



بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر مصرف گاز طبیعی در پیشگرم کن‌های پاتیل شرکت فولاد مبارکه

نرجس‌السادات رضوی¹، ایمان اکبری^{2*}، حامد فردی³، یوسف اسماعیل‌زاده⁴

* نویسنده مسئول: i.akbari@ce.iut.ac.ir

چکیده

پیش‌گرم‌کن‌های پاتیل، عمده مصرف‌کننده‌های گاز طبیعی در واحد فولادسازی محسوب می‌شوند. در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان مصرف گاز طبیعی و اجرای راهکارهای عملیاتی به منظور کاهش مصرف انرژی در این تجهیزات پرداخته شده است. نتایج حاصل از مطالعات میدانی نشان می‌دهد که پارامترهایی نظیر رعایت نمودن فاصله‌ی حداقلی بین بشقابک و پاتیل، دبی بسیار زیاد گاز به منظور تسریع در پیش‌گرمایش، تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت و بیش‌گرمایش پاتیل به بالاتر از 1100°C ، منجر به اتلاف انرژی به میزان حداقل 40 درصد می‌گردد. بر طبق نتایج حاصل از این پژوهش، پس از اعمال تغییرات و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، میزان گاز مصرفی برای پیش‌گرمایش پاتیل سرد از 1449/5 به 1108 نرمال‌مترمکعب و همچنین زمان لازم برای پیش‌گرمایش از 205 دقیقه به 168 دقیقه کاهش یافت. با اجرای کلیه راهکارهای عملیاتی، میزان مصرف انرژی در این تجهیزات، به طور میانگین 20 درصد کاهش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی

پیش‌گرم‌کن پاتیل، صرفه‌جویی انرژی، راهکارهای عملیاتی، فولادسازی

1- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، پارک علم و فناوری شیخ بهائی، شرکت کاوش انرژی ایرانیان

2- دکتری مهندسی شیمی، شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، پارک علم و فناوری شیخ بهائی، شرکت کاوش انرژی ایرانیان

3- واحد فولادسازی، شرکت فولاد مبارکه

4- واحد فولادسازی، شرکت فولاد مبارکه

1- مقدمه

در طی دهه‌ی گذشته، قدم‌های بزرگی در جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد برداشته شده است. ورل و همکاران، پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی و کاهش تولید دی‌اکسید کربن در صنعت آهن و فولاد آمریکا را مورد بررسی قرار دادند [1]. ژانگ و وانگ به بررسی پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی در بخش‌های مختلف صنعت آهن و فولاد چین پرداختند [2]. ناحیه‌ی فولادسازی به عنوان قلب مجتمع فولاد مبارکه، سهم قابل توجهی در مصرف انواع حامل‌های انرژی دارد. گاز طبیعی به عنوان یکی از حامل‌های انرژی مصرفی در این واحد، در تجهیزات متعدد و برای اهداف متفاوتی مصرف می‌گردد. آمار و ارقام نشان می‌دهد که میزان مصرف گاز طبیعی در ناحیه‌ی فولادسازی، سالانه بیش از سی میلیون نرمال مترمکعب است. این میزان گاز طبیعی، در بخش‌های مختلف ناحیه‌ی فولادسازی نظیر پیش‌گرم‌کن‌ها، خشک‌کن‌ها، گرم‌کن‌های تاندیش و تجهیزات متفرقه دیگر مصرف می‌گردد. سهم پیش‌گرم‌کن‌های افقی در مصرف انرژی و همچنین تلفات انرژی بیش از دیگر تجهیزات است. کيفر و باتلز به بررسی بهبود کارایی انرژی در این تجهیزات پرداخته‌اند [3]. هدف از این مقاله، بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مختلف بر میزان مصرف انرژی در پیش‌گرم‌کن‌های افقی و ارائه روش‌های عملیاتی به منظور کاهش مصرف گاز در این تجهیزات است. علاوه بر این، در این مقاله به نتایج حاصل از اجرای راهکارهای عملیاتی به منظور کاهش مصرف گاز طبیعی در این تجهیزات پرداخته شده است.

