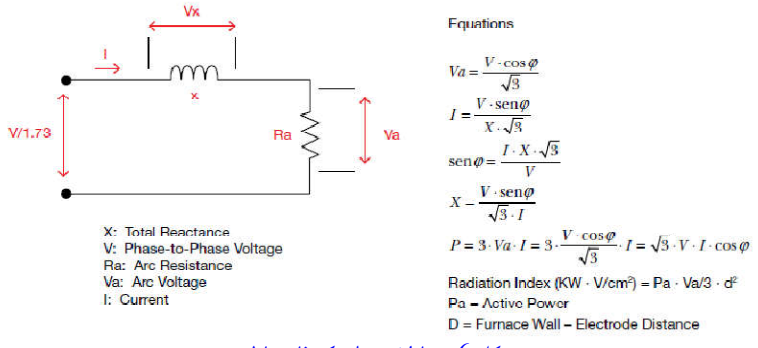
شبیه ساز پروفیل توان

همانطورکه قبلاً بیان شد، این EAF دارای سیستم اتوماسیون سطح 2 برای مدیریت پروفیل‌های توان است. این سیستم ترتیبات تنظیم شده‌ای را برای کنترل‌کننده الکتریکی و برای هر جزء مجموعه انرژی شیمیایی با دنبال کردن تغییرات انرژی کل (شیمیایی+الکتریکی) اجرا می‌کند.

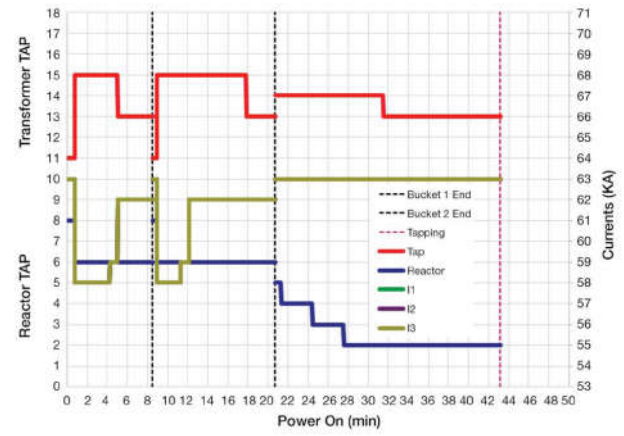
برای تنظیمات پروفیل توان، یک مدول در سیستم اختصاصی سطح 2 وجود دارد که فرآیند را به سه مرحله اصلی تقسیم می‌کند: ذوب کردن سبد اول، ذوب کردن سبد دوم و پالایش. در هر یک از این مراحل، کاربر می‌تواند هر تعداد از "مراحل" (بر حسب انرژی ویژه کل به ازای هر تن شارژ شده) را به طور جداگانه برای پروفیل‌های الکتریکی و شیمیایی تنظیم کند.

به منظور دستیابی به هدف توسعه یک پروفیل جدید به حداکثر رساندن بهره‌وری، یک شبیه‌ساز توسعه داده شد که امکان داد پیشنهادات مختلفی ایجاد شود و برای استفاده در سطح صنعتی مدل شود. این شبیه‌ساز پروفیل توان با استفاده از نرم‌افزار اکسل برای انجام محاسبات مورد نیاز، با استفاده از فرمول‌های قابل کاربرد برای بدست آوردن متغیرهای اصلی الکتریکی ایجاد شد [1]. برای بدست آوردن توان شیمیایی، از فرمول ساده‌ای استفاده شد. معادلات مورد استفاده برای محاسبه توان الکتریکی در **شکل6** نشان داده شده‌اند.

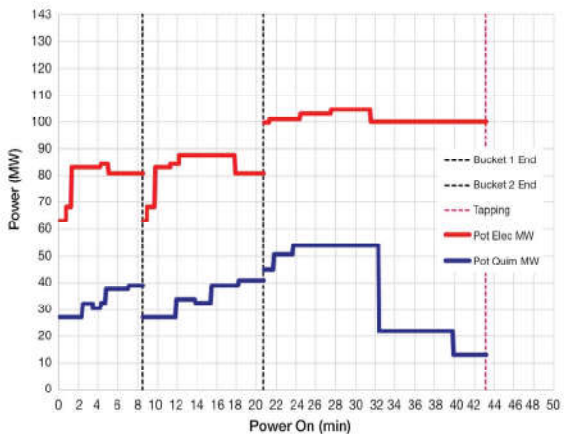
این ابزار همان ورودی سیستم سطح 2 را دریافت می‌کند و امکان انجام تجزیه‌وتحلیل نتایج از تغییرات تنظیمات از نظر موازنه انرژی (الکتریکی/شیمیایی)، پاور–آن، پایداری قوس، شاخص تابش و غیره را فراهم می‌سازد **شکل‌های 7–10** نتایج گرافیکی ارائه شده توسط شبیه ساز را نشان می‌دهند.



