

مقایسه تأثیر استفاده از لانس سایدوال و لانس درب سرباره بر کیفیت سرباره در فولادسازی با کوره قوس الکتریکی

ایوب گودرزی^۱، حامد جمشیدی نیا^۱، عباسعلی براهیمی^۱، سعید شیبانی^۲

^۱ هرمزگان، بندرعباس، شرکت فولاد هرمزگان جنوب

^۲ تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

چکیده

در این پژوهش، مقایسه کیفیت سرباره تولیدی در ذوب‌های فرآیند فولادسازی در کوره قوس الکتریکی شرکت فولاد هرمزگان جنوب تحت شرایط دمش کربن و اکسیژن با دو لانس مختلف یعنی لانس سایدوال و درب سرباره انجام شده است. مقایسه بر اساس بخش فلزی باقیمانده در سرباره، ترکیب شیمیایی، بازیسته و میکروساختار انجام شده است. همچنین تأثیر نوع لانس بر توقفات کربن‌زدایی در یک بازه زمانی چند ماه بررسی شده است. نتایج نشان داد که درصد بخش فلزی موجود در سرباره ذوب‌های با لانس سایدوال کمتر از سایر ذوب‌های تحت دمش با لانس درب سرباره است که تأثیر مثبتی بر کاهش توقفات جمع‌آوری سرباره دارد. ارزیابی میکروساختاری بیانگر وجود تخلخل‌های درشت چند صد میکرون در کنار تخلخل‌های بسیار ریز در سرباره ذوب‌های حاصل از لانس سایدوال است که به معنای کیفیت مطلوب سرباره از جنبه پفکی شدن است. از طرف دیگر تشابه متوسط مقادیر MgO ، FeO و بازیسته سرباره تولیدی با لانس‌های مختلف حاکی از تفاوت نه‌چندان زیاد سیالیت سرباره‌ها است. متوسط توقفات کربن‌زدایی کوره‌های تحت دمش با لانس سایدوال و لانس درب سرباره به ترتیب برابر $۰/۸۸$ و $۱/۲۵$ دقیقه در هر ذوب است که کاهش زمان توقفات با استفاده از لانس سایدوال را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: لانس سایدوال، لانس درب سرباره، فولادسازی، سرباره، کوره قوس الکتریکی.