2- روش تحقیق

در واحد فولادسازی فولاد مبارکه، پاتیل‌های حمل مذاب، قبل از بارگیری مذاب و به منظور جلوگیری از

شوکت حرارتی تا دمای 1100 درجه‌ی سانتیگراد پیش‌گرم می‌شوند. عمل پیش‌گرمایش پاتیل توسط کوره‌ی گاز مجهز به یک مشعل گاز سوز انجام می‌شود. این کوره به صورت یک بشقابک که در مرکز آن یک مشعل احتراقی قرار گرفته است، عمل پیش‌گرم‌نمودن پاتیل را انجام می‌دهد. پس از قرارگیری پاتیل در سکوی مقابل بشقابک به صورت افقی، بشقابک به جلو رانده می‌شود تا در دهانه‌ی پاتیل قرار گیرد و سپس با روشن شدن مشعل، عملاً پیش‌گرمایش پاتیل سرد تا دمای 1100 درجه‌ی سانتیگراد ادامه می‌یابد.

در واحد فولادسازی فولاد مبارکه، پیش‌گرم‌کن‌های افقی در دو بخش مدول A و مدول B واقع شده‌اند. این تجهیزات دارای کنتور مجزا نیستند لذا در گام اول این پروژه و به منظور تعیین میزان دقیق گاز مصرفی در این تجهیزات، یک کنتور توربینی مدل G160 در مسیر خط گاز مصرفی پیش‌گرم‌کن شماره 7 مدول B نصب گردید. پس از نصب و راه‌اندازی کنتور، میزان مصرف گاز طبیعی در این پیش‌گرم‌کن در یک بازه‌ی زمانی ثبت گردید.

در گام بعد، چک لیستی به منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز مانند دمای لحظه‌ای پاتیل، میزان مصرف گاز ثبت‌شده توسط کنتور در بازه‌ی مورد نظر و غیره تهیه شد. پس از این مرحله، داده‌های لازم جهت تعیین میزان مصرف گاز طبیعی قبل از اعمال تغییرات تهیه گردید. در گام سوم با استفاده از مطالعات میدانی و بررسی پارامترهای مختلف، میزان اتلاف انرژی در این تجهیزات و پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی تعیین گردید و بر اساس آن، راهکارهای کاهش مصرف انرژی مشخص شد. در گام بعد راهکارهای عملیاتی مورد نظر از نقطه نظر فنی، ایمنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت و با همکاری تیم تعمیرات مکانیک راهکارهای قابل اجرا روی پیش‌گرم‌کن‌های افقی اعمال

پس از مشخص شدن میزان مصرف گاز در این پیش گرم کن به بررسی میدانی اثر پارامترهای میدانی مختلف بر مصرف گاز طبیعی در این تجهیزات پرداخته شد. نتایج حاصل از مطالعات میدانی نشان می‌دهد که پارامترهایی نظیر (1) رعایت نمودن فاصله‌ی حداقلی بین بشقابک و پاتیل (2) دبی بسیار زیاد گاز به منظور تسریع در پیش گرمایش و (3) تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت، پارامترهای تأثیرگذار بر مصرف پیش گرم کن هستند. در ادامه به نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی اثر پارامترهای مختلف بر مصرف گاز در این پیش گرم کن‌ها پرداخته می‌شود.

3-2-1- زیاد بودن فاصله‌ی بین بشقابک و پاتیل

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که یکی از منابع مهم اتلاف انرژی در این پیش گرم کن‌ها، زیاد بودن فاصله‌ی بین بشقابک و پاتیل است. در شکل (2) عدم رعایت فاصله‌ی حداقلی بین بشقابک و پاتیل نشان داده شده است.



شکل (2) فاصله‌ی زیاد بین بشقابک و پاتیل و اتلاف انرژی از این فاصله

عدم رعایت فاصله، علاوه بر اتلاف حرارت از فضای خالی بین بشقابک و پاتیل، باعث ایجاد خطا در دمای ثبت شده توسط ترموکوپل می‌گردد. به منظور بررسی اثر

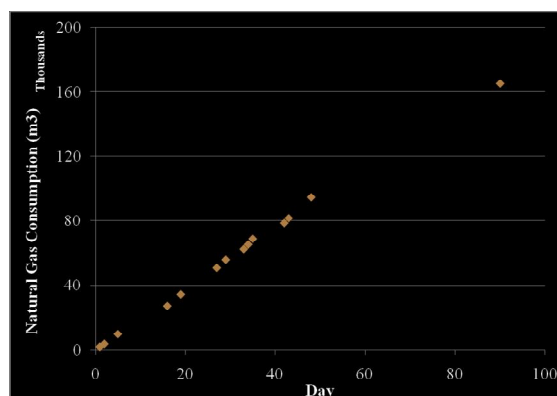
گردید. در گام آخر به بررسی تأثیر اجرای راهکارها بر مصرف گاز طبیعی در این پیش گرم کن پرداخته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- تعیین میزان گاز مصرفی پیش گرم کن

