

# مطالعه موردی ممیزی انرژی واحد فولاد سازی در یک کارخانه فولاد

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۰	چکیده
۱۱	فصل اول: بررسی و دسته‌بندی آلیاژهای تولیدی در کارخانه فولاد ممیزی شده
۱۱	۱-۱. مشخصات انواع آلیاژهای تولیدی در کارخانه فولاد ممیزی شده
۱۴	۲-۱. تحلیل‌های آماری داده‌های بهره‌برداری
۲۰	۳-۱. دسته‌بندی آلیاژهای تولیدی
۲۳	فصل دوم: تحلیل شرایط تولید و کارایی تجهیزات
۲۵	۱-۲. تراز انرژی سالیانه واحد
۲۶	۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی تجهیزات
۲۷	۱-۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی الکتریکی در واحد فولادسازی
۲۸	۲-۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی حرارتی در واحد فولادسازی
۳۰	۳-۲. تعیین عملکرد و کارایی تجهیزات عمده انرژی بر
۳۰	۱-۳-۲. بررسی عملکرد و کارایی کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار PHAST
۳۷	۲-۳-۲. بررسی عملکرد و کارایی بویلر (کارگاه تولید بخار)
۴۶	۳-۳-۲. بررسی عملکرد کوره‌های تونلی و بوژی
۴۹	فصل سوم: تحلیل پارامترهای موثر بر مصرف و تولید
۴۹	۱-۳. کوره‌های قوس الکتریکی
۵۵	۱-۱-۳. روش‌های ممیزی انرژی کوره‌های قوس الکتریکی
۵۸	۲-۱-۳. معرفی مدل تجربی کوهل برای برآورد تاثیر پارامترهای مختلف بر مصرف انرژی
۷۱	۳-۱-۳. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از مدل کوهل و نرم‌افزار EViews
۷۹	3-1-4. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره قوس کارخانه فولاد ممیزی شده با استفاده از نرم افزار PHAST
۸۲	۲-۳. کوره‌های پاتیلی
۸۴	۳-۳. بویلر (مربوط به کارگاه تولید بخار)
۸۴	۱-۳-۳. بررسی تاثیر میزان اکسیژن اضافی
۸۴	۲-۳-۳. دمای بدنه بویلر
۸۶	فصل چهارم: تحلیل تفاوت شرایط کنونی و شرایط بهینه مصرف انرژی
۸۶	۱-۴. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری از مقادیر طراحی

۸۶	۱-۴-۱. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی از مقادیر طراحی
۹۲	۱-۴-۲. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره‌های پاتیلی از مقادیر طراحی
۹۲	۱-۴-۳. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری بویلر کارگاه تولید بخار از مقادیر طراحی
۹۲	<b>۲-۴. برنامه‌ریزی تولید با هدف کاهش مصرف انرژی</b>
۹۲	۱-۴-۲-۱. محاسبه تلفات انرژی الکتریکی ناشی از بالا بودن دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی
۹۳	۱-۴-۲-۲. محاسبه تلفات انرژی الکتریکی ناشی از بالا بودن زمان ذوب (توقفات) در کوره‌های قوس الکتریکی
۹۴	۱-۴-۲-۳. محاسبه پتانسیل صرفه جویی انرژی بوسیله تزریق اکسیژن کافی در کوره‌های قوس الکتریکی
۹۵	۱-۴-۲-۴. محاسبه پتانسیل صرفه جویی انرژی بوسیله در اثر کاهش زمان POWER ON در کوره‌های پاتیلی
۹۷	<b>فصل پنجم: ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تحلیل اقتصادی</b>
۹۷	<b>۱-۵. راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی</b>
۹۷	۱-۵-۱. راهکارهای متداول بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد فولادسازی
۱۲۱	۱-۵-۲. راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد فولادسازی کارخانه ممیزی شده در گزارش
۱۲۹	<b>۲-۵. تحلیل اقتصادی راهکارهای ارائه شده</b>
۱۲۹	۲-۵-۱. راهکارهای کم‌هزینه
۱۳۲	۲-۵-۲. راهکارهای هزینه متوسط
۱۳۳	۲-۵-۳. راهکارهای پرهزینه
۱۴۰	<b>مراجع</b>

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۲	جدول ۱-۱. آنالیز آلیاژهای تولیدی در کارخانه فولاد ممیزی شده
۱۴	جدول ۱-۲. شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده
۱۶	جدول ۱-۳. مقادیر پارامترهای مهم برای کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد مورد نظر
۱۶	جدول ۱-۴. شرایط بهره‌برداری کوره‌های پاتیلی کارخانه فولاد ممیزی شده
۲۰	جدول ۱-۵. مقادیر تناژ مذاب ورودی به ریخته‌گری بلوم و اینگات واحد فولادسازی کارخانه فولاد
۲۱	جدول ۱-۶. دسته‌بندی گریدهای فولاد تولیدی در واحد فولادسازی کارخانه فولاد مورد نظر بر مبنای میزان عناصر آلیاژی
۲۲	جدول ۱-۷. شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی و پاتیلی براساس دسته‌بندی آلیاژهای مختلف
۲۸	جدول ۲-۱. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری
۲۹	جدول ۲-۲. میزان مصرف گاز طبیعی واحد فولادسازی کارخانه فولاد در بازه زمانی اندازه‌گیری
۲۹	جدول ۲-۳. مصرف ویژه حرارتی (فسیلی) واحد فولادسازی کارخانه فولاد مورد نظر در بازه زمانی اندازه‌گیری
۳۱	جدول ۲-۴. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای شماره ذوب ۱۲۱۰۶۲۱ کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد ممیزی شده
۳۴	جدول ۲-۵. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای شماره ذوب ۱۲۲۰۶۵۱ کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد
۴۰	جدول ۲-۶. مقادیر نمونه برای جرم رطوبت موجود در هوا برحسب دمای هوا
۴۱	جدول ۲-۷. محدوده درصد تلفات تشعشی و جابجائی
۴۲	جدول ۲-۸. آنالیز گاز طبیعی مصرفی بویلر کارخانه فولاد
۴۳	جدول ۲-۹. میزان تلفات حرارتی و راندمان بویلر کارخانه فولاد
۴۷	جدول ۲-۱۰. نتایج اندازه‌گیری آنالیز و سرعت دود خروجی از دودکش‌ها و هوای ورودی به نواحی مختلف کوره تونلی شماره ۲
۴۸	جدول ۲-۱۱. انرژی‌های ورودی و خروجی مربوط به کوره‌های تونلی واحد فولادسازی کارخانه فولاد
۵۸	جدول ۳-۱. پیشرفت مدل کوهل برای تعیین انرژی الکتریکی مصرفی در کوره های قوس
۶۷	جدول ۳-۲. واکنشهای اکسیداسیون گرما زا در کربن زدایی و تصفیه مذاب
۶۹	جدول ۳-۳. دامنه تغییرات ترکیب شیمیایی آهن اسفنجی
۷۱	جدول ۳-۴. محدوده ضرائب مدل کوهل
۷۳	جدول ۳-۵. خلاصه داده‌های بهره‌برداری پایش شده کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه مورد بررسی در مدت حدود ۳ ماه
۷۵	جدول ۳-۶. ضرائب مدل کوهل برای برآورد مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره‌های قوس الکتریکی
۷۷	جدول ۳-۷. ضرائب استخراج شده برای مدل کوهل با استفاده از داده‌های آماری کوره قوس الکتریکی

جدول ۳-۸. درصد داده‌های محاسباتی با خطای کمتر از ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط واقعی بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک	۷۷
جدول ۳-۹. ضرایب استخراج شده برای مدل کوهل با استفاده از داده‌های آماری کوره قوس الکتریکی دو	۷۷
جدول ۳-۱۰. درصد داده‌های محاسباتی با خطای کمتر از ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط واقعی بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو	۷۷
جدول ۳-۱۱. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت بهره‌برداری در دماهای محیط مختلف برای کوره قوس الکتریکی یک کارخانه	۸۰
جدول ۳-۱۲. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از گپ درب کوره در فواصل مختلف برای کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد	۸۰
جدول ۳-۱۳. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از باز شدن درب کوره قوس الکتریکی یک برای شارژ قراضه در کارخانه	۸۱
جدول ۳-۱۴. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت بهره‌برداری در دماهای محیط مختلف برای کوره قوس الکتریکی دو	۸۱
جدول ۳-۱۵. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از گپ درب کوره در فواصل مختلف برای کوره قوس الکتریکی شماره ۱ دو کارخانه فولاد	۸۲
جدول ۳-۱۶. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از باز شدن درب کوره قوس الکتریکی دو برای شارژ قراضه در کارخانه فولاد	۸۲
جدول ۳-۱۷. تغییرات انرژی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه با دمای بدنه بویلر در کارخانه فولاد ممیزی شده	۸۵
جدول ۴-۱. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ۱ یک	۸۹
جدول ۴-۲. مقایسه توان متوسط ورودی و توان حرارتی متوسط تلف شده برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک کارخانه	۸۹
جدول ۴-۳. مقایسه سهم تلفات حرارتی و حرارت مفید برای حالت طراحی و بهره‌برداری از انرژی ورودی کوره قوس الکتریکی یک	۹۰
جدول ۴-۴. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ۱ دو	۹۱
جدول ۴-۵. مقایسه توان متوسط ورودی و توان حرارتی متوسط تلف شده برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو	۹۱
جدول ۴-۶. مقایسه سهم تلفات حرارتی و حرارت مفید برای حالت طراحی و بهره‌برداری از انرژی ورودی کوره قوس الکتریکی ۲ کارخانه	۹۱
جدول ۵-۱. مقایسه اطلاعات قبل و بعد از نصب کانستیل	۱۰۹
جدول ۵-۲. ظرفیت شارژ گرم آهن اسفنجی نصب شده	۱۱۲

---

۱۱۷	جدول ۵-۳. مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر
۱۱۸	جدول ۵-۴. مقادیر انرژی صرفه جویی شده برای استفاده از سیستم کنترل مشعل‌های پیشگرمکن در SSP
۱۲۳	جدول ۵-۵. میزان گاز طبیعی صرفه جویی شده برای کاهش درصد اکسیژن
۱۲۵	جدول ۵-۶. تاثیر استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت به عنوان پیشگرمایش پاتیل و تاندیش در واحد فولادسازی
۱۲۸	جدول ۵-۷. مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر
۱۳۲	جدول ۵-۸. هزینه صرفه جویی شده در اثر کاهش درصد اکسیژن اضافی در بویلر کارگاه تولید بخار
۱۳۴	جدول ۵-۹. تاثیر استفاده از قراضه پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی
۱۳۶	جدول ۵-۱۰. تاثیر استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی
۱۳۸	جدول ۵-۱۱. تاثیر استفاده از قراضه خرد شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۸	شکل ۱-۱. سهم آلیاژهای تولید شده در واحد فولادسازی کارخانه ممیزی شده
۱۹	شکل ۱-۲. سهم آلیاژهای تولید شده در کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد مورد نظر
۱۹	شکل ۱-۳. سهم آلیاژهای تولید شده در کوره قوس الکتریکی دو کارخانه فولاد مورد نظر
۲۵	شکل ۱-۲. تراز انرژی فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده
۲۶	شکل ۲-۲. مصرف سالیانه برق واحد فولادسازی کارخانه فولاد
۲۶	شکل ۲-۳. سهم مصرف انرژی الکتریکی قسمت‌های مختلف واحد فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده
۲۷	شکل ۲-۴. تقسیم‌بندی مصارف ویژه انرژی الکتریکی واحد فولادسازی برای ذوب‌های کوره قوس الکتریکی یک در بازه زمانی اندازه‌گیری
۲۷	شکل ۲-۵. تقسیم‌بندی مصارف ویژه انرژی الکتریکی واحد فولادسازی برای ذوب‌های کوره قوس الکتریکی دو در بازه زمانی اندازه‌گیری
۳۰	شکل ۲-۶. سهم مصرف ویژه انرژی حرارتی (فسیلی) قسمت‌های مختلف واحد فولادسازی کارخانه
۳۱	شکل ۲-۷. حجم کنترل مورد نظر برای مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد توسط نرم‌افزار PHAST
۳۲	شکل ۲-۸. سهم تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد
۳۳	شکل ۲-۹. دیاگرام سانکی برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ی یک
۳۴	شکل ۲-۱۰. سهم تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد
۳۶	شکل ۲-۱۱. دیاگرام سانکی برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو
۳۷	شکل ۲-۱۲. ورودی و خروجی بویلر برای محاسبه راندمان با روش مستقیم
۳۸	شکل ۲-۱. تلفات بویلر برای محاسبه راندمان به روش غیر مستقیم
۴۳	شکل ۲-۲. میزان تلفات حرارتی و حرارت مفید برای تولید بخار در بویلر کارخانه فولاد ممیزی شده
۴۴	شکل ۲-۳. سهم حرارت مفید برای تولید بخار و تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST در بویلر کارخانه فولاد
۴۵	شکل ۲-۴. دیاگرام سانکی بویلر کارگاه تولید بخار کارخانه فولاد
۴۶	شکل ۲-۵. شماتیک ساختار کوره‌های تونلی موجود در واحد فولادسازی کارخانه فولاد
۴۷	شکل ۲-۶. نمای شماتیک آگروزهای کوره‌های تونلی واحد فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده
۵۰	شکل ۳-۱. روند تحولات تکنولوژی و تاثیر آن بر پارامترهای فرآیندی و مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی
۵۳	شکل ۳-۲. قسمت‌های مختلف مکانیکی کوره قوس الکتریکی
۵۴	شکل ۳-۳. قسمت‌های مختلف الکتریکی کوره قوس الکتریکی
۵۵	شکل ۳-۴. دیاگرام سانکی بالانس جرم و انرژی به روش مستقیم برای یک کوره ۷۵ تنی

- شکل ۳-۵. محدوده سیستم برای بالانس انرژی در فرآیند کوره قوس ۵۹
- شکل ۳-۶. آنتالپی ویژه یک مذاب کم آلیاژ و یک مذاب فولاد پر آلیاژ کرم-نیکل نسبت به تغییر دما ۶۳
- شکل ۳-۷. نمونه خروجی نرم افزار EVIEWS ۷۲
- شکل ۳-۸. سهم مصرف آهن اسفنجی و قراضه مصرفی در کوره قوس الکتریکی یک واحد فولادسازی کارخانه مورد نظر براساس داده‌های بهره‌برداری پایش شده ۷۳
- شکل ۳-۹. سهم مصرف آهن اسفنجی و قراضه مصرفی در کوره قوس الکتریکی دو واحد فولادسازی مورد نظر ۷۴
- شکل ۳-۱۰. مقایسه مصرف ویژه انرژی کوره قوس الکتریکی یک واحد فولادسازی کارخانه فولاد با مقادیر محاسبه شده توسط معادله کوهل ۷۶
- شکل ۳-۱۱. مقایسه مصرف ویژه انرژی کوره قوس الکتریکی دو واحد فولادسازی کارخانه فولاد با مقادیر محاسبه شده توسط معادله کوهل ۷۶
- شکل ۳-۱۲. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از مدل کوهل تصحیح شده و مقادیر واقعی برای کوره قوس الکتریکی یک ۷۸
- شکل ۳-۱۳. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از مدل کوهل تصحیح شده و مقادیر واقعی برای کوره قوس الکتریکی دو کارخانه فولاد ۷۸
- شکل ۳-۱۴. تاثیر زمان POWER ON بر مصرف انرژی الکتریکی کوره‌های پاتیلی ۸۳
- شکل ۳-۱۵. تاثیر زمان POWER ON بر مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره‌های پاتیلی ۸۳
- شکل ۳-۱۶. درصد افزایش راندمان با کاهش اکسیژن اضافی در بویلر کارخانه فولاد ۸۴
- شکل ۴-۱. سهم تلفات انرژی محاسبه شده در PHAST برای شرایط طراحی کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده ۸۷
- شکل ۴-۲. دیاگرام سانکی برای کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ۸۸
- شکل ۴-۳. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی ۹۳
- شکل ۴-۴. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده ۹۴
- شکل ۴-۵. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از افزایش میزان استفاده از لانس اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ۹۵
- شکل ۴-۶. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان POWER ON در کوره‌های پاتیلی کارخانه مورد نظر ۹۶
- شکل ۵-۱. نمایی از یک کوره قوس DC [۳] ۱۰۱
- شکل ۵-۲. طراحی الکترودهای کف برای کوره‌های DC [۴] ۱۰۱
- شکل ۵-۳. روند توسعه تکنولوژی در فولاد سازی به روش EAF [۵]. ۱۰۲
- شکل ۵-۴. پیشگرم کردن قراضه در سبد شارژ ۱۰۳
- شکل ۵-۵. پیشگرم کردن قراضه با شافت FUCH ۱۰۳
- شکل ۵-۶. سیستم پیشگرم قراضه کانستیل ۱۰۴



- شکل ۵-۷. دیاگرام شماتیک حرارت دادن قراضه در نقاله فرآیند کانستیل [۶] ۱۰۸
- شکل ۵-۸. نمایی از فرآیند کانستیل [۷] ۱۰۸
- شکل ۵-۹. روش‌های مختلف انتقال محصولات واحد احیای مستقیم به کوره قوس الکتریکی [۹] ۱۱۰
- شکل ۵-۱۰. انتقال گرم آهن اسفنجی توسط نقاله در فولاد جدید عربستان ۱۱۱
- شکل ۵-۱۱. مقایسه مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> در فرآیندهای مختلف تولید [۱۳] ۱۱۳
- شکل ۵-۱۲. پیشگرم کردن آهن اسفنجی ۱۱۴
- شکل ۵-۱۳. خط تولید قراضه خرد شده ۱۱۶
- شکل ۵-۱۴. تصویر شماتیک سیستم پیشگرمکن پاتیل ۱۱۸
- شکل ۵-۱۵. تصویر شماتیک سیستم کنترل مشعل‌های کوره پاتیلی ۱۱۹
- شکل ۵-۱۶. واکنش احتراق در شعله مشعل اکسیژن/سوخت ۱۲۰
- شکل ۵-۱۷. مقایسه عملکرد مشعل‌های هوا/سوخت و اکسیژن/سوخت ۱۲۰
- شکل ۵-۱۸. تاثیر دمای تخلیه بر صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس کارخانه فولاد ۱۲۱
- شکل ۵-۱۹. تاثیر زمان ذوب بر صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس کارخانه فولاد ۱۲۲
- شکل ۵-۲۰. تاثیر لانس اکسیژن صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس کارخانه فولاد ۱۲۲
- شکل ۵-۲۱. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان POWER ON در کوره‌های پاتیلی کارخانه ۱۲۳
- شکل ۵-۲۲. تاثیر پیشگرمایش قراضه بر کاهش مصرف انرژی برای هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده ۱۲۷
- شکل ۵-۲۳. تاثیر پیشگرمایش آهن اسفنجی بر کاهش مصرف انرژی برای هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی ۱۲۸
- شکل ۵-۲۴. تاثیر استفاده از قراضه خرد شده بر کاهش مصرف انرژی در هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی ۱۲۹
- شکل ۵-۲۵. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی ۱۳۰
- شکل ۵-۲۶. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش زمان ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی ۱۳۰
- شکل ۵-۲۷. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از افزایش میزان لانس اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریکی ۱۳۱
- شکل ۵-۲۸. خسارت اقتصادی ناشی از زیاد بودن زمان POWER ON در کوره‌های پاتیلی ۱۳۱
- شکل ۵-۲۹. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت به منظور پیشگرمایش پاتیلها و تاندیشهای واحد فولادسازی ۱۳۳
- شکل ۵-۳۰. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از قراضه پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولادمورد نظر ۱۳۵
- شکل ۵-۳۱. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی ۱۳۷
- شکل ۵-۳۲. سودآوری اقتصادی ناشی از قراضه خرد شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی ۱۳۹

## چکیده

واحدهای فولادسازی در کارخانه‌های تولید فولاد یکی از واحدهای پرمصرف انرژی به شمار می‌روند. در این گزارش واحد فولادسازی یک کارخانه فولاد که دارای دو کوره قوس‌الکتریکی، دو کوره پاتیلی، یک ماشین ریخته‌گری پیوسته، خط ریخته‌گری غیرپیوسته، VD و VOD، دو کوره تونلی، یک کوره بوژی و متعلقات مربوطه می‌باشد مورد بررسی و ممیزی قرار می‌گیرد. البته از آنجائیکه کل بخار تولیدی توسط بویلر کارگاه تولید بخار، در واحد فولادسازی مصرف می‌شود لذا عملاً این تجهیز را می‌توان جزء تجهیزات واحد فولادسازی به شمار آورد. در این گزارش پس از بررسی شرایط عملکرد فعلی تجهیزات واحد فولادسازی، انحرافات مابین شرایط بهره‌برداری و طراحی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور هم از تحلیل‌های آماری و هم از تحلیل‌های مستقیم استفاده شده است. در نهایت براساس تحلیل‌های صورت گرفته، راهکارهای مناسب به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در این واحد ارائه شده است.

## فصل اول

### بررسی و دسته‌بندی آلیاژهای تولیدی

#### در کارخانه فولاد ممیزی شده

در این واحد فولادسازی تعداد دو عدد کوره قوس الکتریکی و دو عدد کوره پاتیلی، هر کدام به ظرفیت ۴۰ تن در حال کار می‌باشند. مذاب تهیه شده در کوره‌های قوس پس از سرباره‌گیری در پاتیل‌ها ریخته شده و با استفاده از جرثقیل به زیر الکترودهای کوره‌های پاتیلی منتقل می‌گردد. در این کوره‌ها، عملیات تکمیل ذوب و آلیاژسازی بر روی مذاب انجام می‌گیرد. مذاب پس از این مرحله در صورت نیاز به VD<sup>۱</sup> و پس از آن به قسمت ریخته‌گری انتقال می‌یابد. البته در صورت نیاز ممکن است مذاب قبل از ریخته‌گری مجدداً به کوره‌های پاتیلی ارسال شود تا در آنجا عملیات تکمیل نهایی ذوب بر روی آن انجام شود.

به منظور بررسی و دسته‌بندی آلیاژهای تولید شده در این مجتمع، داده‌های مربوط به تعداد زیادی ذوب در بازه زمانی ۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۰/۱۰/۱۰ جمع‌آوری شده است. در این بازه زمانی، اطلاعات حدود ۵۵۰۰ ذوب جمع‌آوری و مرتب شده‌اند. پس از بررسی‌های انجام شده، ۳/۶ درصد (۲۰۰ ذوب) از کلیه ذوب‌ها حذف شده است. علت حذف این ذوب‌ها ناقص بودن داده‌ها و یا وجود داده‌های بد<sup>۲</sup> در اطلاعات ذوب آنها می‌باشد، که معمولاً به دلیل خطا در ثبت داده‌ها ایجاد می‌شود.

مجموع آلیاژهای تولید شده در کارخانه ی مورد بررسی در گزارش حاضر در این بازه زمانی حدود ۲۴۰۰۰۰ تن بوده که شامل ۸۴ نوع آلیاژ مختلف می‌باشد. آلیاژهای تولید شده کاربردهای متنوعی دارند، از جمله آلیاژهایی که در ساختمان کاربرد دارند تا آلیاژهای حساسی که در ابزار استفاده می‌شوند.

#### ۱-۱. مشخصات انواع آلیاژهای تولیدی در کارخانه فولاد ممیزی شده

در جدول ۱-۱ مشخصات چند نمونه از آلیاژهایی که در واحد فولادسازی کارخانه م بیشتر تولید شده اند، ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Vacuum Degassing

<sup>۲</sup> bad data

جدول ۱-۱. آنالیز آلیاژهای تولیدی در کارخانه فولاد ممیزی شده

Analysis (%)		Grade																								
		0060I	1121D	1181S	1186D	1191S	7035S	7176D	9095I	7027J	7131S	7139S	7147D	7227D	7264J	8159S	1180P	1186P	1209P	1249I	1302P	6541D	6582D	7218P	2080S	2379S
C	Max	0.37	0.11	0.39	0.44	0.48	0.44	0.59	0.48	0.23	0.19	0.19	0.22	0.44	0.23	0.54	0.4	0.42	0.58	0.73	0.33	0.28	0.37	0.31	2.1	1.6
	Min	0.31	0.07	0.32	0.37	0.42	0.4	0.53	0.43	0.17	0.14	0.14	0.17	0.39	0.17	0.5	0.3	0.35	0.53	0.67	0.3	0.25	0.31	0.26	1.9	1.5
Si	Max	0.4	0.1	0.3	0.4	0.35	0.35	0.4	0.35	0.35	0.35	0.35	0.4	0.4	0.35	0.35	0.3	0.4	0.4	0.25	0.6	0.25	0.35	0.3	0.4	0.4
	Min	0.1	0	0.15	0	0.15	0.2	0.25	0.15	0.15	0.2	0.2	0.15	0	0.15	0.2	0.1	0.1	0.1	0.15	0.5	0	0.2	0.1	0.1	0.1
Mn	Max	1.1	0.45	0.65	0.8	0.65	0.85	0.85	0.7	0.9	1.3	1.3	1.3	0.85	0.9	1.1	0.75	0.8	0.8	0.6	1.55	1.3	0.7	0.9	0.45	0.45
	Min	0.95	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.55	0.75	1	1	1.1	0.7	0.75	1	0.65	0.7	0.7	0.53	1.45	1.1	0.55	0.75	0.15	0.2
P	Max	0.045	0.035	0.01	0.03	0.035	0.015	0.025	0.03	0.03	0.025	0.025	0.035	0.025	0.03	0.025	0.04	0.01	0.025	0.045	0.025	0.02	0.025	0.025	0.03	0.03
	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	Max	0.045	0.035	0.03	0.03	0.03	0.008	0.025	0.035	0.03	0.035	0.035	0.035	0.035	0.03	0.03	0.09	0.04	0.04	0.075	0.085	0.02	0.025	0.04	0.003	0.003
	Min	max	0.02	0	0	0	0	0	0.015	0	0	0.02	0	0.02	0	0.015	0.06	0.02	0.02	0.055	0.065	0	0	0.025	0	0
Cr	Max			0.4	0.4	0.4	1.2	0.85	0.4	1.05	1.1	1.1	1.2	1.05	1.25	1.1		0.3	0.3	0.15	0.25	1	1.6	1.05	12	12
	Min			0	0	0	1	0.7	0	0.9	0.8	0.8	1	0.9	0.95	1		0.2	0	0.1	0.15	0.8	1.45	0.95	11	11.5
Mo	Max			0.1	0.1	0.1		0.08	0.1	0.1				0.2	0.2	0.08		0.1	0.1	0.03	0.06	0.3	0.2	0.25	0.04	0.9
	Min			0	0	0		0	0	0				0.15	0.15	0		0	0	0	0	0.2	0.15	0.2	0	0.7
Ni	Max		0.1	0.4	0.4	0.4		0.3	0.4	0.25				0.3	0.2	0.3		0.3	0.3	0.08	0.17	0.7	1.5	0.3	0.2	0.3
	Min		0	0	0	0		0	0	0				0	0	0		0	0	0.04	0	0.4	1.4	0	0	0
V	Max						0.05									0.15				0.04	0.13					1.1
	Min						0									0.1				0.03	0.09					0.8
W	Max						0.03																			
	Min						0																			

Analysis (%)	Grade																									
	0060I	1121D	1181S	1186D	1191S	7035S	7176D	9095I	7027J	7131S	7139S	7147D	7227D	7264J	8159S	1180P	1186P	1209P	1249I	1302P	6541D	6582D	7218P	2080S	2379S	
Ce	Max																								0.06	0.05
	Min																									0.02
Sn	Max			0.05			0.03	0.05					0.03		0.035								0.03			
	Min			0			0	0					0		0								0			
B	Max																0.0005									
	Min																0									
Cu	Max			0.35	0.35	0.35	0.25	0.35	0.35	0.3	0.35	0.35		0.3	0.3	0.25	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.25	0.3	0.4	0.05	0.05
	Min			0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	Max					0.0035																				
	Min					0.0015																				
Ti	Max		0.035				0.03		0.025		0.025			0.025		0.01	0.01	0.01		0.025				0.01	0.05	0.006
	Min		0.02				0		0.015		0.015			0.015		0	0	0		0.015				0	0.03	0
Al	Max		0.02			0.045			0.025	0.025	0.025	0.025	0.04	0.025		0.04	0.025	0.025	0.01	0.035	0.04	0.04	0.03	0.005	0.005	
	Min		0.01			0.02			0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01		0.02	0.015	0.015	0	0.015	0.025	0.025	0.015	0	0	
N	Max		0.07			0.01											0.009		0.017	0.02	0.012			0.015	0.015	
	Min		0			0											0		0.01	0.012	0			0	0	

## ۲-۱. تحلیل‌های آماری داده‌های بهره‌برداری

در جدول ۲-۱ خلاصه‌ای از شرایط بهره‌برداری (پایش شده) مجموع دو کوره قوس الکتریکی در بازه زمانی برای کل آلیاژهای تولید شده در مجتمع مشخص شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود آلیاژ 9095I بیشترین تناژ تولیدی را دارد که شامل ۸۷۷ ذوب می‌باشد.

نسبت آهن قراضه به آهن اسفنجی از ۰/۰۹ برای گرید 0214I تا ۳/۷۸ برای گرید 9033I تغییر کرده است. ذکر این نکته لازم است به دلیل اینکه آنالیز آهن اسفنجی نسبت به قراضه، در محدوده کمتری تغییر می‌کند، لذا برای تولید آلیاژهای با حساسیت بالا معمولاً درصد استفاده از آهن اسفنجی نسبت به قراضه بیشتر است و این یکی از دلایل افزایش مصرف انرژی برای تولید این نوع از آلیاژهاست. براساس داده‌های بهره‌برداری اخذ شده، در ۸۳ درصد از آلیاژها میزان مصرف آهن قراضه بیشتر از آهن اسفنجی است، که نشان می‌دهد میزان حساسیت آنالیز این آلیاژها زیاد نمی‌باشد. مجموع انرژی مصرفی دو کوره قوس الکتریکی در طی یک سال ۱۴۴۴۳۴ مگا وات ساعت می‌باشد.

جدول ۲-۱. شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده در بازه زمانی ۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

آلیاژ	تناژ خروجی (Ton)	نسبت قراضه به آهن اسفنجی	انرژی مصرفی (KWh)	آلیاژ	تناژ خروجی (Ton)	نسبت قراضه به آهن اسفنجی	انرژی مصرفی (KWh)
0060I	35,528	1.97	21,950,151	5515A	705	0.80	502,120
0214I	85	0.09	63,610	5526I	134	0.40	86,250
0416D	1,263	1.82	781,170	5530D	130	1.10	82,280
0511B	122	2.45	96,920	5532P	87	1.01	45,600
0528T	128	1.01	90,420	6526A	44	3.09	26,150
0570D	456	1.44	253,860	6540D	230	1.03	146,580
0727S	42	1.16	27,590	6541D	778	2.25	491,370
0736D	187	0.38	150,220	6580D	774	1.74	518,050
1121D	305	0.78	214,660	6582D	1,827	2.32	1,172,570
1128P	350	2.40	246,210	6657B	41	2.94	25,350
1141D	36,483	1.91	21,988,487	7002P	266	0.93	188,190
1148B	45	0.99	28,950	7014I	847	1.62	513,730
1149B	95	1.53	51,170	7027J	5,974	2.26	3,725,810
1151D	398	3.22	215,250	7035S	4,918	2.11	3,152,690
1175P	609	1.56	392,600	7038B	1,029	2.20	602,600

آلیاژ	تناژ خروجی (Ton)	نسبت قراضه به آهن اسفنجی	انرژی مصرفی (KWh)	آلیاژ	تناژ خروجی (Ton)	نسبت قراضه به آهن اسفنجی	انرژی مصرفی (KWh)
1180P	3,293	1.61	2,112,970	7039B	180	2.50	108,850
1181S	1,531	2.30	947,040	7039D	129	2.35	72,594
1186D	1,330	2.32	830,340	7131S	1,908	1.86	1,184,091
1186P	1,483	1.25	912,190	7139S	710	3.39	424,930
1191S	3,830	2.92	2,278,100	7147D	3,094	1.65	1,924,390
1201B	958	2.04	626,520	7149P	604	1.99	372,820
1201D	125	2.15	82,750	7149S	46	2.79	27,220
1201I	1,234	1.79	775,040	7176D	19,198	2.28	12,301,776
1203D	80	2.42	57,700	7218P	8,121	2.09	5,068,450
1205B	81	1.57	55,180	7218S	261	2.14	166,950
1206D	734	2.41	463,900	7220D	382	1.84	253,990
1209P	1,287	1.99	837,010	7225D	2,595	2.28	1,563,780
1213S	95	3.76	48,020	7227B	708	1.95	486,236
1221S	2,059	2.64	1,267,100	7227D	20,556	2.13	13,060,730
1249I	191	2.28	108,690	7262D	45	1.27	24,530
1302P	10,688	2.40	6,804,580	7262J	645	2.36	406,390
1744D	89	3.35	51,160	7264J	4,146	1.89	2,582,034
2080S	225	0.55	170,760	7335S	165	1.67	106,710
2344D	124	0.77	85,780	7765D	169	1.04	102,230
2379S	80	0.48	53,290	8159S	1,251	1.83	816,220
2436S	108	0.28	85,080	8550S	206	1.08	146,650
2740D	46	2.33	25,380	9020S	302	1.90	186,340
2767S	123	1.17	87,480	9030B	46	0.65	30,950
3505S	920	1.93	609,170	9033I	42	3.78	25,500
4021D	181	0.74	140,650	9035I	40	0.78	30,510
5023D	1,692	2.56	1,088,440	9046P	479	1.94	307,590
5028S	89	1.58	53,810	9095I	38,753	2.20	24,162,938

متوسط و مجموع مقادیر پارامترهای مهم از قبیل مواد اولیه، محصول و انرژی الکتریکی مصرفی برای کوره‌های قوس الکتریکی به صورت مجزا در جدول ۱-۳ مشخص می‌باشد.

جدول ۳-۱. مقادیر پارامترهای مهم برای کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد مورد نظر در بازه زمانی ۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

کوره‌های قوس الکتریک	آهن قراضه (ton)		آهن اسفنجی (ton)		تناژ خروجی (Ton)		انرژی مصرفی (MWh)	
	متوسط	مجموع	متوسط	مجموع	متوسط	مجموع	متوسط	مجموع
کوره ۱	29.9	89758	18.1	41178	42.9	117412	27.7	74004.7
کوره ۲	29.3	83930	19.7	43697	43.1	113920	27.5	70345.6

مذاب پس از عملیات ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی به درون پاتیل‌هایی ریخته می‌شود. در جدول ۴-۱ شرایط بهره‌برداری مجموع دو کوره پاتیلی در بازه زمانی مورد نظر برای کل آلیاژهای تولید شده در مجتمع مشخص شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود آلیاژ 9095I بیشترین تناژ خروجی را دارد. مجموع انرژی مصرفی کوره‌های پاتیلی ۱۷۷۵۴ کیلو وات ساعت و مجموع موادی که در کوره‌های پاتیلی به ذوب‌ها افزوده شده حدود ۵۵۰۰ تن بوده است.

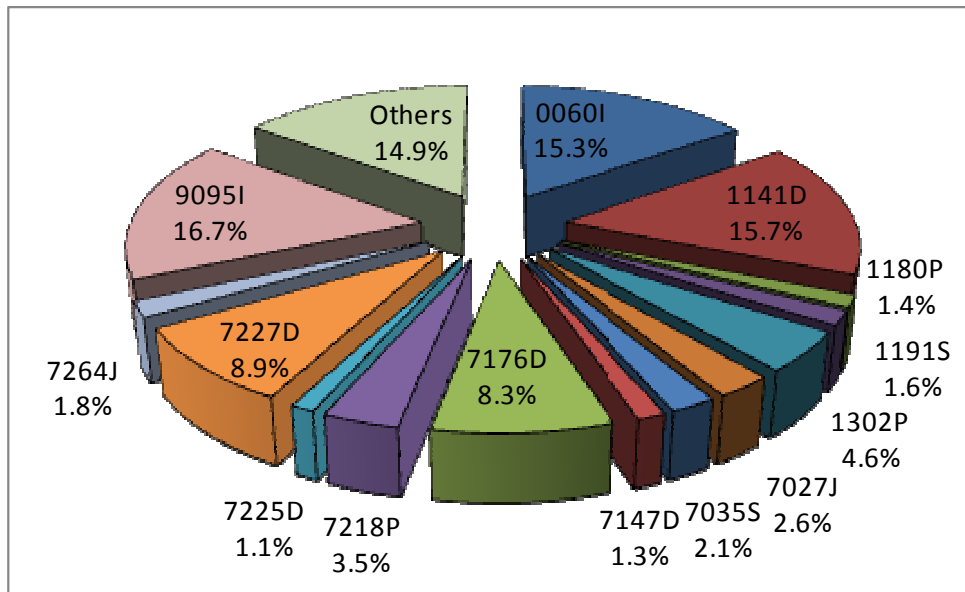
جدول ۴-۱. شرایط بهره‌برداری کوره‌های پاتیلی کارخانه فولاد ممیزی شده در بازه زمانی ۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

آلیاژ	مذاب تولیدی (Ton)	انرژی مصرفی (KWh)	آلیاژ	مذاب تولیدی (Ton)	انرژی مصرفی (KWh)
0060I	36284	2498.9	5515A	737	67.1
0214I	79	3.8	5526I	130	17.2
0416D	1271	90.1	5530D	134	10.6
0511B	124	11.4	5532P	89	6.4
0528T	131	10.0	6526A	45	0.8
0570D	467	32.7	6540D	230	4.7
0727S	41	2.7	6541D	789	109.0
0736D	195	21.8	6580D	836	85.6
1121D	309	23.2	6582D	1934	237.3
1128P	373	35.1	6657B	43	3.4
1141D	37215	2195.8	7002P	271	15.8
1148B	46	2.9	7014I	847	77.2
1149B	95	8.4	7027J	6209	590.9
1151D	408	31.9	7035S	5039	387.9
1175P	706	52.1	7038B	1027	75.6
1180P	3320	293.4	7039B	190	23.0



آلیاژ	مذاب تولیدی (Ton)	انرژی مصرفی (KWh)	آلیاژ	مذاب تولیدی (Ton)	انرژی مصرفی (KWh)
1181S	1556	104.6	7039D	136	12.9
1186D	1359	104.4	7131S	1930	162.8
1186P	1509	106.0	7139S	723	62.5
1191S	3865	215.2	7147D	3154	330.7
1201B	975	67.0	7149P	627	48.5
1201D	129	8.5	7149S	48	2.1
1201I	1267	106.8	7176D	19743	1314.2
1203D	86	4.8	7218P	8344	722.8
1205B	89	8.6	7218S	271	18.8
1206D	773	56.2	7220D	396	32.4
1209P	1324	100.2	7225D	2636	257.1
1213S	94	7.7	7227B	758	47.2
1221S	2103	144.9	7227D	21012	1853.3
1249I	175	14.0	7262D	45	2.1
1302P	10933	1024.1	7262J	666	52.6
1744D	93	5.7	7264J	4252	335.8
2080S	238	50.5	7335S	167	18.3
2344D	133	21.8	7765D	175	18.3
2379S	92	13.3	8159S	1266	148.2
2436S	125	26.3	8550S	217	10.3
2740D	46	7.1	9020S	330	43.6
2767S	128	21.8	9030B	45	1.2
3505S	923	98.5	9033I	46	3.2
4021D	223	31.5	9035I	41	7.2
5023D	1812	111.4	9046P	496	50.2
5028S	92	5.8	9095I	39512	2704.9

برای محاسبه درصد تولید هر آلیاژ مجموع وزن مذابهای خروجی آلیاژ مورد نظر از کوره‌های پاتیلی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱-۱ سهم تولید آلیاژهای مختلف مشخص است.

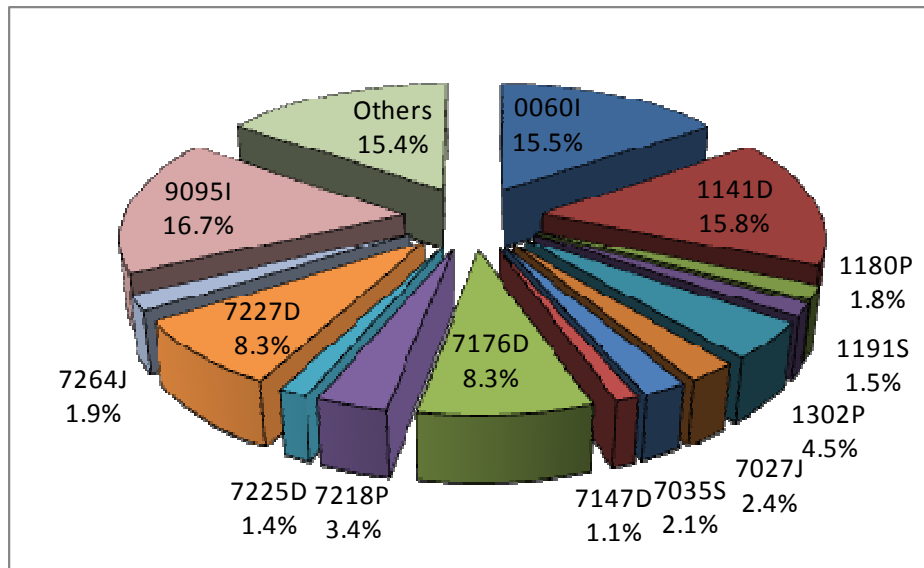


شکل ۱-۱. سهم آلیاژهای تولید شده در واحد فولادسازی کارخانه ممیزی شده در بازه زمانی ۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

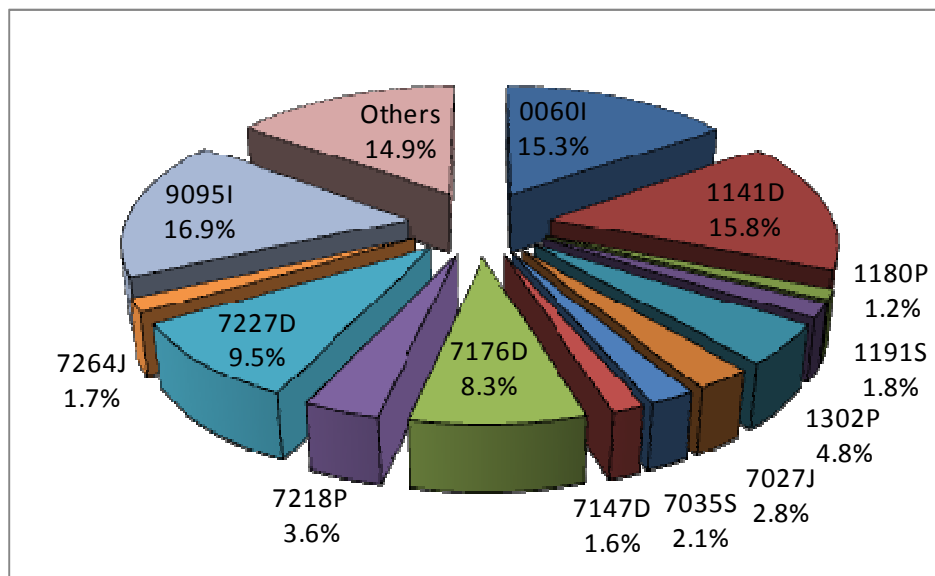
آلیاژهای 0060I و 1141D که عمدتاً برای مصارف ساختمان کاربرد دارند، ۳۱ درصد تولید سالانه را شامل می‌شوند. بیشترین درصد تولید مربوط به آلیاژ 9095I می‌باشد. در شکل ۱-۲ و شکل ۱-۳ سهم آلیاژهایی که مذاب آنها به ترتیب در کوره‌های قوس الکتریکی یک و دو تهیه شده، نشان داده شده است. در کوره یک، ۷۹ و در کوره دو، ۷۱ نوع آلیاژ تولید شده است. تولید کوره یک، ۵۰/۹ درصد و کوره دو، ۴۹/۱ درصد از کل تولید کارخانه بوده است. در محاسبه درصد تولید آلیاژها، وزن مذابهای خروجی آلیاژ مورد نظر از هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی در نظر گرفته شده است.

همانگونه که در این دو نمودار مشخص است، میزان تولید هر آلیاژ در دو کوره تقریباً یکسان است و برای تولید هر آلیاژ از دو کوره استفاده می‌شود.<sup>۱</sup> آلیاژ 9095I بیشترین سهم تولید را در هر کدام از کوره‌ها دارد.

<sup>۱</sup> بجز آلیاژ 7225D که برای تولید آن فقط از کوره ۱ استفاده شده است.



شکل ۱-۲. سهم آلیاژهای تولید شده در کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد مورد نظر



شکل ۱-۳. سهم آلیاژهای تولید شده در کوره قوس الکتریکی دو کارخانه فولاد مورد نظر

مذاب در کارخانه فولاد مورد نظر به دو صورت بلوم<sup>۱</sup> (ریخته‌گری مداوم<sup>۲</sup>) و اینگات<sup>۳</sup> (ریخته‌گری غیر مداوم) ریخته‌گری می‌شود. مقادیر تناژ ورودی به هر دو روش ریخته‌گری در جدول ۱-۵ مشخص شده است. برای تولید بعضی از آلیاژها فقط از یک نوع ریخته‌گری بلوم یا اینگات استفاده می‌شود و بعضی از آلیاژها با هر دو روش ریخته‌گری تولید می‌شوند.