¹ goodarzi.a@hosco.ir

مقدمه

کوره های قوس الکتریکی طی ۴۰ سال اخیر به طور پیوسته در حال تحول و توسعه بوده اند. در این فرآیند با منبع انرژی الکتریکی، امکان فولادسازی از آهن اسفنجی از طریق دمش اکسیژن، تزریق کربن و فلاکس و تشکیل سرباره وجود دارد [۱ و ۲]. هدف از این فرآیند تامین بخشی از انرژی به صورت انرژی شیمیایی است. همچنین تزریق کربن می تواند روی پفکی شدن سرباره تأثیرگذار باشد. علاوه بر این دمش اکسیژن می تواند به منظور کربن زدایی مذاب انجام شود [۳]. از طرف دیگر، سرباره یکی از اجزای اصلی و مهم در فرآیندهای فولادسازی و از آن جمله فولادسازی در کوره قوس الکتریکی است. ویژگی های سرباره بایستی به نحوی باشد که باعث بهبود کیفیت فولاد شود [۴]. بدین منظور، تشکیل سرباره پفکی نیازمند دو عامل تولید گاز در سرباره همراه با ویسکوزیته مناسب آن است. برای تولید سرباره پفکی در فولادسازی با کوره قوس الکتریکی، گاز اکسیژن تزریق می شود. با این حال برای تشدید و کنترل پفکی شدن سرباره، کربن مذاب بایستی به طور خودخواسته افزایش یابد. بنابراین با تزریق یک ماده کربن دار (مانند کک، گرافیت و ...) تشکیل سرباره پفکی کنترل شده و در اثر احیای FeO موجود در سرباره، مقدار آن در سرباره کاهش یافته و به آهن فلزی تبدیل می شود [۵]. اکسیژن دمیده شده می تواند مستقیماً با کربن حل شده در آهن و یا کربن جامد برای تولید CO واکنش داده و یا با آهن برای تولید اکسید آهن واکنش دهد [۲ و ۳]. پفکی شدن مطلوب سرباره زمانی اتفاق می افتد که واکنش تولید گاز CO و CO₂ ترجیحاً ناشی از واکنش اکسیژن با کربن حل شده در مذاب فولاد باشد و واکنش مستقیم گاز اکسیژن دمیده شده با کربن تزریق یا شارژ شده به آن میزان تأثیرگذار نیست. مهم تر اینکه، کربن حل شده با FeO سرباره واکنش دهد تا کارآمدی بیشتری در پفکی شدن سرباره داشته باشد [۶-۸]. سیستم های دمش و تزریق در کوره قوس الکتریکی به روش ها و مشخصات مختلف طراحی می شوند. در این میان، لانس تزریق کربن و دمش اکسیژن از درب سرباره^۱ و لانس سایدوال^۲ دو نوع پرکاربرد هستند [۹]. به طور کلی هدف از لانس سایدوال دستیابی به منبعی از انرژی شیمیایی با راندمان بالا و قابل اعتماد است. بنابراین اثرات مثبت مانند تولید و بهره وری بیشتر، تشکیل سرباره با کیفیت پفکی بهتر، کنترل بهتر اندیس بازیسته، کنترل بهتر و راندمان بیشتر اکسیداسیون، کاهش مصرف الکتریسیته، کاهش مصرف نسوز، کاهش مصرف الکتروود را به دنبال دارد [۱۰ و ۱۱].

شرکت فولاد هرمزگان جنوب سومین کارخانه بزرگ تولید فولاد در کشور است. واحد فولادسازی این شرکت دارای دو کوره قوس الکتریکی است. سیستم دمش کربن و اکسیژن این دو کوره به صورت لانس از درب سرباره بوده است. با توجه به مزایای بیشتر لانس سایدوال نسبت به لانس درب سرباره، در

¹ Slag-door side lance

² Sidewall lance

کوره قوس الکتریکی شماره ۱ این شرکت، لانس سایدوال طراحی و به صورت آزمایشی نصب شده است تا تأثیرگذاری این لانس به صورت یک دوره آزمایشی مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا در این مقاله هدف بررسی اولیه تأثیرگذاری برای بازه زمانی حدود ۴ ماه از نصب لانس جدید در کوره شماره ۱ شرکت فولاد هرمزگان جنوب است.

روش تحقیق

دریافت اطلاعات از ذوب ها و نمونه گیری از سرباره مطابق با استاندارد کاری شرکت، از کوره شماره ۱ (EAF1) در ذوب های مختلف طی بازه زمانی از مرداد تا دی ۱۳۹۹ صورت گرفته است. دریافت نمونه از سرباره در حال تخلیه توسط قاشقک انجام شده است. همچنین به منظور مقایسه بهتر نتایج با خواص سرباره قبل از نصب لانس در بازه زمانی آذر و دی ۱۳۹۸ مقایسه شده است. اطلاعات عملکردی کوره نیز در بازه زمانی شهریور تا دی ماه ۱۳۹۹ با کوره شماره ۲ (EAF2) مقایسه شده است تا تأثیر زمان و فاکتورهای ناشی از آن مانند تغییر در کیفیت و خواص شارژ ورودی تا حد ممکن حذف شود. مشخصات ذوب های مورد بررسی به طور کلی به شرح زیر بوده است. میزان اسفنجی و بریکت شارژ شده حدود ۱۶۰-۱۵۰ تن بوده است. کربن تزریق شده به صورت کک پتروشیمی کلسینه شده (CPC)^۱ و بسته به گرید فولاد تولیدی و آنالیز اسفنجی در محدوده ۵۰۰-۱۰۰۰ kg (۳-۵ kg/t)، مقدار اکسیژن مصرفی هم در حدود ۱۹ Nm³/t بوده است. برای نامگذاری نمونه های سرباره کوره با لانس درب سرباره از پیشوند SD و برای نمونه های سرباره با لانس سایدوال از پیشوند SW استفاده شده است. سرباره ها مطابق استاندارد کاری آزمایشگاه شرکت آماده سازی و طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)^۲ روی آنها انجام گرفت. به منظور بررسی های میکروساختاری، نمونه ها با کاغذ سمباده شماره های ۴۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ تحت صیقل کاری قرار گرفته و سپس پولیش شدند. در مرحله بعد ساختار میکروسکوپی این نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus در بزرگنمایی های مختلف بررسی شد.