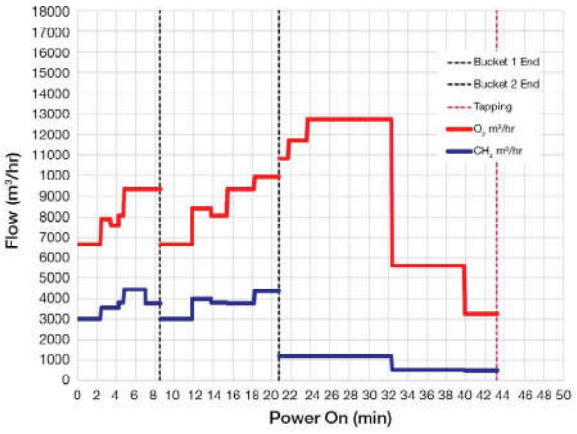
شکل 6- معادلات مدار تک فاز معادل.



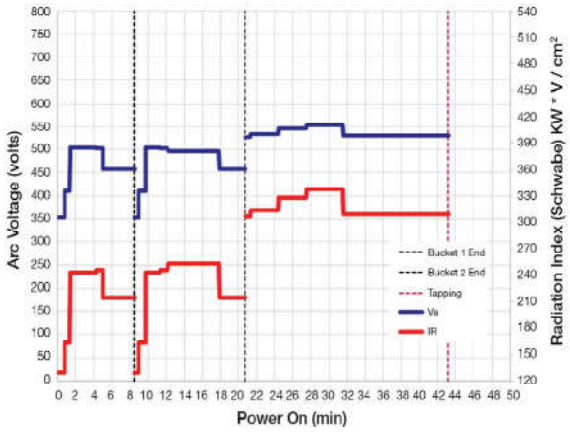
شکل 7- پیکربندی الکتریکی (ترانس، جریان و راکتور).



شکل 8- توان انرژی الکتریکی و شیمیایی.



شکل 9- جریان کل گاز و اکسیژن.



شکل 10- شاخص ولتاژ و تابش قوس.

علاوه بر این، جدولی با اطلاعات ارزشمند برای تنظیم و اصلاح پروفیل‌های توان از جمله آنها ضریب توان، مصرف گازها، کربن تزریقی، مصرف الکترود و جریان متوسط را ارائه می‌دهد.

برای اعتبارسنجی خروجی ارائه شده توسط شبیه‌ساز، نتایج محاسبه شده برای پروفیل 90 MW که از سال 2013 در حال کار بوده است در نظر گرفته شد و با میانگین مقادیر واقعی از نمونه 494 ذوب تهیه شده از ژانویه تا مارس 2016 مقایسه شد؛ به منظور حذف هرگونه تاثیر ناشی از تنظیمات راه‌اندازی فقط ذوب‌های با وقفه کمتر از 15 دقیقه در نظر گرفته شدند. **جدول 1** مقایسه بین نتایج واقعی و محاسبه شده، با دامنه تفاوت بین 1 تا 2 درصد را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های بار حرارتی کوره

به علت عملیات ولتاژ بالا، هرگاه تغییر پروفیل الکتریکی انجام شود، ادامه کنترل تابش به پانل‌های آبگرد بحرانی است زیرا:

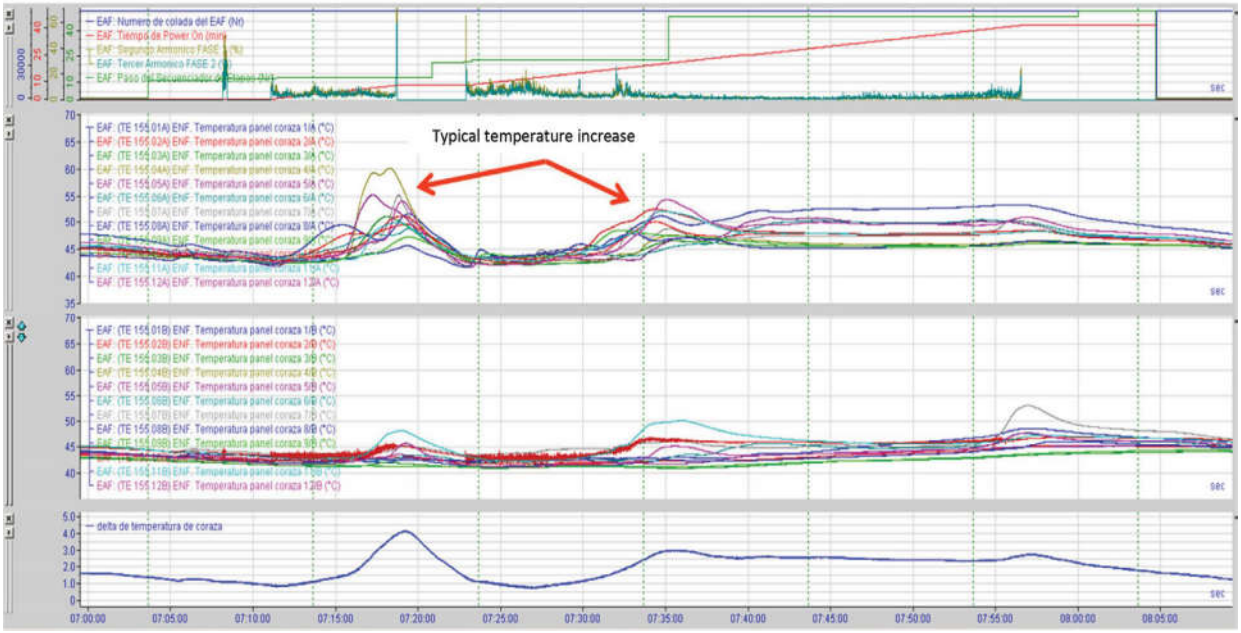
- از تجارب گذشته، پس از تعداد مشخصی از عملیات، پانل‌های آبگرد ساخته شده از فولاد ترک‌های عرضی را بروز می‌دهند، که باعث نشت کوچک آب می‌شوند که در صورت عدم تشخیص، به هیدراته شدن نسوز با ریسک بالای خرابی پوسته کوره و نشت کنترل نشده فولاد از

جدول 1- مقایسه نتایج محاسبه شده و واقعی پروفیل 90 MW

	واقعی	محاسبه شده	تفاوت
پاور-آن (دقیقه)	45.09	44.12	٪2
توان متوسط (MW)	90.3	91.8	-٪2
مصرف O_2 (Nm^3/ton)	33.2	32.7	٪2
مصرف CH_4 (Nm^3/ton)	7.9	8.0	-٪1
مصرف برق (KWh/ton)	418.0	413.2	٪1

آن منجر می‌شوند. در صورت تشخیص ترک‌ها، آنها با از دست دادن بهره‌وری ترمیم می‌گردند.

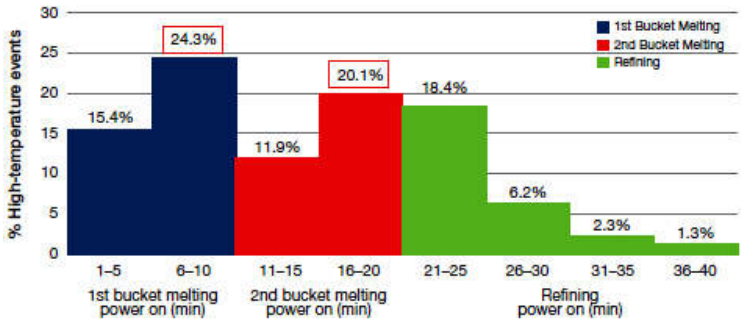
- قرار گرفتن در معرض تابش قوس بیشتر بر فرسایش نسوز بیشتر عمدتا در "نقاط داغ" همانند جلوی الکترود تأثیر می‌گذارد و این باعث می‌شود مدت فعالیت [عمر نسوزچینی] کوره کاهش یابد.
- قرار گرفتن در معرض [تابش قوس] بیشتر سبب ایجاد توقف‌های مکرر می‌شود: هر بار که یک پانل به حد دما می‌رسد، یک هشدار (آلارم) فعال می‌شود.