<sup>۱</sup> bloom

<sup>۲</sup> continuous casting

<sup>۳</sup> ingot

جدول ۱-۵. مقادیر تناژ مذاب ورودی به ریخته‌گری بلوم و اینگات واحد فولادسازی کارخانه فولاد

آلیاژ	CC Input (Ton)	IC Input (Ton)	آلیاژ	CC Input (Ton)	IC Input (Ton)	آلیاژ	CC Input (Ton)	IC Input (Ton)
0060I	32201.0	3272.9	1221S	1983.4	89.4	7038B	1059.8	0.0
0214I	0.0	53.7	1249I	170.6	0.0	7039B	0.0	0.0
0416D	1243.8	0.0	1302P	10305.9	413.1	7039D	0.0	124.4
0511B	87.6	31.8	1744D	93.0	0.0	7131S	1847.5	89.6
0528T	133.0	0.0	2080S	0.0	239.6	7139S	272.5	390.7
0570D	404.3	38.2	2344D	0.0	135.8	7147D	2238.6	723.5
0727S	0.0	39.3	2379S	42.1	44.4	7149P	587.5	35.8
0736D	133.0	65.7	2436S	40.3	86.4	7149S	39.5	0.0
1121D	172.9	123.4	2740D	0.0	46.6	7176D	19019.2	465.6
1128P	314.0	31.8	2767S	0.0	134.3	7218P	7625.0	350.6
1141D	32150.2	3820.4	3505S	256.0	642.9	7218S	131.9	111.4
1148B	0.0	33.8	4021D	44.4	162.6	7220D	392.5	0.0
1149B	74.2	0.0	5023D	1765.6	0.0	7225D	2129.9	406.2
1151D	327.7	35.8	5028S	43.8	46.1	7227B	378.8	303.6
1175P	591.5	0.0	5515A	585.7	78.1	7227D	8743.1	10424.0
1180P	3001.7	77.6	5526I	85.1	44.4	7262D	0.0	41.8
1181S	1514.6	0.0	5530D	72.0	43.3	7262J	630.2	0.0
1186D	1216.2	118.0	5532P	88.9	0.0	7264J	4020.2	105.8
1186P	1487.0	0.0	6526A	0.0	41.4	7335S	0.0	147.3
1191S	3632.6	189.2	6540D	130.5	91.1	7765D	0.0	158.2
1201B	661.2	284.5	6541D	642.6	127.4	8159S	1107.3	119.4
1201D	90.6	37.8	6580D	138.4	664.0	8550S	0.0	199.0
1201I	1055.6	165.2	6582D	577.5	1317.0	9020S	0.0	296.8
1203D	81.8	0.0	6657B	0.0	43.3	9030B	0.0	41.8
1205B	0.0	81.6	7002P	264.9	0.0	9033I	45.0	0.0
1206D	752.8	0.0	7014I	816.9	0.0	9035I	0.0	31.8
1209P	1241.2	34.7	7027J	5832.6	121.2	9046P	360.4	106.4
1213S	97.1	0.0	7035S	4402.3	572.8	9095I	35483.4	3203.5

### ۱-۳. دسته‌بندی آلیاژهای تولیدی

آلیاژهای فولاد تولیدی بر مبنای میزان عناصر آلیاژی در سه گروه کم آلیاژ، آلیاژ متوسط و پر آلیاژ دسته‌بندی شده‌اند، که در جدول ۱-۶ این دسته‌بندی مشخص شده است. این دسته‌بندی با توجه به اطلاعات مربوط به درصد عناصر آلیاژی موجود در هر آلیاژ صورت گرفته است. در هر دسته چند نمونه از آلیاژهایی که تناژ خروجی آنها نسبت به سایر آلیاژهای آن دسته بیشتر می‌باشد، ذکر شده است. همچنین مقدار متوسط مصرف ویژه انرژی (SEC)،

درصد تولید، درصد مینیمم و ماکزیمم مقدار عناصر آلیاژی برای هر دسته براساس داده‌های بهره‌برداری اخذ شده، محاسبه و ارائه شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، دسته کم آلیاژ که بیشترین تولید کارخانه را شامل می‌شود، کمترین مقدار SEC را دارد و با افزایش مقدار آلیاژ، متوسط مصرف ویژه انرژی دسته‌ها افزایش می‌یابد. دسته پر آلیاژ بیشترین SEC را دارد، که آلیاژهای خاصی (عمدتاً فولادهای ابزار) در این دسته قرار گرفته‌اند و حدود ۱ درصد کل تولید کارخانه می‌باشند. لازم به ذکر است منظور از عناصر آلیاژی در این جدول کروم، مولیبدن، نیکل، وانادیوم، تنگستن، سلنیوم، قلع، بور، کلسیم، تیتانیوم و آلومینیم می‌باشد.

دو آلیاژ مهم دسته کم آلیاژ 0060I و 1141D هستند که به ترتیب در ساخت میل‌گرد و فولاد ساده استفاده می‌شوند. یکی دیگر از آلیاژهای این دسته 7176D است که در ساخت فولاد فنر استفاده می‌شود. دو آلیاژ 1302P و 1209P از دسته آلیاژ متوسط بعنوان میکرو آلیاژ شناخته شده‌اند و در ساخت قطعات حساس اتومبیل استفاده می‌شوند. نمونه‌ای از آلیاژهای دسته پر آلیاژ که در فولاد ابزار کاربرد دارند 2379S می‌باشند.

جدول ۱-۶: دسته‌بندی گریدهای فولاد تولیدی در واحد فولادسازی کارخانه فولاد مورد نظر بر مبنای میزان عناصر آلیاژی

دسته‌بندی	گریدها		SEC <sup>۱</sup> (KWh/Ton)	درصد تولید	مینیمم درصد عناصر آلیاژی	ماکزیمم درصد عناصر آلیاژی
کم آلیاژ	0060I	1141D	673	65.6	0.31	1.60
	1121D	1191S				
	1186D	7176D				
	7035S	9095I				
آلیاژ متوسط	1180P	1186P	706	33.3	2.06	3.91
	1209P	1249I				
	1302P	5023D				
	6541D	6582D				
	7027J	7131S				
	7139S	7147D				
	7218P	7227D				
	7264J	8159S				
پر آلیاژ	2080S	2344D	788	1.1	12.43	13.97
	2379S	2436S				
	4021D	7765D				

<sup>۱</sup> مصرف ویژه انرژی از تقسیم مجموع مصرف انرژی کوره قوس و پاتیلی بر تناژ مذاب خروجی از کوره پاتیلی، محاسبه شده است.

در جدول ۱-۷ شرایط بهره‌برداری از کوره‌های قوس الکتریکی و کوره‌های پاتیلی بر مبنای دسته‌بندی فوق، ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در دسته‌های کم آلیاژ و آلیاژ متوسط میزان مصرف آهن قراضه بیشتر از آهن اسفنجی است ولی در دسته پر آلیاژ به دلیل حساسیت بیشتر آلیاژها، میزان مصرف آهن اسفنجی بیشتر می‌شود.

جدول ۱-۷. شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی و پاتیلی براساس دسته‌بندی آلیاژهای مختلف

دسته‌بندی	کوره‌های قوس الکتریکی			کوره‌های پاتیلی	
	مذاب تولیدی (Ton)	نسبت قراضه به آهن اسفنجی	انرژی مصرفی (KWh)	مذاب تولیدی (Ton)	انرژی مصرفی (KWh)
کم آلیاژ	152,132	2.16	94,109,596	155,337	10,375,150
آلیاژ متوسط	76,609	1.90	48,536,961	78,723	7,018,320
پر آلیاژ	2,550	0.97	1,759,990	2,688	358,280

## فصل دوم

### تحلیل شرایط تولید و کارایی تجهیزات

واحد فولادسازی بزرگترین مصرف کننده برق در میان دیگر واحدهای کارخانه می باشد. تجهیزات موجود در واحد فولادسازی کارخانه فولاد مورد نظر به صورت زیر تقسیم بندی می شود:

#### ۱- کوره قوس الکتریکی

عمده ترین مصرف کننده انرژی در واحد فولادسازی و همچنین کل مجتمع فولاد مورد نظر، کوره های قوس این واحد می باشد. در واحد فولادسازی این مجتمع تعداد دو عدد کوره قوس الکتریکی<sup>۱</sup> UHP به ظرفیت هر کدام ۴۰ تن (و در صورت استفاده از ۱۰۰ درصد قراضه برابر ۴۴ تن) و ظرفیت ترانسفورماتور هر کدام برابر ۳۶ مگا ولت-آمپر در حال کار می باشند که در برنامه طرح و توسعه این کارخانه تعداد یک عدد کوره دیگر نیز به این مجموعه اضافه می گردد. کوره های قوس موجود در این واحد برای شارژ مواد اولیه از ۱۰۰ درصد قراضه تا ۲۰ درصد قراضه و ۸۰ درصد آهن اسفنجی طراحی شده اند که بر اساس مدارک طراحی، در حالت استفاده از ۱۰۰ درصد قراضه، کوره های قوس الکتریکی این کارخانه باید با دو عدد سبد، اولی با ۲۴ تن و دومی با ۲۰ تن قراضه شارژ گردد.

#### ۲- کوره پاتیلی

مذاب پس از عملیات ذوب در کوره قوس الکتریکی به درون پاتیلهایی ریخته می شود. برای این منظور، کوره قوس با استفاد از جکهای هیدرولیکی، اندکی کج می شود. لازم به ذکر است پاتیلها قبل از استفاده، به وسیله مشعلهایی که از گاز طبیعی استفاده می کنند، پیشگرم می گردند. پس از تخلیه مذاب، پاتیل مذاب جهت انجام عملیات تکمیل ذوب به کوره پاتیلی انتقال می یابد. در این کوره مواد مورد نیاز برای رسیدن به ترکیب خاص، به مذاب اضافه شده و در ضمن با استفاده از انرژی الکتریکی از افت دمایی جلوگیری می شود. دو عدد کوره پاتیلی در کارخانه فولاد ممیزی شده در گزارش موجود می باشد که هر کدام دارای ظرفیتی برابر ۴۰ تن می باشد.

#### ۳- تجهیزات گاززدا (VD<sup>۲</sup> و VOD<sup>۳</sup>)

مذاب پس از آلیاژسازی در کوره های پاتیلی، بسته به نوع آلیاژ و ملاحظات مربوط به آن ممکن است مستقیم به

<sup>۱</sup> Ultra High Power

<sup>۲</sup> Vacuum Degassing

<sup>۳</sup> Vacuum Oxygen Decarburization

قسمت ریخته‌گری منتقل شود و یا این که به سمت تجهیزات گاززدا انتقال داده شود. در این قسمت درپوشی بر روی پاتیل مذاب قرار می‌گیرد که با استفاده از اجکتورهایی که از بخار آب تولید شده در واحد بخار تغذیه می‌کنند، باعث ایجاد خلأ بر روی سطح مذاب می‌گردد. خلأ ایجاد شده باعث خروج گازهای اضافی موجود در مذاب می‌شود. مذاب در این قسمت در حدود نیم ساعت نگه داشته می‌شود. تجهیزات گاززدا با استفاده از آبهای QW50 و KW خنک می‌شوند. در واحد فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده، از VOD نیز به عنوان VD استفاده می‌نمایند. لازم به ذکر است که این تجهیزات گاززدا از حاملهای انرژی (مانند بخار آب) استفاده می‌نمایند.

#### ۴- سیستم غبارگیر

تولید مذاب در کوره‌های قوس و همچنین عملیات تکمیل ذوب در کوره‌های پاتیلی باعث تولید غبار شده که لازم است از کوره‌ها و همچنین سالن تولید دور و پس از تصفیه به اتمسفر تخلیه شود. این مسئولیت بر عهده سیستم غبارگیر می‌باشد. سیستم غبارگیر به طور کلی از دریچه‌ها، سیستم خنک کننده غبار، داکتهای عبور غبار، فیلترها و فنهای مربوطه تشکیل شده است. این واحد فولادسازی در حال حاضر دارای دو سیستم غبارگیر بوده که هر کدام وظیفه غبارگیری از یک کوره قوس و یک کوره پاتیلی را بر عهده دارند.

#### ۵- بخش ریخته‌گری

مذاب پس از کوره‌های پاتیلی و یا پس از تجهیزات گاززدا، به قسمت ریخته‌گری ارسال می‌گردد. ریخته‌گری به دو صورت پیوسته و غیر پیوسته انجام می‌شود. در ریخته‌گری پیوسته با انتقال مذاب به بالای تاندیشهای<sup>۱</sup> مستقر در قسمت فوقانی ماشین ریخته‌گری پیوسته، مذاب به درون آن ریخته شده و پس از عبور از راهگامی مخصوص و خنک شدن نسبی، به صورت بلوم ریخته‌گری می‌شود. در ریخته‌گری غیر پیوسته، مذاب به درون قالبهایی ریخته می‌شود. محصول این روش، اینگات نام دارد که بسته به ابعاد آن، وزن حدودی آنها ممکن است یکی از سه مقدار ۱، ۲ و ۳ تن باشد.

#### ۶- کوره‌های آماده‌سازی بلوم و اینگات

در این واحد فولادسازی از دو کوره تونلی برای آماده‌سازی اینگات و از یک کوره بوژی به منظور آماده‌سازی بلوم استفاده می‌شود. کوره‌های تونلی از دو برنامه اصلی برای آماده‌سازی اینگات استفاده می‌کنند که هر کدام از این برنامه‌های اصلی دارای دو زیر برنامه برای شارژ گرم و سرد می‌باشند. اختلاف برنامه اصلی در دمای کوره و اختلاف زیر برنامه‌ها در مدت زمان حرارت‌دهی است. این کوره‌ها دارای چهار ناحیه حرارتی بوده که با درهایی از یکدیگر جدا شده‌اند. اینگات با استفاده از واگنهای مخصوص، از یک طرف وارد کوره شده و پس از طی مراحل آماده‌سازی مناسب، از طرف دیگر کوره خارج می‌شوند.

به منظور آماده‌سازی بلوم از کوره دیگری استفاده می‌شود که اصطلاحاً کوره بوژی نام دارد. این کوره دارای

<sup>1</sup> tundish



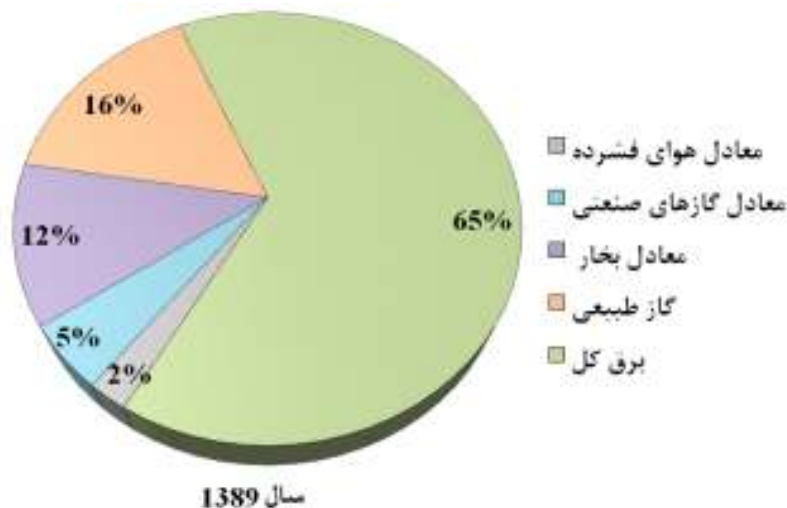
نواحی مختلف حرارتی نبوده و قطعات از یک طرف وارد کوره شده و از همان طرف نیز از کوره خارج می‌شوند.

#### ۷- بویلر (کارگاه تولید بخار)

برای تولید خلأ در تجهیزات گازدا از اجکتورهایی استفاده می‌شود که از بخار استفاده می‌کنند. وظیفه تامین بخار این تجهیزات بر عمده کارگاه تولید بخار است. این کارگاه دارای یک بویلر با ماکزیمم دبی تولید بخار برابر ۱۳/۳ تن بر ساعت با فشار کاری ۱۰ barg می‌باشد.

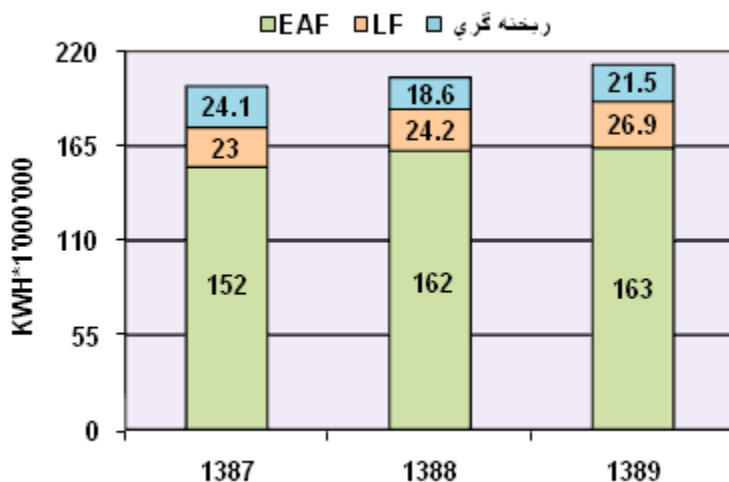
#### ۱-۲. تراز انرژی سالیانه واحد

تراز انرژی فولادسازی برای ۱۳۸۹ در شکل ۱-۲ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که انرژی الکتریکی مصرفی بسیار بیشتر از انرژی حرارتی می‌باشد.



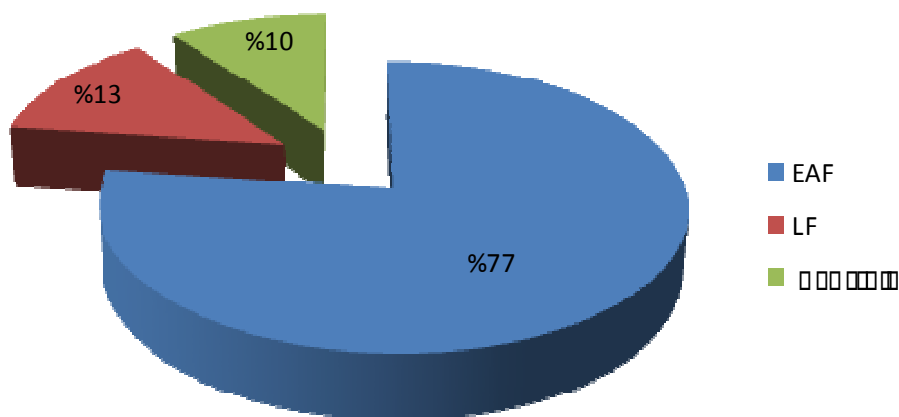
شکل ۱-۲. تراز انرژی فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده در سال ۱۳۸۹

نمودار میزان مصرف سالیانه برق طی سالهای ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ در شکل ۲-۲ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که میزان مصرف برق طی این سالها افزایش یافته است.



شکل ۲-۲. مصرف سالیانه برق واحد فولادسازی کارخانه فولاد طی سالهای ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹

سهم برق مصرفی هر یک از قسمتهای واحد فولادسازی از کل برق مصرفی این واحد، در سال ۱۳۸۹ در شکل ۲-۳ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، سهم میزان مصرف اختصاص داده شده به کوره قوس الکتریکی، حدود ۷۶ تا ۷۹ درصد کل مصرف واحد فولادسازی است. بنابراین با توجه به اینکه عمده مصرف انرژی در واحد فولادسازی، انرژی الکتریکی بوده و در ضمن کوره قوس الکتریکی، بیشترین مصرف انرژی الکتریکی را در این واحد به خود اختصاص داده، لذا بهینه سازی مصرف در کوره قوس الکتریکی می تواند گام موثری در راستای کاهش مصرف انرژی در واحد فولادسازی به شمار آید.



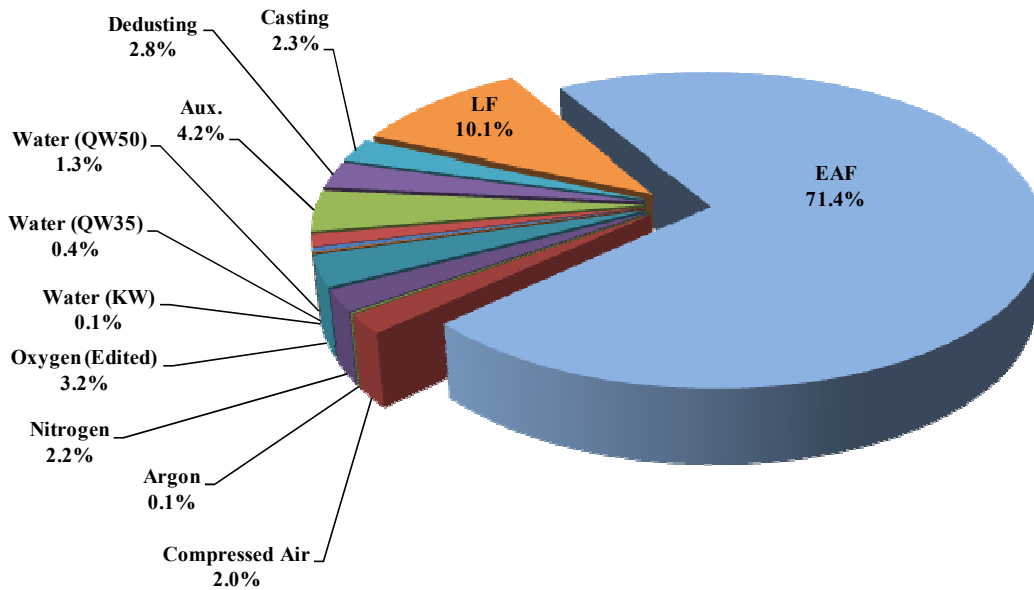
شکل ۲-۳. سهم مصرف انرژی الکتریکی قسمتهای مختلف واحد فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده در سال ۱۳۸۹

## ۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی تجهیزات

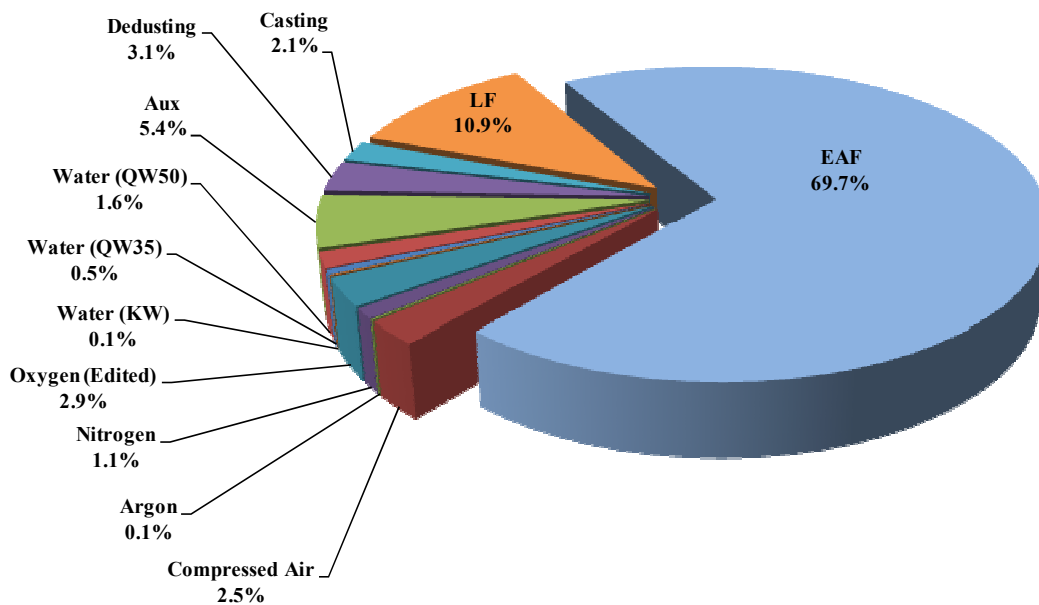
برای انجام یک ممیزی انرژی، ابتدا باید مصرف ویژه الکتریکی یا حرارتی حاملهای انرژی تولید شده در واحدهای یوتیلیتی محاسبه شود. سپس با در دست داشتن مصارف ویژه انرژی حاملها، از حاصل ضرب آن در مقدار حامل ورودی به نواحی تولیدی، انرژی مصرفی معادل آنها حاصل گردد.

### ۱-۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی الکتریکی در واحد فولادسازی

در شکل ۲-۴ و شکل ۲-۵ تقسیم‌بندی مصرف انرژی ویژه الکتریکی واحد فولادسازی مربوط به ذوب‌های کوره‌های قوس الکتریکی ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴. تقسیم‌بندی مصارف ویژه انرژی الکتریکی واحد فولادسازی برای ذوب‌های کوره قوس الکتریکی یک در بازه زمانی اندازه‌گیری



شکل ۲-۵. تقسیم‌بندی مصارف ویژه انرژی الکتریکی واحد فولادسازی برای ذوب‌های کوره قوس الکتریکی دو در بازه زمانی اندازه‌گیری

در جدول ۱-۲ مصارف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری با مقادیر مشابه در سال ۸۹ (که براساس داده‌های آماری محاسبه شده)، مقایسه گردیده است. لازم به ذکر است در این جدول نتایج اندازه‌گیری بصورت میانگین مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند کوره قوس الکتریکی حدود ۷۷٪ از مصرف انرژی الکتریکی واحد فولادسازی را به خود اختصاص داده است.

جدول ۱-۲. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری با مقادیر مشابه در سال ۱۳۸۹

مصرف ویژه انرژی الکتریکی واحد فولادسازی <sup>۱</sup>	مصرف ویژه انرژی الکتریکی ریخته‌گری	مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره پاتیلی	مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره قوس	
KWh/Ton	KWh/Ton	KWh/Ton	KWh/Ton	
831.6	85.2	106.0	640.4	میانگین ذوب در سال ۸۹
902.7	25.0	108.5	769.2	ذوبهای کوره قوس ۱ در زمان اندازه‌گیری
806.6	20.7	106.0	679.9	ذوبهای کوره قوس ۲ در زمان اندازه‌گیری
854.7	22.9	107.3	724.6	میانگین ذوبهای کوره‌های قوس ۱ و ۲ در زمان اندازه‌گیری

## ۲-۲-۲. تعیین مصرف ویژه انرژی حرارتی در واحد فولادسازی

در جدول ۲-۲ میزان مصرف گاز طبیعی در قسمت‌های مختلف واحد فولادسازی کارخانه فولاد مورد بررسی در گزارش و در جدول ۲-۳ مصرف ویژه انرژی فسیلی در این واحد براساس داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به محاسبات ارائه شده برای تعیین راندمان بویلر که در قسمت‌های بعد ارائه شده، علی‌رغم اینکه در بازه اندازه‌گیری برای بویلر از کنتور با تصحیح گر دما و فشار استفاده شده، ولی محاسبات نشان می‌دهند که مقدار اندازه‌گیری شده توسط این کنتور صحیح نمی‌باشد و مقدار اندازه‌گیری شده توسط این کنتور باید در ضریب  $4/29$  ضرب شود. این عدد از تقسیم دو ضریب کنتور  $4/8$  و  $1/12$  بر هم محاسبه شده که ضریب  $4/8$

<sup>۱</sup> شامل مجموع مصارف ویژه انرژی کوره‌های قوس و پاتیلی و قسمت ریخته‌گری می‌شود.

<sup>۲</sup>  $4.8/1.12=4.29$

ضریب کنتور قبلی و ۱/۱۲ ضریب کنتور جدید<sup>۱</sup> است. محاسبات ارائه شده برای راندمان بویلر حاکی از آن است که اعداد کنتور قبلی صحیح بوده، لذا برای محاسبه میزان واقعی مصرف نرمال گاز طبیعی در این تجهیز باید مقدار نشان داده شده توسط کنتور جدید بر ۱/۱۲ تقسیم و سپس در ۴/۸ ضرب شود. در جدول ۲-۲ و جدول ۳-۲ مصرف نرمال گاز طبیعی بویلر و مصرف ویژه انرژی فسیلی (براساس مقادیر تصحیح شده) ارائه شده است.

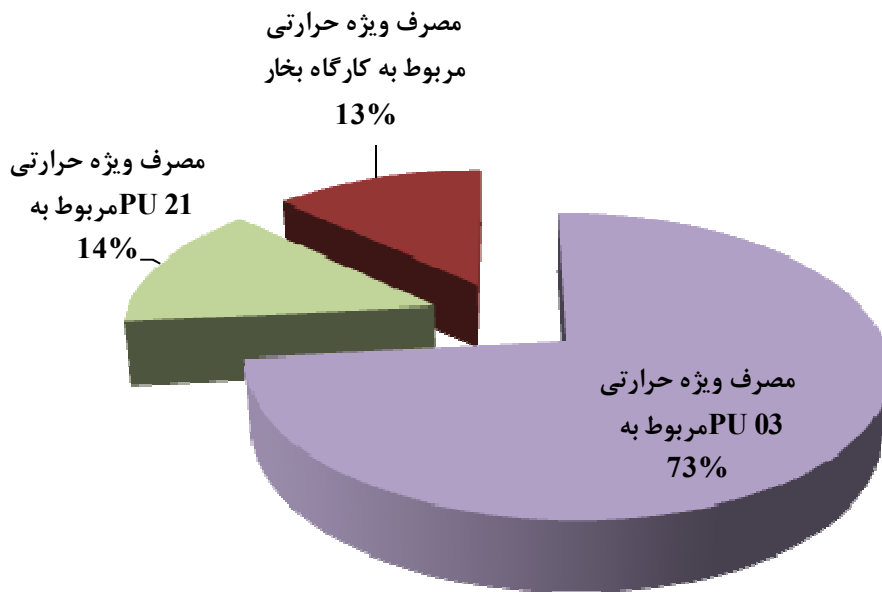
جدول ۲-۲. میزان مصرف گاز طبیعی واحد فولادسازی کارخانه فولاد در بازه زمانی اندازه‌گیری

میزان مصرف گاز طبیعی مربوط به کارگاه بخار (Nm <sup>3</sup> )	میزان مصرف گاز طبیعی مربوط به PU 21 (Nm <sup>3</sup> )	میزان مصرف گاز طبیعی مربوط به PU 03 (Nm <sup>3</sup> )	میزان محصول ریخته‌گری شده (ton)	تاریخ و ساعت خاتمه ریخته‌گری	تاریخ و ساعت شروع ریخته‌گری
1,437	2,926	14,587	674.78	1390/12/8 22:21	1390/12/7 22:14
3,677	2,582	14,577	955.69	1390/12/9 22:16	1390/12/8 22:21
<b>5114</b>	<b>5508</b>	<b>29164</b>	<b>1630.47</b>	<b>1390/12/9 22:16</b>	<b>1390/12/7 22:14</b>

جدول ۳-۲. مصرف ویژه حرارتی (فسیلی) واحد فولادسازی کارخانه مورد نظر در بازه زمانی اندازه‌گیری

مصرف ویژه حرارتی (فسیلی) واحد فولادسازی (GJ/ton)	مصرف ویژه حرارتی (فسیلی) واحد فولادسازی (Nm <sup>3</sup> /ton)	مصرف ویژه حرارتی مربوط به کارگاه بخار (Nm <sup>3</sup> /ton)	مصرف ویژه حرارتی مربوط به PU 21 (Nm <sup>3</sup> /ton)	مصرف ویژه حرارتی مربوط به PU 03 (Nm <sup>3</sup> /ton)	تاریخ و ساعت خاتمه ریخته‌گری	تاریخ و ساعت شروع ریخته‌گری
1.01	28.11	2.15	4.34	21.62	1390/12/8 22:21	1390/12/7 22:14
0.78	21.81	3.86	2.70	15.25	1390/12/9 22:16	1390/12/8 22:21
<b>0.88</b>	<b>24.41</b>	<b>3.14</b>	<b>3.38</b>	<b>17.89</b>	<b>1390/12/9 22:16</b>	<b>1390/12/7 22:14</b>

<sup>۱</sup> به طور متوسط



شکل ۲-۶. سهم مصرف ویژه انرژی حرارتی (فسیلی) قسمت‌های مختلف واحد فولادسازی کارخانه

### ۳-۲. تعیین عملکرد و کارایی تجهیزات عمده انرژی بر

در این قسمت به برآورد عملکرد و کارایی تجهیزات عمده انرژی بر در واحد فولادسازی کارخانه فولاد، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است برای تحلیل عملکرد کوره‌های پاتیلی، علاوه بر اینکه دبی و دمای دود خروجی از کوره قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، دمای آب خنک‌کن خروجی از آن نیز اندازه‌گیری نمی‌شود و لذا برآورد عملکرد آن در یک ذوب و استخراج دیاگرام سانکی برای آن عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد.

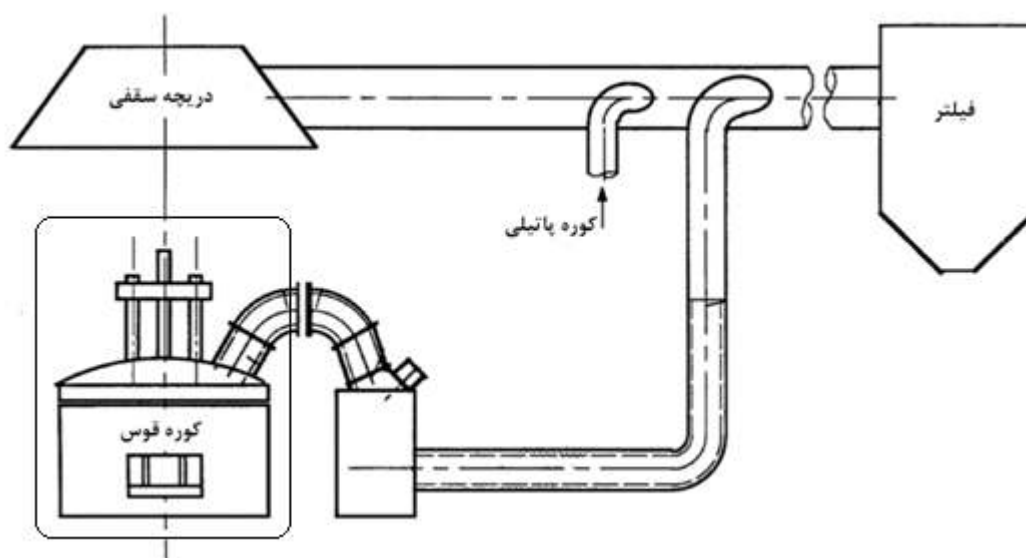
#### ۳-۲-۱. بررسی عملکرد و کارایی کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار PHAST

نرم‌افزار PHAST ابزاری مفید جهت ارزیابی مصرف انرژی و بهینه‌سازی انواع کوره‌های حرارتی و الکتریکی، هیترها، گدازنده‌ها، بویلرها و ... می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار، عملکرد کوره در شرایط متفاوت شبیه‌سازی و میزان تلفات و راندمان آن محاسبه می‌شود. این نرم‌افزار از روش غیر مستقیم جهت محاسبه راندمان کوره استفاده کرده و اطلاعات مربوط به محاسبه عملکرد کوره و تلفات در ۹ بخش زیر وارد می‌شود:

- میزان انرژی ورودی
- میزان انرژی لازم برای ذوب مواد اولیه ورودی به کوره
- انرژی ذخیره شده در کوره
- تلفات خنک‌سازی کوره با آب یا هوا
- تلفات حرارتی گاز خروجی از دودکش
- تلفات ناشی از خارج کردن سرباره
- تلفات ناشی از نشت هوا و تشعشع در هنگام باز شدن در کوره

- تلفات حرارتی تشعشی و جابجائی از جداره کوره
- تلفات دریچه‌ها و درزهایی موجود در کوره

➤ مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد بررسی شده در شرایط بهره‌برداری به منظور مدلسازی کوره‌ها در شرایط بهره‌برداری، داده‌های اندازه‌گیری شده برای یک ذوب از هر کوره در نظر گرفته شده است. گام اول مشخص کردن حجم کنترل است که در اینجا همانطور که در شکل ۲-۷ مشاهده می‌شود حجم کنترل فقط شامل کوره قوس می باشد.



شکل ۲-۷. حجم کنترل مورد نظر برای مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد توسط نرم‌افزار PHAST

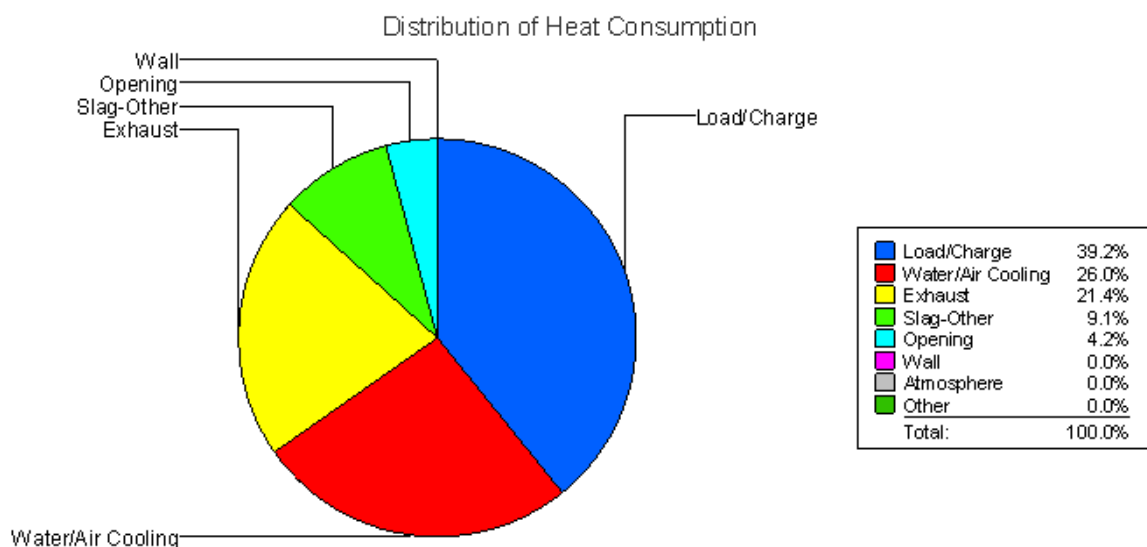
داده‌های اندازه‌گیری شده مورد نیاز در نرم‌افزار PHAST، در جدول ۲-۴ ذکر شده‌اند، این اطلاعات مربوط به شماره ذوب ۱۲۱۰۶۲۱ از کوره ۱ می‌باشد که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۹ اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲-۴. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای شماره ذوب ۱۲۱۰۶۲۱ کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد ممیزی شده

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
آهن اسفنجی مصرفی	Kg	25470	دمای مذاب خروجی	°C	1575
آهن قراضه مصرفی	Kg	27000	دمای محیط	°C	30
مذاب تولیدی	Kg	45700	میانگین افزایش دمای آب	°C	18
سرباره‌سازهای مصرفی	Kg	2587	اکسیژن مصرفی	Nm <sup>3</sup>	855
کربن مصرفی	Kg	783	انرژی الکتریکی مصرفی	KWh	25470
دبی آب خنک‌کن	m <sup>3</sup> /h	562	مدت زمان ذوب <sup>۱</sup>	Min	76

<sup>۱</sup> tap to tap time

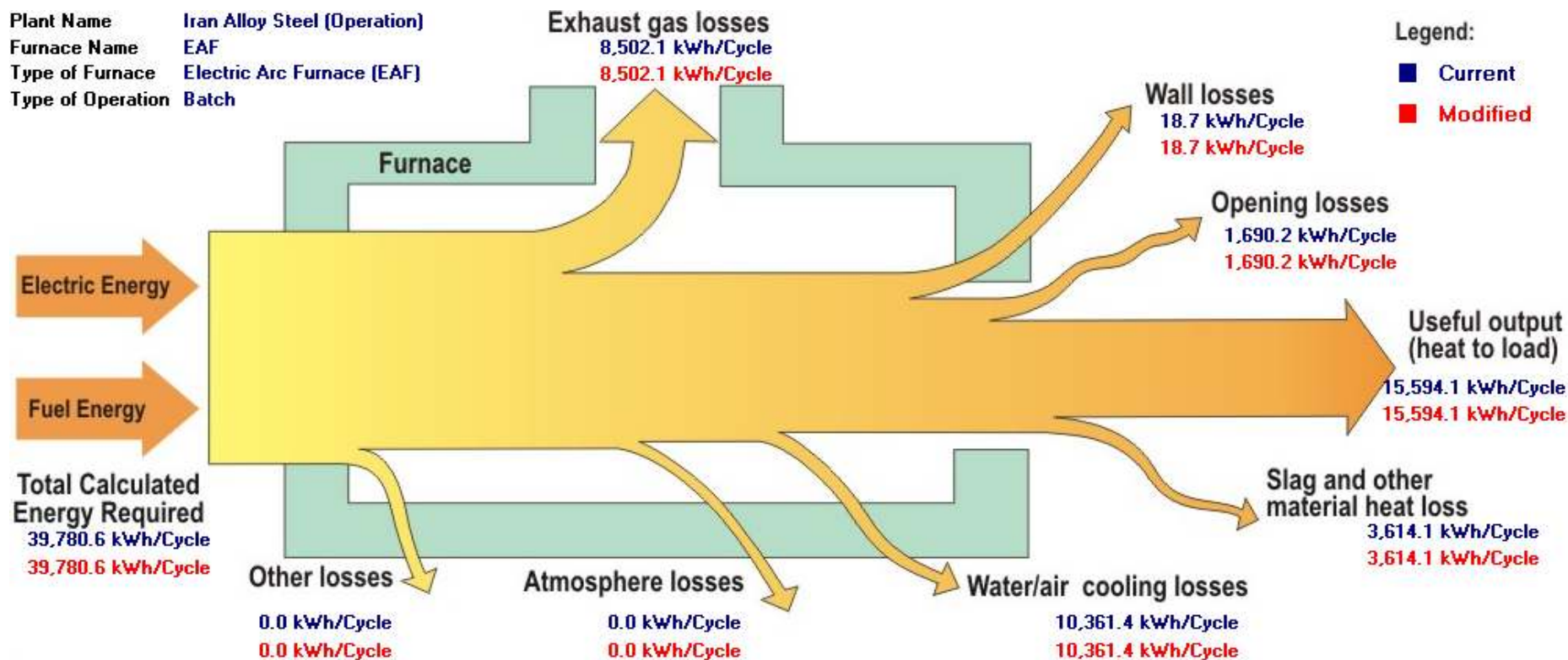
پس از انجام محاسبات، سهم انرژی‌های مصرفی در شکل ۲-۸ مشخص شده است. به طور کلی تلفات عمده کوره‌ها در خنک‌سازی (با آب) و دود خروجی می‌باشد. در این کوره بیشترین تلفات در خنک‌سازی کوره رخ داده است.



شکل ۲-۸. سهم تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد

برای محاسبه تلفات دود خروجی، دبی دود، دانسیته دود، دمای خروج دود و دمای محیط باید مشخص باشند. از آنجا که دبی دود خروجی از داکت کوره قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد میزان تلفات آن بطور مستقیم محاسبه نمی‌شود و با کسر سایر تلفات از میزان انرژی ورودی بدست می‌آید. منحنی سانکی مربوط به این شماره ذوب در شکل ۲-۹ مشخص شده است و مقدار تلفات دود در نرم‌افزار PHAST به گونه‌ای محاسبه شده که موازنه انرژی در کوره برقرار گردد. لازم به ذکر است انرژی ورودی نشان داده شده در این نمودار، انرژی الکتریکی و انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی (مانند انرژی کربن مصرفی و الکتروود و همچنین انرژی آزاد شده به دلیل استفاده از لانس اکسیژن) را شامل می‌شود.





شکل ۲-۹. دیاگرام سانکی برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ۱ یک

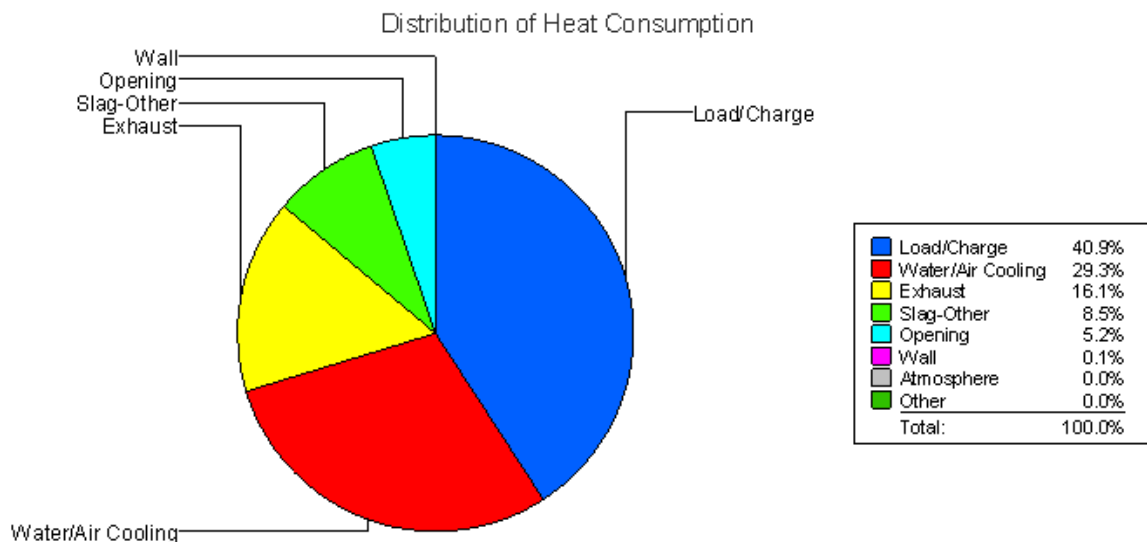
➤ مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده

داده‌های اندازه‌گیری شده مورد نیاز در نرم‌افزار PHAST، در جدول ۲-۵ ذکر شده‌اند، این اطلاعات مربوط به شماره ذوب ۱۲۲۰۶۵۱ از کوره دو می‌باشد که در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۸ اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲-۵. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای شماره ذوب ۱۲۲۰۶۵۱ کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد

پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
آهن اسفنجی مصرفی	kg	10260	دمای مذاب خروجی	°C	1643
آهن قراضه مصرفی	kg	42000	دمای محیط	°C	30
مذاب تولیدی	kg	46000	میانگین افزایش دمای آب	°C	18
سرباره‌سازهای مصرفی	kg	3071	اکسیژن مصرفی	Nm <sup>3</sup>	1059
کربن مصرفی	kg	761	انرژی الکتریکی مصرفی	KWh	25750
دبی آب خنک‌کن	m <sup>3</sup> /h	614	مدت زمان ذوب <sup>۱</sup>	Min	111

پس از انجام محاسبات، سهم انرژی‌های مصرفی در شکل ۲-۱۰ مشخص شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در این کوره تلفات حرارتی ناشی از آب خنک‌کن، بسیار بیشتر از تلفات حرارتی از دود خروجی می‌باشد.