نتایج و بحث

در این قسمت نتایج در دو بخش ارائه خواهد شد. بخش اول مربوط به مطالعه و بررسی روی چند نمونه سرباره دریافت شده از ذوب های تحت دمش لانس سایدوال و مقایسه آن با نمونه های دریافتی قبل از نصب لانس سایدوال یعنی لانس درب سرباره است. بخش دوم مربوط به مقایسه نتایج عملکردی در بازه

^۱ Calcined petroleum coke

^۲ X-ray Fluorescence

زمانی حدود ۴ ماه از مهر تا دی ماه ۱۳۹۹ است. یکی از معیارهایی که می تواند برای ارزیابی کیفیت سرباره مد نظر قرار گیرد، درصد آهن فلزی موجود در سرباره است که با نسبت وزنی بخش فلزی جدا شده از نمونه سرباره نسبت به وزن کل سرباره محاسبه می شود. مقایسه این مقادیر با برخی ذوب هایی که از لانس دمش از درب سرباره استفاده شده است، در شکل ۱ انجام شده است. همان طور که ملاحظه می شود درصد بخش فلزی موجود در سرباره ذوب هایی که با لانس سایدوال انجام شده است به طور معناداری کمتر از سایر ذوب های انجام شده در کوره ۱ در زمان قبل از نصب لانس سایدوال بوده است. مقایسه متوسط این مقادیر نشان می دهد که درصد بخش فلزی در سه ذوب با لانس سایدوال ۲/۲ و برای شش ذوب قبل از نصب لانس ۷/۱ درصد است. یعنی حدوداً به یک سوم کاهش یافته است. این بخش فلزی پس از خروج از کوره و تجمع در بخش های زیرین چاله سرباره (به دلیل دانسیته بیشتر) سبب تشکیل اسکول و افزایش توقفات جمع آوری سرباره خواهد شد. لذا این کاهش قابل توجه در نهایت می تواند تأثیر بسزایی بر کاهش توقفات داشته باشد.

به منظور ارزیابی کیفیت پفکی شدن سرباره در مقیاس میکروسکوپی، تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار سرباره ذوب های SD-1، SD-2 و SD-3 در کوره ۱ با دمش لانس سایدوال در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در هر سه تصویر مشاهده می شود، شباهت بسیار زیادی بین میکروساختارها وجود دارد. به بیان دیگر تخلخل های درشت با ابعاد چند صد میکرون در کنار تخلخل های بسیار ریز به چشم می خورد (مناطق تیره). با این حال در تصویر مربوط به نمونه SD-3، فاز روشن (نشان داده شده با فلش) مشاهده می شود که مربوط به ذرات فلزی باقیمانده در فاز سرباره است. البته این موضوع در تطابق با نتایج شکل ۱ است که این نمونه درصد آهن فلزی بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر داشته است. توضیحات بالا و به ویژه تخلخل بالای این نمونه حاکی از کیفیت مطلوب سرباره از جنبه پفکی شدن است. لذا به نظر می رسد تولید گاز CO و CO₂ ناشی از واکنش بین کربن و اکسیژن تا حد مطلوبی اتفاق افتاده است. به منظور مقایسه تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار تعدادی از سرباره ذوب های SD-2، SD-3 و SD-5 در کوره ۱ قبل از نصب لانس سایدوال، در شکل ۳ آورده شده است. اطلاعات مربوط به آهن فلزی این ذوب ها در شکل ۱ آورده شده بود. آنچه بدیهی است، عدم وجود تخلخل های درشت در این نمونه ها است. هرچند برخی از ذوب ها مانند SD-2 (شکل ۳ الف)) دارای تخلخل میکروسکوپی مطلوب با توزیع یکنواخت هستند، اما سرباره ذوب های SD-3 (شکل ۳ ب)) و SD-5 (شکل ۳ ج)) تخلخل مناسبی ندارند. بنابراین از مقایسه این نتایج با نتایج مربوط به ذوب های بعد از نصب لانس سایدوال (شکل ۲) بهبود کیفیت سرباره از نظر پفکی شدن قابل دریافت است.