شکل 11- ثبت آنلاین دمای پانلهای آبگرد ذوب معمول.

به منظور سنجش اثر تابش قوس، از اطلاعات حسگرهای دمای آب خروجی نصب شده روی هر یک از پانل‌ها استفاده می‌شود. در **شکل 11** امکان مشاهده اطلاعات گرافیکی از هر 24 پانل آبگرد که بخش‌های A و B از یک ذوب معمول را تکمیل می‌کنند وجود دارد. امکان تشخیص دو دوره زمانی افزایش دما در برخی از پانل‌ها وجود دارد؛ این موارد متناظر با پایان ذوب کردن سبد قراضه است، هنگامی که قراضه پائین رفته و قوس شروع به نمایان شدن نموده، و سرباره پفکی هنوز به دلیل فاز جامد جلوگیری‌کننده از تشکیل آن وجود ندارد. اگر دمای آب هر پانل از حد تنظیم شده فراتر رود، یک هشدار رویداد ایجاد می‌شود. در مثال شکل-11، هیچ هشداری وجود نداشت، حتی اگر یک افزایش دمای معمول وجود داشت.

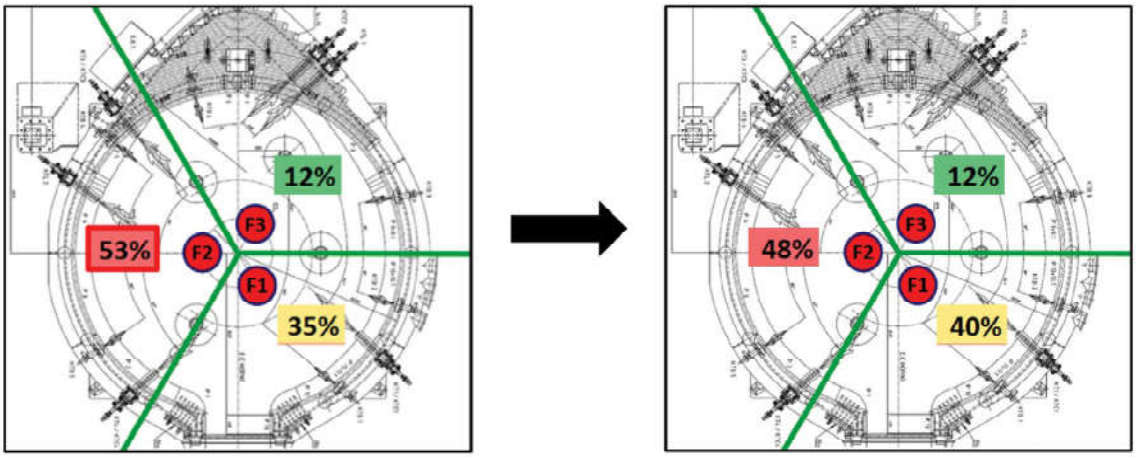
این رفتار حرارتی در هنگام طراحی پروفیل توان در نظر گرفته می‌شود؛ برای مثال، کاهش ولتاژ و توان در هنگام قرار گرفتن در معرض قوس بیشتر تا احتمال وقوع هشدار را کم کند و از این رو فرسایش نسوز و پانل‌های آبگرد را کاهش دهد.



شکل 12- رویدادهای دما بالا نسبت به زمان پاور-آن. (نمونه ای از 1241 رویداد دما بالا از 2693 ذوب.)

با تجزیه‌وتحلیل آمار رویدادهای دما بالا، امکان تایید روند مشاهده شده در یک ذوب معمول وجود دارد. در **شکل 12**، هیستوگرامی از رویدادهای دما بالای تعداد 2693 ذوب نسبت به زمان پاور-آن در فواصل زمانی 5

دقیقه‌ای ترسیم شده است. قابل ذکر می‌باشد که بیشترین احتمال برای داشتن یک رویداد فقط لحظاتی هستند که قبلا توضیح داده شد.