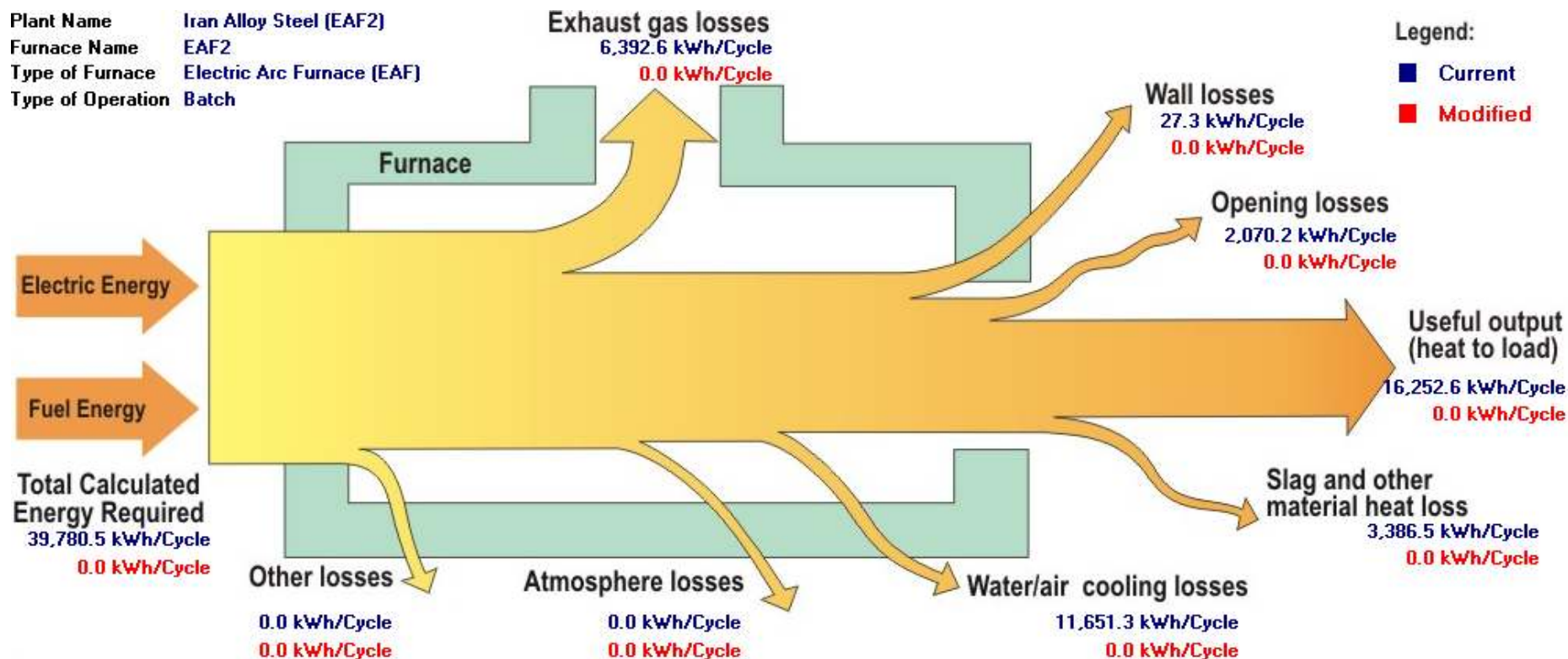


شکل ۲-۱۰. سهم تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو کارخانه فولاد

در این کوره نیز میزان تلفات دود بطور مستقیم محاسبه نمی‌شود و با کسر سایر تلفات از میزان انرژی ورودی

<sup>1</sup> tap to tap time

به دست می‌آید. منحنی سانکی مربوط به این شماره ذوب در شکل ۲-۱۱ مشخص شده است و مقدار تلفات دود در نرم‌افزار PHAST به گونه‌ای محاسبه شده که موازنه انرژی در کوره برقرار گردد. لازم به ذکر است انرژی ورودی نشان داده شده در این نمودار، شامل انرژی الکتریکی و انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی (مانند انرژی کربن مصرفی و الکتروود و همچنین انرژی آزاد شده به دلیل استفاده از لانس اکسیژن) می‌گردد.



شکل ۲-۱۱. دیاگرام سانکی برای شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو

## ۲-۳-۲. بررسی عملکرد و کارایی بویلر (کارگاه تولید بخار)

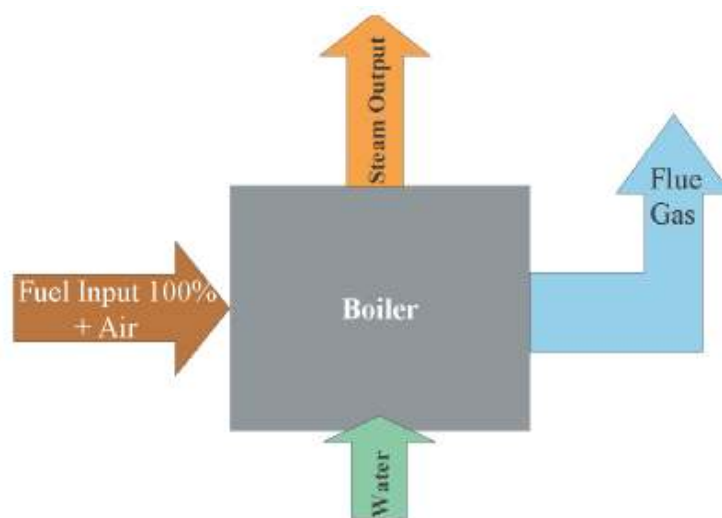
بویلر کارگاه تولید بخار به منظور تامین بخار لازم برای تجهیزات گاز زدای موجود در واحد فولادسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل این بویلر عملاً جز تجهیزات واحد فولادسازی در نظر گرفته شده است.

### ➤ تعیین راندمان بویلر

راندمان بویلر یکی از شاخصهای ارزیابی عملکرد بویلر است، که تأثیر قابل توجهی بر روی هزینه‌های مصرف سوخت، تعمیر، نگهداری و عمر مفید دستگاه دارد. راندمان حرارتی واقعی بویلر با یکی از دو روش ذیل قابل محاسبه است:

### ✓ روش مستقیم

در این روش انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی به بویلر مقایسه می‌شود، تا میزان قابلیت انتقال گرما توسط بویلر ارزیابی شود. در شکل ۲-۱۲ ورودی و خروجی بویلر مشخص شده است.



شکل ۲-۱۲. ورودی و خروجی بویلر برای محاسبه راندمان با روش مستقیم

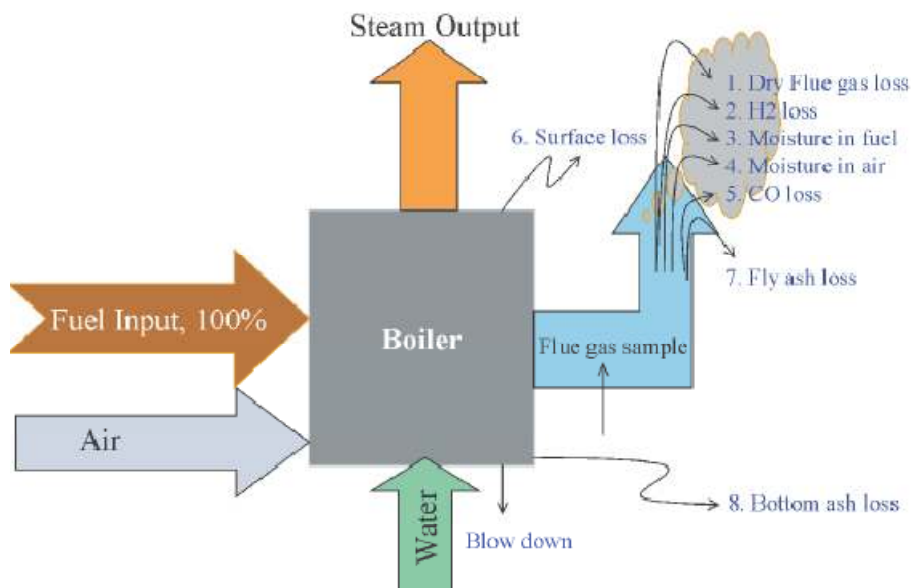
راندمان بویلر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{راندمان بویلر} = \frac{\text{انرژی مفید}}{\text{انرژی ورودی}} \times 100$$

انرژی ورودی به بویلر، انرژی آزاد شده سوخت مصرفی است و انرژی مفید، انرژی لازم برای تبدیل آب به بخار می‌باشد که از احتراق سوخت به آب داده می‌شود.

### ✓ روش غیر مستقیم

این روش که روش تلفات حرارتی نیز نامیده می‌شود، بر پایه احتساب کلیه تلفات حرارتی بویلر بنا شده است و راندمان بویلر با تفاضل مقادیر تلفات از میزان ۱۰۰٪ محاسبه می‌شود. تلفات حرارتی در شکل ۱-۲ مشخص شده‌اند.



شکل ۱-۲. تلفات بویلر برای محاسبه راندمان به روش غیر مستقیم

تلفات زیر برای بویلرهای با سوخت گاز، مایع و جامد در نظر گرفته می‌شوند:

- L<sub>1</sub> تلفات ناشی از دود خشک (حرارت محسوس)
  - L<sub>2</sub> تلفات ناشی از احتراق هیدروژن سوخت (H<sub>2</sub>)
  - L<sub>3</sub> تلفات ناشی از رطوبت موجود در سوخت (H<sub>2</sub>O)
  - L<sub>4</sub> تلفات ناشی از رطوبت موجود در هوا (H<sub>2</sub>O)
  - L<sub>5</sub> تلفات ناشی از احتراق ناقص و تولید کربن منوکسید (CO)
  - L<sub>6</sub> تلفات ناشی از تشعشع، انتقال حرارت جابجایی از سطح و دیگر تلفات که محاسبه نمی‌شوند. اگر سوخت جامد باشد، علاوه بر تلفات فوق، تلفات زیر نیز وجود دارند:
  - L<sub>7</sub> تلفات ناشی از خاکستر موجود در دود (Carbon)
  - L<sub>8</sub> تلفات ناشی از خاکستر کف بویلر (Carbon)
- راندمان بویلر با روش غیر مستقیم با رابطه زیر به دست می‌آید.

$$100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) = \text{راندمان بویلر}$$

روابط لازم برای محاسبه تلفات مختلف در ادامه تشریح شده است. یکی از تلفات عمده، مربوط به دود خشک است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود. در این رابطه  $m$  نسبت جرم دود خشک به جرم سوخت است که از آنالیز دود و سوخت به دست می‌آید،  $C_p$  گرمای ویژه دود،  $T_f$  دمای خروجی دود و  $T_a$  دمای محیط است.

$$L_1 = \frac{mC_p(T_f - T_a)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

احتراق هیدروژن موجب تولید آب می‌شود، مقداری از حرارت صرف تبدیل این آب به بخار می‌شود. برای محاسبه این اتلاف از رابطه زیر استفاده می‌شود. در این رابطه  $H_2$  درصد مولی هیدروژن،  $C_p$  گرمای ویژه بخار سوپرهیت و ۵۸۴ گرمای نهفته بخار آب در فشار جزئی آن است.

$$L_2 = \frac{9H_2\{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

رطوبتی که همراه سوخت وارد بویلر می‌شود، به بخار سوپرهیت تبدیل شده و دمای آن به دمای گاز خروجی می‌رسد. تغییر فاز آب و افزایش دمای بخار باعث اتلاف حرارت می‌شود که با رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه  $M$  درصد مولی رطوبت سوخت،  $C_p$  گرمای ویژه بخار سوپرهیت و ۵۸۴ گرمای نهفته بخار آب در فشار جزئی آن است.

$$L_3 = \frac{M\{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

رطوبت موجود در هوای ورودی در خروج از بویلر به بخار سوپرهیت تبدیل می‌شود. برای محاسبه این اتلاف، جرم رطوبت موجود در هوا باید مشخص شود. با استفاده از نمودارهای سایکومتريک با داشتن دمای هوای ورودی به بویلر با میانبایی (یا برونبایی) جرم رطوبت موجود در هوا را بدست می‌آید. در جدول ۲-۶ مقادیر نمونه‌ای برای جرم رطوبت موجود در هوا ذکر شده است.

جدول ۲-۶. مقادیر نمونه برای جرم رطوبت موجود در هوا برحسب دمای هوا

Dry Bulb Temp °C	Wet Bulb Temp °C	Relative Humidity %	Humidity Factor
20	20	100	0.016
20	14	50	0.008
30	22	50	0.014
40	30	50	0.024

اتلاف ناشی از رطوبت موجود در هوای ورودی با رابطه زیر محاسبه می‌شود. AAS نسبت جرم هوای واقعی به جرم سوخت،  $C_p$  گرمای ویژه بخار سوپرهیت است.

$$L_4 = \frac{AAS \times \text{humidity factor} \times C_p(T_f - T_a)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

در احتراق ناقص تولیدات می‌توانند با اکسیژن ترکیب شوند. این تولیدات شامل CO و هیدروکربن‌های مختلفی است که معمولاً در دود خروجی از بویلر وجود دارند. کربن منوکسید تنها گازی است که به راحتی در بویلر اندازه‌گیری می‌شود. اتلاف ناشی از احتراق ناقص (تبدیل کربن به کربن منوکسید) از دو طریق محاسبه می‌شود:

$$L_5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{GCV \text{ of fuel}} \times 100$$

در این رابطه C درصد مولی کربن سوخت است. اگر CO در آنالیز گاز در مقیاس ppm اندازه‌گیری شود، این اتلاف از رابطه زیر به دست می‌آید.  $M_f$  نرخ مصرف سوخت (kg/hr) است.

$$L_5 = M_{CO} \times 5744$$

$$M_{CO} = CO(\text{in ppm}) \times 10^{-6} \times M_f \times 28$$

یکی دیگر از تلفات بویلر، تلفات تشعشعی و جابجائی از سطح بویلر به محیط اطراف آن می‌باشد. با توجه به نوع و اندازه بویلر یک محدوده برای این اتلاف در جدول ۲-۷ مشخص است.



جدول ۲-۷. محدوده درصد تلفات تشعشعی و جابجائی

<b>For industrial fire tube/package boiler</b>	<b>1.5-2.5</b>
<b>For industrial water tube boiler</b>	<b>2-3</b>
<b>For power station boiler</b>	<b>0.4-1</b>

با این حال، اگر مساحت و دمای سطح بویلر مشخص باشد، اتلاف تشعشعی با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$L_{61} = 0.548 \left[ \left( \frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957(T_s - T_a)^{1.25}$$

$$\times \text{sqrt of } [(196.85V_m + 68.9)/68.9]$$

$V_m$  سرعت باد و  $T_s$  دمای سطح بویلر است. این رابطه اتلاف را بر حسب  $W/m^2$  می‌دهد، و با تبدیل زیر

درصد اتلاف به دست می‌آید.

$$L_6 = \frac{L_{61} \times 0.86 \times \text{Surface area of boiler}}{GCV \times \text{Fuel firing rate}} \times 100$$

به صورت تقریبی تلفات تشعشعی برابر ۱ در صد از مجموع تلفات در نظر گرفته می‌شود. تلفات ناشی از کربن نسوخته در خاکستر دود خروجی از بویلر و خاکستر کف بویلر با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند. این دو اتلاف همانطور که در بالا ذکر شد، مربوط به بویلرهای با سوخت جامد هستند.

$$L_7 = \frac{\text{Total ash collected/kg of fuel burnt} \times \text{GCV of fly ash}}{\text{GCV of fuel}} \times 100$$

$$L_8 = \frac{\text{Total ash collected/kg of fuel burnt} \times \text{GCV of bottom ash}}{\text{GCV of fuel}} \times 100$$

➤ تعیین راندمان بویلر کارگاه تولید بخار کارخانه فولاد مورد بررسی در گزارش  
 ✓ روش مستقیم

با استفاده از داده‌های بهره‌برداری، راندمان بویلر را می‌توان با روش مستقیم محاسبه کرد. در بازه زمانی اندازه‌گیری دبی سوخت مصرفی  $1715 \text{ Nm}^3$  و دبی بخار تولیدی  $90$  تن بوده است. با استفاده از رابطه زیر راندمان بویلر بدست می‌آید. میزان انرژی سوخت با ضریب  $4/29$  محاسبه می‌شود. آنتالپی بخار سوپرهیت در شرایط بهره‌برداری کارگاه تولید بخار، حدود  $2828/26 \text{ kJ/kg}$  و آنتالپی آب ورودی به بویلر در شرایط بهره‌برداری کارگاه،  $96/5 \text{ kJ/kg}$  است.

$$Efficiency = \frac{m_{Steam}(h_{Steam} - h_{Water})}{\forall_{Fuel}HHV * 4.29}$$

با جایگذاری مقادیر آنتالپی آب و بخار در رابطه فوق، راندمان بویلر  $84/8$  درصد بدست می‌آید. لازم به ذکر است، ارزش حرارتی بالایی سوخت براساس آنالیز سوخت این کارخانه برابر  $9427 \text{ Kcal/Nm}^3$  در نظر گرفته شده است.

✓ روش غیرمستقیم

با توجه به این که سوخت این بویلر گاز طبیعی است، راندمان آن با رابطه کلی زیر بدست می‌آید.

$$\text{راندمان بویلر} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6)$$

با استفاده داده‌های اندازه‌گیری شده و همچنین آنالیز گاز طبیعی مصرفی که در جدول ۲-۸ ارائه شده، تلفات حرارتی بویلر قابل محاسبه است.

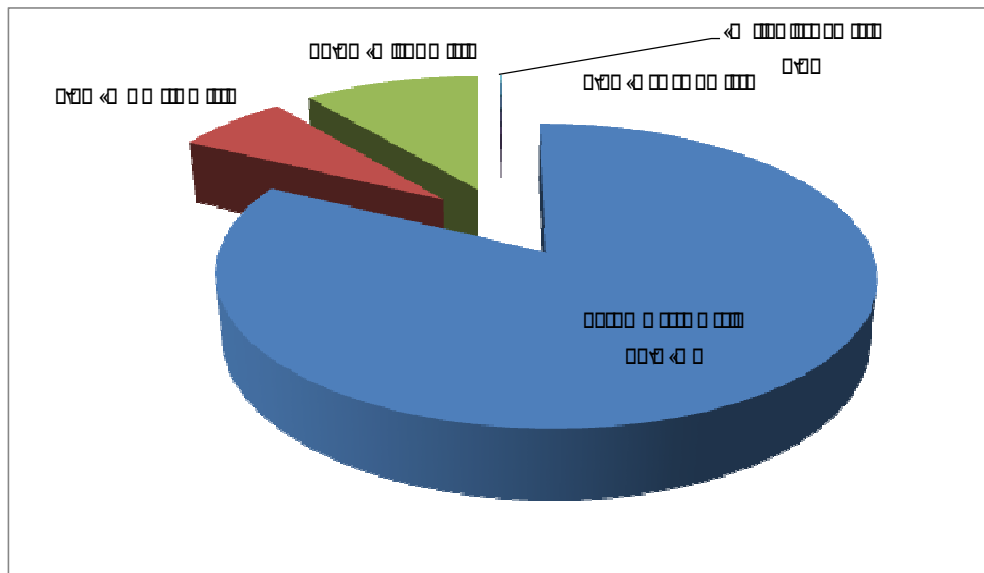
جدول ۲-۸. آنالیز گاز طبیعی مصرفی بویلر کارخانه فولاد

Component	Mole %	Component	Mole %
N-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.0604	CH <sub>4</sub>	90.4934
I-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.2190	N <sub>2</sub>	3.5196
N-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.2991	O <sub>2</sub>	-
I-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0466	CO <sub>2</sub>	1.0541
N-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0288	CO	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.6636	H <sub>2</sub>	-
C <sub>3</sub> H <sub>18</sub>	1.0903	H <sub>2</sub> S	-

با استفاده از روش غیر مستقیم راندمان بویلر کارخانه فولاد محاسبه شده است. میزان تلفات حرارتی که در بالا معرفی شده‌اند و راندمان بویلر در جدول ۲-۹ ارائه شده است. از آنجا که درصد جرمی هیدروژن در گاز طبیعی بالاست، تلفات ناشی از احتراق هیدروژن بیشتر از سایر تلفات است. سوخت بویلر فاقد رطوبت است و در نتیجه این اتلاف حرارتی وجود ندارد. به علت مقدار کم کربن منو کسید در دود، تلفات ناشی از احتراق ناقص ناچیز است. در شکل ۲-۲ میزان تلفات حرارتی و حرارت مفید برای تولید بخار (راندمان) در بویلر کارخانه فولاد مشاهده می‌شود.

جدول ۲-۹. میزان تلفات حرارتی و راندمان بویلر کارخانه فولاد

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	Boiler Efficiency
6.72	10.21	0	0.29	0.02	0.17	82.6

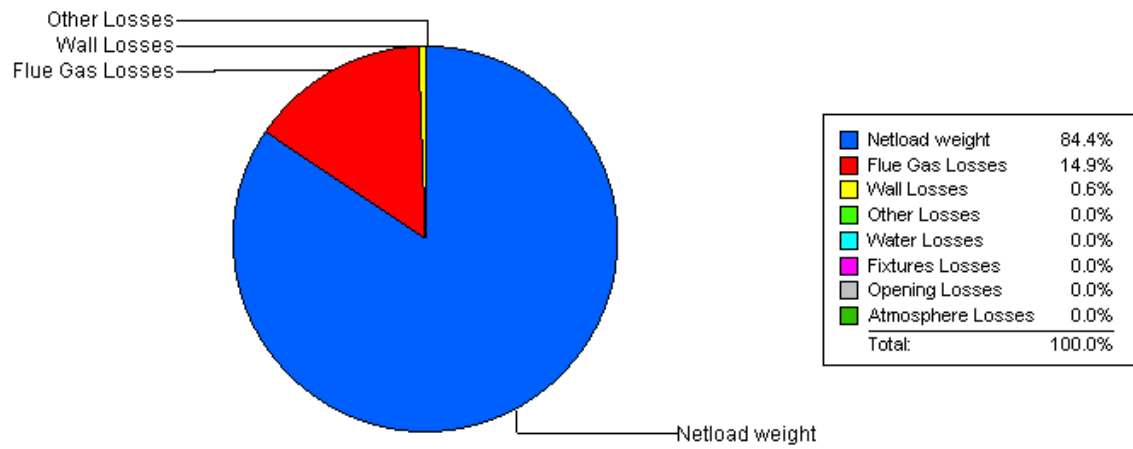


شکل ۲-۲. میزان تلفات حرارتی و حرارت مفید برای تولید بخار در بویلر کارخانه فولاد ممیزی شده

### ✓ با استفاده از نرم‌افزار PHAST

در شکل ۲-۳ نتایج مدلسازی بویلر کارگاه تولید بخار کارخانه فولاد مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار PHAST ارائه شده است. این مدلسازی در واقع تلفیقی از روش مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد، بدین معنا که این نرم‌افزار ابتدا میزان انرژی مفید و تلفات حرارتی را محاسبه کرده و سپس با استفاده از آنها، انرژی ورودی به سیستم را محاسبه می‌نماید. در اینجا تلفات دود شامل تلفات دود خشک، رطوبت و احتراق ناقص است. در شکل ۲-۴ دیاگرام سانکی بویلر مشاهده می‌شود، در این دیاگرام مقدار انرژی ورودی به بویلر و تلفات هر بخش مشخص شده است. در بخش Other Losses تلفات تشعشعی از قسمت‌هایی از سطح بویلر در نظر گرفته شده است که دمای آن‌ها بیشتر از سایر قسمت‌ها است، مساحت این نواحی کم است و در نتیجه مقدار تلفات ناچیز (کمتر از دقت نشان داده شده در شکل) است.

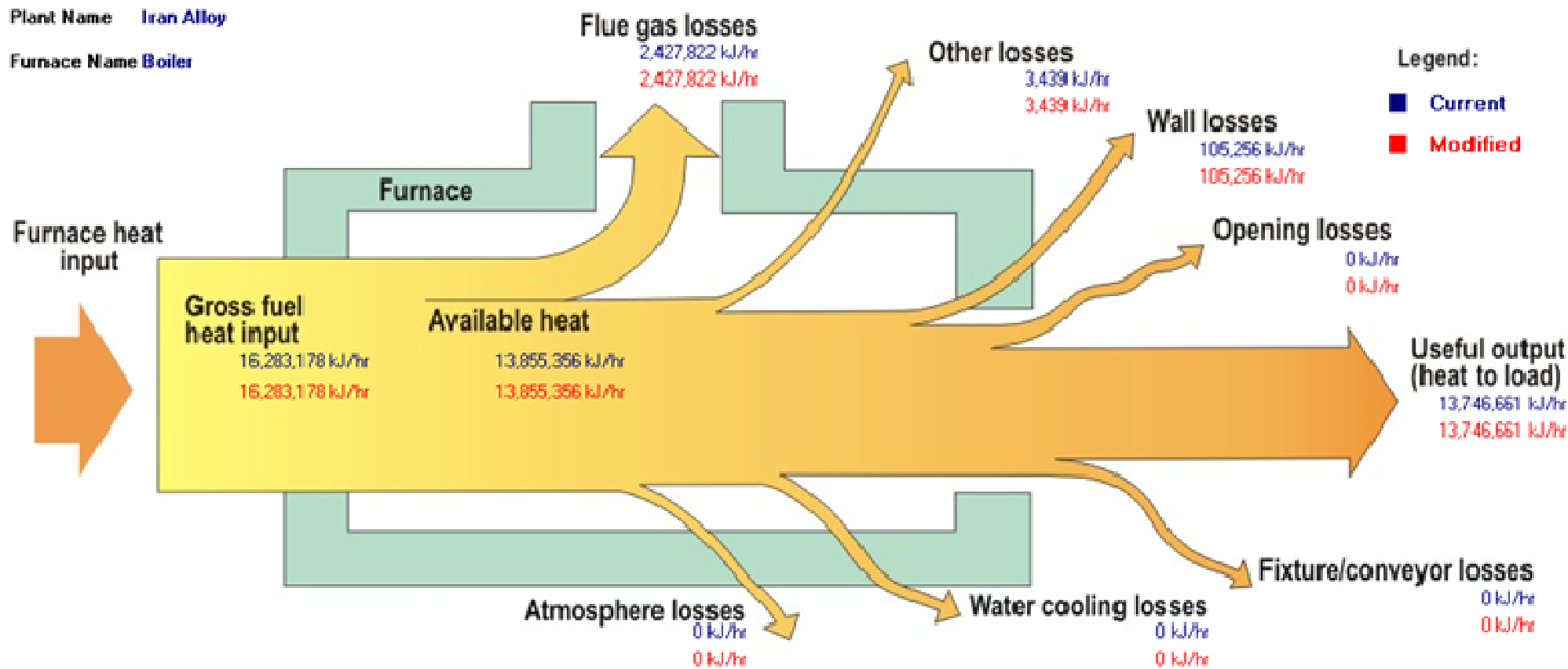
Distribution of Heat Consumption



شکل ۲-۳. سهم حرارت مفید برای تولید بخار و تلفات حرارتی محاسبه شده در PHAST در بویلر کارخانه فولاد

Plant Name Iran Alloy

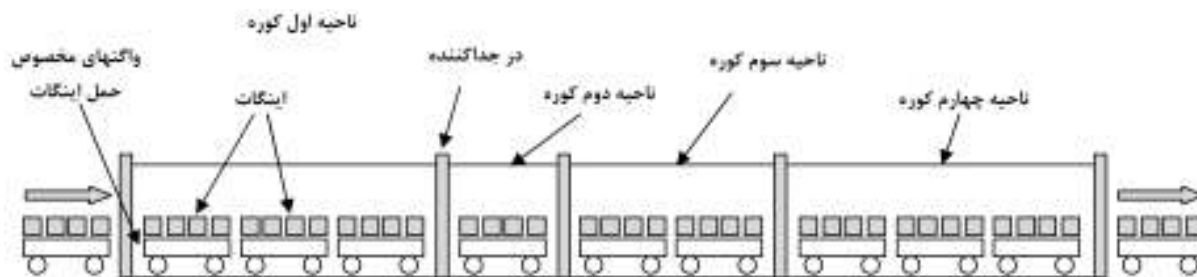
Furnace Name Boiler



شکل ۲-۴. دیاگرام سانکی بویلر کارگاه تولید بخار کارخانه فولاد

### ۲-۳-۳. بررسی عملکرد کوره‌های تونلی و بوژی

در این واحد فولادسازی از دو کوره تونلی برای آماده‌سازی اینگات و از یک کوره بوژی به منظور آماده‌سازی بلوم استفاده می‌شود. این کوره‌ها از مصرف کننده‌های گاز طبیعی در واحد فولادسازی به شمار می‌روند. در شکل ۲-۵ ساختار کوره‌های تونلی بصورت شماتیک ارائه شده است.

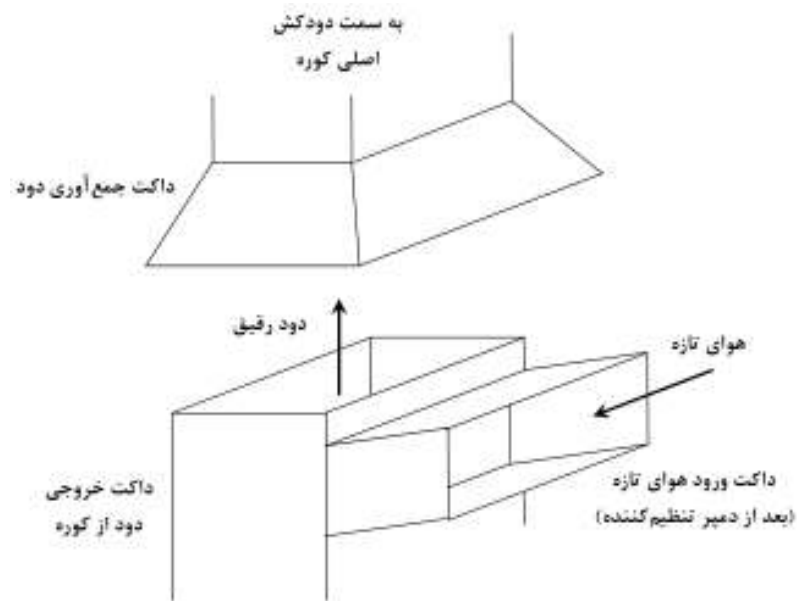


شکل ۲-۵. شماتیک ساختار کوره‌های تونلی موجود در واحد فولادسازی کارخانه فولاد

به منظور تعیین راندمان احتراق این کوره‌ها لازم است آنالیز دود خروجی ۳ ناحیه اول اندازه‌گیری شود (ناحیه چهارم دارای مشعل نمی‌باشد و صرفاً نقش خنک‌کنندگی را دارد). متأسفانه، فشار نواحی مختلف این کوره بوسیله دمپر هوایی کنترل می‌شود. در واقع داکت‌های خروجی این کوره دارای ورودی برای هوا نیز می‌باشند و با جریان پیدا کردن هوای محیط به داکت خروجی و افزایش فشار در این ناحیه، فشار کوره افزایش پیدا می‌نماید و بالعکس. در شکل ۲-۶ نمای شماتیک اگزوزهای نواحی مختلف کوره‌های تونلی واحد فولادسازی، نشان داده شده است.

با توجه به اختلاط هوا و محصولات احتراق (قبل از خروج از اگزوز)، امکان اندازه‌گیری آنالیز محصولات احتراق و در نتیجه محاسبه راندمان احتراق برای این کوره‌ها وجود ندارد. در جدول ۲-۱۰ نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی ورودی‌ها و خروجی‌های کوره‌های تونلی واحد فولادسازی، ارائه شده است. ذکر این نکته لازم است که هوای ورودی به نواحی ۱ و ۳ بصورت مجزا قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، این دو ناحیه یک ورودی مشترک دارند که علاوه بر ورودی نواحی ۱ و ۳، هوای مورد نیاز برای دمپرهای هوای سه ناحیه اول را نیز تامین می‌نماید. دماهای ارائه شده برای خروجی‌های کوره پس از اختلاط با هوای تازه مبطوب به دمپرهای هوایی می‌باشد.

در جدول ۲-۱۱ دبی هوای ورودی به نواحی مختلف کوره و دبی خروجی از اگزوزهای آن و همچنین انرژی ورودی و خروجی از این طریق ارائه شده است. لازم به ذکر است به دلیل عدم وجود کنتور یا فلومتر برای اندازه‌گیری دبی گاز طبیعی مصرفی و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری دبی دود خروجی از اگزوز ناحیه ۲، عملاً امکان بالانس جرم و انرژی برای این کوره‌ها وجود ندارد. در این جدول انرژی‌های ورودی و خروجی براساس دبی هوا یا دود و دمای آن و همچنین آنالیز آن (به منظور تعیین ظرفیت حرارتی)، محاسبه شده است.



شکل ۲-۶. نمای شماتیک اگزوزهای کوره‌های تونلی واحد فولادسازی کارخانه فولاد ممیزی شده

جدول ۲-۱۰. نتایج اندازه گیری آنالیز و سرعت دود خروجی از دودکش‌ها و هوای ورودی به نواحی مختلف کوره تونلی شماره ۲

Zone	Inlet					Outlet				
	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Dimension (cm)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Temp. (°C)	Velocity (m/s)	Dimension (cm)
1	20.40	1	24.2	11.9*	D=36	20.63	0	44.1	2.7	40*96
2	20.19	0	73.1	21.6	D=36	-**	-	-	-	-
3	20.40	1	24.2	*	-	15.63	25	249.9	7.4	30*55
4	20.50	1	41.1	13.1	D=32	20.40	0	47.8	2.5	60*70

\* هوای ورودی نواحی ۱ و ۳ و همچنین هوای مورد نیاز جهت دمپرهای نواحی ۱، ۲ و ۳ توسط یک فن تامین می‌گردد. و منظور از سرعت ذکر شده برای هوای ورودی ناحیه ۱، کل هوای تامین شده توسط این فن می‌باشد.  
\*\* خروجی ناحیه ۲ قابل دسترسی نبوده است.

جدول ۲-۱۱. انرژی‌های ورودی و خروجی مربوط به کوره‌های تونلی واحد فولادسازی کارخانه فولاد

پارامتر	دبی	توان
	Kg/h	KW
هوای ورودی به نواحی ۱ و ۳	4446	5.1
هوای ورودی به ناحیه ۲	6803	100.5
هوای ورودی به ناحیه ۴	3639	21.2
تلفات در دود خارج شده از ناحیه ۱	3546	23.6
تلفات در دود خارج شده از ناحیه ۳	5202	168.7
تلفات در دود خارج شده از ناحیه ۴	3591	27.6
تلفات تشعشی از سطوح	-	102.7

کوره بوژی موجود در واحد فولادسازی کارخانه مورد نظر، دارای تنها یک ناحیه حرارتی می‌باشد. دود خروجی از کوره قبل از رسیدن به داکت خروجی با هوا مخلوط می‌شود و لذا امکان اندازه‌گیری آنالیز دود خروجی و محاسبه راندمان احتراق برای آن وجود ندارد. از طرف دیگر این کوره مکانی برای اندازه‌گیری سرعت دود خروجی را ندارد (گرچه حتی در صورت وجود چنین مکانی، به دلیل اختلاط دود و هوا، عملاً اندازه‌گیری سرعت و آنالیز دود نتیجه‌ای در بر نداشت).



## فصل سوم

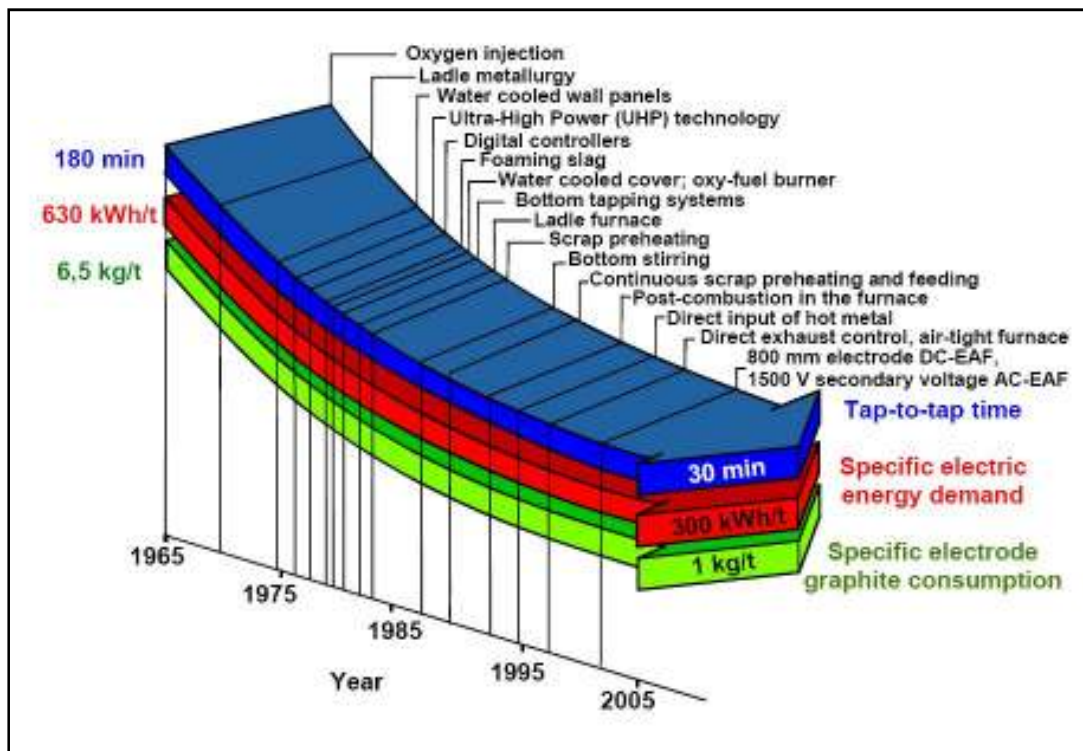
### تحلیل پارامترهای موثر بر مصرف و تولید

#### ۳-۱. کوره‌های قوس الکتریکی

عمده ترین مصرف کننده انرژی الکتریکی در فرآیند تولید فولاد، کوره قوس الکتریکی (EAF)<sup>۱</sup> است. کوره های قوس الکتریکی در ناحیه فولاد سازی و برای ذوب مواد و تولید مذاب به کار می‌روند. در ادامه روند تغییرات به وجود آمده در تکنولوژی کوره‌های قوس در دنیا مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از تثبیت استفاده از کوره های قوس الکتریک به عنوان یک روش صنعتی تولید فولاد، به تدریج راهکارهای جدیدی در جهت بهینه سازی عملکرد این سیستم و کاهش انرژی مصرفی آن ، ارائه گردیده است. شکل ۳-۱ روند تحولات انجام گرفته در این خصوص را به صورت شماتیک نشان می دهد.

---

<sup>1</sup> Electric Arc Furnace



شکل ۳-۱. روند تحولات تکنولوژی و تاثیر آن بر پارامترهای فرآیندی و مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی

اولین طرح اجرا شده در کوره های قوس الکتریک که به منظور افزایش راندمان و کاهش انرژی مصرفی اجرا گردید، دمش گاز اکسیژن<sup>۱</sup> به درون مذاب کوره بود. این طرح با هدف تسریع فرآیندهای متالورژیکی ذوب انجام شد. سپس طرح انتقال واکنشهای متالورژیکی از کوره به پاتیل به مرحله اجرا در آمد. در این طرح که به متالورژی پاتیلی<sup>۲</sup> معروف است، بخشی از عملیات تصفیه و تنظیم ترکیب مذاب درون پاتیل انجام می شود. استفاده از پانلهای آبرگرد<sup>۳</sup> در جداره کوره ها به جای دیواره های نسوز از سال ۱۹۷۵ مرسوم شده است. این طرح علاوه بر کاهش هزینه و زمان تعویض دیواره نسوز با ایجاد قابلیت استفاده از توانهای بالاتر در کوره، موجب افزایش نرخ تولید هم می گردد. استفاده از ترانسفرماتورهای توان بالا<sup>۴</sup>، علاوه بر اینکه ظرفیت تأمین انرژی الکتریکی تا  $700 \frac{kwh}{t}$  را دارا می باشند، با قابلیت کنترل ولتاژ هر الکتروود، امکان کنترل فرآیند ذوب و جلوگیری از تشکیل نقاط گرم را هم در کوره فراهم می سازند.

از دیگر پیشرفتهای انجام گرفته در این زمینه استفاده از کنترلرهای کامپیوتری<sup>۵</sup> به منظور کنترل قوس است.

<sup>۱</sup> Ladle Furnace

<sup>۲</sup> Ladle Metallurgy

<sup>۳</sup> Water Cooled Wall Panel

<sup>۴</sup> Ultra High Power (UHP) Technology

<sup>۵</sup> Digital Controller

این نرم افزارها با قابلیت پیش بینی شرایط ذوب، برای تنظیم پارامترهایی نظیر نرخ شارژ کوره، میزان سر باره سازها، تپ ولتاژ، طول قوس و... برنامه ارائه می کنند. استفاده از این نرم افزارها، عملکرد کوره را به شرایط بهینه نزدیک می کند.

از مهمترین تحولاتی که در زمینه بهبود فرآیند ذوب در کوره های قوس الکتریکی تا به حال اجرا شده، ایجاد سرباره پفکی<sup>۱</sup> در طول فرآیند ذوب است. اجرای این طرح علاوه بر کاهش انرژی مصرفی مذاب در موارد دیگری نظیر کاهش صدای قوس، افزایش راندمان انتقال حرارت، تسهیل واکنشهای مذاب و سر باره، کاهش خوردگی نسوز و ... هم بسیار موثر است.

یکی دیگر از ابداعات صورت گرفته در زمینه جایگزینی انرژی الکتریکی با انرژی شیمیایی استفاده از مشعلهای اکسیژن سوز<sup>۲</sup> است. این تکنولوژی با بکارگیری اکسیژن خالص به عنوان هوای مورد نیاز برای احتراق گاز طبیعی، سهم عمده ای در تامین انرژی مورد نیاز ذوب ایفا می کند. طراحی این مشعلها به گونه ای صورت می گیرد که از تشکیل نقاط مرده (سرد) در کوره جلوگیری به عمل آورد.

تخلیه از کف<sup>۳</sup>، یکی دیگر از مواردی است که از سال ۱۹۸۰ مورد توجه قرار گرفت. در این طرح به جای روش سنتی تخلیه از دیواره جانبی کوره، تخلیه مذاب از کف انجام می شود. اجرای این طرح زمان تخلیه را به طور چشمگیری کاهش می دهد و امکان جدا سازی مذاب و سرباره را با راندمان بالا فراهم می سازد.

با ابداع کوره های پاتیلی<sup>۴</sup>، فرآیند متالورژی داخل پاتیل وارد مرحله تازه ای گردید. این روش با قابلیت نگهداری مذاب در زمانهای طولانی، به طور موثری از زمان تصفیه مذاب در درون کوره کاست. به نحوی که در بسیاری از واحدهای فولادسازی با تنظیم فسفر و کربن مذاب، تخلیه و سایر موارد مربوط به تصفیه و آلیاژسازی در کوره های پاتیلی انجام می گردد. این روش امکان تخلیه مذاب در دماهای پایین تر را هم فراهم می سازد.

طرح دیگری که به منظور کاهش انرژی الکتریکی مصرفی کوره به مرحله اجرا درآمده است، استفاده از پیشگرم قراضه<sup>۵</sup> است. این طرح بواسطه ملاحظات زیست محیطی و مشکلات اجرایی هنوز به طور کامل صنعتی نشده است.

در نیمه دوم دهه ۸۰ میلادی طرح همزدن مذاب از کف<sup>۶</sup> توسط تزریق گاز آرگون در کوره های قوس اجرا گردید. این طرح با افزایش راندمان انتقال حرارت و همگن سازی ترکیب مذاب زمان مورد نیاز فرآوری ذوب را کاهش می دهد. تکنولوژی دیگر مطرح شده در زمینه کاهش انرژی، پیشگرم و تغذیه مداوم قراضه<sup>۷</sup> در کوره قوس است. این طرح با کاهش موثر زمان شارژ و اتلاف حرارت موجب کاهش مصرف انرژی آن می گردد.

<sup>۱</sup> Foamy Slag

<sup>۲</sup> Oxy Fuel Burner

<sup>۳</sup> Bottom Tapping

<sup>۴</sup> Ladle Furnace

<sup>۵</sup> Scrap Preheating

<sup>۶</sup> Bottom Stirring

<sup>۷</sup> Continuous Scrap Preheating and Feeding

احتراق تکمیلی<sup>۱</sup> درون کوره یکی از طرحهایی است که در اوایل دهه ۹۰ میلادی در کوره های قوس الکتریکی به کار گرفته شد. این طرح بر مبنای استفاده از انرژی شیمیایی دود و احتراق CO موجود در آن شکل گرفته است و اجرای آن امکان کاهش تا ۸۰ kWh از انرژی مصرفی کوره را به ازای هر تن مذاب فراهم می کند. در اواخر دهه ۹۰ میلادی کنترل مستقیم خروج دود<sup>۲</sup> و تنظیم فشار داخلی کوره برای کاهش نفوذ هوای اضافه به درون کوره به عنوان یک راه حل موثر در کاهش تلفات انرژی ناشی از دود به مرحله اجرا در آمده است. استفاده از کوره های DC با قطر الکتروود ۸۰۰ میلیمتر جزء آخرین پیشرفتهای تکنولوژیک کوره های قوس الکتریکی است. این طرح با افزایش راندمان کوره و کاهش آلودگی صوتی و فلیکر در سیستم الکتریکی روز به روز مورد استقبال بیشتر قرار گرفته و تعداد آن در حال افزایش است. آخرین تکنولوژی به کار گرفته شده در کوره های قوس استفاده از ترانسهای توان بالا با قابلیت ایجاد ولتاژ ثانویه ای برابر با ۱۵۰۰ ولت است. این تکنولوژی امکان افزایش طول قوس و انتقال انرژی الکتریکی بیشتری را در زمان کوتاهتر فراهم می سازد.