همانگونه که بیان گردید، اولین گام پس از نصب و راه‌اندازی کنتور، تعیین میزان مصرف گاز طبیعی در شرایط نرمال در پیش گرم کن مورد مطالعه است. در شکل (1) میزان مصرف تجمعی گاز در روزهای مختلف، ثبت شده از زمان نصب کنتور بر حسب مترمکعب نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌نمائید، روند مصرف گاز در این پیش گرم کن تقریباً به صورت خطی و با شیب ثابت است که بر این اساس میانگین مصرف گاز روزانه در این پیش گرم کن، 6417 نرمال مترمکعب برآورد می‌گردد. با توجه به اینکه در مدت این داده‌برداری، واحد در شرایط نرمال کارکرد قرار داشته است، لذا می‌توان نتیجه گرفت در صورت کارکرد در شرایط نرمال، مصرف گاز سالانه‌ی این پیش گرم کن نزدیک به دو میلیون و سیصد و چهل و دو هزار نرمال مترمکعب خواهد بود.



شکل (1) میزان مصرف تجمعی گاز در پیش گرم کن پاتیل شماره 7 ناحیه‌ی فولادسازی در طول دوره‌ی داده‌برداری

3-2- بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر مصرف گاز

از 2430 به 2652 نرمال مترمکعب افزایش یافته است که معادل با افزایش 10 درصدی در مصرف گاز است.

جدول (2) بررسی اثر دبی بر مصرف گاز و عملیات پیش گرمایش

پارامتر	نمونه CS ¹	نمونه CS ³
دمای اولیه‌ی پاتیل	250 °C	250 °C
دمای نهایی پاتیل	1100 °C	1100 °C
دبی متوسط گاز	663 Nm ³ /hr	487 Nm ³ /hr
نرخ گرمایش	212/5 °C/hr	200 °C/hr
زمان سپری شده	4 hr	5 hr
کل مصرف گاز	2652 Nm ³	2430 Nm ³

3-2-3- پیش گرمایش پاتیل

طبق دستورالعمل مربوط به پیش گرمایش پاتیل، لازم است تا پاتیل قبل از ارسال به منظور بارگیری مذاب، تا دمای 1100 درجه‌ی سانتیگراد پیش گرم شود. اما در بعضی موارد به دلایل مختلف پاتیل تا بالاتر از دمای 1100 درجه‌ی سانتیگراد پیش گرم می‌گردد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش دمای پاتیل، مقدار مصرف انرژی به ازای افزایش هر درجه‌ی سانتیگراد دمای پاتیل با روند تساعدی افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده، کاهش اختلاف دمای بین شعله و پاتیل و در نتیجه کاهش سرعت انتقال حرارت است. نتایج حاصل از داده‌برداری میدانی نیز تأییدکننده‌ی همین موضوع است. در شکل (3) مقدار مصرف انرژی به ازای هر درجه‌ی سانتیگراد افزایش دمای پاتیل در بازه‌های دمایی مختلف نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌نمائید، با افزایش دمای پاتیل، مقدار مصرف انرژی به ازای هر درجه‌ی سانتیگراد افزایش دمای پاتیل، افزایش می‌یابد. به طور متوسط در دماهای بالاتر از 1100 درجه‌ی سانتیگراد، برای افزایش هر درجه‌ی

فاصله بر مصرف گاز، به مقایسه‌ی میزان مصرف گاز در دو آزمایش مختلف پرداخته شده است. در جدول (2) نتایج حاصل از داده‌برداری اثر فاصله بر مصرف انرژی در دو حالت مشابه نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌نمائید، با افزایش فاصله‌ی بشقابک از پاتیل، مصرف گاز افزایش می‌یابد. به طور میانگین نتایج حاصل از داده‌برداری نشان می‌دهند که رعایت فاصله‌ی حداقلی بین بشقابک و پاتیل می‌تواند حداقل 10 درصد کاهش مصرف انرژی را به همراه داشته باشد.

جدول (1) بررسی اثر فاصله بر مصرف گاز و عملیات پیش گرمایش

پارامتر	نمونه CS ¹	نمونه CS ²
دمای پاتیل در حالت اول	800 °C	800 °C
دمای پاتیل در حالت دوم	867 °C	868 °C
مصرف گاز در این بازه	404 Nm ³	464 Nm ³
فاصله‌ی بشقابک	حداقل	بیش از 10 سانتیمتر

3-2-2- دبی بسیار زیاد گاز به منظور تسریع در پیش گرمایش

در بعضی موارد و به منظور تسریع در پیش گرمایش پاتیل، دبی گاز ورودی به پیش گرم کن، با استفاده از شیر دستی توسط اپراتور افزایش می‌یابد. این امر اگر چه در بعضی مواقع سرعت پیش گرمایش را افزایش می‌دهد، اما سبب افزایش قابل توجه مصرف انرژی در این پیش گرم کن نیز می‌گردد. به منظور بررسی اثر دبی بر مصرف گاز و سرعت پیش گرمایش، آزمایشاتی با دو دبی مختلف انجام گردید. در جدول (2) عملیات پیش گرمایش دو پاتیل مختلف با هم مقایسه شده است.