شکل 13- هیستوگرام رویدادهای دما بالا بر حسب بخش زاویه ای، قبل و بعد از افزایش توان.

این اطلاعات همچنین برای توصیف نقاط داغ در کوره توسط تجزیه‌وتحلیل رویدادها بر اساس مکان آنها بسته به پانلی که افزایش دما داشته، مورد استفاده قرار گرفت. پوسته به سه بخش 120 درجه متناظر با هر فاز الکتریکی تقسیم شد. از این نتایج بدیهی است که توزیع ناهمگن حرارت در بخش فاز 2 وجود دارد که از نظر قرار گرفتن در معرض تابش قوس بیشترین اهمیت را دارد.

به منظور تعادل توزیع حرارت، در پروفیل‌های جدید توان، مشعل نزدیک به بخش فاز 2 خاموش نگهداشته شد و به منظور محافظت از دیواره و استفاده از مزیت تمرکز بالاتر حرارت، با تزریق آهک جایگزین شد.

شکل13 توزیع رویدادهای هر سه بخش را برای قبل و بعد از اصلاحات بسته [انرژی] شیمیایی ترسیم می‌کند. همانطورکه مشاهده می‌شود، حتی اگر متعادل‌تر به نظر برسد، هنوز تفاوت‌های معنی‌داری بین بخش‌های فاز 1 و 2 با بخش فاز 3 وجود دارد

جدول 2- مقایسه KPI برای پروفیل‌های 90 MW و 100 MW

	محاسبه شده 90 MW	محاسبه شده 100 MW
پاور-آن (دقیقه)	44.12	39.82
توان متوسط (MW)	91.8	101.2
مصرف O_2 (Nm^3/ton)	32.7	32.9
مصرف برق (KWh/ton)	412.2	411.3
تن مذاب در ساعت	162	162
پاور-آف (دقیقه)	12	12
بهره‌وری* (t/ons/hour)	173.2	187.6

* افزایش 14.4 تن در ساعت

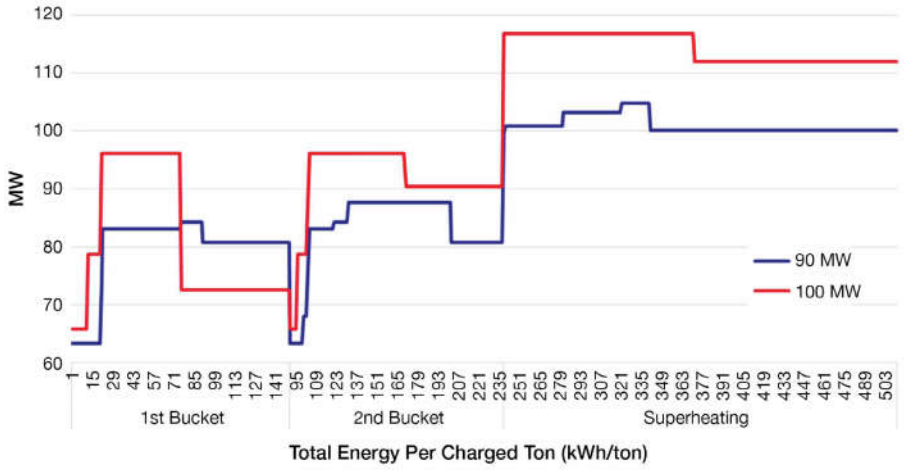
طراحی پروفیل جدید

پیش فرض‌هائی که برای طراحی پروفایل جدید توان در نظر گرفته شدند عبارتند از:

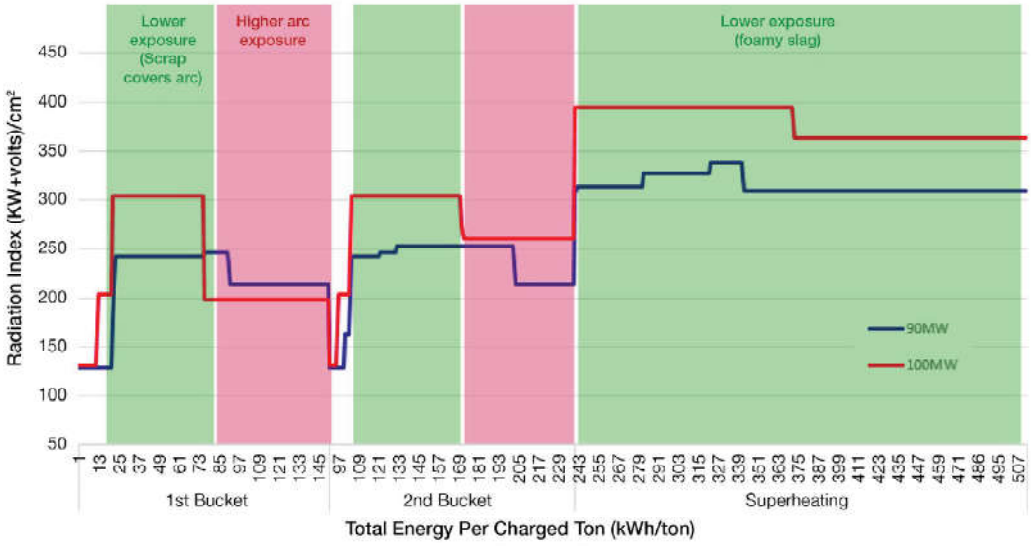
- رسیدن به حداکثر توان با استفاده از ولتاژ تا حد ممکن زیاد برای به حداقل رساندن مصرف الکترود.
- حفظ ضریب توان سینوسی مشابه صورت محاسبه شده برای پروفیل 90MW برای به خطر نیانداختن پایداری قوس.
- حفظ شاخص تابش قوس مشابه در طی لحظات تابش زیاد.
- اصلاح تزریق اکسیژن برای دستیابی به مصرف انرژی الکتریکی و شیمیایی مشابه.

بر اساس این پیش‌فرض‌ها و با توصیه‌های یک متخصص کوره قوس الکتریکی، پروفیل جدید تدوین شد. لحظاتی که در آن قرار گرفتن در معرض قوس کمتری وجود دارد، برای افزایش توان ایده‌آل می‌باشد، با اهمیت کمتر به شاخص تابش که در طی مراحل قرار گرفتن در معرض قوس زیاد بسیار مهم است. با در نظر گرفتن این مورد و با استفاده از شبیه‌ساز، پروفیل جدید با متوسط

توان حدود 100MW در هر ذوب حاصل شد، که به معنی 10MW بیشتر از پروفیل مورد استفاده در حال حاضر (90MW) است. برای محاسبه مزایای بالقوه، بهره‌وری با در نظر گرفتن مدت زمان پاور–آف تکنولوژیکی (شارژ سبد، آماده‌سازی EBT و تخلیه)، اندازه ذوب و میانگین بهره‌دهی واقعی قراضه محاسبه شد. خلاصه آن در **جدول2** نشان داده شده است.

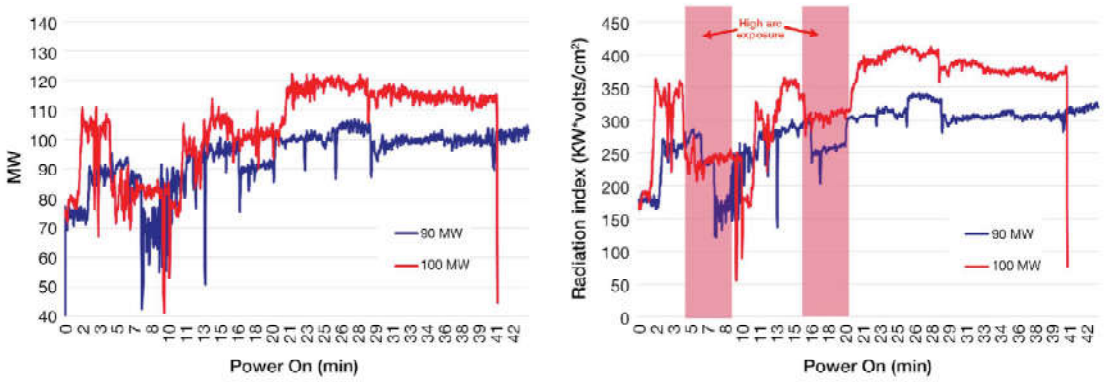


شکل 14– میانگین توان محاسبه شده بین 90 و 100MW نسبت به انرژی کل به ازای هر تن شارژ شده.