در طی سالهای اخیر اصلاحات مهمی در کوره های قوس انجام گرفته است. آمار نشان می دهد که در کوره های قوس مدرن، زمان ذوب کامل در شرایط مطلوب تولید به ۳۰ دقیقه رسیده است. همچنین شدت مصرف انرژی الکتریکی کمتر از  $300 \frac{kwh}{t}$  و مصرف الکتروود بین  $0.9 \frac{kg}{t}$  تا  $1.3 \frac{kg}{t}$  گزارش شده است.

### ➤ معرفی اجمالی تجهیزات یک کوره قوس الکتریکی

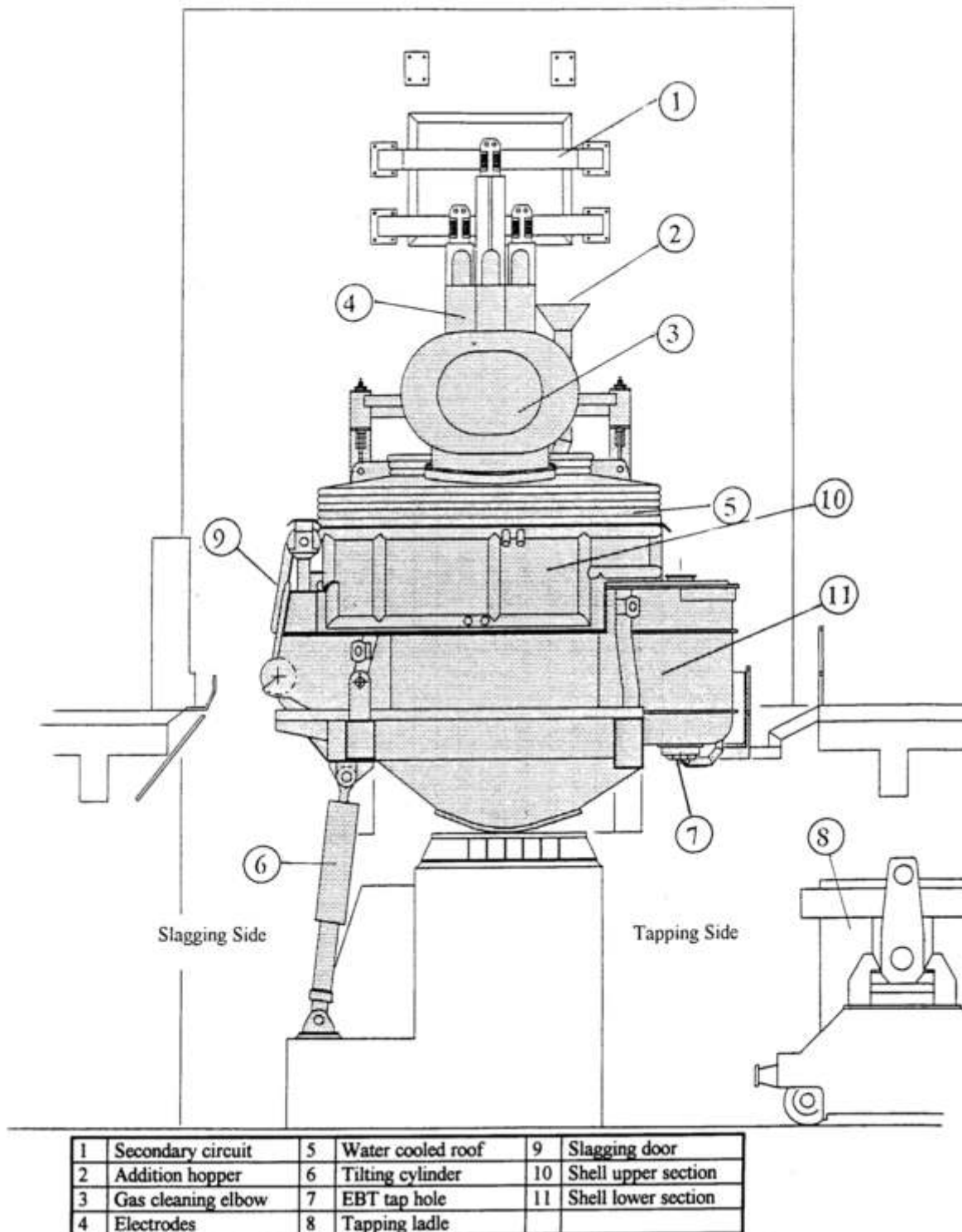
یک کوره قوس الکتریکی از اجزای متعدد مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده است. برای یک کوره مدرن توان بالا، به اختصار می توان قسمتهای مکانیکی زیر را بر شمرد:

- لایه های نسوز و دیرگداز جداره داخلی کوره
- سیستم پانلهای آبگرد پوسته و سقف کوره
- سیستم نگهدارنده و تنظیم کننده الکتروود
- سیستم چرخش کوره به منظور تخلیه مذاب و سرباره
- سیستم جابجا کننده سقف کوره به منظور شارژ مواد

در شکل ۲-۳ نمای شماتیک تجهیزات مکانیکی یک کوره قوس الکتریکی نشان داده شده است.

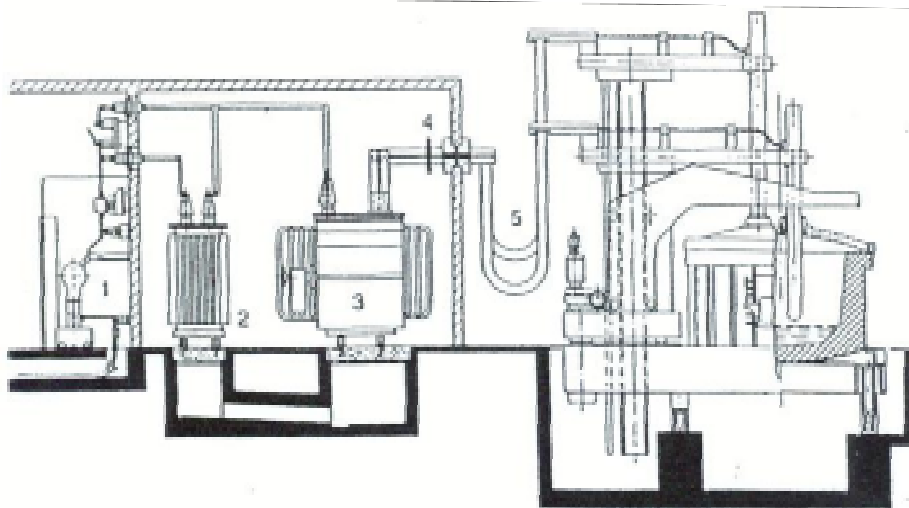
<sup>1</sup> Post Combustion in the Furnace

<sup>2</sup> Direct Exhaust Control, Air Tight Furnace



شکل ۲-۳. قسمت‌های مختلف مکانیکی کوره قوس الکتریکی

علاوه بر تجهیزات مکانیکی، قسمت عمده تجهیزات این کوره ها الکتریکی است. در کارخانجات فولاد سازی، برای تغذیه کوره های قوس معمولاً از یک ترانسفورماتور ۳ فاز استفاده می کنند. این ترانسها که به نام ترانس کوره شناخته می شوند بین خط تغذیه ولتاژ بالا و کوره قرار می گیرند و ولتاژ بالای ورودی را به ولتاژ پایین تبدیل می کنند که این کار باعث می شود ثانویه ترانس توانایی فراهم کردن جریان بسیار بالایی را که برای ذوب مواد لازم است، داشته باشد. یک کوره قوس مدرن در اندازه متوسط، یک ترانس با ظرفیت  $60 \text{ MVA}$  با ولتاژ ثانویه در حدود  $800$  ولت دارد که ثانویه ترانس می تواند جریانی معادل  $44$  کیلو آمپر را تأمین کند. در شکل ۳-۳ تجهیزات الکتریکی برای یک کوره قوس الکتریک نشان داده شده است.



1	high-voltage cell with high-voltage circuit breaker, primary-side current transformers and short-circuiting switch	4	secondary-side current transformer
2	reactor or inductance coil	5	flexible high-current cables
3	furnace transformer		

شکل ۳-۳. قسمت‌های مختلف الکتریکی کوره قوس الکتریکی

در کنار ترانسهای ذکر شده ممکن است یک سری تجهیزات جانبی نیز بکار رود. یکی از این تجهیزات کلید قطع و وصل جریان است که بین خط تغذیه و ترانس نصب می گردد و قابلیت قطع و وصل جریان در حالت تحت بار را نیز دارد. این کلیدها باید مناسب شرایط ویژه کوره باشند یعنی بتوانند تا  $60$  بار یا بیشتر در طول روز قطع و وصل شوند. کلیدهای کوره های قوس در انواع مختلفی بکار می روند مانند کلیدهای روغنی یا هوای فشرده. از دیگر تجهیزاتی که در کنار ترانسهای کوره بکار برده می شود راکتورها هستند. راکتورها به منظور محدود کردن تغییرات جریان و ولتاژی که در طول ذوب ایجاد می گردد، بکار می روند. ترانسفورماتورهای قدیمی قابلیت تنظیم بین  $6$  تا  $12$  تپ را دارند. این تپ چنجرها فقط در شرایط بدون بار الکتریکی (یعنی مدار قطع) باید بکار برده شوند. در

ترانسهای مدرن تپ چنجرهایی با تعداد تپ بیشتر و قابلیت عمل کردن در زیر بار بکار می‌روند.

### ۳-۱-۱. روش‌های ممیزی انرژی کوره‌های قوس الکتریکی

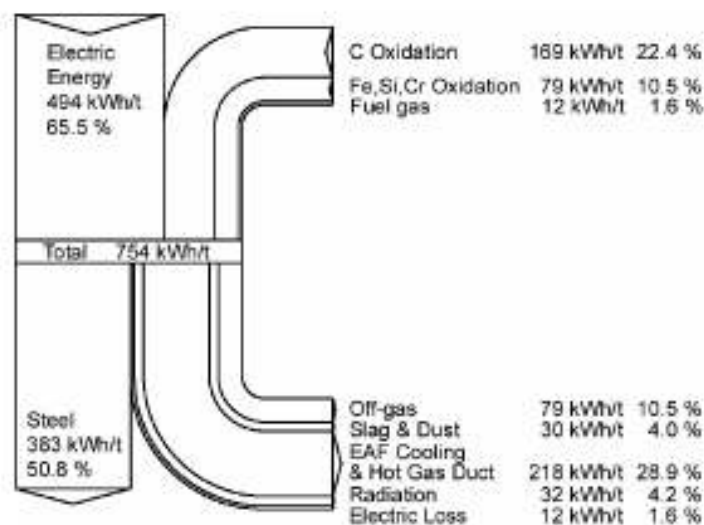
برای ممیزی انرژی کوره های قوس الکتریکی از دو روش "بالانس جرم و انرژی مستقیم" و "بالانس انرژی به وسیله مدل‌های تجربی" استفاده می‌گردد. هر یک از این روشها، مزیتها و محدودیتهایی دارند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

#### ➤ بالانس جرم و انرژی به روش مستقیم

بطور کلی انجام بالانس انرژی در کوره های قوس الکتریکی بر اساس قانون اول ترمودینامیک و بصورت رابطه کلی زیر انجام می‌پذیرد.

$$\sum E_{in} = \sum E_{out}$$

در این روش انرژی های ورودی و خروجی از کوره را اندازه گیری می‌کنند که کل انرژی های ورودی به کوره باید با کل انرژی های خروجی برابر باشد. سپس سهم هر کدام از انرژی ها را مشخص و درصد تلفات مختلف را محاسبه می‌کنند. باید متذکر شد که این روش برای سیستمهایی مناسب است که بطور پیوسته کار می‌کنند. همچنین در این روش تمام انرژی های خروجی از کوره شامل: تلفات دود، تلفات سیستم خنک کننده، تلفات تشعشع، تلفات درب سرباره و درب کوره و .... همگی باید اندازه گیری شوند. در شکل ۳-۴ نمونه ای از دیاگرام سانکی بالانس انرژی به روش مستقیم برای یک کوره ۷۵ تنی نشان داده شده است.



شکل ۳-۴. دیاگرام سانکی بالانس جرم و انرژی به روش مستقیم برای یک کوره ۷۵ تنی

بالانس جرم و انرژی به روش مستقیم دارای مزایا و معایبی است. از مزایای این روش اینست که تلفات کوره برای هر ذوب بطور دقیق و همچنین در طول یک ذوب اثر بخشی پارامترهای مختلف بر مصرف انرژی الکتریکی محاسبه می شود. از طرف دیگر معایب این روش شامل: محدودیت اندازه گیری پارامترهای اساسی (مانند فلو و دمای دود) و صحت نتایج بدست آمده برای ذوب مورد ممیزی می باشد.

### ➤ بالانس انرژی به وسیله مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی که برای محاسبه شدت مصرف انرژی الکتریکی در کوره های قوس بکار می روند بر اساس تحلیل آماری اطلاعات فرآیند ذوب بدست می آیند. تأثیر فرآیندهای مختلف و تکنولوژیهای گوناگون بر روی شدت مصرف انرژی الکتریکی با ضرایب رگرسیون مدل‌هایی از جمله مدل های "کوهل"<sup>۱</sup> و "آدامز"<sup>۲</sup> بررسی می شود. به منظور اطمینان از ضرائب این رگرسیون، تحلیل ترمودینامیکی انرژی منتقل شده از منابع مختلف به مواد اولیه و ذوب مواد هم بکار گرفته شده است. بوسیله بالانس کامل انرژی در فرآیند کوره های قوس مقدار ضرایب رگرسیون از ارتباط انرژی الکتریکی ورودی با پارامترهای مختلف فرآیند نظیر آهن اسفنجی و قراضه شارژ شده، کک، مواد پیشگرم شده، سرباره سازها، تزریق اکسیژن و زمان و دمای تخلیه بدست می آید. اهداف کلی بکار گیری این روش بهبود پذیری در کوره های قوس الکتریکی شامل موارد زیر است:

مینیمم کردن شدت مصرف انرژی

کاهش مصرف الکتروود

افزایش تولید

علاوه بر موارد ذکر شده با استفاده از این روش بررسی اثر بخشی پارامترهای مختلف کوره بر مصرف انرژی (در طی یک بازه طولانی یعنی شامل چندین ذوب) میسر می شود.

برای مدل‌های محاسبه انرژی الکتریکی مصرفی در کوره های قوس لازم است، از پیچیدگیهای روابط بین مصرف انرژی الکتریکی و پارامترهای فرآیند کاسته شود. به همین منظور مدل‌های تجربی مبتنی بر رگرسیون خطی است که از تعداد زیادی داده بدست می آید. این مدلها تغییرات میزان مصرف انرژی را در شرایطی که پارامترهای مختلف فرآیند تغییر می کنند، نشان می دهند. نظیر همین مدلها برای محاسبه میزان مصرف الکتروود و ... هم وجود دارد.

در سال ۱۹۹۲ اولین مدل تجربی توسط کوهل که با یک سری اطلاعات جامع شامل کوره های مختلف و با پیشگرم قراضه و نیز بدون پیشگرم قراضه بطور موفقیت آمیزی بسط داده شده بود، مورد بررسی قرار گرفت و به تأیید هم رسید. سپس در سال ۱۹۹۹ این مدل با یک آیتم برای احتراق تکمیلی از گازهای خروجی  $\text{CO}$  و  $\text{H}_2$

<sup>1</sup> Kohle

<sup>2</sup> Adams



تکمیل گردید. ورودی چدن مذاب، آهن اسفنجی و بریکت نیز به آن اضافه گردید. همچنین تأثیر کارکرد کوره به صورت پیوسته یا ناپیوسته نیز در نظر گرفته شد و مدل جامع تری بدست آمد.

در سال ۲۰۰۱، کوهل مدل دیگری با استفاده از یک کوره ۱۴۵ تن بدون مشعل گازی (gas burner) بدست آورد که بر اساس یک سری اطلاعات فرآیندی برای ذوب های کنترل شده از کوره مذکور انجام گرفت. در این کوره قراضه و آلیاژهای نیکل و کرم برای تولید فولاد های زنگ نزن (stainless steel) شارژ می شد.

در سال ۲۰۰۲ جدیدترین ویرایش مدل کوهل ارائه شد. این مدل بر اساس مجموعه وسیعی از اطلاعات شامل مقادیر متوسطی از ۶۰ کوره و ۵۵۰۰ ذوب از ۵ کوره و مقادیر متوسط ماهانه یک کوره تنظیم شد. در این مدل علاوه بر پارامترهای قبلی، میزان ورودی قراضه خرد شده و تلفات انرژی بوسیله سیستم خنک کن کوره در نظر گرفته شد. در جدول ۱-۳ مدلهای تجربی کوهل در سالهای مختلف نشان داده شده است. مدل تجربی که برای کارخانه فولاد مورد نظر بکار گرفته شده، مدل کوهل می باشد که در ادامه به توضیح آن پرداخته می شود.

جدول ۳-۱. پیشرفت مدل کوهل برای تعیین انرژی الکتریکی مصرفی در کوره های قوس

$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 300 + 900 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1600 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.85 \cdot \frac{t_s + t_N}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$	(1)
1992	
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 300 + 900 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1600 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.85 \cdot \frac{t_s + t_N}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$ $- 2.8 \cdot \frac{M_N}{\text{m}^3/\text{t}} + 80 \cdot \frac{G_{\text{DRI/HBI}}}{G_A} - 300 \cdot \frac{G_{\text{HM}}}{G_A} - 15 \cdot \text{CON}$	(2)
1999	
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 391 + 450 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 800 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.35 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.43 \cdot \frac{t_s + t_N}{\text{min}} - 2.1 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$	(3)
2001	
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 375 + 400 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1000 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.3 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 1.00 \cdot \frac{t_s + t_N}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$ $- 2.8 \cdot \frac{M_N}{\text{m}^3/\text{t}} + 80 \cdot \frac{G_{\text{DRI/HBI}}}{G_A} - 350 \cdot \frac{G_{\text{HM}}}{G_A} - 50 \cdot \frac{G_{\text{Shr}}}{G_A} + \text{NV} \cdot \frac{W_V - W_{V_m}}{\text{kWh/t}}$	(4)
2002	

CON	continuous (+1), discontinuous (-1) operation	M <sub>N</sub>	Specific post-combustion oxygen [m <sup>3</sup> /t]
G <sub>A</sub>	Furnace tap weight [t]	NV	Furnace specific factor (0.2 to 0.4)
G <sub>DRI</sub>	Weight of DRI (Direct Reduced Iron) [t]	T <sub>A</sub>	Tapping temperature [°C]
G <sub>E</sub>	Weight of all ferrous materials [t]	t <sub>N</sub>	Power-off time [min]
G <sub>HBI</sub>	Weight of HBI (Hot Briquetted Iron) [t]	t <sub>S</sub>	Power-on time [min]
G <sub>HM</sub>	Weight of hot metal [t]	W <sub>R</sub>	Specific electric energy demand (from regression analysis) [kWh/t]
G <sub>Shr</sub>	Weight of shredder [t]	W <sub>V</sub>	Energy losses (if measured) [kWh/t]
G <sub>Z</sub>	Weight of slag formers [t]	W <sub>Vm</sub>	Mean value of W <sub>V</sub> [kWh/t]
M <sub>L</sub>	Specific lance oxygen [m <sup>3</sup> /t]		
M <sub>G</sub>	Specific burner gas [m <sup>3</sup> /t]		

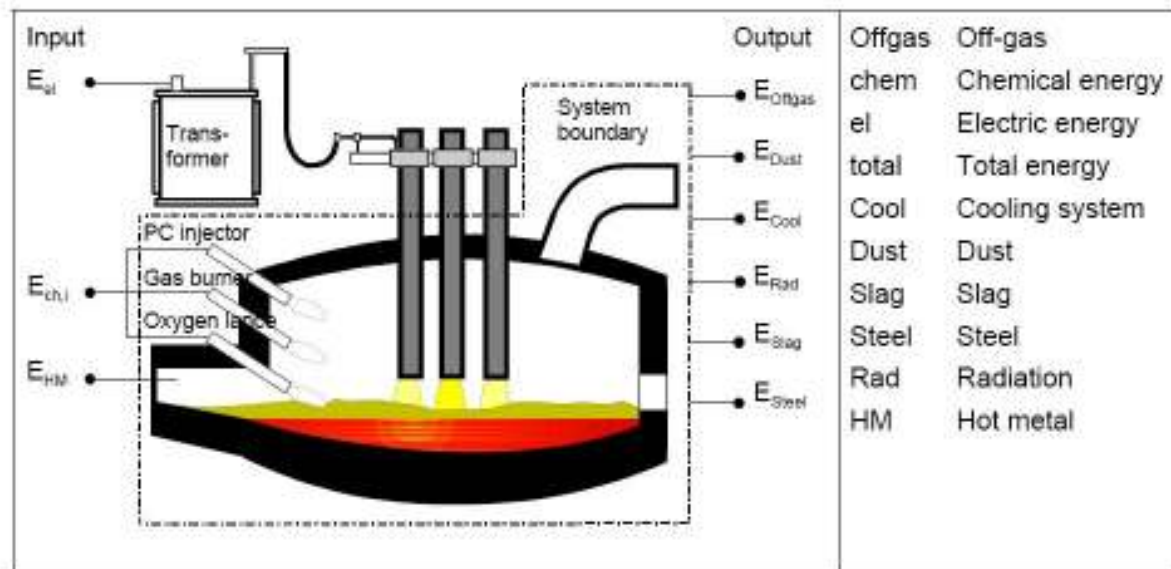
### ۳-۱-۲. معرفی مدل تجربی کوهل برای برآورد تاثیر پارامترهای مختلف بر مصرف انرژی

بالانس انرژی فرآیند ذوب در کوره های قوس بر اساس قانون اول ترمودینامیک (مصرف انرژی) نوشته می شود. با این فرض که مقدار انرژی متوسط کوره ثابت می ماند، بالانس انرژی ورودی و خروجی از کوره با رابطه زیر بیان می شود.

$$\varepsilon_{total} = \eta_{el} \cdot \varepsilon_{el} + \sum \varepsilon_{chem,i} + \varepsilon_{HM} = \varepsilon_{steel} + \varepsilon_{slag} + \varepsilon_{Dust} + \varepsilon_{off\ gas} + \varepsilon_{Rad} + \varepsilon_{cool}$$

اندازه گیری انرژی الکتریکی یک ذوب معمولاً قبل از ترانسفورماتور انجام می شود. تلفات انرژی در سیستم جریان بالا (شامل ترانسفورمر، خطوط تغذیه، نگهدارنده های الکتروودها و الکتروودها) توسط یک ضریب راندمان برای

انتقال انرژی الکتریکی از منبع توان به قوس الکتریکی در نظر گرفته می شود ( $\eta_{el} \cdot \mathcal{E}_{el}$ ). اگر محدوده سیستم برای بالانس انرژی مانند شکل ۳-۵ انتخاب شود انرژی لازم برای فن های سیستم غبارگیر، انرژی مصرفی در کوره پاتیلی، انرژی پیشگرم قراضه و انرژی احتراق تکمیلی و رفتار گازهای خروجی در سیستم غبارگیر در نظر گرفته نمی شود.



شکل ۳-۵. محدوده سیستم برای بالانس انرژی در فرآیند کوره قوس

با استفاده از محدوده تعیین شده برای سیستم که در شکل ۳-۵ نشان داده شده، برای محاسبه انرژی منتقل شده جهت ذوب قراضه در کوره همه مسیرهای جریان جرم و انرژی در نظر گرفته می شود. اگر آنتالپی دود را قبل و بعد از احتراق تکمیلی و سیستم خنک کن گازهای خروجی در نظر گرفته شود، مرزهای سیستم به تجهیزات خنک کن دود در سیستم غبارگیر اولیه گسترش پیدا می کند. مدل کوهل از پارامترهای متعددی تشکیل شده است که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می شود:

### ➤ حداقل مصرف انرژی الکتریکی ویژه

با استفاده از حدود سیستم مشخص شده در شکل ۳-۵ میزان انرژی الکتریکی به آسانی بوسیله فرمول زیر تعیین می شود.

$$\mathcal{E}_{el} = \frac{\mathcal{E}_{steel}}{\eta_{el}} - \frac{\sum chim,i + \mathcal{E}_{HM}}{\eta_{el}} + \frac{\mathcal{E}_{slag} + \mathcal{E}_{dust} + \mathcal{E}_{off\ gas} + \mathcal{E}_{red} + \mathcal{E}_{cool}}{\eta_{el}}$$

میزان انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن تلفات انرژی سرباره، دود و سیستم خنک کن افزایش می یابد و با ورود انرژی شیمیایی و چدن مذاب کاهش می یابد. از رابطه فوق حداقل انرژی الکتریکی برای ذوب قراضه تعیین می شود،

که همان اعداد ثابتی هستند که در مدل‌های رگرسیون ۱ تا ۴ نشان داده شده است. آنتالپی ذوب فولاد ساده کربنی برای تغییر دما از ۲۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد برابر  $\frac{kwh}{t}$  ۳۶۱ است. دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد بعنوان دمای مبنا در مدل‌های رگرسیون ۱ تا ۴ استفاده می‌شود. این عدد برای ذوب فولاد های زنگ نزن پرالیاژ برابر  $\frac{kwh}{t}$  ۳۷۲ می‌باشد. حداقل مقدار انرژی الکتریکی برای ذوب هر تن قراضه و رساندن دمای مذاب به  $1600^{\circ}C$  بدون منابع انرژی دیگر برابر است با:

$$\frac{\varepsilon_{steel}}{m_{steel} \cdot \eta_{el}} = \frac{\Delta h_{steel}}{\eta_{el}} = 380 \text{ to } 413 \frac{kwh}{t}$$

در این رابطه، ضریب راندمان ( $\eta_{el}$ ) سیستم الکتریکی بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ می‌باشد. با تقسیم حداقل انرژی

$$\frac{\Delta h_{steel}}{\eta_{el}} = 391 \frac{kwh}{t} \text{ و } \frac{\Delta h_{steel}}{\eta_{el}} = 380 \frac{kwh}{t} \text{ برای ذوب فولادهای کم آلیاژ و}$$

برای ذوب فولادهای آلیاژی بدست می‌آید. در کوره‌های قدیمی ضرائب راندمان الکتریکی پایین‌تر و عدد ثابت به

$$\frac{kwh}{t} 413 \text{ افزایش می‌یابد. مقادیر ثابت مدل‌های کوهل به حداقل مقدار انرژی الکتریکی در دمای مبنای } 1600$$

درجه سانتیگراد مربوط می‌شود که در ضرائب ثابت رگرسیون از ۳۰۰ تا  $\frac{kwh}{t}$  ۳۷۵ تغییر می‌کند.

### ➤ مواد فلزی ورودی

امروزه ذوب قراضه یکی از روشهای مرسوم تولید فولاد است. با توجه به اینکه از کیفیت قراضه در حین ذوب کاسته نمی‌شود استفاده از قراضه به عنوان یک ماده ایده آل بازیافتی روز به روز بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن این مسئله که قراضه شامل مواد غیر فلزی، اکسیدها، چربی، آب و آلودگی‌های دیگر است.

ضریب مواد آهنی ورودی، به صورت مقدار انرژی الکتریکی ویژه ای لحاظ می‌شود که برای تبخیر، اکسیداسیون

و تفکیک آلودگیها از مذاب فلزی نیاز است و به صورت  $(\frac{G_E}{G_A} - 1)$  محاسبه می‌شود.

بازده مواد آهنی معمولاً از ۸۶٪ تا ۹۲٪ متغیر است. انرژی اضافی که برای گرم کردن تلفات مذاب تا دمای

مبنای  $1600^{\circ}C$  نیاز است، با بالانس جرم و انرژی اجزای تبخیر شده و اکسید شده و با فرض اینکه متوسط مذاب باقی مانده در کوره ثابت باشد، تخمین زده می‌شود.

آنتالپی ناخالصیهای اکسیدی فلزی و غیر فلزی در دمای  $1600^{\circ}C$  از آنتالپی سرباره و ترکیب آن تعیین می

شود. Cao و Mgo که از سرباره سازها یا نسوز کوره وارد سیستم می‌شود برای این مورد در نظر گرفته نشده است.

جرم ویژه غبار از ۱۰ تا ۲۵ کیلوگرم بر تن تغییر می‌کند. آنالیز شیمیایی غبار کوره نشان می‌دهد که ۸۰ تا ۹۰

درصد از گانگ غیر فلزی از مواد اولیه ورودی تشکیل شده است. آنتالپی غبار برای متوسط دما بین  $900^{\circ}C$  تا

$1200^{\circ}C$  محاسبه می‌شود. از جرم ویژه آب، روغن و چربی در مواد فلزی ورودی به دلیل فقدان اطلاعات دقیق

صرفنظر می شود  $m_{H_2O} = m_{oil} = 0$ . بنابراین مصرف انرژی ویژه تلفات بازده مواد فلزی در دمای دود به صورت زیر تخمین زده می شود.

$$\Delta h_E = 480 \text{ to } 600 \frac{kwh}{t}$$

بطور متناظر میزان انرژی الکتریکی ویژه برای تلفات مواد فلزی با ضرائب راندمانی  $\eta_{el}$ ،  $\eta_{arc}$  در نظر گرفته می شود.

$$e_{el,E} = \frac{\Delta h_E}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = 600 \text{ to } 1000 \frac{kwh}{t}$$

مقدار انرژی الکتریکی ویژه برای تلفات مواد فلزی بوسیله رگرسیون مدل کوهل به صورت زیر بدست می آید.

$$\frac{\Delta w_{R,E}}{kwh/t} = 400 \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right]$$

ملاحظه می شود ضریب مواد فلزی از ۴۰۰ تا ۹۰۰ در مدل‌های (۱) و (۴) تنظیم شده است. در مدل (۳) نیز ضریب تنظیم شده برابر ۴۵۰ می باشد، که برای ساخت فولاد زنگ نزن با کوره های خاص بکار می رود. به هر حال تعیین دقیق انرژی الکتریکی ویژه تلفات مواد غیر فلزی به دلایلی از جمله تغییر جرم، ترکیب ناخالصی ها، تغییر دما و میزان تلفات ناشی از اکسیدها و مواد فرار در گاز، سرباره و غبار مشکل است.

### ➤ سرباره سازها

به طور معمول از سرباره سازها به مقدار ۲۵ تا ۵۰ کیلوگرم به ازای هر تن مذاب استفاده می شود. سرباره سازها معمولاً آهک یا مخلوط آهک و دولومیت هستند که مقدار CaO به MgO باید به نسبت ۴ به ۱ تا ۵ به ۱ باشد. به منظور افزایش CO<sub>2</sub> و CO و بهم زدن مذاب، سنگ آهک (CaCO<sub>3</sub>) هم به عنوان سرباره ساز در کوره شارژ می شود. در این حالت واکنش تکلیس سنگ آهک به انرژی معادل  $500 \frac{kwh}{t_{cao}}$  یا  $890 \frac{kwh}{t_{cao3}}$  نیاز دارد.

آنتالپی ویژه CaO خالص یا MgO خالص در دمای ۱۶۰۰°C برابر  $416 \frac{kwh}{t_{cao}}$  و

$$\Delta h_{Mgo} = 550 \frac{kwh}{t_{Mgo}} \text{ می باشد. به همین ترتیب } \Delta h_{caco3} = 733 \frac{kwh}{t_{cao}} \text{ است.}$$

انرژی لازم برای گرم کردن سرباره سازها با نسبت ۵ به ۱ (CaO به MgO) تا دمای ۱۶۰۰°C معادل

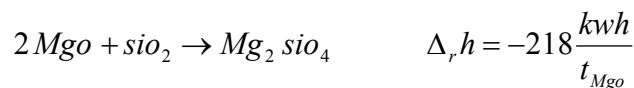
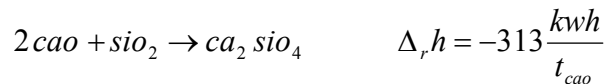
$$\Delta h = 438 \frac{kwh}{t}$$

الکتریکی ویژه به صورت زیر در خواهد آمد:

$$e_{el,slagformers} = \frac{h_{cao/Mgo}(T)}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = 548 \text{ to } 730 \frac{kwh}{t_{cao/Mgo}}$$

SiO<sub>2</sub> که از واکنشهای اکسیداسیون مذاب یا نسوز کوره وارد سیستم می شود، تشکیل سیلیکات منیزیم و کلسیم می دهد.

آنتالپی واکنش گرمای تشکیل سیلیکات در بالانس کامل انرژی فقط در موارد خاصی در نظر گرفته می شود.



آنتالپی واکنش تشکیل سیلیکات که در آن نسبت Cao به MgO برابر ۵ به ۱ باشد برابر است با

$$\Delta_r h_{cao/Mgo} = -297 \frac{kwh}{t_{cao/Mgo}}, \text{ راندمان حرارتی برای انرژی منتقل شده از واکنش گرمای تشکیل سیلیکات در فاز}$$

سرباره به فولاد مذاب برابر  $\eta_r = 50\%$  تخمین زده می شود. در شرایطی که آنتالپی واکنش سیلیکات در نظر گرفته شود، میزان انرژی الکتریکی ویژه برای ذوب سرباره سازها با رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$e_{el,Z} = \frac{\Delta h_{cao/Mgo}(T) - \eta_r \cdot \Delta_r h_{cao/Mgo}(T)}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = 373 \text{ to } 498 \frac{kwh}{t_{cao/Mgo}}$$

میزان انرژی الکتریکی ویژه ای که برای سرباره سازها تعیین می شود در مدل های رگرسیون به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$\Delta W_R = 1000 \cdot \frac{G_z}{G_A} \left( \frac{kwh}{t} \right)$$

ضریب سرباره سازها برای مصرف ویژه انرژی الکتریکی از ۱۶۰۰ تا ۱۰۰۰ (برای مدل های ۱ و ۲ و ۴) کاهش می یابد و در مدل (۳) نیز به ۸۰۰ کاهش می یابد، همه ضرائب رگرسیون به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار تخمین زده شده ۵۴۸ تا  $730 \frac{kwh}{t}$  می باشد.

به هر حال با در نظر گرفتن استفاده از مخلوطی با ۷۰ درصد سنگ آهک، ۲۰ درصد آهک و ۱۰ درصد

دولومیت، مقدار انرژی لازم برای گرم کردن سرباره سازها تا دمای ۱۶۰۰ °C برابر  $651 \frac{kwh}{t}$  می باشد و در

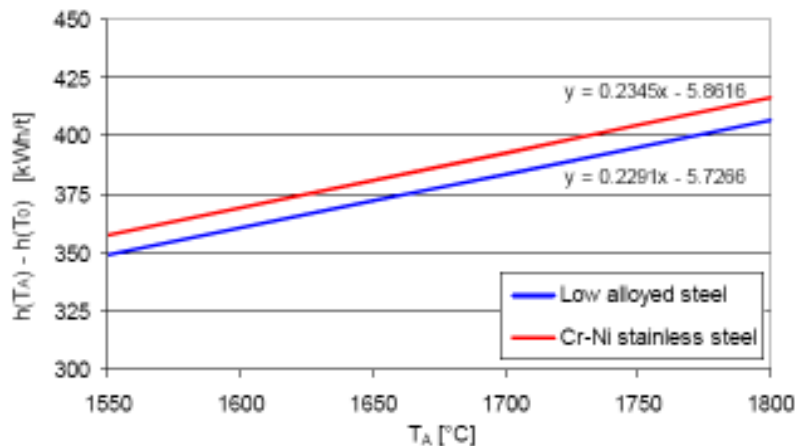
صورتیکه آنتالپی تشکیل سیلیکات در نظر گرفته شود، برابر  $502 \frac{kwh}{t}$  است و حدود تخمین زده شده برای افزایش

مقدار انرژی الکتریکی بین  $628 \frac{kwh}{t}$  تا  $837 \frac{kwh}{t}$  خواهد بود. این مقدار برای مخلوط سنگ آهک، آهک و

دولومیت با مدل (۳) که ضریبی برابر  $800 \frac{kwh}{t}$  دارد، بطور قابل قبولی همخوانی دارد.

### ➤ دمای تخلیه مذاب

به طور معمول دمای تخلیه فولاد مذاب بین  $1550^{\circ}\text{C}$  و  $1750^{\circ}\text{C}$  متغیر است که با توجه به خواص و شرایط تولید در واحد فولاد سازی تغییر می کند. شکل ۳-۶ آنتالپی ویژه یک مذاب فولاد غیر آلیاژی و یک مذاب فولاد پر آلیاژ کرم - نیکل را برحسب دمای تخلیه، نشان می دهد.



شکل ۳-۶. آنتالپی ویژه یک مذاب کم آلیاژ و یک مذاب فولاد پر آلیاژ کرم-نیکل نسبت به تغییر دما

بطور تقریبی تغییرات خطی آنتالپی ها برای ۲ نوع گرید فولاد ذکر شده شیب ثابت  $\frac{\Delta h(T_A)}{\Delta T_A} = 0.23 \frac{kwh}{kt}$  را

نشان می دهد. تغییر در مقدار انرژی الکتریکی با گرم کردن مذاب تا بالای  $1600^{\circ}\text{C}$  برابر است با:

$$e_{el,TA} = \frac{1}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} \cdot \frac{\Delta h(T_A)}{\Delta T_A} = 0.29 \text{ to } 0.38 \frac{kwh}{kt}$$

رابطه بین انرژی الکتریکی با دمای تخلیه مذاب توسط Jonse با ضریب  $\Delta e_{el,TA} = 0.24 \frac{kwh}{kt}$  و توسط

Memoli با ضریب  $\Delta e_{el,TA} = 0.4 \frac{kwh}{kt}$  تعیین می شود. ضرائب رگرسیون در مدل های کوهل بصورت زیر

می باشد:

$$\Delta w_{R,TA} = 0.3 [T_A - 1600] \left( \frac{kwh}{t} \right)$$

مقادیر رگرسیون شده برای تأثیر دمای تخلیه مذاب از  $0.3$  تا  $0.7$  تنظیم شده است که به خوبی با محدوده

تخمین زده شده مطابقت دارد.

### ➤ کل زمان ذوب<sup>۱</sup>

زمان ذوب روی انرژی الکتریکی تأثیر مستقیم می گذارد. این تأثیر از طریق تمام پارامترهای انرژی بر که وابسته به زمان کاری کوره هستند، صورت می گیرد. این موارد عبارتند از مقدار دبی دود، جرم، غبار، سیستم خنک کن کوره و گرمای تشعشع و ... وابستگی زمان انرژی الکتریکی بصورت زیر تعیین می گردد.

$$\frac{de_{el}(t)}{dt} = \frac{e_{Dust}(t) + e_{off\ gas}(t) + e_{Rod}(t) + e_{cool}(t) - e_{HM}(t) - \sum e_{chem,i}(t)}{\eta_{el}}$$

در این رابطه وابستگی زمانی انرژی الکتریکی هم برای مقدار انرژی ورودی و هم برای خروجی لحاظ می شود. اگر قراضه پیشگرم شده بطور پیوسته درون کوره شارژ شود، یک پارامتر اضافی در رابطه فوق بکار می رود. بوسیله ارزیابی مقدار انرژی اندازه گیری شده و بالانسهای انرژی از ۴ کوره با وزن تخلیه مذاب بین ۷۰ تا ۱۵۰ تن، وابستگی زمانی انرژی الکتریکی از ۰/۸ تا  $\frac{1}{3} \frac{kwh}{t\ min}$  تخمین زده شد. تأثیر زمان ذوب بر مصرف انرژی الکتریکی در ابتدای فرآیند ذوب  $\frac{0.4}{t\ min} \frac{kwh}{t\ min}$  و قبل از تخلیه مذاب  $\frac{1.7}{t\ min} \frac{kwh}{t\ min}$  گزارش شده است. این مسئله نشان می دهد که اختلاف مهمی در تأثیر مدت زمان قطعی ذوب و اینکه توقف در ابتدای ذوب باشد یا در پایان فرآیند ذوب بر مقدار انرژی الکتریکی مصرفی وجود دارد. رگرسیون مدلهای کوهل (مدلهای ۱ تا ۴) تأثیر زمان ذوب را بصورت زیر نشان می دهد:

$$\Delta w_{R,\Delta t} = 1 \times (t_s + t_n) \left( \frac{kwh}{t} \right)$$

این مقدار به خوبی با دامنه ۰/۸ تا  $\frac{1}{3} \frac{kwh}{t\ min}$  سازگار است. برای کوره خاص مدل ۳ ضریب بدست آمده بطور چشمگیری کوچک و برابر ۰/۴۳ می باشد. که این عدد تأثیر کم زمان ذوب را بر روی مصرف انرژی نشان می دهد.

### ➤ استفاده از مشعل گازی

مشعلهای اکسیژن سوز برای بدست آمدن گرمای یکنواخت در کوره به منظور کاهش زمان ذوب قراضه و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی، بکار می روند. معمولاً مشعلهای گازی در ۵ تا ۱۵ دقیقه اول بعد از شارژ قراضه فعال می شوند، زیرا راندمان حرارت انتقالی به قراضه ها با افزایش دما شدیداً کاهش می یابد. انرژی شیمیایی گازهای سوختی تجاری از ۹/۳ تا  $\frac{10.7}{m^3} \frac{kwh}{m^3}$  متغیر است. با توجه به ضرائب راندمان حرارتی جایگزینی انرژی

<sup>1</sup> Tap to Tap Time



الکتریکی بوسیله انرژی شیمیایی که از احتراق گاز حاصل می شود از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\Delta e_{el\ G} = \frac{\eta_G \cdot h_{VG}}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = -6.9 \text{ to } -11.5 \frac{kwh}{m^3 O_2}$$

با در نظر گرفتن راندمان بالاتر برای انرژی انتقالی از مشعل و قوس الکتریکی به دلیل قراضه‌ای که تازه شارژ شده و دمای آن پایین است،  $\eta_G = 75\% - 85\%$ ،  $\eta_{el} \cdot \eta_{arc} = 85\% - 95\%$ ، آنگاه بازه انرژی از  $-7/3$  تا  $-10/7$   $\frac{kwh}{m^3}$  خواهد شد. با دنبال کردن مدل‌های رگرسیون شده (مدل ۱ تا ۴)، استفاده از مشعل گازی مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می‌دهد.

$$\Delta W_{R,G} = -8 \cdot M_G \left[ \frac{kwh}{t} \right]$$

### ➤ تزریق اکسیژن جهت احتراق تکمیلی در کوره قوس

هدف از احتراق تکمیلی گازهای  $H_2$  و  $CO$  داخل کوره های قوس، آزاد کردن انرژی واکنشهای اکسیداسیون برای ذوب قراضه می باشد. انرژی واکنشهای اکسیداسیون  $H_2$  و  $CO$  به ترتیب برابر  $\Delta h = -5.99 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  و  $\Delta h = -7.01 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  می باشد. در کنار اکسیژن ورودی بوسیله تزریق کننده های اکسیژن، اکسیژن اضافی مشعلهای اکسیژن سوز نیز به احتراق تکمیلی موثر کمک می کند. انرژی آزاد شده از احتراق تکمیلی محتویات دود، برای مثال با ۲۵ درصد  $CO$  و ۱۰ درصد  $H_2$  برابر است با:

$$\Delta h = \frac{25 \times \Delta h_{CO} + 10 \times \Delta h_{H_2}}{35} = -6.8 \frac{kwh}{m^3 O_2}$$

به دلیل اینکه بیشترین احتراق تکمیلی در بالای توده قراضه و مذاب پوشیده شده با سرباره صورت گیرد، راندمان انتقالی به قراضه و مذاب کمتر از ۵۰٪ است. بیشترین راندمان حرارتی حدود ۶۵ درصد تقریب زده می شود که موقعی اتفاق می افتد که قراضه سرد شارژ شود و راندمان حرارتی ۲۰ تا ۳۰ درصد موقعی اتفاق می افتد که احتراق بالای سرباره پفکی انجام پذیرد.