به منظور ارزیابی کیفیت سرباره در بازه زمانی طولانی تر و یکسان، مقایسه درصد متوسط MgO ، FeO و اندیس بازیسته (B3) سرباره دو کوره ۱ و ۲ در بازه زمانی ۱۳۹۹/۵/۳۱ تا ۱۳۹۹/۱۰/۱۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. این سه پارامتر از این جهت انتخاب شده اند که تأثیر گذاری همزمان آنها می تواند روی سیالیت سرباره و در نهایت پفکی شدن آن موثر باشد. نتایج حاکی از آن است متوسط مقدار MgO و B3 در دو کوره تفاوت چندانی ندارند. با این حال مقدار متوسط FeO در سرباره دو کوره تنها حدود ۰/۵ درصد اختلاف دارند. با فرض اینکه دمای متوسط سرباره در هر دو کوره یکسان باشند و با توجه به دیگرام های حلالیت ایزوترمال^۱ (ISD) [۵۳]، به نظر می رسد، سیالیت سرباره های دو کوره تفاوت چندانی نداشته اند. لذا با توجه به کنترل های صورت گرفته روی شرایط عملیاتی و فرآیندی، استفاده از لانس سایدوال در کوره ۱ شرایط دستیابی به سرباره با سیالیت مشابه کوره ۲ را فراهم کرده است. بنابراین کیفیت بهتر پفکی شدن سرباره به پیشرفت بیشتر و مطلوب تر واکنش های بین کربن و اکسیژن و لذا تولید بیشتر گاز CO و CO_2 در سرباره کوره ۱ بر می گردد که تحت شرایط یکسان سیالیت، دمش و تزریق با لانس سایدوال عملکرد بهتری از این نظر داشته است. نکته ای که بایستی بر آن تاکید شود، در خصوص بازخورد اپراتور کوره و پرسنل جمع آوری سرباره از زیر کوره ها است. لازم به ذکر است طی این مدت در خصوص پفکی بودن سرباره خروجی از کوره ۱ رضایت بیشتری وجود داشته است که در تطابق با نتایج آنالیز میکروسکوپی است. یکی از پارامترهای مهم تأثیر گذار بر عملکرد کوره ها، توقفات مختلف است. منشا این توقفات به عوامل مختلف مانند توقفات کربن زدایی، باز نشدن مجرای تخلیه، برشکاری مجرای تخلیه، جوشش مذاب در کوره و... مربوط می شود. در این میان توقفات کربن زدایی سهم قابل توجهی در مقایسه یا سایر موارد دارد. از طرف دیگر توقف کربن زدایی به نوعی بیانگر میزان پیشرفت فرآیند واکنش کربن با سایر عوامل و به ویژه اکسیژن است. به عبارت دیگر، نحوه دمش اکسیژن و تزریق کربن در مذاب می تواند روی میزان پیشرفت واکنش بین کربن و اکسیژن موثر باشد و لذا ارزیابی تغییر سیستم دمش به لانس سایدوال بر روی توقفات کربن زدایی می تواند معیار مناسبی برای سنجش وضعیت کوره ها باشد. بدین منظور مقایسه ای بین دو کوره ۱ و ۲ در بازه زمانی حدود چهار ماهه (۱۳۹۹/۵/۳۱ تا ۱۳۹۹/۱۰/۱۲) انجام شده است. نتایج این ارزیابی در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که این پارامتر وابسته به عوامل مختلف مانند گرید فولاد تولیدی، ترکیب آهن اسفنجی شارژ شده و برخی پارامترهای عملکردی کوره است. با این وجود سعی شده است تا با در نظر گرفتن بازه زمانی حداکثر، اثرات سایر پارامترها تا حدی قابل قبول یکسان در نظر گرفته شود. همان طور که مشاهده می شود، بهبود وضعیت کوره ۱ در این بازه چهار ماهه بدیهی است. به عبارت دیگر علی رغم تعداد بیشتر ذوب های تولیدی در کوره ۱، تعداد و مدت