همانگونه که مشاهده می‌نمائید، با افزایش دبی متوسط گاز از 663 به 487 نرمال مترمکعب، زمان لازم برای پیش گرمایش پاتیل از 5 ساعت به 4 ساعت کاهش یافته است. اما مصرف گاز

با همکاری کارشناسان و تکنسین های تعمیرات کوره های پاتیلی، تغییراتی روی پیش گرم کن شماره هفت انجام گردید که در ادامه به بیان این تغییرات پرداخته می شود.

3-3-2- تنظیم نسبت هوا به سوخت

تنظیم پارامترهای احتراق (هوا به سوخت، طول شعله) با استفاده از اندازه گیری غلظت اکسیژن و مونوکسید کربن در محصولات حاصل از احتراق با استفاده از آنالایزر احتراق انجام گردید. بدین منظور با استفاده از دستگاه تستو مدل 330، در حین عملیات تنظیم هوا به سوخت، غلظت اکسیژن و مونوکسید کربن در گازهای حاصل از احتراق اندازه گیری شد و در دبی گاز ثابت، مقدار هوا به نحوی تنظیم گردید که مقدار اکسیژن در حداقل میزان ممکن باشد. با در نظر گرفتن این نکته که غلظت مونوکسید کربن، بیش از 100 ppm نباشد.

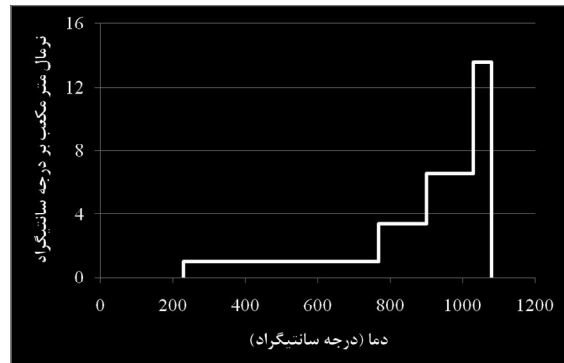
3-3-3- رعایت فاصله ی حداقلی پاتیل و بشقابک

با توجه به اینکه تنظیم و رعایت فاصله ی حداقلی به اپراتور بهره بردار بستگی دارد، در این بخش از داده برداری، بشقابک توسط همکار این پروژه (تکنسین تعمیرات کوره های پاتیلی) در کمترین فاصله نسبت به پاتیل قرار داده شد.

3-4- بررسی اثر بخشی تغییرات

پس از اعمال تغییرات مدنظر روی پیش گرم کن شماره 7، داده برداری از پیش گرم کن در عملیات پیش گرمایش چند پاتیل مختلف انجام گردید. در این داده برداری ها سعی گردید تا پیش گرم کن در شرایط بهینه و کنترل شده قرار داشته باشد. نکاتی مانند رعایت فاصله ی حداقلی و تنظیم هوا به سوخت برای این داده برداری ها اعمال گردید. در ادامه به بیان نتایج حاصل از این بخش و مقایسه آن با داده های پیش از اصلاح پرداخته می شود. برای حالت بعد از تغییرات

سانتیگراد دمای پاتیل، 13 نرمال متر مکعب گاز مصرف می گردد.



شکل (3) مقدار گاز مصرفی برای افزایش هر درجه ی سانتیگراد دمای پاتیل در بازه های دمایی مختلف

3-2-3- تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت

یکی از مشکلات رایج و منابع اتلاف انرژی در پیش گرم کن ها (همانند دیگر سیستم های احتراقی) تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت است. در این پیش گرم کن ها عملیات تنظیم نسبت هوا به سوخت، به صورت چشمی انجام می شود و تنها ملاک تنظیم بودن شعله، رنگ آن است. از آنجا که میزان اکسیژن در دسترس برای انجام واکنش، تأثیر بسزایی در بازده فرآیند احتراق دارد، لذا تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت تأثیر بسزایی در بازده حرارتی کوره دارد. بررسی بازده احتراق با استفاده از تعیین میزان بهینه ی هوای اضافی انجام می گیرد. نتایج حاصل از محاسبات با استفاده نرم افزار Hysys نشان می دهد که با افزایش نسبت هوای اضافی از 10 به 20 درصد دمای شعله به میزان 200 درجه ی سانتیگراد کاهش و تلفات انرژی از طریق گازهای حاصل از احتراق به میزان 8 درصد افزایش می یابد.