متوسط راندمان گرمایی که با جایگزینی احتراق تکمیلی با انرژی الکتریکی حاصل می شود، بین ۳۰ تا ۵۰ درصد تخمین زده می شود و با توجه به  $\langle \eta_{el} \eta_{arc} \rangle > 60\%$  خواهیم داشت:

$$\Delta e = \frac{\eta_{pc} \times \Delta h}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = -2.5 \text{ تا } -5.6 \frac{kwh}{m^3 O_2}$$

کاهش مصرف انرژی الکتریکی با استفاده از احتراق تکمیلی دودهای خروجی در کوره قوس، ماکزیمم  $3/1$  - گزارش شده است. رگرسیون ضرایب مدل‌های کوهل بصورت زیر می‌باشد.

$$\Delta W = -2.8 \times M_N \frac{kwh}{t}$$

### ➤ قراضه های خرد شده ورودی

با وارد کردن قراضه خرد شده به داخل کوره، به دلیل زیاد شدن سطح تماس، سرعت ذوب بالا رفته و مصرف انرژی کاهش می یابد. تاثیر انواع مختلف قراضه و ترکیب آنها بر روی مصرف انرژی الکتریکی با رگرسیون مدلی که بر پایه ۲۸۹۴ ذوب می باشد، مورد مطالعه قرار داده شد. اختلاف بین اعداد بدست آمده برای متوسط همه انواع قراضه و متوسط قراضه های خرد شده از ۵۸- تا  $۸۲ \frac{kwh}{t_{scrap}}$  می باشد. این مقدار به عواملی مانند: خلوص و جرم کل قراضه های خرد شده، مخلوط قراضه و نحوه شارژ آنها در بین سبدها بستگی دارد. تاثیر مخلوطهای قراضه مختلف بر روی هزینه های کوره های قوس تعیین شد و کاهش مصرف انرژی الکتریکی از  $۳۸۲ \frac{kwh}{t}$  (برای قراضه فولاد) تا  $۳۵۰ \frac{kwh}{t}$  (برای قراضه خرد شده و خالص) گزارش گردید. در این صورت خواهیم داشت.

$$\Delta h_{shr} = -32 \frac{kwh}{t}$$

بنابراین کاهش مصرف انرژی الکتریکی با استفاده از قراضه خرد شده بین ۳۲- تا  $۸۲ \frac{kwh}{t}$  می باشد. رگرسیون مدل کوهل (مدل ۴) میزان انرژی مصرفی کاهش یافته با قراضه خرد شده بصورت زیر می باشد:

$$\Delta w = -50. \frac{G_{shr}}{G_A}$$

### ➤ ورودی چدن مذاب

با استفاده از چدن مذاب، ذرات غیر خالص قراضه حل شده و کاهش می یابند و مصرف انرژی الکتریکی با افزایش انرژی مواد ورودی کاهش می یابد. چدن مذاب معمولاً بین دماهای  $۱۱۵۰^{\circ}C$  تا  $۱۳۵۰^{\circ}C$  شارژ می شود که در این رنج دمائی، مقدار انرژی چدن مذاب بین ۲۵۵ تا  $۳۰۱ \frac{kwh}{t}$  می باشد. تغییر مصرف انرژی الکتریکی با استفاده از چدن مذاب با راندمان  $60\% < \eta_{el} \eta_{arc} < 80\%$  محاسبه می شود.

$$\Delta e = \frac{\Delta h_{HM}}{\eta_{arc} \eta_{el}} = -319 \quad \text{to} \quad -502 \frac{kwh}{t}$$

دمای چدن مذاب ورودی نیز در کاهش مصرف انرژی الکتریکی مهم است. مدل تجربی کوهل (مدل ۴) ورودی چدن مذاب را با آیتم زیر مشخص کرده است.

$$\Delta w = -350. \frac{G_{HM}}{G_A} \frac{kwh}{t}$$

### ➤ تزریق اکسیژن بوسیله لانس

تزریق اکسیژن به منظور کربن زدایی از مذاب و تولید سر باره پفکی بوسیله احتراق کک و مواد افزودنی دیگر می باشد. برخی مواد آلیاژی مانند فسفر، آلومینیوم و سیلیسیم به طور کامل در معرض اکسیداسیون قرار می گیرند. عناصری نظیر کربن، آهن، منگنز، کرم برای اکسیداسیون احتیاج به فشار اکسیژن بالاتری دارند. کل انرژی آزاد شده از واکنشهای اکسیداسیون گرمازا به عوامل زیر بستگی دارد:

(۱) ترکیب شیمیایی مواد فلزی ورودی

(۲) جرم کک تزریق شده یا شارژ شده

(۳) ترکیب فولاد مذاب تخلیه شده

انرژی شیمیایی کل که از واکنشهای اکسیداسیون آزاد می شود از ۵۰ تا  $300 \frac{kwh}{t}$  متغیر است. اکسیژن بوسیله

تزریق کننده ها، لانسها و جریان هوا تأمین می شود. لیست آنتالپی واکنشهای اکسیداسیون مختلف در فولادسازی در جدول ۲-۳ ارائه گردیده است.

جدول ۲-۳. واکنشهای اکسیداسیون گرمازا در کربن زدایی و تصفیه مذاب

Chemical reactions in the steel melt				Reaction enthalpy	
Si	+	O <sub>2</sub>	→	SiO <sub>2</sub>	- 8.94 kWh/kg <sub>Si</sub> - 11.20 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Mn	+	0.5 O <sub>2</sub>	→	MnO	- 1.93 kWh/kg <sub>Mn</sub> - 9.48 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2 Cr	+	1.5 O <sub>2</sub>	→	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 3.05 kWh/kg <sub>Cr</sub> - 9.42 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2 Fe	+	1.5 O <sub>2</sub>	→	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 2.05 kWh/kg <sub>Fe</sub> - 6.80 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Fe	+	0.5 O <sub>2</sub>	→	FeO	- 1.32 kWh/kg <sub>Fe</sub> - 6.58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
C	+	0.5 O <sub>2</sub>	→	CO	- 2.55 kWh/kg <sub>C</sub> - 2.73 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2 Al	+	1.5 O <sub>2</sub>	→	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 5.29 kWh/kg <sub>Al</sub> - 13.84 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Mo	+	O <sub>2</sub>	→	MoO <sub>2</sub>	- 1.70 kWh/kg <sub>Mo</sub> - 7.29 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
S	+	O <sub>2</sub>	→	SO <sub>2</sub>	- 2.75 kWh/kg <sub>S</sub> - 3.94 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2 P	+	2.5 O <sub>2</sub>	→	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	- 5.54 kWh/kg <sub>P</sub> - 8.58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Chemical reactions in the gas phase				Reaction enthalpy	
C	+	O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	- 9.10 kWh/kg <sub>C</sub> - 4.88 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
CO	+	0.5 O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	- 7.01 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	+	0.5 O <sub>2</sub>	→	H <sub>2</sub> O	- 5.99 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>

مقادیر جدول ۲-۳ نشان می دهد که آنتالپی واکنشهای مؤثر بین  $2/73 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  برای کربن و  $11/2$  برای

سیلیسیم می باشد که به ترکیب قراضه و فولاد و شرایط لانس زدن بستگی دارد. برای مثال در صورتیکه ۱ درصد

کربن و ۱ درصد سیلیسیم در مذاب اکسید شود، انرژی معادل  $6/6 \frac{kwh}{m^3 O_2} = \Delta h_L$  آزاد می شود. تعیین دقیق  $\Delta h_L$

بدون در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی واقعی و دمای مذاب مشکل است.

انرژی شیمیایی که بواسطه تزریق  $25 \frac{m^3}{t}$  در یک کوره ۱۰۰ تنی آزاد می شود به طور متوسط برابر

می باشد. جایگزینی انرژی شیمیایی حاصل از واکنشهای اکسیداسیون به جای انرژی الکتریکی  $\Delta h_L = 5/2 \frac{kwh}{m^3 O_2}$

معادل  $\Delta h_L = 5/2 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  و با ضرائب راندمان ( $\eta_L = 70\% - 80\%$  ,  $\eta_{el} \eta_{arc} = 60\% - 80\%$ ) کنترل

می گردد.

$$\Delta P_{el,L} = \frac{\eta_L \cdot \Delta h_L}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}} = 4.3 \text{ to } 6.9 \frac{kwh}{m^3}$$

نتایج تحقیق مشابه دیگری بر روی ۲۰ کوره در ژاپن نشان داده است که مقادیر برای جایگزینی انرژی شیمیایی

به جای الکتریکی بین  $4/7 -$  تا  $6/8 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  می باشد: Memoli هم عدد  $3/2 \frac{kwh}{m^3 O_2}$  را برای جایگزینی انرژی

پیشنهاد می کند.

در رگرسیونهای خطی مدلهای کوهل اکسیژن تزریقی لانس ها، مشعلها و احتراق تکمیلی از هم تفکیک شده اند

(مدلهای ۱ تا ۴). از تحلیل رگرسیون کوهل مقدار منطبق شده برای جایگزینی انرژی الکتریکی بوسیله تزریق

اکسیژن برابر است با:

$$\Delta w_R = -4.3 M_L \left( \frac{kwh}{t} \right)$$

ملاحظه می شود که ضریب رگرسیون  $4/3 -$  در دامنه پیش بینی شده، ولی ضریب کوره خاص مدل ۳،

$2/1 -$  می باشد که بطور مشخص پایین تر از مدل اصلی (مدل ۴) است. این ضریب، راندمان پایین تزریق اکسیژن در

این سیستم را نشان می دهد. در شرایطی که دی اکسید کربن موجود در مذاب فولاد ثابت نیست، انرژی شیمیایی

حاصل از واکنش تبدیل مونوکسید کربن به دی اکسید کربن در جایگزینی انرژی الکتریکی نقشی ندارد. ولی مقدار

انرژی شیمیایی دود را افزایش می دهد. اگر مقدار انرژی شیمیایی گاز CO بعنوان تلفات دود در نظر گرفته نشود،

مقدار انرژی شیمیایی ورودی حاصل از اکسیداسیون کربن و انرژی کل در مقادیر پایین تری تخمین زده می شود.

### ➤ درصد آهن اسفنجی و بریکت ورودی

امروزه آهن اسفنجی و بریکت، با رشد چشمگیری به عنوان مواد ورودی به همراه قراضه در کوره ها شارژ

می شوند. علت این امر افزایش تولید فولاد در کوره های قوس الکتریکی است که نیاز به مواد اولیه آهنی را افزایش

داده است. اگر برای کوره فولاد سازی قراضه با کیفیت پایین استفاده شود، درصد مواد ناخالصی قراضه را با ورود

مواد آهنی نسبتا خالص کاهش می دهند. به دلیل متفاوت بودن تکنولوژیهای تولید، منابع مختلف معدنی، درصد

گانگ و درجه متالیزاسیون، ممکن است خواص شیمیایی و فیزیکی آهن اسفنجی و بریکت متفاوت باشد. جدول ۳-۳ دامنه تغییرات ترکیب شیمیایی آهن اسفنجی را نشان می دهد.

جدول ۳-۳. دامنه تغییرات ترکیب شیمیایی آهن اسفنجی

Degree of metallization [%]	Fe <sub>total</sub> [%]	Carbon content [%]	Gangue material	
			acidic [%]	basic [%]
85 - 96	86 - 95	0.1 - 5.0	0.7 - 6.0	0.2 - 4.8

به منظور محاسبه مصرف انرژی آهن اسفنجی و بریکت ورودی، آنتالپی واکنش احیای اکسید آهن با کربن آهن اسفنجی و بریکت باید با توجه به دمای آهن اسفنجی و بریکت لحاظ شود. فرض می شود که اکسیدهای آهنی که با کربن احیا نمی شود در سرباره باقی می ماند که این امر باعث کاهش بازده فلزی آهن اسفنجی و بریکت می شود.

$$e_{DRI/HBI} = \Delta h_{DRI/HBI}(T) + X_C \Delta_r h_{FeO \rightarrow Fe}(T) - h_{TDRI/HBI}(T_{DRI/HBI})$$

هنگام در نظر گرفتن تأثیر اضافه کردن آهن اسفنجی و بریکت بر روی بالانس انرژی کوره، این مسأله باید مورد توجه قرار گیرد که با افزایش سهم آهن اسفنجی و بریکت، میزان اضافه کردن سرباره سازها هم افزایش می یابد و به همین نسبت بازده مواد فلزی ورودی کاهش می یابد. سرباره سازهای قلیایی با نسبت ۲/۵ به ۱ در مقایسه با مواد اسیدی به آهن اسفنجی و بریکت اضافه می شوند. افزایش مصرف انرژی بواسطه اضافه کردن آهن اسفنجی و بریکت با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta e_{el} = \frac{[e_{DRI/HBI}(T) - e_{z,DRI/HBI}(T)] - [e_{scrap}(T) + e_{z,scrap}(T)]}{\eta_{el} \cdot \eta_{arc}}$$

تغییر میزان مصرف انرژی هنگامیکه آهن اسفنجی و بریکت جایگزین قراضه می شود، تنها به خواص شیمیایی و فیزیکی آهن اسفنجی و بریکت وابسته نیست، بلکه به خواص فیزیکی و شیمیایی قراضه ای که جایگزین آن شده است هم بستگی دارد. کیفیت پایین قراضه باعث می شود که بازده فلزی پایین بیاید و در نتیجه سهم سرباره سازهای ورودی به منظور جبران این مسئله افزایش می یابد. تغییر مصرف انرژی الکتریکی با ورودی آهن اسفنجی و بریکت در ۲۵°C بصورت زیر تغییر می کند:

$$\Delta e_{el} = -70 \text{ to } +80 \frac{kwh}{t}$$

این مقدار با ضریب رگرسیون مدل ۴ کوهل که مربوط به آهن اسفنجی و بریکت است مقایسه می شود:

$$\Delta w_{R, DRI / HBI} = 80 \frac{G_{DRI / HBI}}{GA}$$

دامنه محاسبه شده برای آهن اسفنجی و بریکت (۷۰- تا +۸۰) نشان می دهد که ضریب رگرسیون در مدل کوهل باید برای ترکیب شیمیایی و دمای آهن اسفنجی و بریکتی که در کوره های خاص مصرف می شود، مورد استفاده قرار گیرد.

#### ➤ سیستم خنک کننده کوره

با استفاده از اندازه گیری دما و مقدار دبی آب خنک کننده، مقدار انرژی منتقل شده توسط دیواره و پوسته کوره و سیستم خنک کننده دود برای ۴ کوره قوس تعیین شده است. این اطلاعات منجر به اضافه شدن یک ترم برای سیستم خنک کنندگی کوره در فرمول رگرسیون کوهل می شود (مدل ۴)

$$\Delta w_R = NV(W_V - W_{wm}) \frac{kwh}{t}$$

NV ضریب ویژه کوره است که می تواند بین ۰/۲ تا ۰/۴ باشد.  $W_V$  مقدار گرمای اندازه گیری شده برای سیستم خنک کننده کوره را در هر ذوب مشخص می کند که واحد آن  $(\frac{kwh}{t})$  می باشد. مفهوم این بررسی نشان می دهد که در ضرایب راندمان انرژی منتقل شده ( $\eta_i < 1$ ) همه تلفات انرژی دود، سرباره و سیستم خنک کننده در نظر گرفته شده است. بنابراین استفاده از ترم خنک کننده در رابطه رگرسیون ضروری نیست و از دید ترمودینامیکی برای سیستمی که در شکل ۳-۵ نشان داده شده نباید در نظر گرفته شود.

به هر حال اختلاف بین پارامترهای فرآیند و تجهیزات کوره از کوره ای به کوره دیگر، باعث می شود مقادیر راندمان حرارتی ( $\eta_i$ ) به طور چشمگیری متفاوت باشند. در این مورد NV ممکن است یک ضریب صحیح برای همه ضرائب رگرسیون را در هر کوره ای نشان دهد.

با توجه به مطالب ارائه شده محدوده ضرائب مدل کوهل در جدول ۳-۴ خلاصه شده است.

جدول ۳-۴. محدوده ضرائب مدل کوهل

Regression coefficients	1992	1999	2002	2001	Range [4]
Constant	+300	+300	+375	+391	+380 to +413
Specific ferrous Input	+900	+900	+400	+450	+600 to +1000
Slag formers	+1600	+1600	+1000	+800	+548 to +730
Tapping temperature	+0.70	0.70	+0.3	+0.35	+0.29 to +0.38
Tap-to-tap time	+0.85	+0.85	+1.00	+0.43	+0.4 to +1.7
Oxy-fuel burner	-8.0	-8.0	-8.0	-	-6.9 to -11.5
Injected lance oxygen	-4.3	-4.3	-4.3	-2.1	-4.3 to -6.9
Oxygen post-combust.	-	-2.8	-2.8	-	-2.5 to -5.6
Input of DRI/HBI	-	+80	+80	-	-70 to +80
Input of hot metal	-	- 300	-350	-	-319 to -512
Input of shredder	-	-	-50	-	-82 to -32
Furnace cooling system	-	-	0.2 to 0.4	-	0

۳-۱-۳. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از

### مدل کوهل و نرم‌افزار Eviews

#### ➤ معرفی اجمالی نرم‌افزار Eviews Enterprise v.7

بررسی رابطه بین متغیرهای مختلف و برآورد توابع مختلف در حوزه‌های مختلف، نقش موثری ایفا می‌کند. در مدلسازی‌ها غالباً به برآورد رگرسیونی توابع و تخمین پارامترهای مربوط به آنها نیاز است که برای انجام این منظور استفاده از نرم افزارهای مختلف کمک شایانی به استفاده موثر و مطلوب از داده‌های آماری می‌نماید. یکی از بهترین و پرکاربردترین نرم افزارهای مورد استفاده برای برآورد رگرسیونی توابع مختلف و انجام آزمون‌های مختلف آماری برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، نرم‌افزار Eviews است. جدیدترین نسخه مورد استفاده این نرم‌افزار، نسخه Enterprise v.7 آن می‌باشد. در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از خروجی این نرم افزار نشان داده شده است.

در ادامه براساس داده‌های بهره‌برداری اخذ شده از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد مورد نظر و با استفاده از نرم‌افزار Eviews و همچنین با توجه به مدل کوهل (که در قسمت‌های قبل به معرفی آن پرداخته شد)، رابطه‌ای بین پارامترهای مختلف و موثر بر مصرف انرژی استخراج خواهد شد.

Estimation Command:

```
=====
QREG(K=E,NGRID=100,Q=R) SEC C FERROUS/STEEL-1 SLAG_FORMER/STEEL
TEMP-1600 TIME OXYGEN/(STEEL/1000) DRI/STEEL
```

Estimation Equation:

```
=====
SEC = C(1) + C(2)*(FERROUS/STEEL-1) + C(3)*SLAG_FORMER/STEEL +
C(4)*(TEMP-1600) + C(5)*TIME + C(6)*OXYGEN/(STEEL/1000) + C(7)*DRI/STEEL
```

Substituted Coefficients:

```
=====
SEC = 463.246471954 + 349.369342564*(FERROUS/STEEL-1) +
266.026332771*SLAG_FORMER/STEEL + 0.0536633892497*(TEMP-1600) +
0.405466320147*TIME - 0.375221520424*OXYGEN/(STEEL/1000) + 530.942681192*DRI/STEEL
```

شکل ۳-۷. نمونه خروجی نرم افزار Eviews

➤ بررسی داده‌های آماری اخذ شده از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده از آنجا که یکی از مشکلات همیشگی در داده‌های آماری، وجود داده‌های بد<sup>۱</sup> می‌باشد، لذا اولین قدم پایش اطلاعات بهره‌برداری اخذ شده، می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، داده‌های بهره‌برداری بصورت زیر پایش شده‌اند:

- ✓ حذف ذوب‌هایی که وزن قراضه مصرفی آنها مشخص نبوده
- ✓ حذف ذوب‌هایی که وزن آهن اسفنجی مصرفی آنها مشخص نبوده
- ✓ حذف ذوب‌هایی که زمان tap to tap آنها کمتر از زمان Power On آنها بوده
- ✓ حذف ذوب‌هایی که زمان Tap to tap آنها کمتر از ۴۰ دقیقه بوده
- ✓ حذف ذوب‌های با مصرف ویژه انرژی کمتر از ۵۰۰ و بیشتر از ۱۰۰۰ کیلووات ساعت بر تن مذاب
- ✓ حذف ذوب‌های با مصرف آهک و دولومیت (مجموعاً) برابر صفر یا نامشخص
- ✓ حذف ذوب‌های با مصرف اکسیژن صفر یا نامشخص
- ✓ حذف ذوب‌هایی که دمای تخلیه آنها مشخص نبوده و یا در سیستم، صفر منظور شده
- ✓ حذف ذوب‌های با راندمان تولید کمتر از ۷۰ درصد و بیشتر از ۱۰۰ درصد

لازم به ذکر است مبنای پایش داده‌ها، کمبود اطلاعات (مانند مشخص نبودن وزن قراضه و آهن اسفنجی)، خطا در ثبت اطلاعات و یا داده‌های بهره‌برداری که به ندرت اتفاق می‌افتد و استفاده از آنها باعث کاهش دقت رابطه بدست آمده می‌گردد، بوده است.

داده‌های مورد استفاده پس از پایش برای کوره‌های قوس الکتریکی ۱ و ۲ به ترتیب شامل ۶۷۳ و ۵۱۸ ذوب

<sup>1</sup> bad data

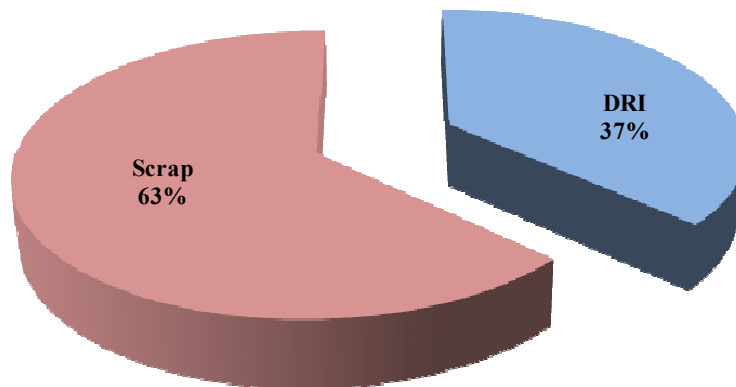


می‌شود. میانگین و مجموع مقادیر بهره‌برداری در این مدت در جدول ۳-۵ خلاصه شده است.

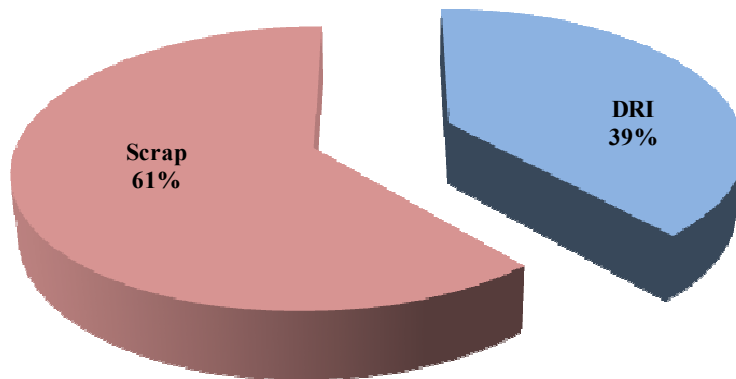
جدول ۳-۵. خلاصه داده‌های بهره‌برداری پایش شده کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه مورد بررسی در مدت حدود ۳ ماه

		EAF 1		EAF 2	
		Avg.	Sum	Avg.	Sum
No. of Heat	-	-	673	-	518
DRI	ton	17.5	11,783	18.7	9,694
Scrap	ton	30.0	20,220	29.8	15,418
Steel	ton	43.5	29,295	43.0	22,290
Oxygen	Nm <sup>3</sup>	907	610,401	847	438,639
Power On Time	min	64	43,076	67	34,838
Tap to Tap Time	min	114	76,436	111	57,541
Tapping Temp.	°C	1,623	-	1,613	-
Energy Consumption	MWh	27.2	18,302	26.6	13,782

در شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ به ترتیب سهم آهن اسفنجی و قراضه مصرفی در کوره‌های قوس ۱ و ۲ این واحد براساس داده‌های بهره‌برداری پایش شده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۸. سهم مصرف آهن اسفنجی و قراضه مصرفی در کوره قوس الکتریکی یک واحد فولادسازی کارخانه مورد نظر براساس داده‌های بهره‌برداری پایش شده



شکل ۳-۹. سهم مصرف آهن اسفنجی و قراضه مصرفی در کوره قوس الکتریکی دو واحد فولادسازی مورد نظر

### ➤ بررسی ضرایب مدل کوهل در کارخانه فولاد

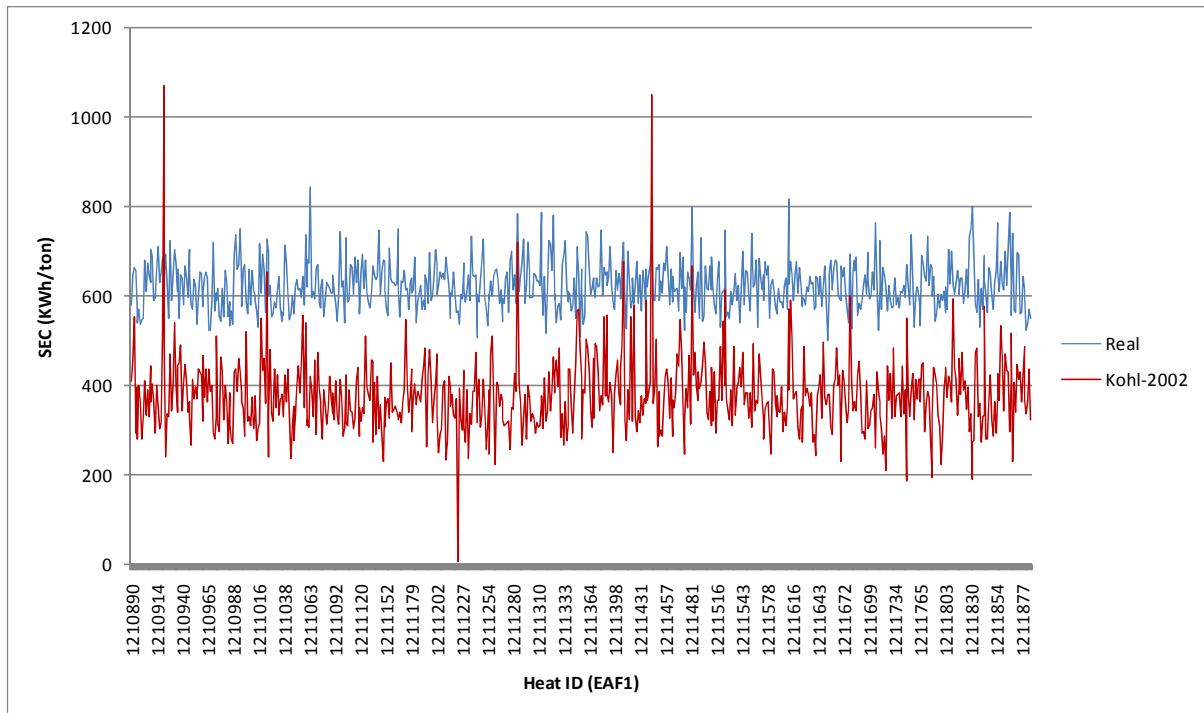
با توجه به غیرپیوسته بودن بهره‌برداری از کوره قوس الکتریکی، مهمترین قدم در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی در این تجهیز، بهبود و پایش شرایط بهره‌برداری است. در این راستا استفاده از مدل‌های آماری می‌تواند به عنوان مهمترین کمک مطرح گردد. با استفاده از این مدل‌های آماری امکان پیش‌بینی مصرف ویژه انرژی براساس پارامترهای بهره‌برداری فراهم خواهد بود. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، از مهمترین و برجسته‌ترین مدل‌های ارائه شده برای مصرف ویژه انرژی در کوره های قوس الکتریکی، مدل کوهل می‌باشد. این مدل طی چندین سال روند تکاملی داشته و علاوه بر ارائه شده در محافل علمی، در عرصه عملی نیز جایگاه خود را باز کرده به گونه‌ای که برخی از شرکت‌های اروپایی از این رابطه به منظور پیش‌بینی رفتار کوره قوس استفاده می‌نمایند. ضرایب مدل کوهل، در جدول ۳-۶ ارائه شده که برای محاسبات از آخرین نسخه آن (سال ۲۰۰۲) استفاده شده است.

جدول ۳-۶. ضرایب مدل کوهل برای برآورد مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره‌های قوس الکتریکی

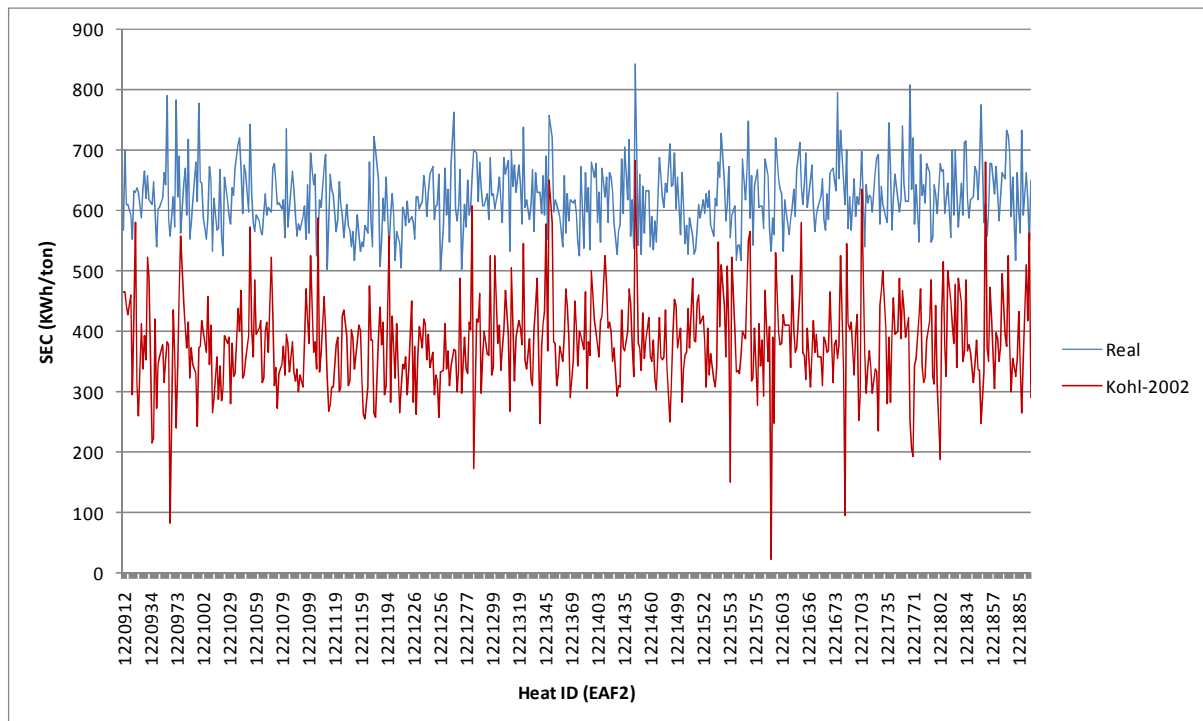
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 300 + 900 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1600 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.85 \cdot \frac{t_s + t_n}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$	(1)	1992
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 300 + 900 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1600 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.85 \cdot \frac{t_s + t_n}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}} - 2.8 \cdot \frac{M_N}{\text{m}^3/\text{t}} + 80 \cdot \frac{G_{\text{DRI/HBI}}}{G_A} - 300 \cdot \frac{G_{\text{HM}}}{G_A} - 15 \cdot \text{CON}$	(2)	1999
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 391 + 450 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 800 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.35 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 0.43 \cdot \frac{t_s + t_n}{\text{min}} - 2.1 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}}$	(3)	2001
$\frac{W_R}{\text{kWh/t}} = 375 + 400 \cdot \left[ \frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 1000 \cdot \frac{G_Z}{G_A} + 0.3 \cdot \left[ \frac{T_A}{^\circ\text{C}} - 1600 \right] + 1.00 \cdot \frac{t_s + t_n}{\text{min}} - 8 \cdot \frac{M_G}{\text{m}^3/\text{t}} - 4.3 \cdot \frac{M_L}{\text{m}^3/\text{t}} - 2.8 \cdot \frac{M_N}{\text{m}^3/\text{t}} + 80 \cdot \frac{G_{\text{DRI/HBI}}}{G_A} - 350 \cdot \frac{G_{\text{HM}}}{G_A} - 50 \cdot \frac{G_{\text{shr}}}{G_A} + \text{NV} \cdot \frac{W_v - W_{vm}}{\text{kWh/t}}$	(4)	2002

CON	continuous (+1), discontinuous (-1) operation	M <sub>N</sub>	Specific post-combustion oxygen [m <sup>3</sup> /t]
G <sub>A</sub>	Furnace tap weight [t]	NV	Furnace specific factor (0.2 to 0.4)
G <sub>DRI</sub>	Weight of DRI (Direct Reduced Iron) [t]	T <sub>A</sub>	Tapping temperature [°C]
G <sub>E</sub>	Weight of all ferrous materials [t]	t <sub>N</sub>	Power-off time [min]
G <sub>HBI</sub>	Weight of HBI (Hot Briquetted Iron) [t]	t <sub>S</sub>	Power-on time [min]
G <sub>HM</sub>	Weight of hot metal [t]	W <sub>R</sub>	Specific electric energy demand (from regression analysis) [kWh/t]
G <sub>shr</sub>	Weight of shredder [t]	W <sub>V</sub>	Energy losses (if measured) [kWh/t]
G <sub>Z</sub>	Weight of slag formers [t]	W <sub>vm</sub>	Mean value of W <sub>V</sub> [kWh/t]
M <sub>L</sub>	Specific lance oxygen [m <sup>3</sup> /t]		
M <sub>G</sub>	Specific burner gas [m <sup>3</sup> /t]		

در شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ به ترتیب مقدار مصرف ویژه انرژی کوره قوس الکتریکی ۱ و ۲ کارخانه مورد نظر با مقدار بدست آمده از معادله کوهل (با ضرایب اصلی)، مقایسه شده است.



شکل ۳-۱۰. مقایسه مصرف ویژه انرژی کوره قوس الکتریکی یک واحد فولادسازی کارخانه فولاد با مقادیر محاسبه شده توسط معادله کوهل



شکل ۳-۱۱. مقایسه مصرف ویژه انرژی کوره قوس الکتریکی دو واحد فولادسازی کارخانه فولاد با مقادیر محاسبه شده توسط معادله کوهل

همان طور که ملاحظه می گردد مصرف ویژه انرژی محاسبه شده با استفاده از معادله کوهل با مقادیر واقعی

تفاوت دارند. این موضوع به دلیل عدم تطابق شرایط بهره‌برداری در نظر گرفته شده در معادله کوهل با شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده می‌باشد. برای رفع این مشکل، بهترین راه حل استفاده از تحلیل‌های آماری و استخراج مجدد ضرایب می‌باشد.

در جدول ۷-۳ و جدول ۹-۳ به ترتیب، ضرایب معادله کوهل براساس داده‌های آماری کوره قوس ۱ و ۲ این واحد و با استفاده از نرم‌افزار Eviews Enterprise v.7 و در جدول ۸-۳ و جدول ۱۰-۳ درصد داده‌های با خطای کمتر از ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد برای این کوره‌ها، ارائه شده است.

جدول ۷-۳. ضرایب استخراج شده برای مدل کوهل با استفاده از داده‌های آماری کوره قوس الکتریکی

Coefficient						
Constant	$(G_E/G_A)-1$	$G_Z/G_A$	$T_A-1600$	$t_S+t_N$	$M_L$	$G_{DRI}/G_A$
463.25	349.47	266.03	0.05	0.41	-0.38	530.94

جدول ۸-۳. درصد داده‌های محاسباتی با خطای کمتر از ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط واقعی بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی

42.1	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۳ درصد
63.0	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۵ درصد
90.0	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۱۰ درصد
97.9	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۱۵ درصد

جدول ۹-۳. ضرایب استخراج شده برای مدل کوهل با استفاده از داده‌های آماری کوره قوس الکتریکی دو

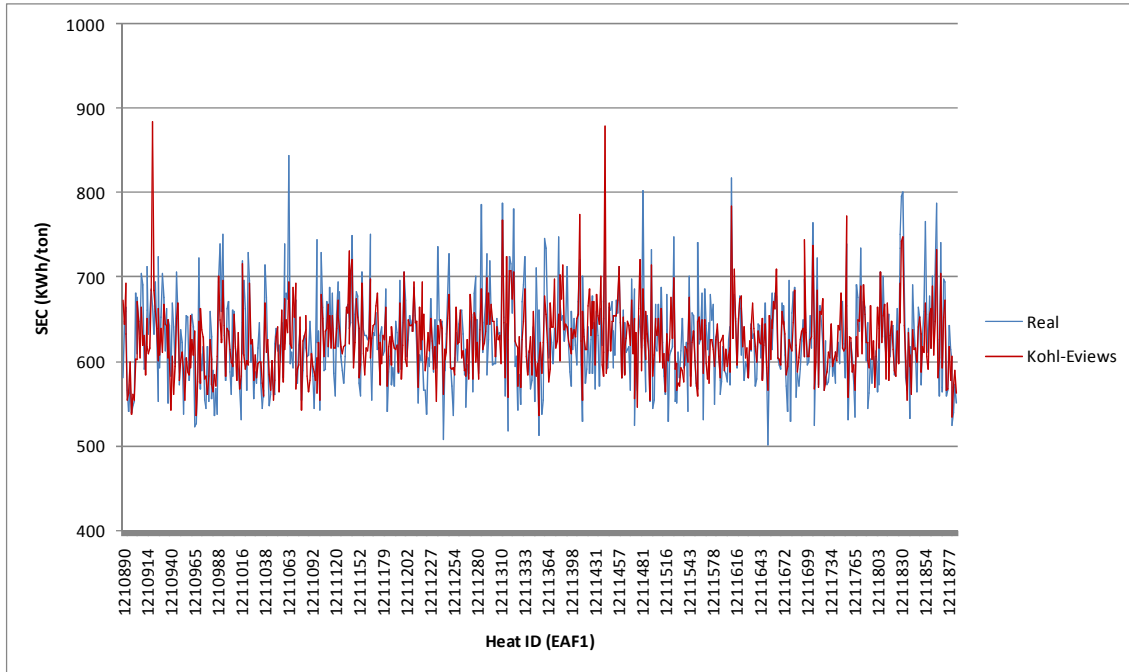
Coefficient						
Constant	$(G_E/G_A)-1$	$G_Z/G_A$	$T_A-1600$	$t_S+t_N$	$M_L$	$G_{DRI}/G_A$
458.78	374.87	526.94	0.01	0.39	-1.43	517.77

جدول ۱۰-۳. درصد داده‌های محاسباتی با خطای کمتر از ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به شرایط واقعی بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی

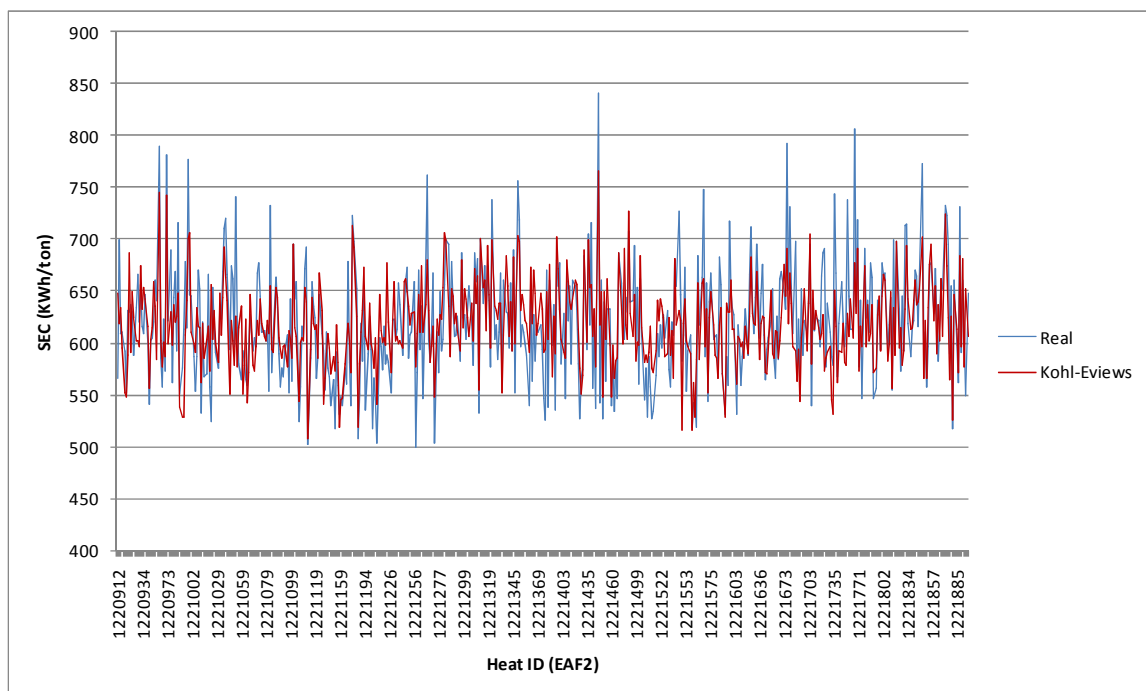
40.3	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۳ درصد
61.2	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۵ درصد
91.9	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۱۰ درصد
98.6	درصد داده‌های با خطای کمتر از ۱۵ درصد

در شکل ۱۲-۳ و شکل ۱۳-۳ به ترتیب مصرف ویژه انرژی کوره‌های قوس الکتریکی ۱ و ۲ کارخانه فولاد مورد

بررسی در گزارش در دو حالت محاسباتی (با استفاده از ضرایب محاسبه شده برای معادله کوهل با استفاده از نرم افزار Eviews) و واقعی مقایسه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، این دو مقدار با یکدیگر تطابق خوبی دارند.



شکل ۳-۱۲. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از مدل کوهل تصحیح شده و مقادیر واقعی برای کوره قوس الکتریکی یک



شکل ۳-۱۳. مقایسه مصرف ویژه انرژی الکتریکی محاسبه شده با استفاده از مدل کوهل تصحیح شده و مقادیر واقعی برای کوره قوس الکتریکی دو کارخانه فولاد

### ۳-۱-۴. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره قوس کارخانه فولاد ممیزی شده با

#### استفاده از نرم افزار PHAST

با وجود اینکه تحلیل‌های آماری ابزاری قدرتمند در تحلیل تاثیر پارامترهای مختلف بر مصرف انرژی می‌باشد، اما بررسی تاثیر برخی از پارامترها بر مصرف انرژی با استفاده از آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای تحلیل تاثیر این پارامترها، بهترین روش استفاده از ممیزی انرژی به روش مستقیم می‌باشد. در قسمت‌های قبل مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی کارخانه فولاد در شرایط بهره‌برداری با استفاده از نرم‌افزار PHAST، ارائه گردید. در این قسمت تاثیر برخی از شرایط بهره‌برداری که با استفاده از تحلیل‌های آماری نمی‌توان آنها را مشخص نمود، پرداخته می‌شود.

#### ➤ بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی یک

##### ✓ دمای محیط

به منظور بررسی دمای محیط بر میزان تلفات کوره قوس الکتریک یک، در نرم‌افزار PHAST از سه دمای محیط ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه سلسیوس استفاده شده است که دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در بخش‌های قبل بررسی شده است. در جدول ۳-۱۱ تاثیر تغییر دمای محیط بر میزان تلفات حرارتی کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد ارائه شده است. این بررسی‌ها برای شرایطی که مقدار کلیه پارامترهای بهره‌برداری به جز دمای محیط برابر شرایط بهره‌برداری ذوب شماره ۱۲۱۰۶۲۱ باشد، انجام گرفته است. در ضمن، فرض شده است افزایش دمای محیطی تاثیر بر افزایش دمای آب خنک‌کن ندارد. این بدان معناست که دمای سطح بیرونی کوره قوس در اثر تغییر دمای محیط تغییری نکند و لذا تغییر دمای محیط بر روی میزان تلفات حرارتی از سطح بیرونی کوره (به دلیل تغییر دمای محیط) تاثیرگذار باشد.

همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشترین تاثیر دمای محیط در تلفات حرارتی جداره کوره می‌باشد و در سایر تلفات تاثیر ناچیزی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند به ازای  $15^{\circ}\text{C}$  افزایش دمای محیط میزان انرژی ورودی حدود ۰/۵ درصد، و میزان انرژی لازم برای تولید مذاب حدود ۰/۹۵ درصد کاهش می‌یابد. البته منظور از دمای محیط، دمای سوله فولادسازی می‌باشد.

جدول ۳-۱۱. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت بهره‌برداری در دماهای محیط مختلف برای کوره قوس الکتریکی یک کارخانه

انرژی ورودی و تلفات (KWh/Cycle)	حالت بهره‌برداری در دمای محیط 15°C	حالت بهره‌برداری در دمای محیط 30°C	حالت بهره‌برداری در دمای محیط 45°C
مجموع انرژی ورودی	39979.6	39780.6	39582
انرژی مفید	15743.7	15594.1	15444.7
سرباره	3649.2	3614.1	3579.1
درب سرباره و گپ درب کوره	1690.2	1690.2	1690
جداره کوره	32.8	18.7	4.7

### ✓ فاصله درپوش کوره

عامل دیگر که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته، فاصله درپوش کوره می‌باشد. در جدول ۳-۱۲ تغییرات تلفات حرارتی با تغییر فاصله درپوش کوره، ارائه شده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که میزان تلفات رابطه مستقیمی با میزان فاصله دارد و با افزایش فاصله درپوش میزان تلفات و انرژی ورودی بیشتر شده است، به ازای ۲ سانتی‌متر افزایش فاصله درپوش میزان انرژی ورودی حدود ۰/۰۸ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۳-۱۲. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از گپ درب کوره در فواصل مختلف برای کوره قوس الکتریکی یک کارخانه فولاد

فاصله درپوش کوره (گپ درب)	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
مجموع انرژی ورودی (KWh/Cycle)	39780.6	39813.3	39844.9	39877.6	39910.3
تلفات گپ درپوش کوره (KWh/Cycle)	32.7	65.4	97.0	129.7	162.4

### ✓ تعداد دفعات شارژ قراضه

تعداد دفعات شارژ قراضه از جمله عواملی است که موجب تلفات زیادی در کوره می‌شود. در کوره قوس الکتریکی یک وزن قراضه استفاده شده برای این ذوب خاص ۲۷ تن است که در دو مرحله شارژ می‌شود. در جدول ۳-۱۳ تغییرات انرژی ورودی و تلفات ناشی از افزایش تعداد دفعات شارژ قراضه ارائه شده است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد اگر قراضه در سه مرحله شارژ شود، میزان انرژی ورودی حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است یکی از دلایل افزایش تعداد دفعات شارژ قراضه می‌تواند کیفیت نامناسب اندازه قراضه و در نتیجه کاهش چگالی توده‌ای قراضه، باشد. واضح است که کاهش توده‌ای قراضه باعث کاهش وزن قراضه به ازای هر بار شارژ و در نتیجه افزایش تعداد دفعات شارژ به ازای تناژ ثابت شارژ قراضه خواهد شد.

<sup>۱</sup> به دلیل اینکه ضریب دید (View Factor) برای گپ بین درب و لبه بالایی کوره کم است و از طرف دیگر دمای مذاب به مراتب بیشتر از دمای محیط است، لذا تغییر دما تغییر بسیار کمی بر روی اتلافات حرارتی از این طریق دارد.