شکل 15– شاخص تابش محاسبه شده بین پروفیلهای 90MW و 100MW نسبت به انرژی کل به ازای هر تن شارژ شده.
(سایه قرمز متناظر با لحظات در معرض قوس زیاد است و سایه سبز در هنگامی است که قوس توسط قراضه یا سرباره پفکی پوشانده شده است.)

در **شکل‌های14 و 15**، شاخص توان و تابش محاسبه شده برای هر دو پروفیل 90MW و 100MW مقایسه شده‌اند. شاخص تابش در طی لحظات قرار گرفتن در معرض قوس زیاد هر دو مورد تقریباً یکسان است، فقط با متوسط افزایش 3 درصد، که بسیار ناچیز تلقی شده و در آزمایش‌های صنعتی تأیید می‌گردد.



شکل 16– هیستوگرام رویدادهای دما بالا بر حسب بخش زاویه ای، قبل و بعد از افزایش توان.

نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج، به دلیل برخی مسائل در نیمه دوم سال 2016 که مانع از داشتن شرایط عادی (فصل بارانی، محدودیت اکسیژن و غیره) مشابه آخرین دوره پایدار با استفاده از پروفیل 90MW (در نظر گرفته شده از ژانویه تا مارس 2016)، لازم بود تا سال 2017 صبر کرد. بنابراین دوره بین آوریل و مه 2017 به عنوان عملیات استاندارد با پروفیل جدید 100MW در نظر گرفته شد. مقایسه یک ذوب حاصل از این دوره با یک ذوب معمول با پروفیل قبلی 90MW در **شکل16** نشان داده شده، که در آن شاخص توان و تابش واقعی نسبت به زمان پاور–آن برای نشان دادن اثر واقعی تنظیمات جدید ترسیم شده‌اند.

در **جدول3**، نتایج استفاده از پروفیل جدید برای KPIهای اصلی و افزایش بهره‌وری نشان داده شده است. به منظور حذف اثر راه‌اندازی و تنظیمات فقط ذوب‌های با وقفه 15 دقیقه یا کمتر در نظر گرفته شدند.

جدول 3– مقایسه KPI بین عملیات با پروفیل‌های 90MW و 100MW

	محاسبه شده 90 MW	محاسبه شده 100 MW
نمونه (تعداد ذوبها)	494	575
پاور–آن (دقیقه)	45.1	40.5
توان متوسط (MW)	90.3	100.5
مصرف O_2 (Nm^3/ton)	36.8	37
مصرف برق (KWh/ton)	418	415.1
تن مذاب در ساعت	162.2	163.3
پاور–آف (دقیقه)	12.3	12.1
بهره وری* (t/ons/hour)	169.7	186.3
نسبت هشدار دمای بالا **	0.35	0.17

* افزایش 14.4 تن در ساعت
** نسبت هشدار یا آلارم (نسبت رویدادها به تعداد ذوب‌ها)

برخی از جنبه‌های مرتبط که می‌توان از جدول برجسته کرد عبارتنداز:

- افزایش 16.6 تن در ساعت بدست آمد.
- افزایش بهره‌وری به دلیل متوسط توان بالاتر و کاهش منتج در زمان پاور–آن.
- مصرف انرژی الکتریکی و شیمیایی در هر دو حالت مشابه است و به هدف تعیین شده می‌رسند.
- نسبت هشدار (آلارم)، که تعداد رویدادهای دما بالا در یک دوره معین تقسیم بر تعداد ذوب‌های تولید شده در همان مدت است، با پروفیل MW-100 حتی پایین‌تر هم می‌باشد.

نتیجه گیری

با استفاده از یک استراتژی ساختار یافته و مرتب، امکان دستیابی روان به نتایج مثبت با حداقل ریسک وجود دارد. افزایش 9.8 درصدی بهره‌وری که بالاتر از حد انتظار است، با میزان مصرف انرژی یکسان و حتی نسبت هشدار (آلارم) کمتر به دست آمد. شبیه‌ساز ابداع شده و تجزیه‌وتحلیل رویدادهای دمای بالا ابزار بسیار توانمندی برای انجام بهینه‌سازی فرآیند و حفظ عملکرد فرآیند تحت کنترل پیوسته است.

منابع:

1. L.R. Jaccard, “Operation of the Electric Arc Furnace,” http://www. jaccard.com.br/ES/operacao-at.pdf.