3-3- بهبود شرایطی عملیاتی پیش گرم کن

با توجه به موارد بیان شده در بخش قبل و مشخص شدن عیوب و مشکلات پیش گرم کن ها از لحاظ مصرف انرژی،

نشان می‌دهد که عواملی نظیر دبی بیش از حد گاز، تنظیم نبودن نسبت هوا به سوخت، فاصله‌ی زیاد بین بشقابک و پاتیل منجر به هدر رفت انرژی حرارتی در این پیش‌گرم‌کن‌ها تا 40 درصد (و در بعضی موارد بیشتر) می‌گردد. داده‌برداری‌های میدانی نشان می‌دهد که با افزایش دبی متوسط گاز، اگر چه زمان لازم برای پیش‌گرمایش پاتیل کاهش می‌یابد، اما مصرف گاز نیز به میزان حداقل 10 درصد افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از داده‌برداری قبل و بعد از اعمال تغییرات، نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، بعد از اعمال تغییرات و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، مقدار گاز مصرفی از 1449/5 به 1108 نرمال مترمکعب و زمان لازم برای افزایش دمای پاتیل از 205 دقیقه به 168 دقیقه کاهش یافته است. به طور کلی با اجرای کلیه‌ی راهکارهای عملیاتی میزان مصرف انرژی جهت پیش‌گرمایش پاتیل‌های دورچینی به طور میانگین 20 درصد کاهش یافت.

8- تشکر و قدردانی

این مقاله در راستای طرح تحقیقاتی ما بین شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان و مجتمع فولاد مبارکه تهیه گردیده است. در این ارتباط لازم است از همکاری و مساعدت مسئولین محترم مجتمع فولاد مبارکه تشکر و قدردانی به عمل آید.

مراجع:

- [۱] Worrell E., Price, L., Martin, N., Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector, *Energy*, ۲۶, ۲۰۰۱, p.p. ۵۱۳-۵۳۶.
- [۲] Zhang, J., Wang, G., Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector, *Energy*, ۳۳, ۲۰۰۸, p.p. ۵۲۵-۵۳۷.
- [۳] Kiefer J. R., Battles D. D., *Improved Efficiency in Ladle Preheating, A Case Study*, 2nd Industrial Energy Technology Conference, TX, ۱۳-۱۶ April ۱۹۸۰, Houston, USA

چندین داده‌برداری انجام گردید. در جدول (3) زمان و میزان مصرف گاز برای پیش‌گرمایش پاتیل سرد قبل از اعمال تغییرات و بعد از اعمال تغییرات با هم مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌نمائید، علاوه بر مقدار گاز مصرفی زمان مورد نیاز برای پیش‌گرمایش پاتیل نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. مقدار گاز مصرفی از 1449/5 به 1108 نرمال مترمکعب و زمان لازم برای افزایش دمای پاتیل از 205 دقیقه به 168 دقیقه کاهش یافته است. نتایج فوق نشان دهنده‌ی اثربخشی قابل توجه تغییرات انجام شده روی این پیش‌گرم‌کن در این پروژه است.

همانگونه که در جداول فوق مشاهده می‌شود، با اصلاح این پیش‌گرم‌کن و انجام تغییرات مناسب روی آن و نظارت بر آن، علاوه بر اینکه مقدار مصرف گاز برای دستیابی به هدف کاهش یافته است، زمان لازم برای پیش‌گرمایش نیز کم شده است.

جدول (1) بررسی اثر دبی بر مصرف گاز و عملیات پیش‌گرمایش

پارامتر	قبل از اصلاح	پس از اصلاح
تنظیم فاصله‌ی بشقابک	x	✓
تنظیم نسبت هوا به سوخت	x	✓
اصلاح سیستم خروج گاز	x	✓
دمای اولیه‌ی پاتیل	485 °C	492 °C
دمای ثانویه	861 °C	876 °C
مصرف گاز	1449/5 Nm ^۳	1108 Nm ^۳
زمان	205 دقیقه	168 دقیقه

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بیان راهکارهای اجرا شده به منظور کاهش مصرف انرژی در پیش‌گرم‌کن شماره هفت و بررسی اثر بخشی راهکارها پرداخته شد. مطالعات این بخش