جدول ۳-۱۳. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از باز شدن درب کوره قوس الکتریکی یک برای شارژ قراضه در کارخانه

تعداد دفعات شارژ قراضه	2	3	4
مجموع انرژی ورودی (KWh/Cycle)	39780.6	40634.8	41489.1
تلفات باز شدن درب کوره برای شارژ قراضه (KWh/Cycle)	1586.4	2440.6	3294.9

➤ بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی دو

➤ دمای محیط

در جدول ۳-۱۴ تاثیر تغییر دمای محیط بر میزان تلفات حرارتی کوره قوس الکتریکی شماره ۱ دو ارائه شده است. این بررسی‌ها برای شرایطی که مقدار کلیه پارامترهای بهره‌برداری به جز دمای محیط برابر شرایط بهره‌برداری ذوب شماره ۱۲۲۰۶۵۱ باشد، انجام گرفته است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشترین تاثیر دمای محیط در تلفات حرارتی جداره کوره می‌باشد و در سایر تلفات تاثیر ناچیزی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند به ازای  $15^{\circ}\text{C}$  افزایش دمای محیط میزان انرژی ورودی حدود ۰/۶ درصد، و میزان انرژی لازم برای تولید مذاب حدود ۱ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۳-۱۴. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت بهره‌برداری در دماهای محیط مختلف برای کوره قوس الکتریکی

دو

انرژی ورودی و تلفات (KWh/Cycle)	حالت بهره‌برداری در دمای محیط $15^{\circ}\text{C}$	حالت بهره‌برداری در دمای محیط $30^{\circ}\text{C}$	حالت بهره‌برداری در دمای محیط $45^{\circ}\text{C}$
مجموع انرژی ورودی	40002.0	39780.5	39558.7
انرژی مفید	16421.9	16252.6	16083.2
سرباره	3417.9	3386.5	3355.0
درب سرباره و گپ درب کوره	2070.4	2070.2	2069.8
جداره کوره	47.9	27.3	6.8

✓ فاصله درپوش کوره

در جدول ۳-۱۵ تغییرات تلفات حرارتی با تغییر فاصله درپوش کوره، ارائه شده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که با افزایش فاصله درپوش میزان تلفات و انرژی ورودی بیشتر شده است، به ازای ۲ سانتی‌متر افزایش فاصله درپوش میزان انرژی ورودی حدود ۰/۱۴ درصد افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است به دلیل تفاوت در دمای مذاب کوره‌های ۱ و ۲، تاثیر فاصله درپوش بر تلفات حرارتی برای این دو کوره متفاوت است.

جدول ۳-۱۵. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از گپ درب کوره در فواصل مختلف برای کوره قوس الکتریکی شماره ی دو کارخانه فولاد

فاصله درپوش کوره (گپ درب)	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
مجموع انرژی ورودی (KWh/Cycle)	39780.5	39835.7	39890.9	39946.1	40001.3
تلفات گپ درپوش کوره (KWh/Cycle)	55.2	110.4	165.6	220.8	276.0

### ✓ تعداد دفعات شارژ قراضه

در کوره قوس الکتریکی دو وزن قراضه استفاده شده برای این ذوب خاص ۴۲ تن است که در سه مرحله شارژ می‌شود. در جدول ۳-۱۶ تغییرات انرژی ورودی و تلفات ناشی از افزایش و کاهش تعداد دفعات شارژ قراضه ارائه شده است. مقایسه مقادیر نشان می‌دهد که به ازای افزایش هر مرحله شارژ قراضه، میزان انرژی ورودی حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید افزایش تعداد دفعات شارژ قراضه می‌تواند به دلیل اندازه نامناسب قراضه و در نتیجه کاهش چگالی توده‌ای قراضه می‌باشد.

جدول ۳-۱۶. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی ناشی از باز شدن درب کوره قوس الکتریکی دو برای شارژ قراضه در کارخانه فولاد

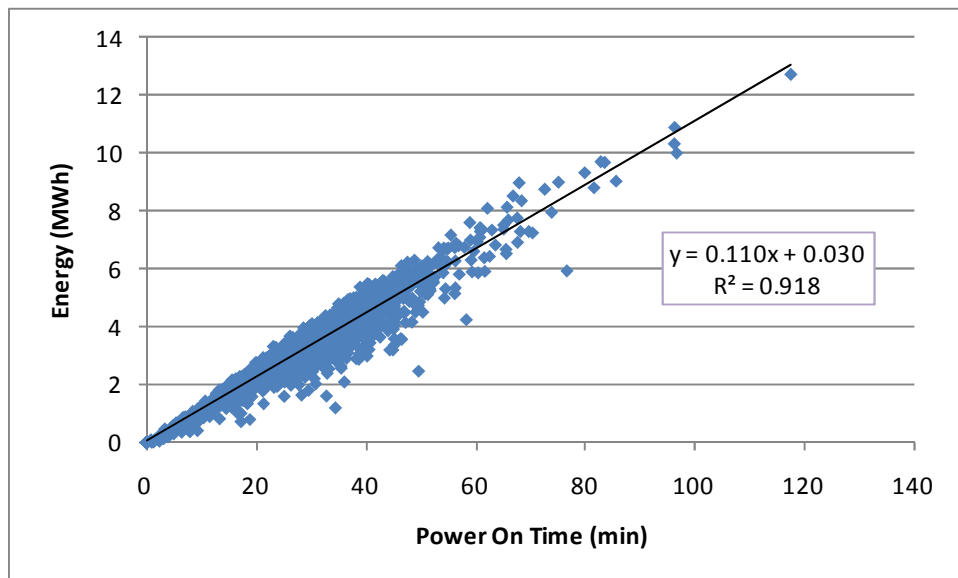
تعداد دفعات شارژ قراضه	2	3	4
مجموع انرژی ورودی (KWh/Cycle)	38956.2	39780.5	40604.8
تلفات باز شدن درب کوره برای شارژ قراضه (KWh/Cycle)	1030.4	1854.7	2679.0

### ۳-۲. کوره‌های پاتیلی

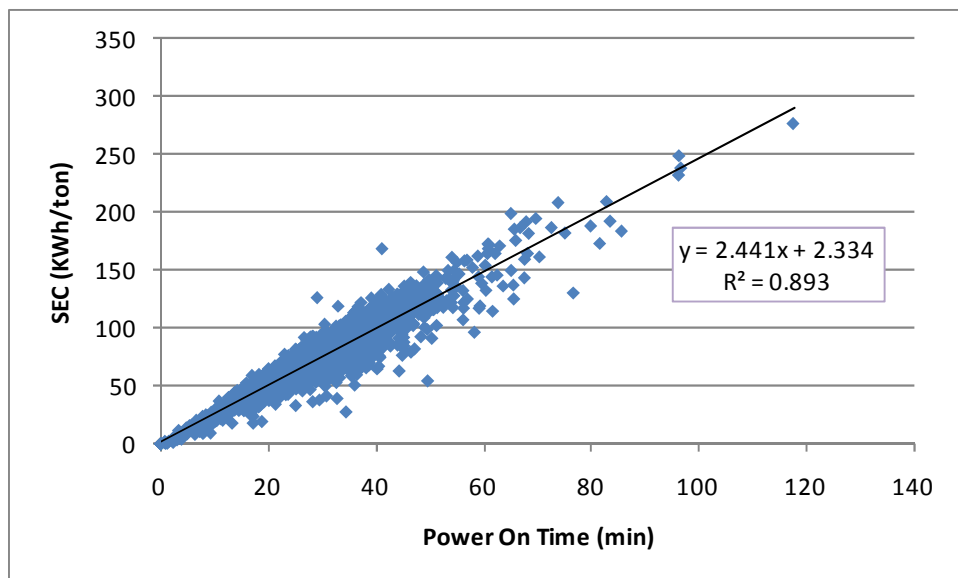
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این واحد فولادسازی تعداد دو عدد کوره کوره پاتیلی به ظرفیت هر کدام ۴۰ تن در حال کار می‌باشند. مذاب تهیه شده در کوره‌های قوس پس از سرباره‌گیری با استفاده از جرثقیل به کوره‌های پاتیلی منتقل می‌گردد. در این کوره‌ها، عملیات تکمیل ذوب بر روی مذاب انجام می‌گیرد. در بازه زمانی سه ماه داده‌های حدود ۲۰۰۰ ذوب جمع‌آوری و مرتب شده‌اند و پس از بررسی تعداد محدودی از ذوب‌ها (به دلیل وجود داده‌های بد<sup>۱</sup>) حذف شده است. با توجه به داده‌های اخذ شده، معیارهای تشخیص داده‌های بد در داده‌های بهره‌برداری کوره‌های پاتیلی، صفر بودن زمان Power On برای ذوبی که مصرف انرژی الکتریکی آن غیر صفر است و مصرف ویژه انرژی بیشتر از ۵۰۰ کیلو وات ساعت بر تن بوده است. در شکل ۳-۱۴ تاثیر مدت زمان Power On بر مقدار مصرف انرژی الکتریکی کوره‌های پاتیلی مشخص است.

<sup>1</sup> bad data

در این نمودار روند خوبی بین داده‌ها مشاهده می‌شود و با در نظر گرفتن معادله خطی مقدار رگرسیون قابل قبولی بدست آمده است. متوسط زمان Power On در این بازه زمانی ۲۹ دقیقه و متوسط توان الکتریکی مصرف شده ۶/۵۷ مگاوات است.



شکل ۳-۱۴. تاثیر زمان Power On بر مصرف انرژی الکتریکی کوره‌های پاتیلی



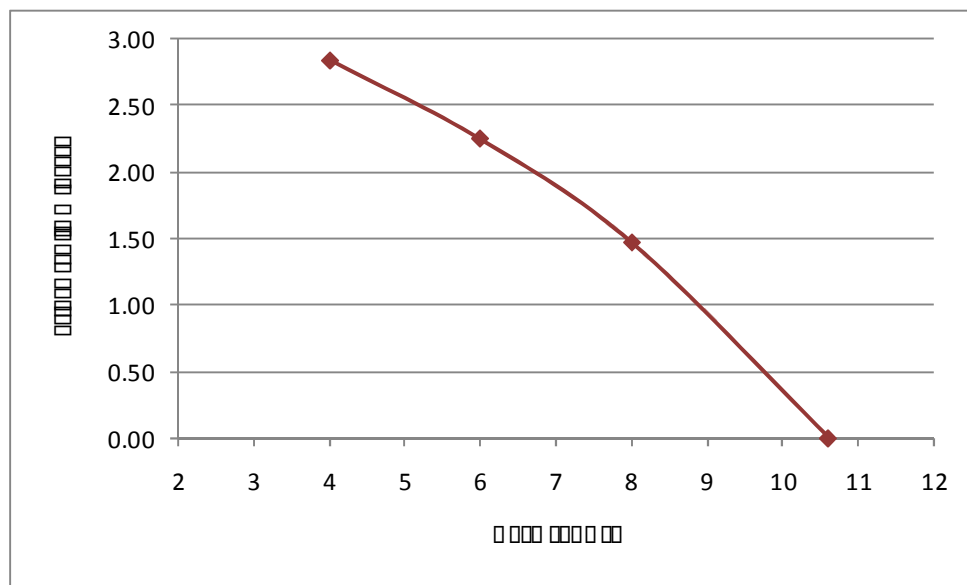
شکل ۳-۱۵. تاثیر زمان Power On بر مصرف ویژه انرژی الکتریکی کوره‌های پاتیلی

### ۳-۳. بویلر (مربوط به کارگاه تولید بخار)

در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد بویلر کارگاه تولید بخار کارخانه فولاد مورد بررسی در گزارش، پرداخته می شود.

#### ۳-۳-۱. بررسی تاثیر میزان اکسیژن اضافی

یکی از پارامترهای مهمی که تاثیر زیادی بر عملکرد بویلر دارد، میزان اکسیژن مصرف شده است. در شکل ۳-۱۶ نمودار تغییرات راندمان بویلر با اکسیژن اضافی رسم شده است. میزان اکسیژن اندازه گیری شده ۱۰/۶ درصد است، با مینا قرار دادن این مقدار، میزان افزایش راندمان بویلر به ازای کاهش مصرف اکسیژن محاسبه شده است. بعنوان مثال اگر مقدار اکسیژن از ۱۰/۶ به ۶ درصد کاهش یابد، راندمان بویلر ۲/۲ درصد بیشتر می شود.



شکل ۳-۱۶. درصد افزایش راندمان با کاهش اکسیژن اضافی در بویلر کارخانه فولاد

#### ۳-۳-۲. دمای بدنه بویلر

دمای بدنه بویلر در میزان تلفات تشعشعی از سطح موثر است. در جدول ۳-۱۷ مقدار انرژی ورودی و تلفات حرارتی از سطح بویلر در سه دما مشخص شده است. دمای بدنه بویلر با توجه به عکسبرداری حرارتی از سطح، بطور متوسط  $50^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شده است. مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی در هر دما، توسط نرم افزار PHAST محاسبه شده اند. محاسبات نشان می دهند به ازای  $15^{\circ}\text{C}$  افزایش دمای بدنه، راندمان بویلر کارگاه تولید بخار حدود ۰/۴ درصد کاهش می یابد.

جدول ۳-۱۷. تغییرات انرژی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه با دمای بدنه بویلر در کارخانه فولاد ممیزی شده

دمای بدنه (°C)	35	50	65
انرژی ورودی (KJ/hr)	16137.8	16218.3	16293.4
تلفات از بدنه (KJ/hr)	36.7	105.3	169.2

## فصل چهارم

### تحلیل تفاوت شرایط کنونی و شرایط بهینه مصرف انرژی

#### ۴-۱. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری از مقادیر طراحی

##### ۴-۱-۱. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی از مقادیر طراحی

در این قسمت ابتدا به مدلسازی کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه بر مبنای اطلاعات مدارک طراحی پرداخته شده و در ادامه به مقایسه نتایج بدست آمده با مقادیر بهره‌برداری و تحلیل انحرافات پرداخته می‌شود.

یکی از پارامترهای مهم زمان Tap to Tap است که در مدارک طراحی کوره، ۱۴۰ دقیقه ذکر شده است. مصرف ویژه انرژی الکتریکی به ازای ۴۰ تن مذاب که ۴۲۰ KWh/ton می‌باشد. با مشخص بودن مصرف الکتروود به ازای تن فولاد مذاب و میزان کربن اضافه شده کل انرژی ورودی بدست می‌آید. لازم به ذکر است که کوره فاقد مشعل بوده و بنابراین گاز طبیعی مصرف نمی‌شود.

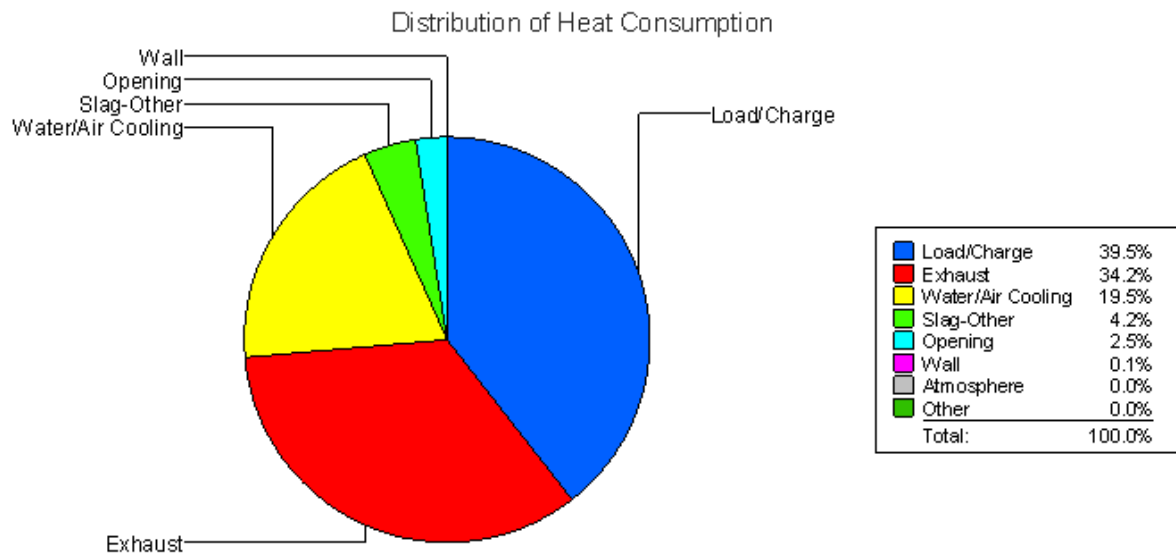
مواد اولیه آهن اسفنجی و قراضه است که در مدارک طراحی به نسبت ۲۰ به ۸۰ درصد و مجموع ۴۴ تن در وارد کوره می‌شوند. تعداد دفعات شارژ قراضه دو بار است.

آب خنک‌کاری کوره (با توجه به حجم کنترل در نظر گرفته شده که شامل Fume نمی‌شود) شامل آب مورد نیاز برای ترانسفورماتور، پانل‌های ثانویه و پوسته کوره است، در مدارک طراحی میانگین افزایش دمای آب حدود  $15^{\circ}\text{C}$  ذکر شده است. تلفات ناشی از خنک‌سازی کوره سهم زیادی از تلفات را شامل می‌شود. یکی دیگر از تلفاتی که سهم زیادی دارد تلفات دود خروجی از کوره است، دبی دود خروجی بر طبق مدارک طراحی،  $7745 \text{ m}^3/\text{h}$  و دمای آن کمتر از دمای مذاب و طبق مدارک  $1502^{\circ}\text{C}$  می‌باشد، در این بخش تلفات ناشی هوا به کوره نیز در نظر گرفته شده است.

باز شدن درب کوره برای شارژ قراضه، درزهای موجود در سقف کوره و دریچه‌ای که سرباره از آن خارج می‌شود، منابع دیگر تلفات هستند که ابعاد آن‌ها در مدارک موجود است، برای شارژ قراضه از دو سبد استفاده می‌شود. قطر خارجی کوره ۴/۹ متر و ارتفاع آن ۲/۴ متر است.

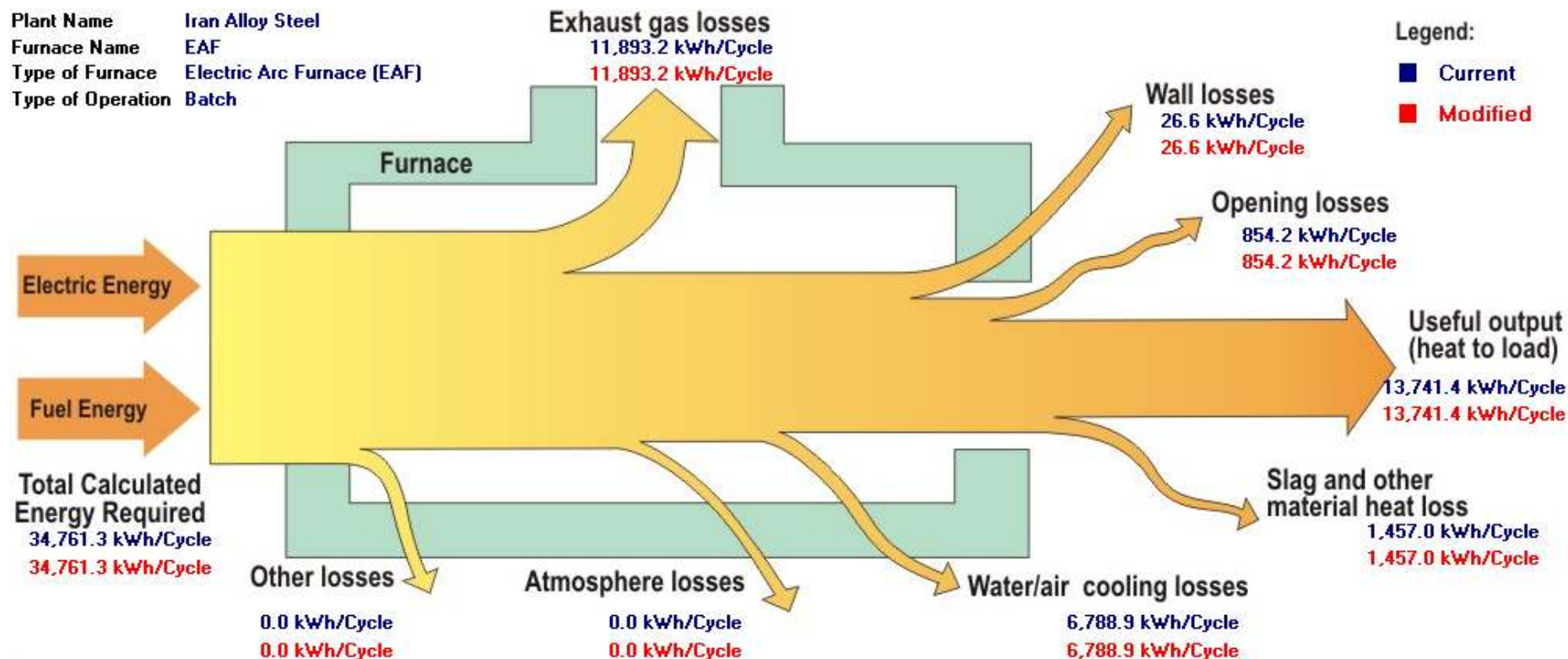
پس از اینکه موازنه انرژی (برای حالت طراحی) در نرم‌افزار PHAST برقرار گردید، می‌توان سهم تلفات حرارتی را محاسبه نمود. همانطور که در شکل ۴-۱ مشخص شده است در حالت طراحی، ۳۹/۵ درصد از انرژی

ورودی به کوره صرف تولید مذاب می شود و بقیه از قسمت های مختلف کوره هدر رفته است. بطور کلی تلفات عمده کوره ها در خنک سازی و دود خروجی می باشد. در این کوره بیشترین تلفات در دود خروجی از دودکش رخ داده است و علت این است که در حجم کنترل اختیار شده دود با دمای بالایی خارج می شود. لازم به ذکر است حجم کنترل اختیار شده در اینجا شبیه حجم کنترل در مدلسازی شرایط بهره برداری (شکل ۲-۷) است.



شکل ۴-۱. سهم تلفات انرژی محاسبه شده در PHAST برای شرایط طراحی کوره های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده

دیاگرام سانکی برای شرایط طراحی کوره قوس الکتریکی در شکل ۴-۲ مشخص شده است. در این دیاگرام میزان انرژی ورودی و میزان حرارت تلف شده در هر بخش مشخص می باشد.



شکل ۴-۲. دیاگرام سانکی برای کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد



### ➤ تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک از مقادیر طراحی

در جدول ۴-۱ مقادیر انرژی ورودی و تلفات عمده بدست آمده برای حالت طراحی کوره و بهره‌برداری ( برای ذوب شماره ۱۲۱۰۶۲۱) مقایسه شده است. با توجه به این جدول مشخص است که تلفات ویژه حرارتی و به دنبال آن انرژی ویژه ورودی به کوره قوس نسبت به حالت طراحی افزایش یافته است. در حالت طراحی تلفات عمده مربوط به دود خروجی است و در حالت بهره‌برداری بیشترین تلفات ناشی از خنک‌سازی است. در ۰ توان تلف شده و همچنین توان ورودی به کوره قوس در دو حالت طراحی و بهره‌برداری مقایسه شده است. با توجه به اعداد این جدول مشخص است اختلاف توان در حالت طراحی و بهره‌برداری نسبت به میزان انرژی در این دو حالت تغییر بسیاری داشته است. این موضوع را می‌توان عمدتاً به زمان ذوب مرتبط دانست. زمان Tap to Tap در حالت طراحی برابر ۱۴۰ دقیقه و در شرایط بهره‌برداری (در این ذوب خاص) برابر ۷۶ دقیقه بوده که اختلاف این دو زمان، تاثیر بسزایی بر توان تلفاتی داشته است. لازم به ذکر است، توان ورودی و یا توان تلف شده از تقسیم انرژی بر کل زمان Tap to Tap محاسبه شده است.

جدول ۴-۱. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ۱ یک

انرژی ورودی و تلفات	حالت طراحی		حالت بهره‌برداری		درصد اختلاف (بر مبنای مصرف ویژه انرژی طراحی)
	KWh/Cycle	KWh/ton	KWh/Cycle	KWh/ton	
مجموع انرژی ورودی	34761.3	790.0	39780.6	870.5	10.2
انرژی مفید	13741.4	312.3	15594.1	341.2	9.3
خنک‌سازی	6788.9	154.3	10361.4	226.7	46.9
دود خروجی	11893.2	270.3	8502.1	186.0	31.2
سرباره	1457	33.1	3614.1	79.1	139.0
قسمت‌های باز و شارژ قراضه	854.2	19.4	1690.2	37.0	90.7

جدول ۴-۲. مقایسه توان متوسط ورودی و توان حرارتی متوسط تلف شده برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی یک کارخانه

انرژی ورودی و تلفات	حالت طراحی	حالت بهره‌برداری
	MW	MW
مجموع انرژی ورودی	14.9	31.4
انرژی مفید	5.9	12.3
خنک‌سازی	2.9	8.2
دود خروجی	5.1	6.7
سرباره	0.6	2.9
قسمت‌های باز و شارژ قراضه	0.4	1.3

سهم هر کدام از تلفات حرارتی و میزان حرارت لازم برای ذوب مواد اولیه (حرارت مفید) از انرژی ورودی، که از نرم افزار PHAST بدست آمده است، برای حالت طراحی و بهره‌برداری در جدول ۴-۳ مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود سهم حرارت مفید در هر دو حالت تقریباً برابر است، سهم تلفات دود نسبت به حالت طراحی کاهش قابل توجهی داشته است، در حالیکه سهم سایر تلفات افزایش یافته است.

جدول ۴-۳. مقایسه سهم تلفات حرارتی و حرارت مفید برای حالت طراحی و بهره‌برداری از انرژی ورودی کوره قوس الکتریکی یک

انرژی مفید و تلفات	حالت طراحی (%)	حالت بهره‌برداری (%)
انرژی مفید (برای ذوب مواد اولیه)	39.5	39.2
تلفات مربوط به خنک‌سازی	19.5	26.0
تلفات مربوط به دود خروجی	34.2	21.4
تلفات مربوط به سرباره	4.2	9.1
تلفات مربوط به قسمت‌های باز و شارژ قراضه	2.5	4.2

#### ➤ تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو از مقادیر طراحی

در جدول ۴-۴ مقادیر انرژی ورودی و تلفات عمده بدست آمده برای حالت طراحی کوره و بهره‌برداری ( برای ذوب شماره ۱۲۲۰۶۵۱) مقایسه شده است. با توجه به این جدول مشخص است که تلفات ویژه حرارتی و به دنبال آن انرژی ویژه ورودی به کوره قوس نسبت به حالت طراحی افزایش یافته است. در حالت طراحی تلفات عمده مربوط به دود خروجی است و در حالت بهره‌برداری بیشترین تلفات ناشی از خنک‌سازی است. در ۰ توان تلف شده و همچنین توان ورودی به کوره قوس در دو حالت طراحی و بهره‌برداری مقایسه شده است. با توجه به اعداد این جدول مشخص است اختلاف توان در حالت طراحی و بهره‌برداری نسبت به میزان انرژی در این دو حالت تغییر بسیاری داشته است. این موضوع را می‌توان عمدتاً به زمان ذوب مرتبط دانست. زمان Tap to Tap در حالت طراحی برابر ۱۴۰ دقیقه و در شرایط بهره‌برداری (در این ذوب خاص) برابر ۱۱۱ دقیقه بوده است. لازم به ذکر است در این مورد نیز توان ورودی و توان تلف شده از تقسیم انرژی بر زمان Tap to Tap محاسبه شده است.

جدول ۴-۴. مقایسه مقادیر انرژی ورودی و تلفات حرارتی برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی شماره ۱ دو

انرژی ورودی و تلفات	حالت طراحی		حالت بهره‌برداری		درصد اختلاف (بر مبنای مصرف ویژه انرژی طراحی)
	KWh/Cycle	KWh/ton	KWh/Cycle	KWh/ton	
مجموع انرژی ورودی	34761.3	790.0	39780.5	846.4	7.1
انرژی مفید	13741.4	312.3	16252.6	345.8	10.7
خنک‌سازی	6788.9	154.3	11651.3	247.9	60.7
دود خروجی	11893.2	270.3	6392.6	136.0	49.7
سرباره	1457	33.1	3386.5	72.1	117.8
قسمت‌های باز و شارژ قراضه	854.2	19.4	2070.2	44.0	126.8

جدول ۴-۵. مقایسه توان متوسط ورودی و توان حرارتی متوسط تلف شده برای حالت طراحی و بهره‌برداری کوره قوس الکتریکی دو

انرژی ورودی و تلفات	حالت طراحی	حالت بهره‌برداری
	MW	MW
مجموع انرژی ورودی	14.9	21.5
انرژی مفید	5.9	8.8
تلفات مربوط به خنک‌سازی	2.9	8.8
تلفات مربوط به دود خروجی	5.1	3.5
تلفات مربوط به سرباره	0.6	1.8
تلفات مربوط به قسمت‌های باز و شارژ قراضه	0.4	1.1

سهم هر کدام از تلفات حرارتی و میزان حرارت لازم برای ذوب مواد اولیه (حرارت مفید) از انرژی ورودی، که از نرم‌افزار PHAST بدست آمده است، برای حالت طراحی و بهره‌برداری در جدول ۴-۶ مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود سهم تلفات دود نسبت به حالت طراحی کاهش قابل توجهی داشته است، در حالیکه سهم سایر تلفات و حرارت مفید افزایش یافته است.

جدول ۴-۶. مقایسه سهم تلفات حرارتی و حرارت مفید برای حالت طراحی و بهره‌برداری از انرژی ورودی کوره قوس الکتریکی ۲ کارخانه

انرژی مفید و تلفات	حالت طراحی (%)	حالت بهره‌برداری (%)
انرژی مفید (برای ذوب مواد اولیه)	39.5	40.9
تلفات مربوط به خنک‌سازی	19.5	29.3
تلفات مربوط به دود خروجی	34.2	16.1
تلفات مربوط به سرباره	4.2	8.5
تلفات مربوط به قسمت‌های باز و شارژ قراضه	2.5	5.2

#### ۴-۱-۲. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری کوره‌های پاتیلی از مقادیر طراحی

مصرف ویژه انرژی کوره‌های پاتیلی در شرایط اندازه‌گیری برابر 107 KWh/ton بوده که در مقایسه با مقدار طراحی (95 KWh/ton) اندکی افزایش داشته است. البته همان‌طور که در قسمت قبل ملاحظه گردید، زمان Power On تاثیر مستقیمی بر مصرف ویژه انرژی در کوره‌های پاتیلی دارد. این زمان می‌تواند به دلیل عملیات آلیاژسازی در کوره‌های پاتیلی و همچنین مشکلات موجود در خط تولید و در نتیجه افزایش زمان ماند مذاب در این کوره‌ها، افزایش یابد. متاسفانه در مدارک طراحی شرایط بهره‌برداری کوره پاتیلی و همچنین نوع آلیاژ و زمان ماند مذاب در کوره، ذکر نشده و لذا عملاً مقایسه شرایط بهره‌برداری با شرایط طراحی صحیح نمی‌باشد.

#### ۴-۱-۳. تحلیل انحراف شرایط بهره‌برداری بویلر کارگاه تولید بخار از مقادیر طراحی

همان‌طور که محاسبات نشان می‌دهند راندمان فعلی بویلر کارگاه تولید بخار، برابر ۸۳ درصد است که از راندمان طراحی آن (۸۹ درصد) کمتر است. در مدارک طراحی این بویلر، شرایط بهره‌برداری ذکر نشده و بنابراین تحلیل دلایل انحراف عملاً ممکن نیست. با این حال براساس محاسبات انجام شده در قسمت‌های قبل، مشخص است یکی از عوامل این انحراف درصد زیاد هوای اضافی در شرایط بهره‌برداری می‌باشد. در بازه‌های زمانی طولانی میزان استفاده از تجهیزات گاززدا در واحد فولادسازی بر روی مصرف ویژه انرژی کارگاه تولید بخار تاثیر گذار است. در واقع هر چه میزان استفاده از این تجهیزات افزایش پیدا کند، میزان تقاضا برای تولید بخار نیز افزایش پیدا کرده و به دلیل کاهش نسبت تلفات به انرژی مفید در بویلر، مصرف ویژه انرژی در بویلر کاهش پیدا می‌کند.

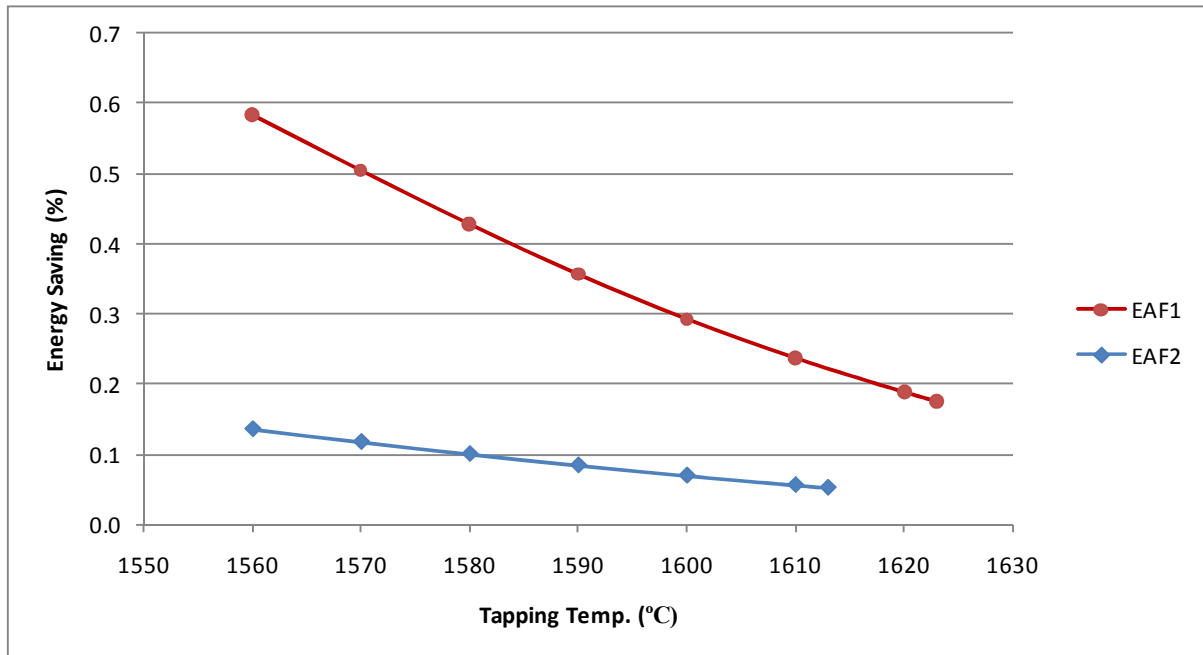
#### ۴-۲. برنامه‌ریزی تولید با هدف کاهش مصرف انرژی

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید به دلیل ماهیت غیرپیوسته بودن فرآیند تولید در واحد فولادسازی، مهمترین و موثرترین روش بهینه‌سازی مصرف انرژی در این واحد، اصلاح شرایط بهره‌برداری است. در ادامه به بررسی تاثیر بهینه‌سازی برخی از پارامترهای بهره‌برداری بر روی مصرف انرژی پرداخته شده است.

#### ۴-۲-۱. محاسبه تلفات انرژی الکتریکی ناشی از بالا بودن دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی

یکی از عوامل مهم در مصرف انرژی در واحد فولادسازی، دمای تخلیه مذاب در کوره قوس می‌باشد. در این قسمت با استفاده از ضرایب مدل کوهل (که با استفاده از داده‌های بهره‌برداری و به کمک نرم‌افزار Eviews محاسبه شدند) به بررسی تاثیر بالا بودن دمای ذوب بر میزان تلفات حرارتی کوره‌های قوس الکتریکی موجود در واحد فولادسازی کارخانه فولاد، پرداخته می‌شود. برای انجام این بررسی، از داده‌های بهره‌برداری پایش شده مربوط به دو کوره قوس الکتریکی استفاده شده است. در شکل ۴-۳ درصد صرفه‌جویی ناشی از کاهش دمای تخلیه با توجه به داده‌های بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده ارائه شده است. هر نقطه در این نمودار معرف درصد صرفه‌جویی انرژی الکتریکی به ازای کاهش دمای تخلیه مورد نظر می‌باشد. به عنوان مثال برای کوره قوس یک، اگر دمای تخلیه ذوب‌هایی که بیش از 1580°C است، به این مقدار کاهش پیدا کند، پتانسیل

صرفه‌جویی انرژی برابر ۰/۴۳ درصد خواهد بود. در این نمودار نقاط ماکزیمم برابر میانگین دمای تخلیه برای هر کوره بر اساس داده‌های بهره‌برداری پایش شده می‌باشد. همان‌گونه که در این نمودار نیز مشخص است، کاهش دمای تخلیه بر کاهش مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی یک خیلی بیشتر از کوره قوس الکتریکی دو تاثیر گذار است.

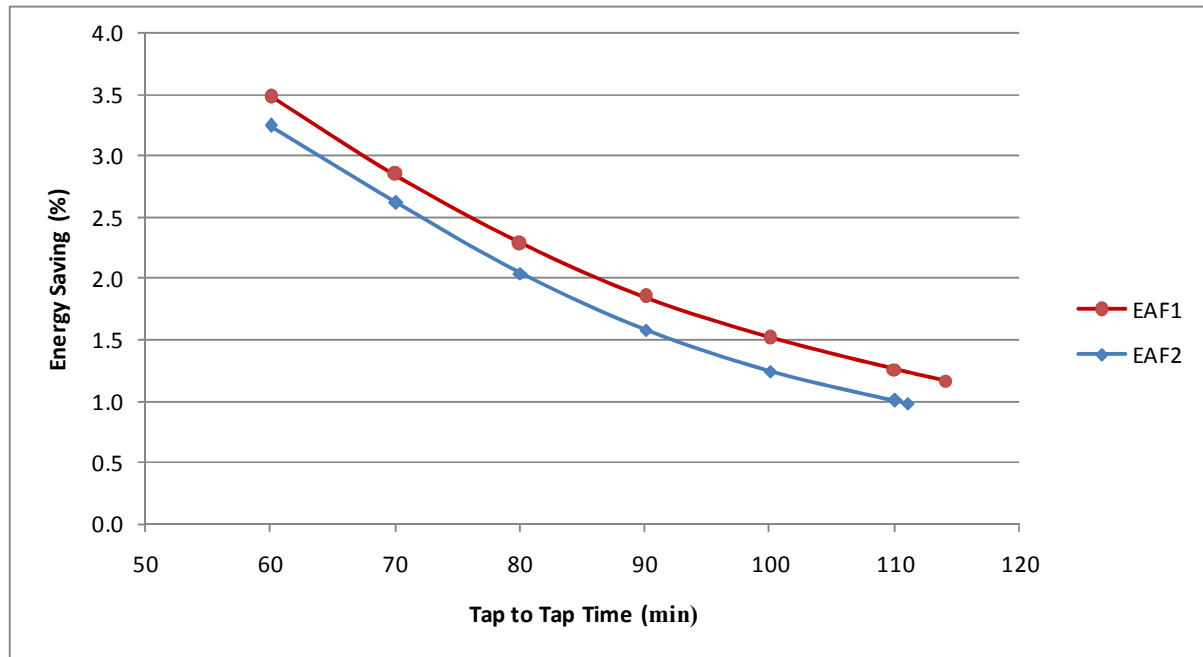


شکل ۳-۴. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی

#### ۴-۲-۲. محاسبه تلفات انرژی الکتریکی ناشی از بالا بودن زمان ذوب (توقفات) در کوره های قوس

##### الکتریکی

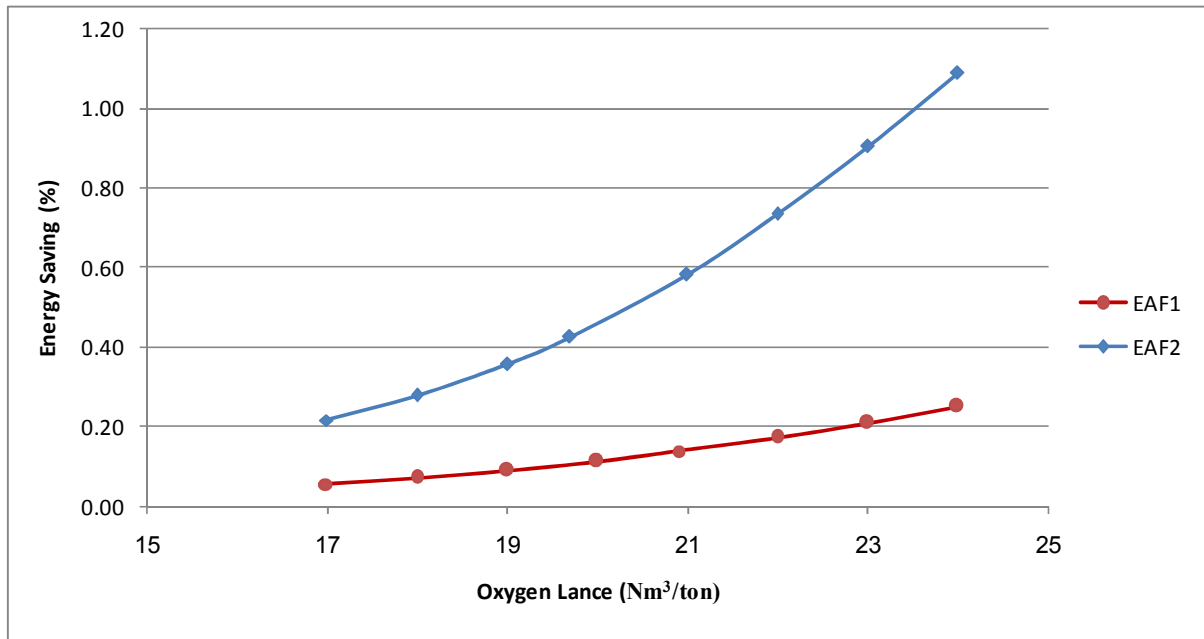
از دیگر شرایط بهره‌برداری موثر بر مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی، زمان ذوب می‌باشد. در شکل ۴-۴ درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان ذوب با توجه به ضرایب مدل کوهل محاسبه شده با نرم‌افزار Eviews برای کوره‌های یک و دو کارخانه فولاد، ارائه شده است. به عنوان مثال با توجه به این نمودار، در صورتی که زمان Tap to Tap ذوبهای کوره قوس الکتریکی ۲ این کارخانه که از ۹۰ دقیقه بیشتر است، برابر ۹۰ دقیقه شود، درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی برابر ۱/۵۸ درصد خواهد بود. لازم به ذکر است زمان ماکزیمم در این نمودار مقادیر میانگین براساس داده‌های بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی این کارخانه می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهند زمان Tap to Tap بر مصرف انرژی هر دو کوره قوس الکتریکی یک و دو کارخانه تاثیر تقریباً یکسانی دارد (تاثیر بر کوره قوس یک، کمی بیشتر است).



شکل ۴-۴. درصد صرفه جویی انرژی ناشی از کاهش زمان ذوب در کوره های قوس الکتریکی کارخانه فولاد ممیزی شده

#### ۴-۲-۳. محاسبه پتانسیل صرفه جویی انرژی بوسیله تزریق اکسیژن کافی در کوره های قوس الکتریکی

از دیگر عوامل تاثیر گذار بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوس استفاده مناسب از انرژی شیمیایی ناشی از واکنش های اکسیژن می باشد. در شکل ۴-۵ درصد صرفه جویی انرژی ناشی از افزایش میزان استفاده از لانس اکسیژن با توجه به ضرایب مدل کوهل محاسبه شده با استفاده از نرم افزار Eviews ارائه شده است. به عنوان مثال با توجه به این نمودار، در صورتی که در کوره قوس الکتریکی دو در ذوب هایی که لانس اکسیژن آنها کمتر از  $19 \text{ Nm}^3/\text{ton}$  می باشد از لانس اکسیژنی برابر  $19 \text{ Nm}^3/\text{ton}$  استفاده شود، درصد صرفه جویی انرژی الکتریکی برابر  $0/36$  درصد خواهد بود. همان گونه که محاسبات نشان می دهند، افزایش میزان استفاده از لانس اکسیژن بر مصرف انرژی کوره قوس دو به مراتب بیشتر از کوره یک تاثیر گذار است.

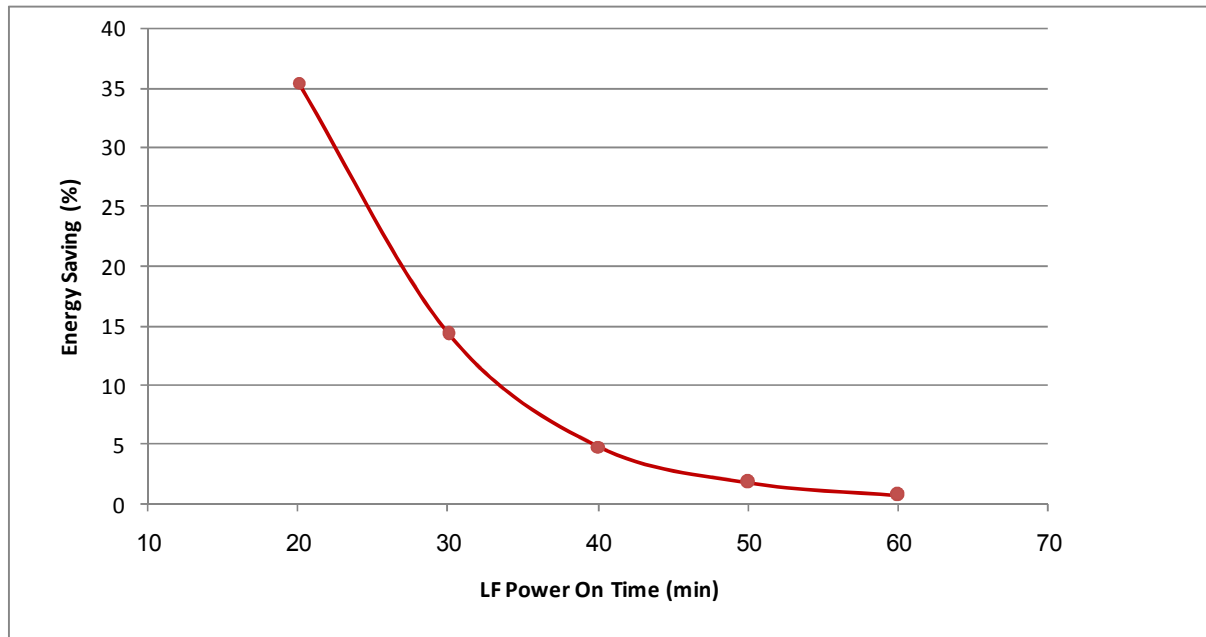


شکل ۴-۵. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از افزایش میزان استفاده از لانس اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد

#### ۴-۲-۴. محاسبه پتانسیل صرفه‌جویی انرژی بوسیله در اثر کاهش زمان Power On در کوره‌های

##### پاتیلی

همان طور که قبلاً مشاهده گردید، مهمترین پارامتر تاثیر گذار بر مصرف انرژی در کوره‌های پاتیلی، زمان Power On آن می‌باشد. این زمان می‌تواند در اثر مشکلات موجود در خط و نگهداری بیش از حد مذاب در کوره پاتیلی و یا به دلیل آلیاژسازی، افزایش پیدا کند. در شکل ۴-۶ پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی در اثر کاهش زمان Power On در کوره‌های پاتیلی موجود در کارخانه فولاد مورد نظر در گزارش حاضر بر اساس داده‌های بهره‌برداري آنها، ارائه شده است. بر طبق این محاسبات، مثلاً در صورتی که زمان Power On از ۳۰ دقیقه تجاوز نکند، پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی در حدود ۱۴/۳ درصد خواهد بود. همان گونه از نمودار مشخص است، تغییرات پتانسیل صرفه‌جویی مصرف انرژی با کاهش زمان Power On غیرخطی است.