¹ Isothermal solubility diagrams

زمان کل توقفات به طور قابل توجهی کمتر از کوره ۲ است. به نوعی که متوسط توقفات کوره ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۱/۲۵ دقیقه در هر ذوب است. این موضوع در طولانی مدت تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه تولید و لذا بهبود بهره وری دارد.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش به طور خلاصه به شرح زیر است. درصد بخش فلزی موجود در سرباره ذوب‌هایی که با لانس سایدوال انجام شده است به طور معناداری کمتر از سایر ذوب‌های انجام شده با لانس درب سرباره بوده است. لذا این کاهش قابل توجه در نهایت می‌تواند تأثیر بسزایی بر کاهش توقفات جمع‌آوری سرباره داشته باشد. همچنین نتایج بررسی میکروسکوپی نشان داد که در سرباره ذوب‌های حاصل لانس سایدوال، تخلخل‌های درشت با ابعاد چند صد میکرون در کنار تخلخل‌های بسیار ریز وجود دارد که حاکی از کیفیت مطلوب سرباره از جنبه پفکی شدن است. از طرف دیگر متوسط مقدار MgO ، FeO و بازیسته در سرباره ایجاد شده با لانس‌های مختلف و لذا سیالیت سرباره‌های دو کوره تفاوت چندانی نداشته‌اند. علاوه بر این متوسط توقفات کربن زدایی کوره‌های تحت دمش با لانس سایدوال و لانس درب سرباره به ترتیب برابر ۰/۸۸ و ۱/۲۵ دقیقه در هر ذوب است. این موضوع در طولانی مدت تأثیر قابل توجهی بر افزایش بهره وری دارد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از شرکت فولاد هرمزگان جنوب در خصوص حمایت از انجام این پژوهش در دانشگاه تهران، تشکر و قدردانی می‌شود.