شکل ۴-۶. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان Power On در کوره‌های پاتیلی کارخانه مورد نظر



## فصل پنجم

### ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تحلیل اقتصادی

#### ۵-۱. راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی

##### ۵-۱-۱. راهکارهای متداول بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد فولادسازی

صنعت آهن و فولاد به شدت انرژی‌بر است. تحقیقات انجام شده همگی به دنبال یافتن راهی برای کاهش مصرف انرژی، افزایش تولید و ظرفیت کارخانه‌ها بوده‌اند. فرصت‌های بهبود راندمان انرژی در فولادسازی در زیر شرح داده می‌شود.

#### ➤ بهبود کنترل فرآیند

کنترل فرآیند می‌تواند عملکردها را بهینه کند و بصورت قابل توجهی مصرف انرژی الکتریکی را کاهش دهد. کنترل‌های پیشرفته با انبوهی از سنسورها می‌توانند به این هدف بزرگ دست یابند. سیستم‌های کنترل و مونیتورینگ برای EAF در حال حرکت به سمت تجمیع مونیتورینگ بلا درنگ<sup>۱</sup> متغیرهای فرآیند مانند دمای مذاب فولاد، میزان کربن، فاصله قراضه، با سیستم‌های کنترل بلا درنگ برای تزریق گرافیت و عملیات دمش اکسیژن هستند. برای مثال، سیستم شبکه عصبی داده‌ها را آنالیز می‌کند و بهترین فرمان‌ها را اجرا می‌کند و در نتیجه می‌تواند به کاهش مصرف الکتریسیته کمک کند. برای شبکه‌های عصبی EAF میانگین صرفه جویی انرژی ۸٪ یا ۰/۱۴ GJ/tonne برآورد شد. علاوه بر این قابلیت تولید ۹ تا ۱۲٪ افزایش یافته و مصرف الکتروود ۲۵٪ کاهش یافته است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری ۳۷۲۵۰۰ دلار برای هر کوره با صرفه جویی هزینه سالانه ۱/۵ دلار بر تن و زمان برگشت سرمایه ۰/۵ سال برآورد شده است.

توسط مونیتورینگ سرعت سیلان و ترکیب گاز خروجی از کوره، کاربرد انرژی شیمیایی در کوره می‌تواند افزایش یابد. بررسی دقیق post-combustion گازهای خروجی با سنسور نوری می‌تواند انجام شود. استفاده از داده‌های مونیتورینگ به عنوان ورودی کنترل سیستم، post-combustion گاز خروجی می‌تواند بصورت online کنترل شود. مزایای این روش شامل کاهش مصرف الکتریسیته، کوتاه شدن زمان روشن کردن<sup>۲</sup>، افزایش ظرفیت تولید، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش سایش نسوز است. اگر اکسیژن تزریق شده برای post-combustion بصورت پیوسته توسط داده‌های بلادرنگ بدست آمده از غلظت‌های CO و CO<sub>2</sub> در گازهای خروجی (Off Gas)

<sup>1</sup> Real-time

<sup>2</sup> Power-on

کنترل شود، ۵۰٪ افزایش در سرعت بازیابی انرژی شیمیایی در دود در مقایسه با عملیات بر پایه set-point های از پیش تعیین شده می تواند بدست آید.

سیستم مخصوصی برای اندازه گیری پیوسته CO<sub>2</sub>، CO، H<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> برای کنترل post-combustion در واحد Hylsa's Planta Norte توسط شرکت نوکر نصب شد. سیستم موجب کاهش ۲ تا ۴٪ در مصرف الکتریسیته، ۸ تا ۱۶٪ در مصرف گاز طبیعی، ۵ تا ۱۶٪ در مصرف اکسیژن و ۱۸٪ در کربن شارژ و تزریقی شده است. در عین حال، راندمان بین ۱ تا ۲٪ افزایش یافته و مصرف الکتروود ۳/۵ تا ۱۶٪ کاهش یافته است، در حالی که ظرفیت تولید ۸٪ بیشتر شده است.

### ➤ درایوهای تنظیم دور

از آنجا که جریان گاز با زمان تغییر می کند، درایوهای تنظیم دور<sup>۱</sup> فرصتی را برای فن های جمع کننده غبار با راندمان بالاتر فراهم می کنند. درایوهای سریع قابل تنظیم گاز سوختنی در کشورهای مختلف (مانند آلمان، بریتانیا) نصب شده اند. صرفه جویی الکتریسیته ۰/۰۶ GJ/tonne با زمان برگشت سرمایه ۲ تا ۳ سال برآورد شده، البته سرعت جمع آوری غبار ۲ تا ۳٪ کاهش یافته است.

### ➤ ترانسفورماتورهای با توان بسیار بالا

ترانسفورماتورهای با توان بسیار بالا<sup>۲</sup> (UHP) به کاهش تلفات انرژی کمک می کند و ظرفیت تولید را افزایش می دهد. کوره های UHP ظرفیت ترانسفورماتور بیش از ۷۰۰ کیلو ولت آمپر (kVA) به ازای هر تن ظرفیت حرارتی دارند. فعالیت UHP ممکن است منجر به فلاکس های حرارتی و افزایش سایش نسوز شود که خنک کاری پانل های کوره را ضروری می سازد. صرفه جویی انرژی کل ۰/۰۶۱ GJ/tonne برآورد شده است. ترانسفورماتورهای جدیدی روی EAF برای افزایش توان کوره نصب شده اند. هزینه سرمایه گذاری ۴/۳ دلار بر تن و زمان برگشت سرمایه ۵/۲ سال برآورد می شود.

### ➤ تلاطم از کف / تزریق گاز متلاطم کننده

تلاطم از کف همراه با تزریق گاز خنثی به کف EAF برای افزایش انتقال حرارت در ذوب صورت می گیرد. علاوه بر این، برهم کنش بین سرباره و مذاب افزایش یافته و موجب افزایش بازده فلز مذاب ۰/۵ درصد می شود. کوره های با تزریق اکسیژن می توانند موجب صرفه جویی الکتریکی ۰/۰۴ GJ/tonne تا ۰/۰۸ با کاهش هزینه تولید سالانه خالص ۰/۸ تا ۱/۶ دلار بر تن شوند. صرفه جویی توان الکتریکی ۰/۰۷۲ GJ/tonne برآورد شد. هزینه های سرمایه گذاری برای به روز کردن کوره های موجود بالغ بر ۰/۹۴ دلار بر تن برای افزایش هزینه های نسوز و نصب توپرها است و هزینه های سالانه خرید گاز خنثی ۲/۰ دلار بر تن گزارش شده است. ظرفیت تولید افزایش یافت و کاهش هزینه ها ۵/۵ دلار بر تن و زمان برگشت سرمایه ۰/۲ سال برآورد شده است.

<sup>1</sup> Adjustable speed drive

<sup>2</sup> Ultra- high- power

### ➤ عملیات پفکی کردن سرباره

سرباره پفکی<sup>۱</sup> قوس و سطح مذاب را برای کاهش تلفات ناشی از تابش می پوشاند. سرباره پفکی می تواند با تزریق کربن (ذغال دانه بندی) و اکسیژن یا با دمش اکسیژن تنها بدست آید. سرباره پفکی راندمان الکتریکی را حداقل ۲۰٪ در صورت وجود ولتاژ قوس بالاتر افزایش می دهد. صرفه جویی انرژی خالص  $0.02-0.28 \text{ GJ/tonne}$  برآورد شده است. پفکی کردن سرباره ظرفیت تولید با کاهش زمان tap to tap افزایش می دهد. هزینه های سرمایه گذاری حدود ۱۵/۶ دلار به ازای هر تن ظرفیت است. افزایش ظرفیت تولید ممکن است معادل صرفه جویی هزینه تقریباً ۲/۹ دلار بر تن و زمان برگشت سرمایه ۴/۲ سال است.

### ➤ مشعل های اکسیژن-سوخت

مشعل های اکسیژن- سوخت تقریباً برای نیمی از کوره های قوس الکتریکی در ایالات متحده استفاده می شود. این مشعل ها ظرفیت موثر کوره را با افزایش سرعت ذوب و کاهش مصرف الکتریسیته و الکتروود افزایش می دهند و از طرفی انتشار گازهای گلخانه ای را نیز کاهش می دهند. کاربرد مشعل های اکسیژن- سوخت چندین مزیت دارد: افزایش انتقال حرارت، کاهش اتلاف حرارت، کاهش مصرف الکتروود و کاهش زمان tap to tap. علاوه بر این، تزریق اکسیژن به حذف عناصر مختلف از مذاب فولاد کمک می کند، مانند فسفر، سیلیسیم و کربن. در حال حاضر، مشعل های اکسیژن- گاز به همراه لانس دمش اکسیژن استفاده می شوند. زمانی که مذاب تهیه شد مشعل به عنوان لانس اکسیژن عمل می کند. صرفه جویی الکتریسیته از ۱۱ تا  $20 \text{ GJ/m}^3$  اکسیژن تزریقی است. تزریق گاز طبیعی معمولاً ۱۰ فوت معکب بر کیلو وات ساعت است با صرفه جویی انرژی در محدوده  $0.14-0.72 \text{ GJ/tonne}$ . هزینه سرمایه گذاری برای اصلاح کوره قوس ۱۱۰ تن ۷/۵ دلار بر تن برآورد شد. صرفه جویی هزینه سالانه ممکن است تقریباً ۷/۱ دلار بر تن به علت کاهش زمان tap to tap باشد و زمان برگشت سرمایه ۰/۹ سال است.

### ➤ Post-combustion گازهای سوختنی

Post-combustion فرآیندی برای فراهم کردن انرژی شیمیایی در  $\text{CO}$  و  $\text{H}_2$  بدست آمده از حمام فولاد برای حرارت فولاد در پاتیل EAF و پیشگرم کردن قراضه تا  $800-300^\circ\text{C}$  است. این فرآیند مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می دهد و ظرفیت تولید EAF را افزایش می دهد. مزیت های دیگر نیز کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، کاهش دمای off-gas سیستم و حداقل کردن spike های دما بالا با آزاد شدن سریع  $\text{CO}$  است. Post-combustion به بهینه شدن مزیت های تزریق اکسیژن و سوخت کمک می کند. شرایط کاری EAF با مقادیر زیادی کربن یا آهن خام شارژ شده برای پیاده سازی تکنولوژی Post-combustion  $\text{CO}$  هنگام ذوب قراضه مناسب است. در سیستم Post-combustion مخصوصی، صرفه جویی الکتریسیته از ۶ تا ۱۱٪ است و کاهش زمان tap to tap بسته به شرایط کاری از ۳ تا ۱۱٪ است. اطلاعاتی پیرامون زمان برگشت هزینه موجود نیست.

<sup>1</sup> Foamy slag

## ➤ کوره‌های قوس با جریان مستقیم

کوره قوس جریان مستقیم<sup>۱</sup> (DC) در اروپا پیشگام است و کوره‌های تک الکترودی به تازگی در آمریکای شمالی تجاری شده‌اند. کوره قوس DC از جریان مستقیم به جای جریان متناوب (AC) استفاده می‌کند. در کوره DC یک الکتروود استفاده می‌شود و کف کوره به عنوان مخزن استفاده می‌شود. براساس ویژگی متمایز کاربرد حرارت و نیروی مغناطیسی در تولید توسط جریان در ذوب، صرفه‌جویی انرژی کوره قوس تقریباً ۵٪ توان مصرفی در مقایسه با کوره قوس AC سه فاز است. علاوه بر این، ویژگی‌های دیگری مانند راندمان ذوب بالاتر و عمر بوت‌ها بیشتر را دارد. توان مصرفی  $454-544 \text{ kWh/ton}$  یا  $1/8-2/2 \text{ GJ/tonne}$  فولاد مذاب است. مصرف الکتروود حدود نصف کوره‌های متداول است، ۲-۱ کیلوگرم به ازای هر تن فولاد مذاب. صرفه‌جویی انرژی خالص  $0/32 \text{ GJ/tonne}$  برآورد می‌شود. با این حال در مقایسه با کوره‌های AC جدید صرفه‌جویی  $0/072 \text{ GJ/tonne}$  -  $0/036$  است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اضافی این کوره‌های نسبت به کوره‌های AC تقریباً  $6/1$  دلار بر تن و زمان برگشت سرمایه ۰/۷ سال است.

طراحی کوره قوس DC نوین و نوسان<sup>۲</sup> الکتریکی را کاهش می‌دهد، راندمان را افزایش می‌دهد و مصرف الکتریسیته را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۰۷، هشت کوره قوس DC در ایالات متحده و یکی در مکزیک فعالیت می‌کردند. بیشتر این کوره‌ها طی دو سال نصب شدند، اولین کوره در سال ۱۹۹۱ نصب شد، سازندگان آنها Fuchs، NKK/United، MAN Ghh و Voest-Alpine هستند. صناعی که در حال حاضر از این تکنولوژی جدید استفاده می‌کنند عبارتند از فولاد چارتر<sup>۳</sup>، فولاد فلوریدا، فولاد گالاتین<sup>۴</sup> فولاد نورث استار و واحدهای نوکر.

تاریخچه استفاده از کوره‌های قوس DC به سال ۱۸۷۸ بر می‌گردد، زمانی که ویلیام زیمنس<sup>۵</sup> کوره قوس DC را با کاتد گرافیتی و آند کف آبرگرد استفاده کرد. تجاری‌سازی تکنولوژی کوره قوس DC در دهه ۱۹۹۰ همزمان با افزایش تقاضا برای کوره‌های قوس DC جهت ذوب قراضه با توسعه رکتیفایرهای توان بالا<sup>۶</sup> رخ داد. در این دوره حدود ۸۰ کوره قوس DC در نیمکره شمالی ساخته شد [۱].

به دلیل توسعه منابع توان - بالا مطمئن جریان مستقیم، واحدهای فولادسازی با کوره قوس DC در دهه‌های اخیر ایجاد و گسترش یافته‌اند. نسل اول کوره‌های DC مجهز به سه الکتروود گرافیتی قرار گرفته در سقف کوره و سه الکتروود کف نصب شده در آسترهای کف کوره بودند. الکتروودهای کف با آب یا هوای فشرده خنک می‌شدند. منطقه سرد شونده با آب بیرون آستر کف قرار داشت [۲].

نسل جدید کوره‌های DC با یک الکتروود گرافیتی توسعه یافتند. در این کوره‌ها، آسترهای با مرکز هادی جریان

<sup>1</sup> Direct current

<sup>2</sup> flicker

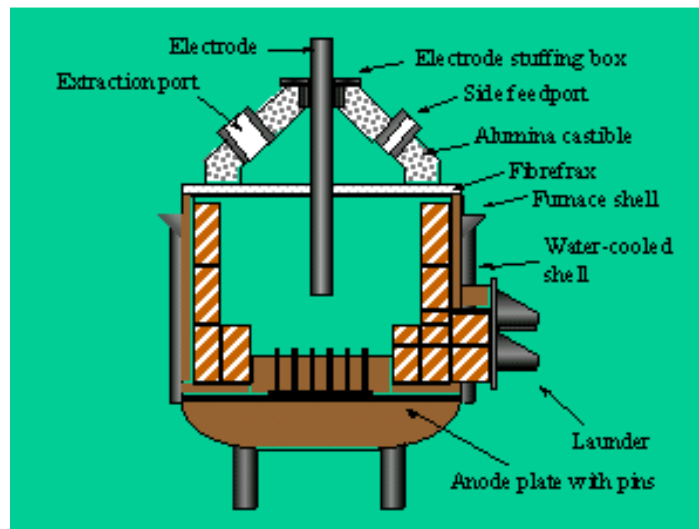
<sup>3</sup> Charter steel

<sup>4</sup> gallatin

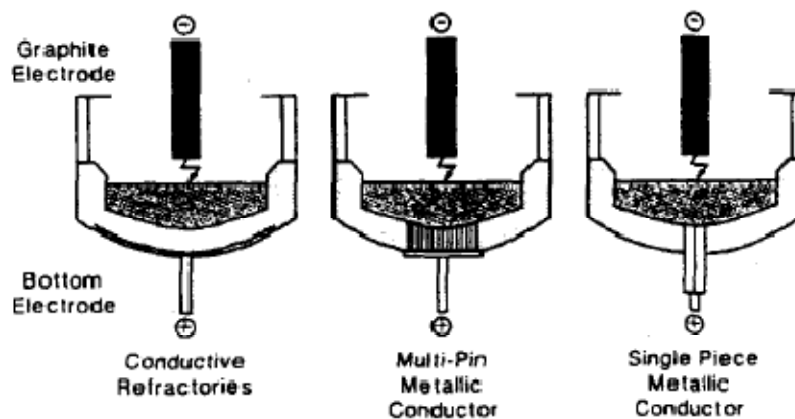
<sup>5</sup> Sir William Siemens

<sup>6</sup> high-power

استفاده می‌شوند. دوام الکترودهای کف این نوع کوره‌ها به ۵۰۰۰ ذوب یا بیشتر می‌رسد (شکل ۵-۱ و شکل ۵-۲).



شکل ۵-۱. نمایی از یک کوره قوس DC [۳]



شکل ۵-۲. طراحی الکترودهای کف برای کوره‌های DC [۴]

کاهش مصرف الکتروود مهم‌ترین مزیت کوره‌های قوس DC در مقایسه با کوره‌های قوس سه الکتروودی متداول است. اکسیداسیون الکتروود به علت جایگزینی یک الکتروود با سه الکتروود کمتر می‌شود. ایجاد قوس پایدارتر در مقایسه با کوره‌های AC ناشی از کاهش مصرف الکتروود است. گزارشات، کاهش ۵۰ تا ۶۰٪ مصرف الکتروود را نشان داده‌اند. مصرف الکتروود می‌تواند ۳ تا ۵٪ کمتر از کوره‌های AC باشد. سیلان جریان از کاتد کربنی به آن‌د کف کوره است. عملکرد پایدار الکتروود در کاتد ناشی از مصرف انرژی کمتر در این بخش است [۴].

توکیو استیل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ کوره قوس DC با ظرفیت ۱۳۰ تن و ۶۰ مگاوات استفاده کرد. این کوره سالانه

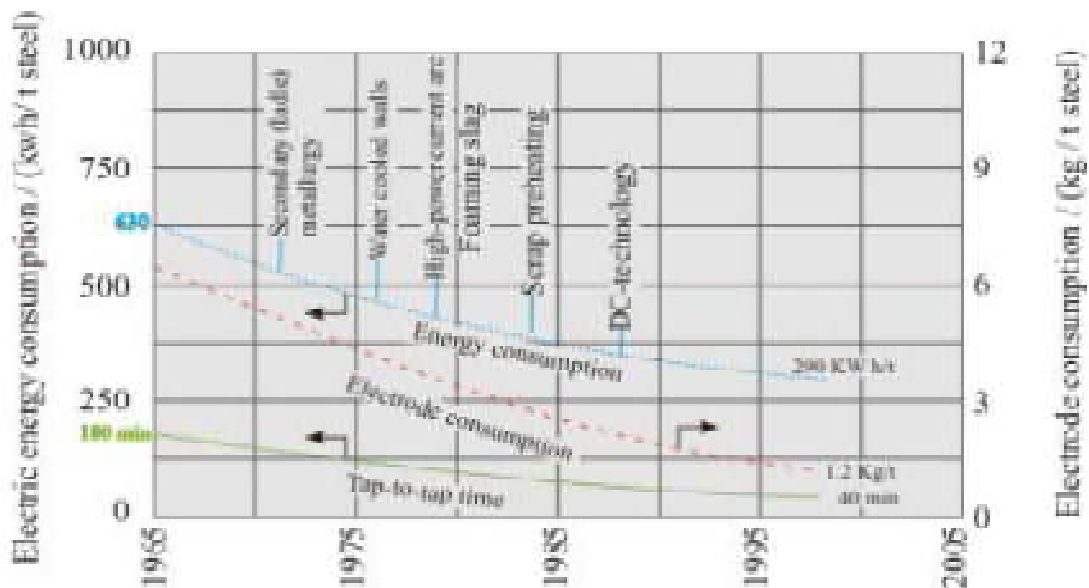
<sup>۱</sup> Tokyo Steel

یک میلیون تن فولاد تولید می‌کند. این کوره دارای یک الکتروود مرکزی و الکتروود کف (سرد شونده با آب) است.

مزایای بدست آمده برای این کوره عبارتند از:

- ۵۰٪ کاهش مصرف الکتروود
- ۵ تا ۱۰٪ کاهش مصرف توان
- کاهش شدید مصرف نسوز
- ذوب یکنواخت
- کاهش میزان نوسان<sup>۱</sup> و نصف شدن فرکانس نوسان
- تولید ۲۳ ذوب در هر روز [۴]

توسعه در تکنولوژی‌های EAF توسط فولاد سازی ثانویه حمایت شده است. شکل ۵-۳ روند توسعه فرآیندهای فولادسازی EAF را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مصرف انرژی از ۶۳۰ kWh/ton به ۲۹۰ kWh/ton فولاد رسیده است. زمان tap to tap از ۱۸۰ دقیقه به ۴۰ دقیقه کاهش یافته و مصرف الکتروود از حدود ۶/۲kg/ton به کمتر از ۱/۲kg/ton (در دوره نشان داده شده در شکل) کاهش یافته است [۵].

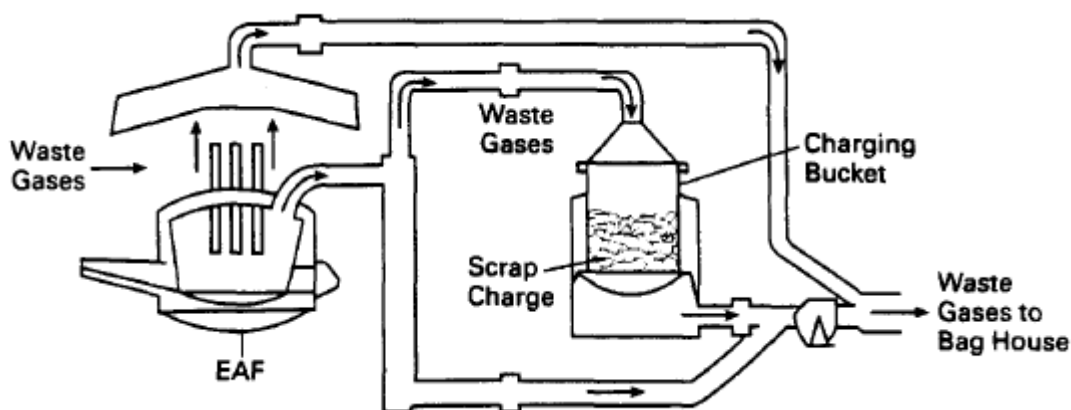


شکل ۵-۳. روند توسعه تکنولوژی در فولاد سازی به روش EAF [۵].

<sup>1</sup> Flicker

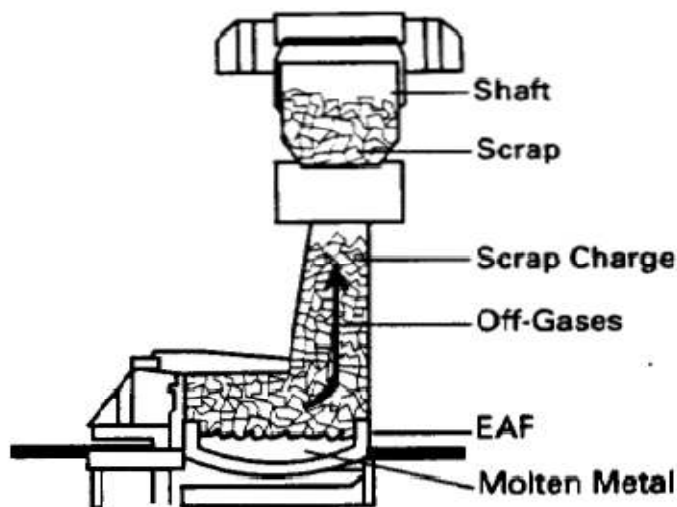
### ➤ پیشگرم کردن قراضه

در برخی کارخانه‌های فولاد، سیستم‌های پیشگرم کردن قراضه اجرا می‌گردد. یکی از روش‌های مرسوم فرستادن گازهای داغ خروجی از کوره به محفظه‌ای است که سبد شارژ قراضه در آن قرار می‌گیرد. میزان تبادل حرارت به عواملی چون سایز قراضه، سطح تماس، دمای گاز و مدت زمان تبادل حرارت بستگی دارد. این سیستم بصورت شماتیک در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



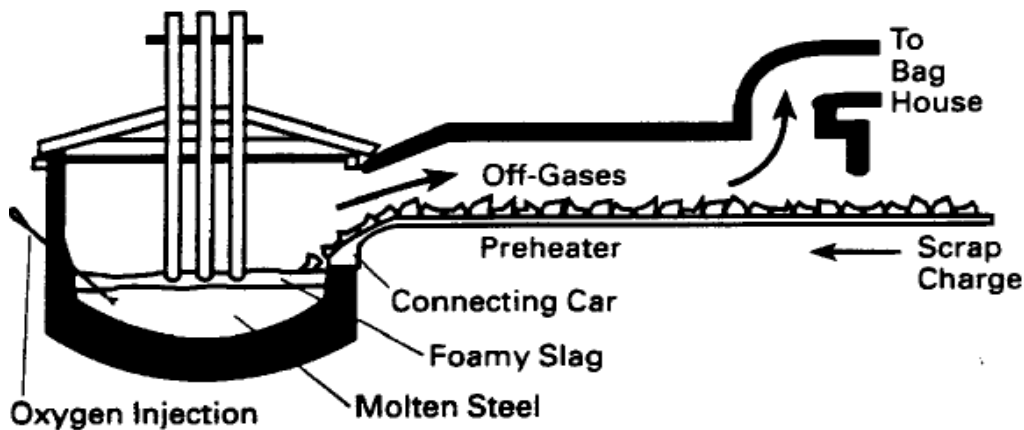
شکل ۴-۵. پیشگرم کردن قراضه در سبد شارژ

یکی از روش‌های جدید برای پیشگرم کردن قراضه استفاده از شافت Fuch است، که در شکل ۵-۵ این سیستم مشاهده می‌شود. این سیستم هم برای کوره‌های جریان مستقیم و هم جریان متناوب قابل استفاده است. شافت در بالای کوره نصب می‌شود، قراضه با سرعت کم در شافت پائین می‌آید و توسط گازهای داغ خروجی از کوره پیشگرم می‌شود.



شکل ۵-۵. پیشگرم کردن قراضه با شافت Fuch

در شکل ۵-۶ سیستم پیوسته کانستیل نشان داده شده است، که برای پیشگرم کردن قراضه استفاده می‌شود. در این سیستم قراضه توسط نوار نقاله به کوره شارژ می‌شود و گازهای داغ خروجی از کوره از روی قراضه‌ها عبور می‌کنند، و پس از تبادل حرارت مستقیم از داکت خارج می‌شوند.



شکل ۵-۶. سیستم پیشگرم قراضه کانستیل

پیشگرم کردن قراضه بصورت گسترده در ژاپن استفاده می‌شود، کاربرد گازهای داغ کوره برای پیشگرم کردن قراضه در امریکا موجب صرفه جویی  $0.16-0.20$  GJ/tonne و کاهش زمان tap to tap ۸ تا ۱۰ دقیقه شده است. مثال برجسته کاربرد پیشگرم کردن قراضه در شارژ پیوسته قراضه به کوره قوس در فرآیند کانستیل<sup>۱</sup> است. پیشگرم کردن قراضه توان مصرفی EAF را با استفاده از حرارت اتلافی به عنوان منبع انرژی، برای این عملیات کاهش می‌دهد. فرآیند کانستیل شامل نوار نقاله است که قراضه را از طریق تونل به EAF منتقل می‌کند. علاوه بر صرفه جویی انرژی، ظرفیت تولید تا ۳۳٪ می‌تواند افزایش و مصرف الکتروود نیز ۴۰٪ کاهش یابد. صرفه جویی الکتریکی  $0.22$  GJ/tonne و هزینه سرمایه‌گذاری  $3/2$  میلیون دلار برای ظرفیت ۵۵۰۰۰۰ تن تولید در سال است. صرفه جویی هزینه‌های سالانه نیز  $3/0$  دلار بر تن است و زمان برگشت سرمایه  $1/3$  سال است.

### ➤ نسوزهای مهندسی

نسوزها<sup>۲</sup> در EAF باید شرایط سختی مانند دمای بیش از  $1600^{\circ}\text{C}$ ، اکسیداسیون، شوک حرارتی، سایس و خوردگی را تحمل کنند. این شرایط سخت معمولاً موجب سایس ناخواسته نسوزها می‌شود. نسوزها می‌توانند با ریزساختار کنترل شده تولید شوند: ذرات آلومینا و میکرو حباب‌های مولایت پوشش داده شده بصورت یکنواخت با کربن و کاربید. نسوزها بصورت زینتر و ریختگی تولید می‌شوند و در اجزای مختلف واحد EAF (مانند کوره، کوره پاتیلی و ...) استفاده می‌شوند. نسوزها می‌توانند تراوشات پاتیل و تشکیل سرباره حین انتقال را کاهش دهند.

<sup>1</sup> Consteel

<sup>2</sup> Refractory



### ➤ عملیات airtight

مقادیر زیادی هوا وارد EAF می‌شود، حدود  $30000\text{m}^3$  در کوره ۱۶۵ تنی با زمان حرارت دهی ۱ ساعت. هوای با دمای محیط، نیتروژن هوا و اکسیژن واکنش نکرده در کوره حرارت داده می‌شوند و توسط دودکش‌ها در دمای بالا (حدود  $980^\circ\text{C}$ ) خارج می‌شوند، در نتیجه اتلاف حرارتی قابل توجهی رخ می‌دهد. براساس نتایج در مقیاس آزمایشگاهی با کوره ۶ تنی در مرکز تحقیقاتی آرسلور، مزیت پتانسیلی برای کوره صنعتی با فرآیند airtight شامل عملیات post-combustion و کنترل موثر خروجی دود حدود  $0.4\text{GJ/tonne}$  برای کوره صنعتی با مصرف الکتریسیته  $1/8\text{GJ/tonne}$  حدود  $0.8\%$  صرفه‌جویی در کاهش تلفات انرژی در دودکش‌ها شده است.

### ➤ کوره contiarc

کوره contiarc بصورت پیوسته با مواد در رینگ بین شافت مرکزی و دیواره خارجی کوره تغذیه می‌شود، که مواد شارژ شده بصورت پیوسته با بالا آمدن گاز فرآیند در جریان متقابل پیشگرم می‌شود، در حالی که مواد پیوسته از پایین حرکت می‌کنند. مزایای کوره contiarc:

- ۱- کاهش تلفات انرژی ( $0.8\text{GJ/tonne}$  کمتر از کوره های متداول)
- ۲- کاهش قابل توجه حجم گاز اتلافی و غبار که منجر به کاهش ظرفیت سیستم تمیزکننده گاز و کاهش مصرف توان الکتریکی می‌شود ( $0.91\text{GJ/tonne}$ )
- ۳- کاهش مصرف الکتروود (حدود  $0.9$  کیلوگرم بر تن کمتر از کوره‌های AC متداول)

### ➤ کنترل و مونیتورینگ گاز سوختنی

کاربرد VSD ها می‌تواند مصرف انرژی فن‌های گاز سوختنی را با کاهش تلفات در گاز سوختنی کاهش دهد. صرفه‌جویی الکتریسیته  $0.54\text{GJ/tonne}$  با دوره بازگشت سرمایه ۲ تا ۴ سال و هزینه‌های سرمایه‌گذاری  $3/1$  دلار بر تن برآورد شده است.

### ➤ خروج از کف بصورت خارج از مرکز

خروج از کف بصورت خارج از مرکز<sup>۱</sup> موجب خروج بدون سرباره، کاهش زمان tap to tap، کاهش مصرف نسوز و الکتروود و بهبود عمر پاتیل می‌شود. صرفه‌جویی انرژی  $0.54\text{GJ/tonne}$  برآورد می‌شود. هزینه اصلاح در واحدی در کانادا  $3/3$  میلیون دلار برای کوره با ظرفیت تولید سالانه  $690000$  تن یا  $5$  دلار به ازای هر تن و زمان برگشت سرمایه ۷ سال بوده است.

### ➤ کوره دو پوسته

کوره دوپوسته<sup>۲</sup> شامل دو محفظه EAF با سیستم تامین توان و قوس متداول است. ظرفیت تولید را با کاهش

<sup>1</sup> Eccentric bottom tapping

<sup>2</sup> Twin-shell

زمان tap to tap، افزایش و مصرف انرژی با کاهش تلفات حرارتی کاهش می‌دهد. در کوره دو پوسته در مقایسه با کوره تک پوسته<sup>۱</sup> ۰/۰۶۸GJ/tonne صرفه‌جویی می‌شود. هزینه‌های تولید ۲ دلار بر تن کمتر از کوره تک پوسته است و هزینه سرمایه‌گذاری ۹/۴ دلار بر تن بیش تر از کوره تک پوسته و زمان برگشت سرمایه ۳/۵ سال است.

### ➤ فرآیندها و تکنولوژی‌های توسعه یافته در جهت کاهش مصرف انرژی

در طول ۴۵ سال گذشته در فناوری فرآیند تولید فولاد به روش کوره قوس الکتریکی تحولات عظیمی رخ داده است. تزریق اکسیژن، بکارگیری متالورژی ثانویه، دیواره‌های خنک شونده با آب، قدرت ترانس بالا، پایش فرآیند با رایانه، سرباره پفکی، سقف خنک شونده با آب، استفاده از مشعل‌های سوخت-اکسیژن، تخلیه مذاب فولاد از کف، حفظ مقداری مذاب در کوره، کوره پاتیلی، تخلیه مذاب از کف بصورت خارج از مرکز، پایش گرم کردن قراضه، بکارگیری خنک‌کننده مسی در ناحیه سرباره و شارژ چدن مذاب در کوره‌های قوس الکتریکی از اقدامات اصلی این تحولات بوده است. در ادامه در فرآیندهای جدیدی شرح داده می‌شود.

#### • فرآیند کانستیل

این فرآیند اولین بار در ایالت متحده در دهه ۱۹۸۰ اجرا شد. پس از آن بویژه در سالهای اخیر، در تعدادی از کشورهای اروپایی، آسیا و ایالات متحده گسترده شده است. شماتیک فعالیت کانستیل (فولاد سازی پیوسته)<sup>۲</sup> بدین شرح است که کوره قوس الکتریکی با یک نقاله مخصوص تجهیز شده است که قراضه را به کوره با سرعت تنظیم شده منتقل و به درون حمام مذاب از طریق مدخل واقع در دیواره کوره شارژ می‌شود. در این روش، قراضه از طریق تونل با طول تقریباً ۳۰ متر عبور می‌کند. گازهای خروجی کوره در طول تونل با سرعت کم به سمت قراضه جریان دارند و قراضه را گرم می‌کنند و سپس گاز تمیز شده عبور می‌کند (شکل ۵-۷).

سرعت شارژ قراضه بستگی به توان قوس الکتریکی برای ثابت نگهداشتن دمای حمام مذاب در  $1590^{\circ}\text{C}$  - ۱۵۸۰ حین فرآیند شارژ دارد. در این مورد، مقدار ثابت حرارت بدست آمده توسط حمام مذاب از قوس معادل حرارت مصرفی برای ذوب قراضه و حرارت دادن ذوب تشکیل شده تا رسیدن به دمای حمام است.

پس از ذوب شدن کامل قراضه، مذاب تا رسیدن به دمای مورد نظر نهایی حرارت داده می‌شود و بارریزی آغاز می‌شود. قسمت مشخصی از ذوب و سرباره در کوره باقی می‌ماند. به تازگی استفاده از فلز داغ در کوره‌های کانستیل به مقدار زیاد استفاده می‌شود.

فرآیند کانستیل تعدادی مزیت مهم دارد. قوس‌ها در سطح حمام قرار می‌گیرند و حین حرارت دهی درون سرباره پفکی فرو می‌روند. بنابراین موجب افزایش قابل توجه پایداری و بهره‌وری می‌شود. سطح نویزهای صوتی شدیداً کاهش می‌یابد. غلظت FeO در سرباره نیز کاهش می‌یابد. عمر پانل‌های آبگرد به علت حذف کامل مراحل

<sup>1</sup> Single-shell

<sup>2</sup> Consteel

حرارت دهی (زمانی که دیواره‌های کوره و سقف در معرض تابش مستقیم قوس‌های باز<sup>۱</sup> قرار می‌گیرند)، افزایش می‌یابد (به علت این که نیازی به باز شدن سقف برای شارژ قراضه نیست و شکست الکتروود حذف می‌شود). به علت اینکه کوره‌های کانستیل در فشار منفی زیر سقف کار می‌کنند، امکان انتشار گاز- غبار کنترل نشده در فضای کارگاه از طریق شیارهای الکتروود وجود ندارد. فاکتور مورد بحث دیگر، کاهش هزینه‌های سیستم تهویه گازهای خروجی است.

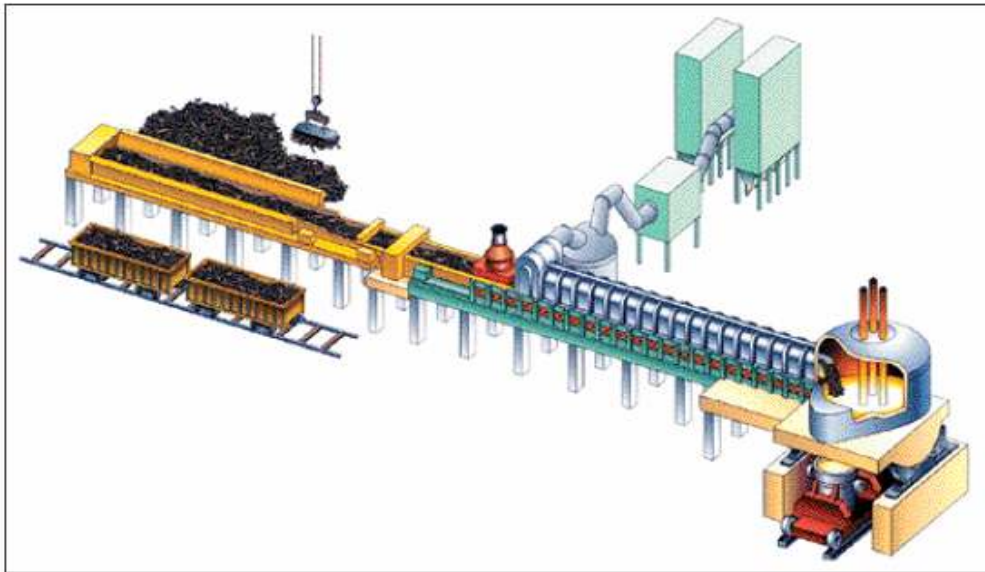
بهره‌وری عملکرد کوره‌های کانستیل موجود به مقدار ناچیزی از کوره‌های قوس الکتریکی پیشرفته با توان بالا، بویژه نسل جدید کوره‌ها کمتر است. در کوره‌های مرسوم، بیشتر قراضه با قوس الکتریکی که دمای آن  $5500^{\circ}\text{C}$  -  $4500$  بالاتر از نقطه ذوب آهن است، ذوب می‌شود. مشعل‌های گاز- اکسیژن نیز در ذوب قراضه در بیرون کوره سهیم‌اند. در فرآیند کانستیل، قراضه ذوب شده با قوس در تماس نیست.

با نصب ۸ عدد کانستیل در امریکای شمالی تعداد این فرآیند به ۳۵ عدد رسیده است. در این فرآیند شارژ بصورت اتومات و پیوسته به EAF بصورت پیشگرم شده وارد می‌شود (شکل ۵-۸). شارژ پیشگرم شده توسط فولاد مذاب ذوب می‌شود. مزیت کلیدی در مقایسه با فرآیندهای EAF مرسوم این است که قراضه توسط قوس الکتریکی ذوب می‌شود. مزایای دیگر این فرآیند در مقایسه با تکنولوژی‌های EAF پیشرفته دیگر عبارتند از:

- صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی
- نیاز به توان کمتر برای سطح یکسان تولید
- کاهش قابل توجه در اختلالات الکتریکی در شبکه
- مصرف الکتروود کمتر و کاهش شکست الکتروود
- کاهش هزینه‌ها برای نیروی انسانی، تدارکات، نگهداری و مدیریت مواد زاید
- ۱-۲٪ افزایش در بازده قراضه

---

<sup>1</sup> Open arc



شکل ۵-۷. دیاگرام شماتیک حرارت دادن قراضه در نقاله فرآیند کانستیل [۶]



شکل ۵-۸. نمایی از فرآیند کانستیل [۷]

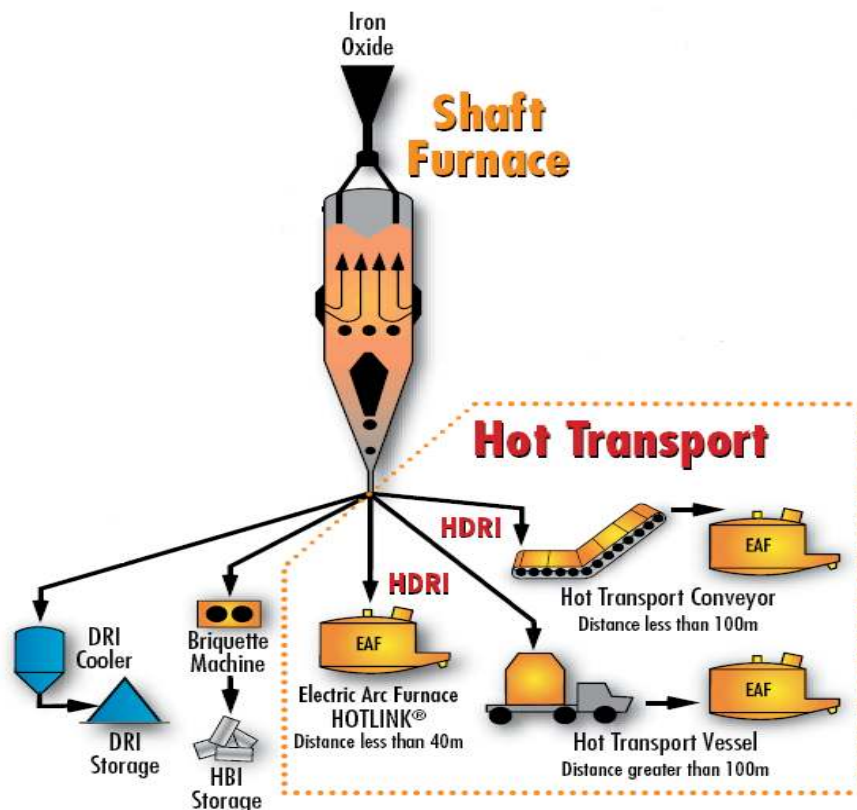
در سال ۲۰۰۷ شرکت SOVEL از زیرمجموعه‌های گروه SIDENOR از فرآیند کانستیل در یونان استفاده کرد. نتایج استفاده از این فرآیند در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. کاربرد کانستیل موجب افزایش ظرفیت تولید و کاهش مصرف انرژی الکتریکی شد.

جدول ۵-۱. مقایسه اطلاعات قبل و بعد از نصب کانستیل [۸]

Parameters	Before	After
Tap- tap time (min)	56	48
Power-on time (min)	41	40
Power-off time (min)	15	8
Productivity (tph)	138	160
Energy consumption (kWh/ton)	430	395
Oxygen consumption (Nm <sup>3</sup> /ton)	32	32
Natural gas consumption (Nm <sup>3</sup> /ton)	4	0
Carbon (kg/ton)	10	18
Yield (%)	87	88
FeO (%)	37	23
Average power (MW)	81	77
Electrode consumption (kg/ton)	1.77	1.75
Refractory delta -roof life (heats)	300	200
Mark point (t/h/MW)	1.68	2.14

#### • شارژ DRI گرم

در کشورهای نظیر ایران، عربستان، قطر، ونزوئلا، مکزیک و مالزی که کوره های قوس الکتریکی با شارژ ۹۰٪ آهن اسفنجی بهره‌برداری می شوند، در دوره مشابه میزان مصرف انرژی از ۸۵۰ به ۶۲۰ کیلووات ساعت بر تن، مدت زمان بین دو تخلیه از ۲۱۰ به ۷۹ دقیقه و میزان مصرف الکتروود نیز از ۶/۵ به ۲/۶ کیلوگرم بر تن فولاد کاهش یافته است و هنوز راه حل‌های دیگری وجود دارد که مصارف انرژی، و زمان بین دو تخلیه و به عبارت دیگر بهره‌وری کوره‌های قوس الکتریکی و قیمت تمام شده فولاد کاهش پیدا کند. یکی از راه‌حل‌های مهم و مؤثر، شارژ گرم آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی است. در شکل ۵-۹ گزینه‌های مختلف تولید و شارژ خروجی محصولات واحد تولید آهن اسفنجی مشاهده می شود [۹]. همانطوری که در شکل دیده می شود شارژ آهن اسفنجی گرم در کوره‌های قوس الکتریکی بصورت مستقیم، با نوار نقاله جعبه‌دار و انتقال با بونکر عایق صورت می‌پذیرد.