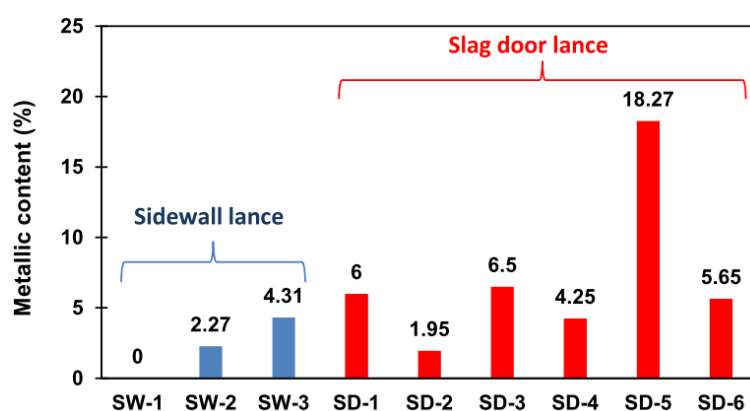
مراجع

- [1] F. Memoli, C. Mapelli, P. Ravanelli, M. Corbella, "Evaluation of the Energy Developed by a Multipoint Side-wall Burner-Injection System during the Refining Period in a EAF", ISIJ International, 2004, Vol. 44, No. 9, pp. 1511-1516.
- [2] H. Matsuura, C. P. Manning, R. A. Fortes, and R. J. Fruehan, "Development of a decarburization and slag formation model for the electric arc furnace", ISIJ international, 2008, Vol. 48, No. 9, pp. 1197-1205.
- [3] A. P. Luz, T. A. Ávila, P. Bonadia, V. C. Pandolfelli, "Slag Foaming: Fundamentals, Experimental Evaluation and Application in the Steelmaking Industry", Refractories Worldforum, 2011, Vol. 3, pp. 91-98.
- [4] E. B. Pretorius, R. C. Carlisle, "Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking", Iron and Steelmaker (USA), 1999, Vol. 26, No. 10, pp. 79-88.

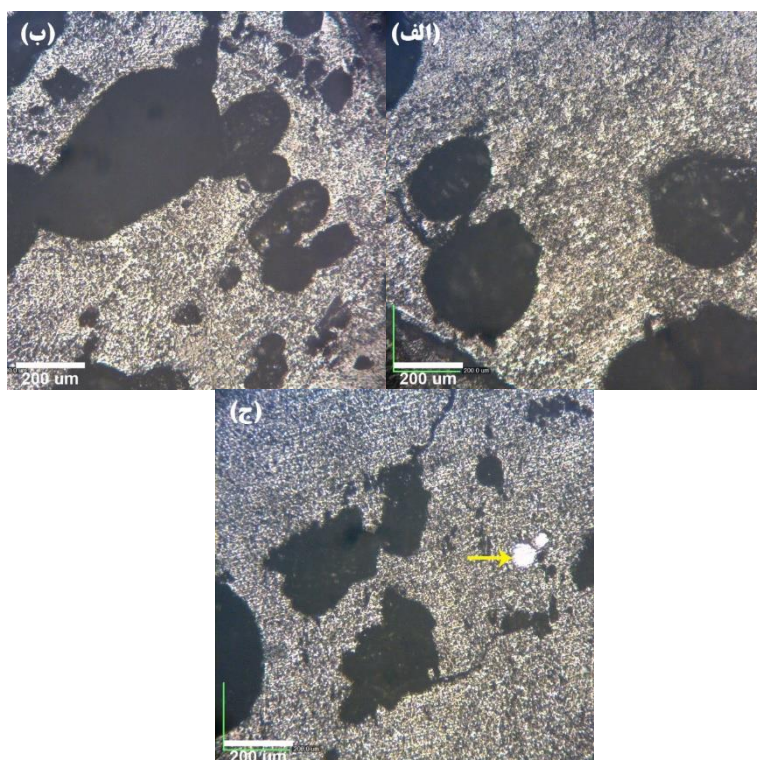
- [5] E. Turkdogan, R. Fruehan, "Fundamentals of iron and steelmaking; The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining" AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1998, Volume, Vol. 11, pp. 125-126.
- [6] B. Sarma, A. Cramb, R. Fruehan, "Reduction of FeO in smelting slags by solid carbon: experimental results", Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, Vol. 27, No. 5, pp. 717-730.
- [7] W. Pan, M. Sano, M. Hirasawa, K. Mori, "Kinetics of carbon oxidation reaction between molten iron of high carbon concentration and iron oxide containing slag", ISIJ international, 1991, Vol. 31, No. 4, pp. 358-365.
- [8] H. Matsuura, R. J. Fruehan, "Slag Foaming in an electric arc furnace", ISIJ international, 2009, Vol. 49, No. 10, pp. 1530-1535.
- [9] J.A.T. Jones, B. Bowman, P.A. Lefrank, "Electric Furnace Steelmaking, The AISE Steel Foundation", 1998, Pittsburgh, PA.
- [10] F. Memoli, C. Mapelli, P. Ravanelli, M. Corbella, "Simulation of Oxygen Penetration and Decarburisation in EAF Using Supersonic Injection System", ISIJ International, 2004, Vol. 44, No. 8, pp. 1342-1349.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به متوسط توقفات کربن زدایی در دو کوره ۱ و ۲ در بازه زمانی ۱۳۹۹/۵/۳۱ تا ۱۳۹۹/۱۰/۱۲.

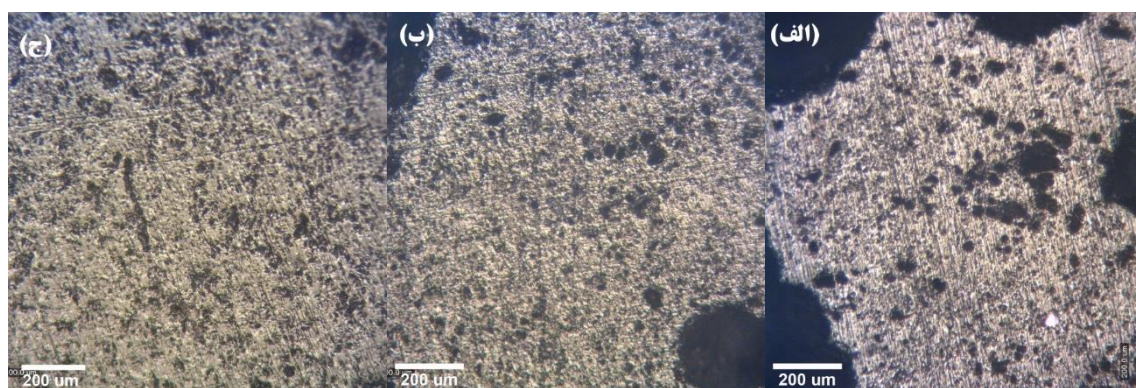
کوره	تعداد کل ذوب	تعداد توقفات	زمان کل توقف (min)	متوسط توقفات (min/Heat)
۱	۲۵۱۶	۷۰۴	۲۲۰۷	۰/۸۸
۲	۲۴۵۸	۱۰۵۳	۳۰۶۳	۱/۲۵



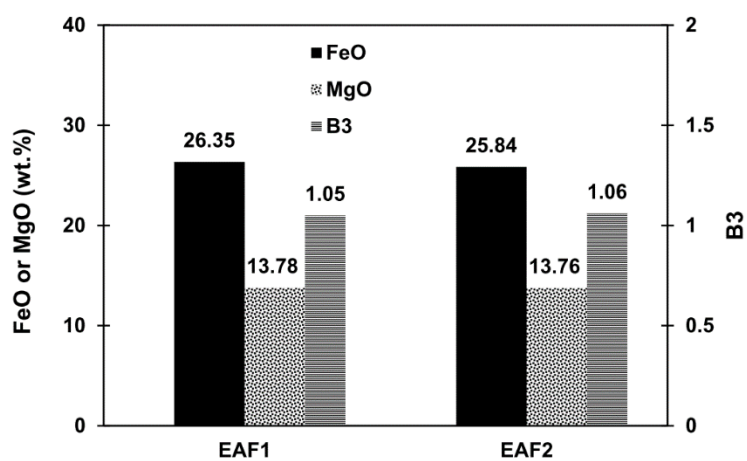
شکل ۱- مقایسه درصد بخش فلزی موجود در سرباره برای ذوب های مختلف.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار سرباره ذوب های (الف) SD-1، (ب) SD-2 و (ج) SD-3 در کوره ۱ با دمش لانس ساییدوال.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار سرباره ذوب های (الف) SD-2، (ب) SD-3 و (ج) SD-5 در کوره ۱ با لانس درب سرباره.



شکل ۴- مقایسه متوسط درصد FeO، MgO و اندیس B3 سرباره دو کوره ۱ و ۲ در بازه زمانی ۱۳۹۹/۵/۳۱ تا ۱۳۹۹/۱۰/۱۲.