شکل ۵-۹. روش‌های مختلف انتقال محصولات واحد احیای مستقیم به کوره قوس الکتریکی [۹]

شارژ آهن اسفنجی گرم اولین بار در فولاد اسار هند، با استفاده از بونکر عایق در سال ۱۹۹۹ شروع شد. این کارخانه دارای ۵ مدول آهن اسفنجی میدرکس به ظرفیت کل ۵/۵ میلیون تن در سال و چهار کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی با جریان مستقیم و قدرت ترانس ۱۶۰ مگا ولت آمپر می‌باشد. خروجی آهن اسفنجی سرد و گرم این شرکت به ترتیب ۴۰ و ۶۰ درصد است. اولین آزمایش شارژ آهن اسفنجی گرم با درجه حرارت  $650^{\circ}\text{C}$  در این کارخانه با استفاده از بونکر عایق ۴۵ تنی صورت پذیرفت. بعد از مشاهده نتایج مثبت، بونکر ۴۵ تنی دوم ساخته و بکار گرفته شد و طراحی بونکر ۹۰ تنی شروع شد. هم اکنون ۲ بونکر ۴۵ تنی و ۵ بونکر ۹۰ تنی در حال بهره‌برداری است. درجه حرارت تخلیه آهن اسفنجی  $650^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  است. اندازه گیری نشان داد که افت حرارت  $^{\circ}\text{C}$  ۵۰ در ساعت است. با شارژ بونکر ۴۵ و ۹۰ تنی مدت زمان بین دو تخلیه از ۷۲ به ۶۶ دقیقه کاهش یافت [۱۰]. در ذوب‌های با آهن اسفنجی گرم ۹۰ و ۱۳۵ تنی به ترتیب ۶۰ و ۹۰ کیلووات ساعت انرژی به ازای هر تن فولاد مذاب صرفه‌جویی می‌شود. با استفاده از شارژ ۱۰۰٪ آهن اسفنجی گرم صرفه‌جویی انرژی به ۱۲۰ کیلووات ساعت بر تن بود. در شرایط کنونی با شارژ ۳۶ درصد، ۶۰٪ شارژ گرم آهن اسفنجی با دمای  $675^{\circ}\text{C}$  و ۴٪ قراضه میزان مصرف انرژی ۵۱۵ کیلووات ساعت بر تن فولاد مذاب است. مدت زمان بین دو تخلیه نیز به ۶۰ دقیقه کاهش یافته است. هدف آتی این شرکت شارژ آهن اسفنجی گرم به میزان ۷۵٪ در EAF است.

در بزرگترین واحد تولید آهن اسفنجی دنیا در عربستان انتقال آهن اسفنجی توسط نوار نقاله مکانیکی انجام

می‌شود. ظرفیت کوره قوس این واحد ۱۵۰ تن و تولید سالانه آن ۱/۴ میلیون تن است. درجه حرارت تخلیه آهن اسفنجی  $750^{\circ}\text{C}$  و ظرفیت تغذیه آهن اسفنجی ۲۵۰ تن در ساعت است. در شکل ۵-۱۰ واحد آهن اسفنجی مدول E و سیستم نوار نقاله جعبه‌دار آهن اسفنجی گرم حدید مشاهده می‌شود [۱۱]. در این واحد با شارژ ۱۰۰٪ آهن اسفنجی  $850^{\circ}\text{C}$  میزان مصرف انرژی ۴۰۰ کیلووات ساعت بر تن و مدت زمان عبور جریان ۴۰ دقیقه به ثبت رسیده است.



شکل ۵-۱۰. انتقال گرم آهن اسفنجی توسط نقاله در فولاد حدید عربستان

در جدول ۵-۲ فهرستی از شرکت‌ها به همراه ظرفیت شارژ گرم آهن اسفنجی ارائه شده است. در شکل ۵-۱۱ مقایسه میزان مصرف انرژی و انتشار گاز  $\text{CO}_2$  به ازای هر تن فولاد مذاب در کوره قوس الکتریکی با ۸۰٪ آهن اسفنجی سرد و گرم و دیگر ترکیبات شارژی مشاهده می‌شود [۱۲]. جایگزینی ۸۰٪ آهن اسفنجی سرد با ۸۰٪ آهن اسفنجی گرم منجر به کاهش ۱/۵ گیگاژول مصرف انرژی ویژه می‌شود.

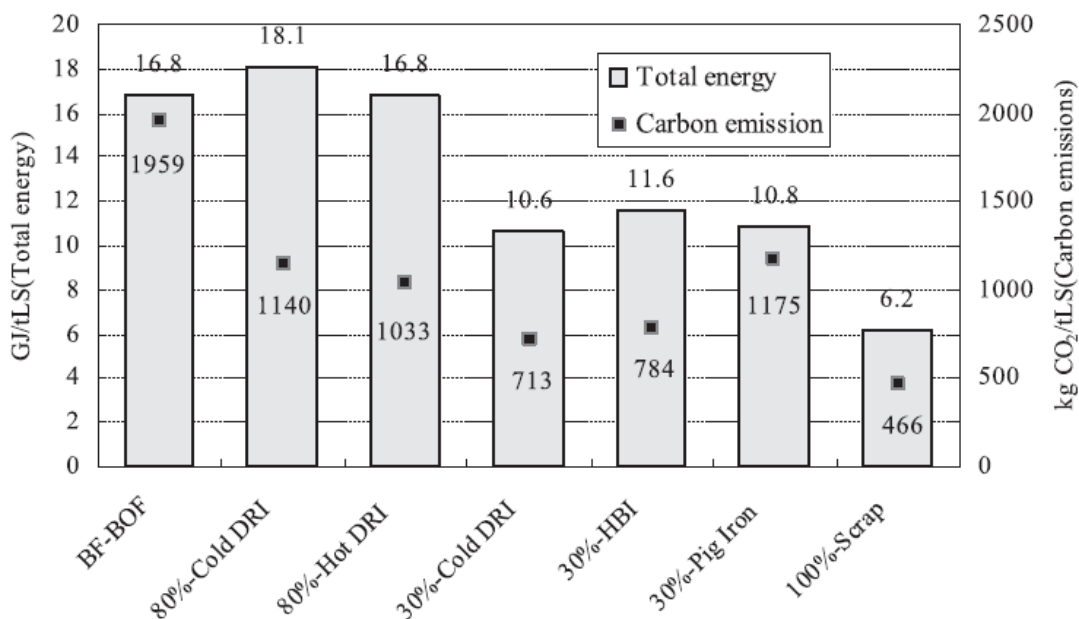
جدول ۵-۲. ظرفیت شارژ گرم آهن اسفنجی نصب شده

installation	Capacity T/hr	Temperature °C	Length m	Material transported
Hadeed, Saudi Arabia	250	750	95	DRI, Fines, Lump
Posco, S Korea	210	850	151	HBI
Posco, S Korea	400	800	175	HBI
Posco, S Korea	22	1000	46	DRI, Fines, Lump
Former CAL, Trinidad	140	900	67	Fines
Kwinana, Australia	195	900	56	Fines
Megasteel, Malaysia	3*400	850	10.5	HBI and DRI
ESISCO, Egypt	400	800	36	DRI, Fines, Lump
Sidor-Matesi, Venezuela	4*124	750	11	HBI

مزایای شارژ گرم آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی به شرح زیر می‌توان خلاصه نمود:

- به دلیل کاهش زمان بین دو تخلیه، بهره‌وری کوره قوس الکتریکی ۱۵ تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد.
- میزان مصرف انرژی الکتریکی  $120-140 \text{ kWh/t}$  کاهش می‌یابد.
- مصرف الکتروود گرافیتی  $0/5-0/6$  کیلوگرم بر تن فولاد مذاب کاهش می‌یابد.
- میزان انتشار گاز  $\text{CO}_2$  ۱۰٪ کاهش می‌یابد.
- مصرف ویژه نسوز ۲-۱/۸ کیلوگرم بر تن فولاد مذاب کاهش می‌یابد.
- تلفات حرارتی در حین انتقال با بونکر کمتر از  $5^\circ\text{C}$  در ساعت است.
- قیمت تمام شده فولاد به میزان ۸ تا ۱۰ دلار بر تن فولاد کاهش می‌یابد.
- در حین شارژ مستقیم آهن اسفنجی گرم، اکسیداسیون مجدد و خرد شدن و کاهش درجه فلزی رخ نمی‌دهد.

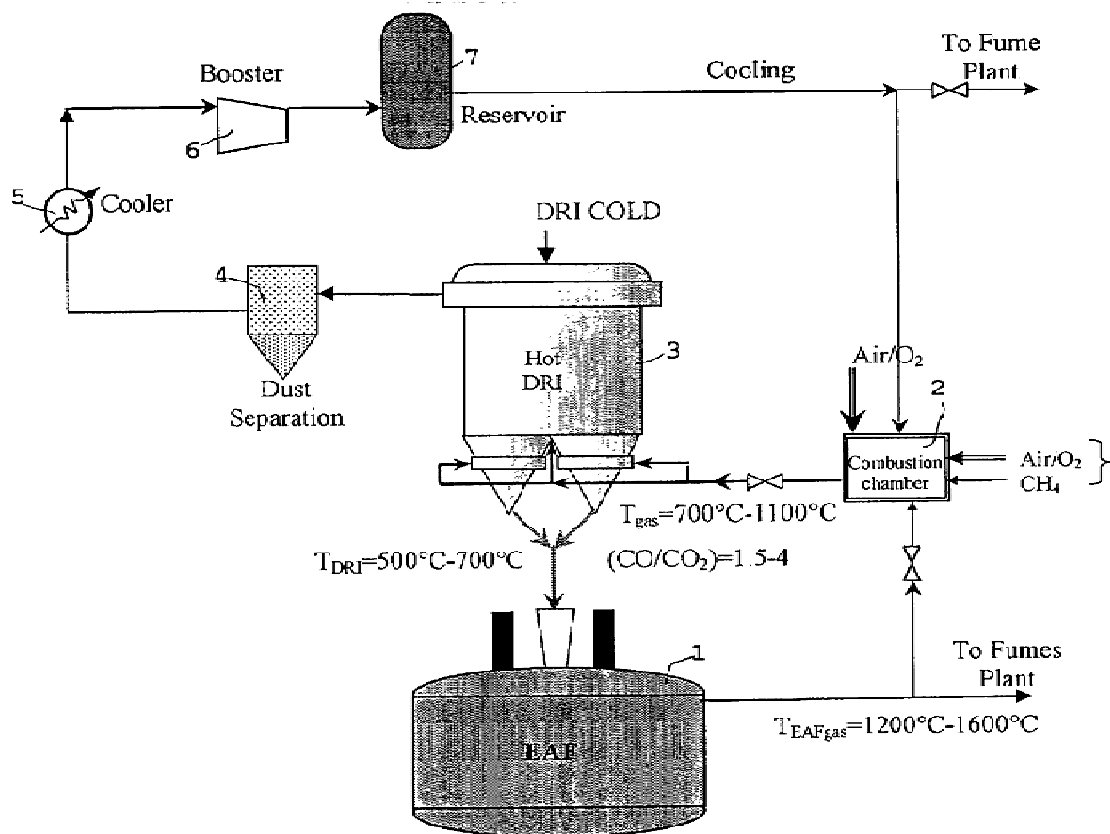




شکل ۵-۱۱. مقایسه مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> در فرآیندهای مختلف تولید [۱۳]

#### • پیشگرم آهن اسفنجی

در شکل ۵-۱۲ فرآیندهای لازم برای پیشگرم کردن آهن اسفنجی بصورت شماتیک نشان داده شده است. از آنجا که دود خروجی از کوره شامل مقادیری CO است، می‌تواند در محفظه احتراق حرارت لازم برای پیشگرم کردن آهن اسفنجی را فراهم آورد. گازهای داغ خروجی از کوره با دمای حدود ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ °C وارد محفظه احتراق می‌شوند و پس از ترکیب با هوا دمای آن تا حدی کاهش می‌یابد. در صورت نیاز، متان و اکسیژن نیز در محفظه احتراق تزریق می‌شود تا نسبت CO/CO<sub>2</sub> افزایش یابد. گازهای خروجی از محفظه احتراق در تماس مستقیم با آهن اسفنجی قرار می‌گیرند، بنابراین نسبت CO/CO<sub>2</sub> باید تنظیم شود تا از اکسایش آهن جلوگیری شود. گازهای خروجی از محفظه احتراق از پائین گرمکن وارد و از بالای آن خارج می‌شوند.



شکل ۵-۱۲. پیشگرم کردن آهن اسفنجی

#### • کاربرد لاستیک‌های فرسوده در کوره قوس الکتریکی

لاستیک‌های فرسوده خودرو منبع مناسب سوخت جهت ذوب فولاد در کوره‌های قوس الکتریکی هستند. لاستیک‌های خودرو به قراضه فولاد بعنوان منابع انرژی شیمیایی جهت جایگزینی ذغال، کک و گاز طبیعی افزوده می‌شود. کربن و هیدروژن لاستیک‌ها انرژی سوختی را تامین کرده و نوار سیم لاستیک قسمتی از شارژ فلزی را تشکیل می‌دهد. هنگام احتراق لاستیک‌ها به منظور کامل و تمیز سوختن به درون کوره اکسیژن دمیده می‌شود. لاستیک‌های فرسوده در حین فرآیند فولادسازی کاملاً می‌سوزند و هیچ گونه انتشار آلاینده مشاهده نمی‌شود و بالعکس باعث کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌گردد. لاستیک‌ها به راحتی انتقال می‌یابند و در کنار انبار قراضه نگهداری می‌شوند. در بعضی ایالت‌های امریکا مسئولین، برنامه‌های تشویقی برای مصرف کنندگان لاستیک‌های فرسوده دارند. بعنوان مثال در خرید تجهیزات برای آنها تخفیف قائل می‌شوند و مبلغی را تحت عنوان خالی و تمیز کردن محل جمع آوری لاستیک‌های فرسوده پرداخت می‌کنند. ارزش حرارتی لاستیک‌های فرسوده  $15800 \text{ BTU}$  بر پوند بوده و به میزان ۲۰٪ از ارزش حرارتی ذغال بالاتر است. ارزش حرارتی ۲۰ پوند لاستیک فرسوده بطور تقریبی معادل  $92 \text{ kW}$  انرژی برقی می‌باشد. با بکارگیری لاستیک‌های فرسوده جمع‌آوری آنها روی خاک انجام نگرفته و محیط زیست پاک می‌شود. ضمناً نیاز انرژی به منابع نظیر برق، ذغال و گاز طبیعی کاهش می‌یابد. جایگزینی لاستیک

های فرسوده بجای ذغال انتشار آلاینده ها را نسبت به پروسه های دمای بالا کاهش می دهد. بکارگیری لاستیک ها در کوره های قوس الکتریکی منجر به کاهش هزینه های انرژی برق و شیمیائی می گردد و انتشار آلاینده ها از فرآیند، کاهش پیدا می کند. لذا صرفه جویی قابل توجهی در هزینه های انرژی بدست می آید و مقدار قابل توجهی قراضه فولاد بازیافت می گردد. ۲۵٪ وزن لاستیک های فرسوده کامیونها را نوار و سیم فولادی تشکیل می دهد. این مقدار برای لاستیک های خودرو سواری ۱۰٪ وزن می باشد. مقدار زیادی لاستیک های فرسوده را می توان در پروسه کوره قوس الکتریکی به مصرف رساند. در دنیا سالانه بیش از یک میلیارد حلقه لاستیک از رده خارج می شود. در امریکا سالانه بیش از ۲۵۰ میلیون حلقه لاستیک از ماشین ها جدا می گردند.

#### • استفاده از قراضه خرد شده

تولید فولاد از مواد اولیه دارای کارایی کمتری بوده و اثرات نامطلوب زیست محیطی بسیاری بدنبال دارد. در صورتی که با استفاده از آهن قراضه انرژی کمتری مصرف می شود و میزان تولید CO<sub>2</sub> نیز کاهش می یابد. برای بهره برداری بهتر از قراضه از شردر<sup>۱</sup> (دستگاه خردکن قراضه) برای خرد کردن قراضه استفاده می شود. این دستگاهها در ظرفیت های مختلف ساخته می شوند. بعضی از انواع شردر علاوه بر خرد کردن قراضه، محصولات را فشرده نیز می کنند. شردر برای خرد کردن آهن آلات از چکش ها، رنده ها، شبکه ها و لاینرها، که درون این دستگاه تعبیه شده است، استفاده می کند.

مزایای استفاده از قراضه خرد شده عبارتند از:

- کاهش زمان پالایش و صرفه جویی در مصرف اکسیژن کوره
- کاهش زمان شارژ همراه با صرفه جویی در حرارت کوره
- پر شدن سریعتر کوره با تعداد سبد کمتر
- افزایش راندمان ذوب
- کاهش عمده در رسوبات حاصل از فرآیند ذوب (کاهش سرباره ذوب)
- قابلیت افزایش تولید سالانه
- حذف خاک و آشغال از آهن
- ثبات دانسیته بالا و همگن سازی محصول

در شکل ۵-۱۳ تصویر یک شردر و خط تولید قراضه خرد شده مشاهده می شود. برای راه اندازی یک خط تولید فضای نسبتاً زیادی لازم است.

<sup>1</sup> shredder



شکل ۵-۱۳. خط تولید قراضه خرد شده

در جدول ۵-۳ مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر<sup>۱</sup> ذکر شده است. از قبیل توان موتور دستگاه، حداکثر اندازه قراضه و میزان تولید قراضه خرد شده در هر ساعت است. ، به منظور استفاده از این نوع شردر در ، از آنجا که متوسط قراضه مصرفی حدود ۳۰ تن است، دستگاه با توان ۷۵۰ کیلو وات کار خواهد کرد. با توجه به این نکته، محاسبات مربوط به صرفه‌جویی اقتصادی استفاده از قراضه خرد شده در کارخانه مورد بررسی در گزارش حاضر انجام شده است.

<sup>۱</sup> BECKER

جدول ۵-۳. مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر

Driving Power (KW)	Operation Width (mm)	Output (ton/hr)
750	2000	20-35
1000	2000	25-45
1120	2000	40-60
1250	2500	60-80

### • احتراق با دمای بالای هوا

سوخت‌های فسیلی مهمترین منبع تامین انرژی در جهان هستند. نگرانی کلی در مورد استفاده از این سوخت‌ها نشأت گرفته از محدود بودن این منابع و آلودگی محیط زیست است. براین اساس به منظور کاهش مصرف سوخت و آلودگی محیط زیست، تکنولوژی جدیدی تحت عنوان احتراق با دمای بالای هوا<sup>۱</sup> (HITAC) به کار گرفته شده است. در محفظه‌های احتراق همواره مقدار زیادی گرما از طریق گازهای احتراق از دودکش تلف می‌شود. جهت افزایش بازده کوره‌ها، می‌توان گرمای ناشی از محصولات احتراق را دوباره به سیستم بازگرداند. همچنین توسط این گرمای بازیافت شده، هوای مورد نیاز جهت عمل احتراق نیز پیشگرم می‌شود. تکنولوژی فوق برای اولین بار توسط وینبرگ<sup>۲</sup> ارائه گردید. بازگرداندن محصولات احتراق<sup>۳</sup> و مخلوط کردن آن با هوای مورد نیاز احتراق، سبب کاهش غلظت اکسیژن مصرفی و در نتیجه کاهش تولید NO<sub>x</sub> می‌شود. از طرفی توسط این روش مقدار زیادی انرژی گرمایی به سیستم بازگردانده می‌شود که این خود باعث کاهش مصرف سوخت می‌گردد. این تکنولوژی به نام احتراق هوا با دمای بالا یا HITAC نامیده می‌شود. از آنجایی که در غلظت‌های کم اکسیژن، شعله‌ای در حین احتراق دیده نمی‌شود، گاهی به آن اکسیداسیون بدون شعله<sup>۴</sup> یا FLOX نیز گفته می‌شود [۱۴].

### ➤ بهبود شرایط کارکرد مشعل‌های پیشگرمکن

یکی از کاربردهای مهم مشعل‌ها در صنعت فولاد پیشگرم کردن پاتیل است. در شکل ۵-۱۴ تصویر شماتیک سیستم پیشگرمکن پاتیل نشان داده شده است. دلایل پیشگرم کردن پاتیل عبارتند از:

۱- دمای مذاب تا جای ممکن بالا نگه داشته شود، یک پاتیل سرد موجب کاهش دمای مذاب می‌شود و در نتیجه قسمتی از مذاب در پاتیل جامد می‌شود. که منجر به کاهش تولید و افزایش هزینه نگهداری پاتیل می‌شود.

۲- کاهش شوک‌های حرارتی، این شوک‌ها به نسوزهای پاتیل آسیب وارد می‌کنند.

۳- از بین بردن رطوبت، رطوبت برای مذاب بسیار مضر است. هر گونه آبی که در پاتیل وجود داشته باشد به

<sup>1</sup> High temperature of air combustion

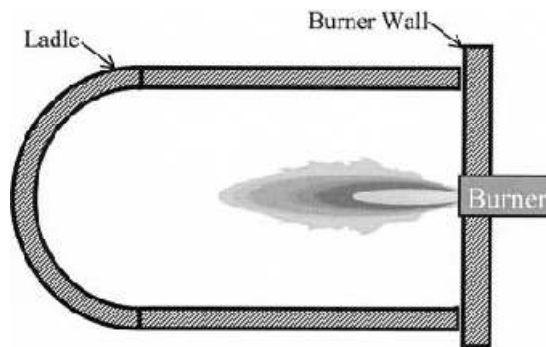
<sup>2</sup> Weinberg

<sup>3</sup> Gas recirculation

<sup>4</sup> Flameless oxidation

سرعت به بخار تبدیل می‌شود و به تجهیزات آسیب وارد می‌کند.

۴- بهبود فرآیند تولید، بدون پیشگرم کردن، دمای پاتیل بطور قابل توجهی، از یک ذوب تا ذوب بعدی تغییر می‌کند. این تغییرات بستگی به مدت زمان بین دو ذوب، وزن مذاب و شرایط محیطی کارخانه دارد [15].



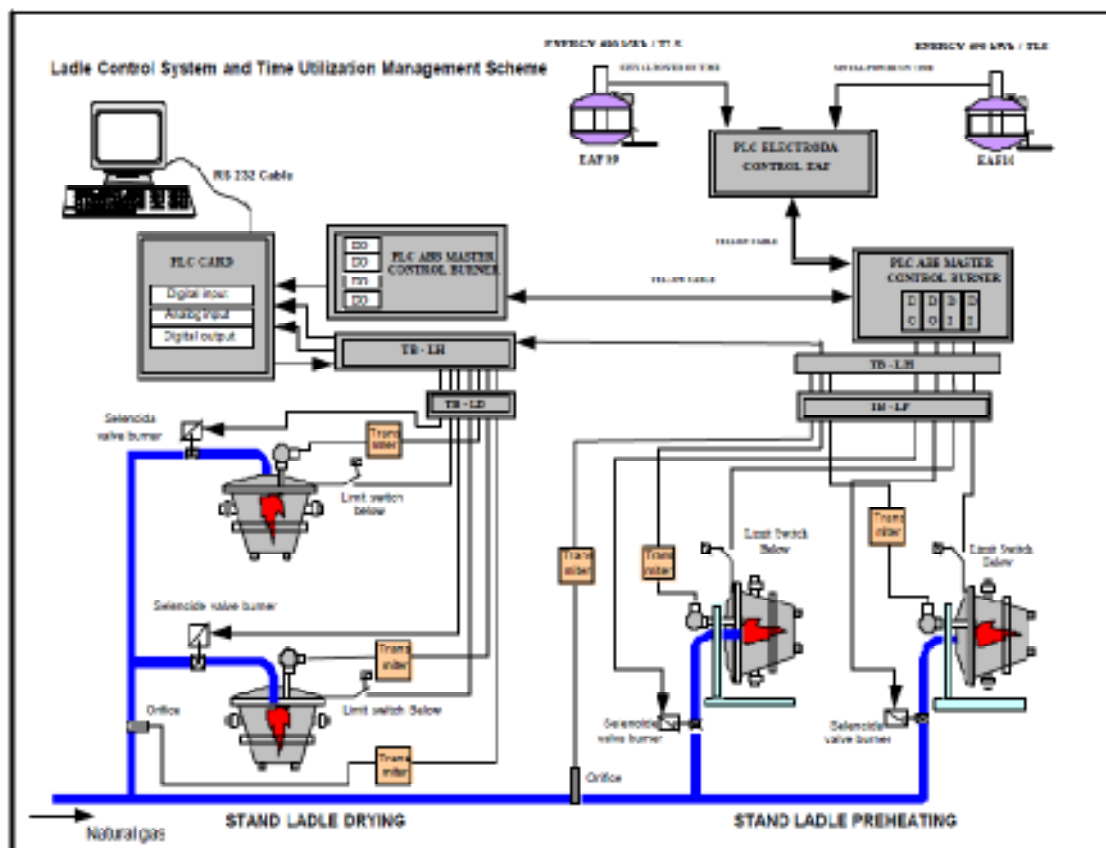
شکل ۵-۱۴. تصویر شماتیک سیستم پیشگرمکن پاتیل

برای بهبود فرآیند پیشگرم کردن پاتیل لازم است سیستم کنترل مشعل‌ها نصب شود تا زمان روشن بودن مشعل‌ها کنترل شود و تلفات انرژی به حداقل برسد. در جدول ۴-۵ مقادیر انرژی صرفه‌جویی شده برای استفاده از سیستم کنترل مشعل‌ها در SSP<sup>۱</sup> (یکی از بزرگترین مشتریان گاز طبیعی) ارائه شده است. در شکل ۵-۱۵ تصویر شماتیک سیستم کنترل مشعل‌های کوره پاتیلی نشان داده شده است [16].

جدول ۴-۵. مقادیر انرژی صرفه‌جویی شده برای استفاده از سیستم کنترل مشعل‌های پیشگرمکن در SSP

No	Item	Specific Energy Consumption Nm <sup>3</sup> /ton			Energy saving opportunity Nm <sup>3</sup> /yr	Saving Target		
		Actual	Standard	Difference		Nm <sup>3</sup> /ton	Nm <sup>3</sup> /yr	Mill Rp./yr
1.	Drying	2.18	0.68	1.5	910,536	1.2	728,429	425.95
2.	Preheating	1.16	0.45	0.71	430,987	0.568	344,790	201.617
TOTAL saving target					1,341,523	1.768	1,073,218	627,568

<sup>1</sup> Slab Steel Plant

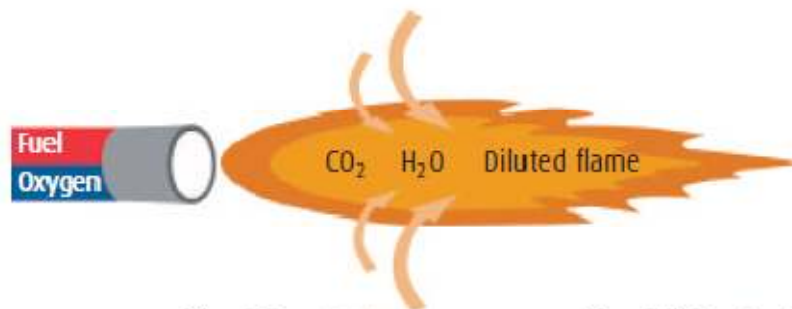


شکل ۵-۱۵. تصویر شماتیک سیستم کنترل مشعل‌های کوره پاتیلی

### ➤ استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت به منظور پیشگرمایش پاتیل‌ها

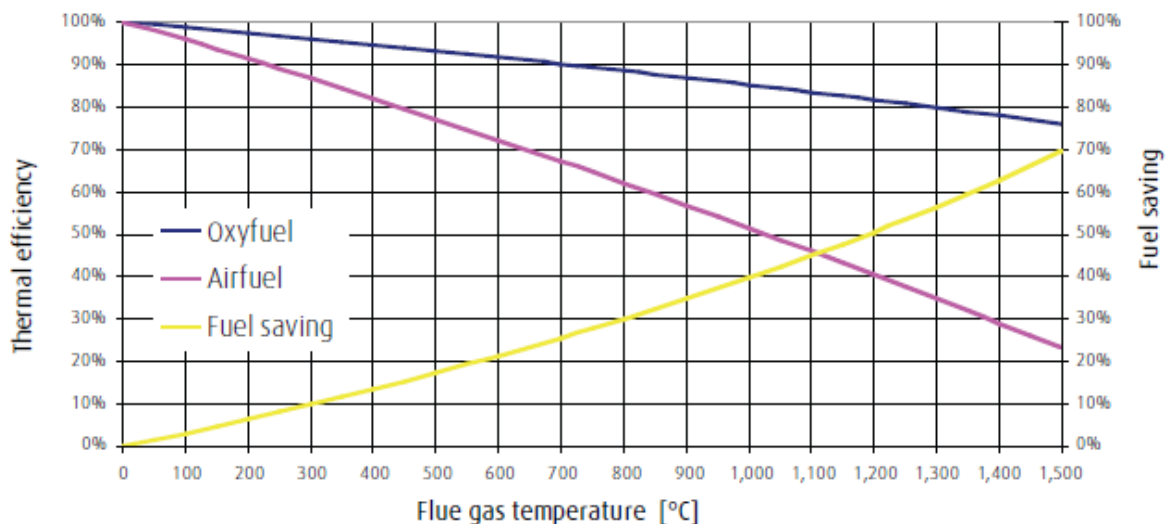
امروزه پاتیل‌ها تا دماهای بالای  $1100^{\circ}\text{C}$  پیشگرم می‌شوند، رسیدن به این دماهای بالا با استفاده از مشعل‌های هوا/سوخت میسر نمی‌باشد. برای رسیدن به دماهای بالا از مشعل‌های اکسیژن/سوخت استفاده می‌شود که در مدت زمان کوتاه‌تر و با راندمان بالاتر، انرژی لازم را فراهم می‌کنند. این مشعل‌ها موجب صرفه‌جویی تا ۷۰ درصد در مصرف سوخت و کاهش دود خروجی، در مقایسه با مشعل‌های هوا/سوخت می‌شوند [15].

شعله مشعل‌های هوا/سوخت، به علت احتراق سوخت با هوا شامل مقداری نیتروژن است، که بخشی از انرژی سوخت صرف حرارت دادن به آن می‌شود. در شکل ۵-۱۶ واکنش احتراق سوخت با اکسیژن در شعله مشعل مشخص شده است.



شکل ۵-۱۶. واکنش احتراق در شعله مشعل اکسیژن/سوخت

در شکل ۵-۱۷ عملکرد مشعل‌های هوا/سوخت و اکسیژن/سوخت مقایسه شده است. در این نمودارها راندمان حرارتی و مقدار سوخت صرفه‌جویی شده بر حسب دمای گازهای خروجی از دودکش، برای هر دو نوع مشعل مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، راندمان حرارتی مشعل اکسیژن/سوخت بطور کلی بیشتر از راندمان مشعل هوا/سوخت است و هرچه دمای دود خروجی بیشتر باشد، اختلاف راندمان‌ها بیشتر می‌شود. بعنوان مثال راندمان مشعل اکسیژن/سوخت در دمای دود  $1100^\circ\text{C}$  حدود ۸۴ درصد است، در صورتیکه راندمان مشعل هوا/سوخت حدود ۴۸ درصد است. مقدار سوخت صرفه‌جویی شده با افزایش دمای دود افزایش می‌یابد. اگر دمای دود  $1200^\circ\text{C}$  باشد، مصرف سوخت ۵۰ درصد کاهش می‌یابد [17]] البته استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت به دلیل استفاده از اکسیژن باعث تحمیل هزینه‌های تولید اکسیژن به سیستم خواهد شد.



شکل ۵-۱۷. مقایسه عملکرد مشعل‌های هوا/سوخت و اکسیژن/سوخت

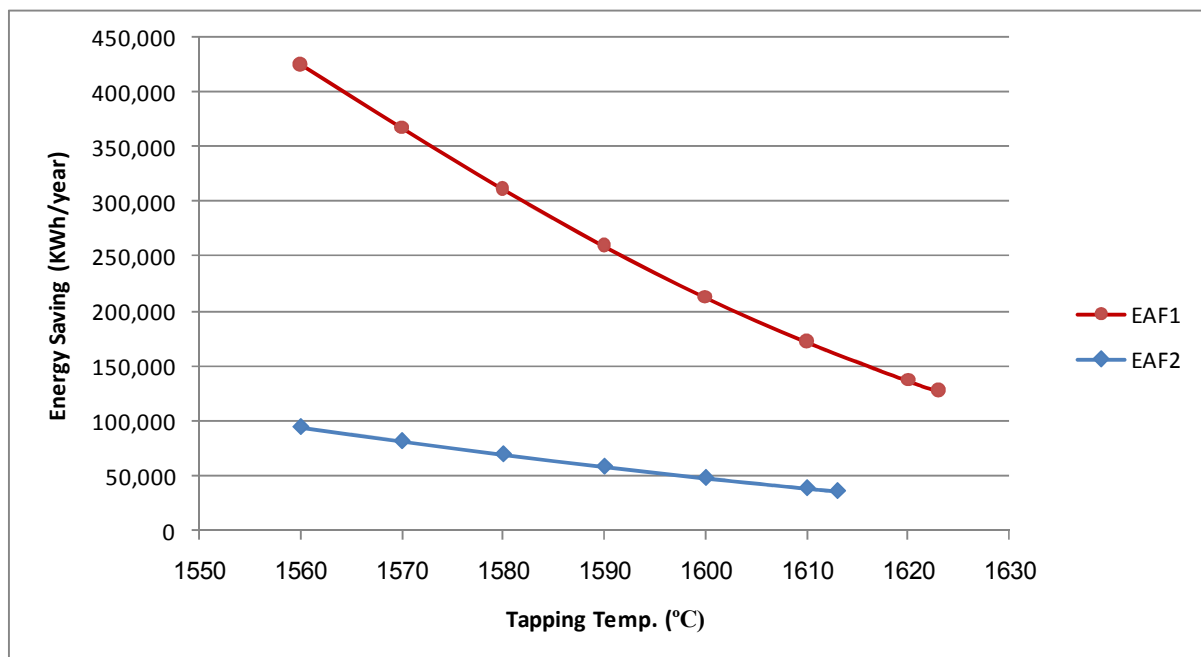


## ۵-۱-۲. راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی در واحد فولادسازی کارخانه ممیزی شده در گزارش

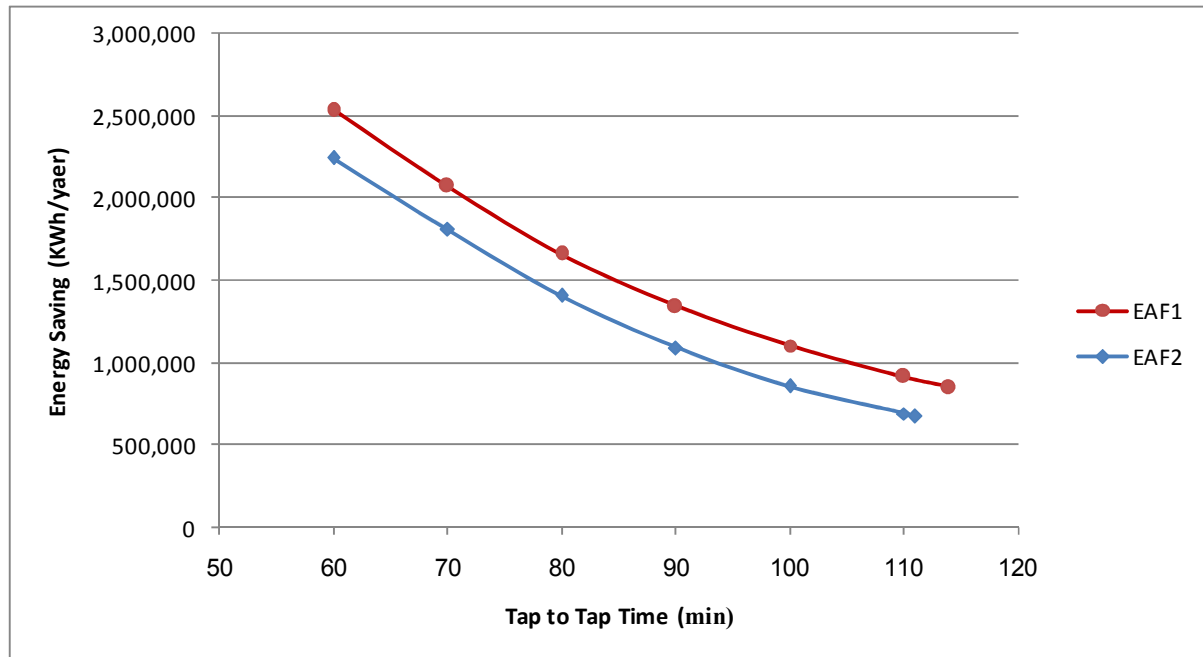
### ➤ راهکارهای کم‌هزینه

#### ✓ الف: بهبود شرایط بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی

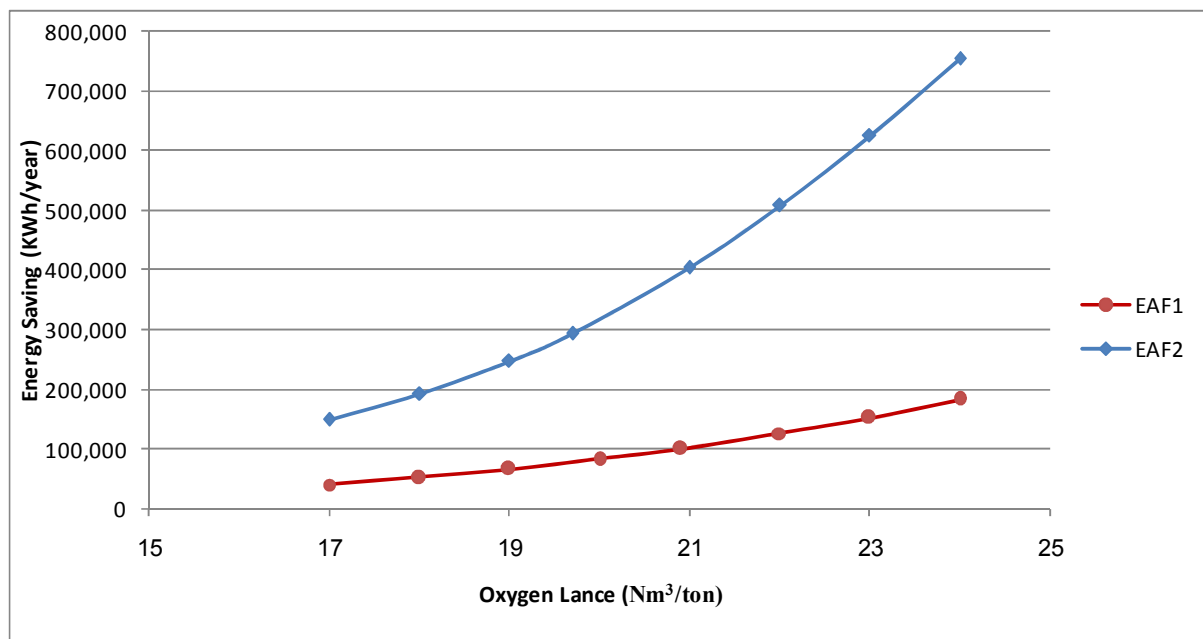
از آنجا که تولید در واحد فولادسازی پیوسته نیست، لذا توجه به شرایط بهره‌برداری می‌تواند تاثیر بسزایی بر مصرف انرژی داشته باشد، به خصوص که عمده‌ترین مصرف کننده‌های انرژی الکتریکی نیز در این واحد قرار دارند. در قسمت‌های قبل تاثیر دمای تخلیه، زمان ذوب و استفاده مناسب از لانس اکسیژن بر مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی، بررسی گردید. در شکل ۵-۱۸ تاثیر دمای تخلیه بر صرفه‌جویی مصرف انرژی سالیانه ارائه شده است. لازم به ذکر است این محاسبات براساس داده‌های بهره‌برداری کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد مورد نظر، ارائه شده است. در شکل ۵-۱۹ تاثیر زمان ذوب و در شکل ۵-۲۰ تاثیر میزان استفاده از لانس اکسیژن بر صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس این کارخانه ارائه شده است.



شکل ۵-۱۸. تاثیر دمای تخلیه بر صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره‌های قوس کارخانه فولاد



شکل ۵-۱۹. تاثیر زمان ذوب بر صرفه جویی انرژی الکتریکی در کوره های قوس کارخانه فولاد

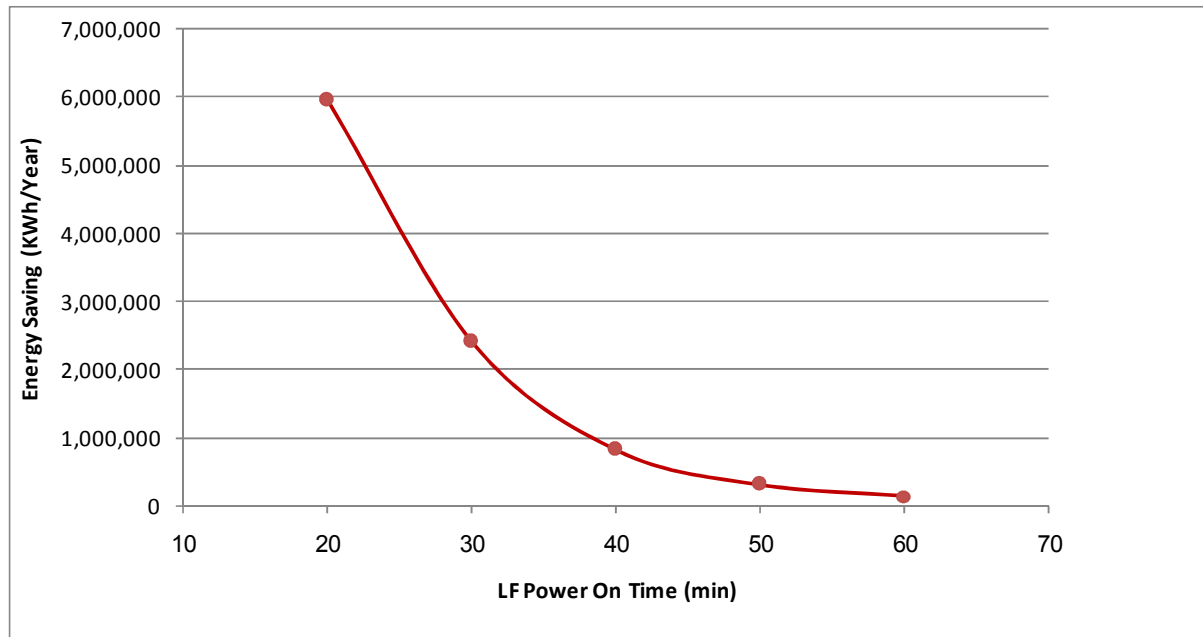


شکل ۵-۲۰. تاثیر لانس اکسیژن صرفه جویی انرژی الکتریکی در کوره های قوس کارخانه فولاد

✓ ب: بهبود شرایط بهره برداری کوره های پاتیلی

کوره های پاتیلی دومین مصرف کننده عمده انرژی الکتریکی در کارخانه مورد نظر می باشد. همان گونه که قبلا ذکر گردید، زمان Power On تاثیر مستقیمی بر مصرف انرژی در این کوره ها دارد. در قسمت های قبل پتانسیل صرفه جویی انرژی ناشی از کاهش زمان Power On در کوره های پاتیلی این کارخانه ارائه گردید. در شکل ۵-۲۱ میزان انرژی صرفه جویی شده سالانه ناشی از کاهش زمان Power On در کوره های پاتیلی کارخانه، ارائه شده است. به عنوان مثال در صورتی که زمان Power On این کوره ها (مجموع دو کوره) ماکزیمم ۳۰ دقیقه شود،

سالانه بالغ بر ۲۴۰۰ مگاوات ساعت در مصرف انرژی الکتریکی صرفه‌جویی خواهد شد. ذکر این نکته لازم است تاثیر نسبتاً زیاد زمان Power On کوره‌های پاتیلی بر روی صرفه‌جویی انرژی به دلیل این است که در شرایط بهره‌برداری فعلی، زمان نگهداری مذاب در کوره‌های پاتیلی نسبتاً زیاد است. در بسیاری از موارد توقفات باعث افزایش زمان ماند مذاب در کوره‌های پاتیلی شده که برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند قدم موثری در بهینه‌سازی مصرف انرژی به شمار آید.



شکل ۵-۲۱. درصد صرفه‌جویی انرژی ناشی از کاهش زمان Power On در کوره‌های پاتیلی کارخانه

#### ✓ ج: بهبود شرایط بهره‌برداری بویلر کارگاه تولید بخار

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مصرف انرژی در بویلر، میزان هوای اضافی آن است. این پارامتر با استفاده از آنالیز دود خروجی بویلر قابل اندازه‌گیری و محاسبه است. اکسیژن موجود در دود خروجی از بویلر در حال حاضر برابر ۱۰/۶ درصد است که این میزان قابل کاهش دادن است. در جدول ۵-۵ میزان گاز طبیعی صرفه‌جویی شده در یک سال برای کاهش مقدار اکسیژن از ۱۰/۶ درصد به مقادیر مشخص شده، تعیین شده است.

جدول ۵-۵. میزان گاز طبیعی صرفه‌جویی شده برای کاهش درصد اکسیژن

میزان اکسیژن %	میزان گاز صرفه‌جویی شده سالانه Nm <sup>3</sup>
8	65366
6	100228
4	126887

### ➤ راهکارهای هزینه متوسط

در این قسمت به بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت بجای مشعل‌های هوا/سوخت در کارخانه، پرداخته می‌شود.

متوسط ماهانه مصرف سوخت مشعل‌ها در سال ۱۳۸۹، حدود  $345370 \text{ Nm}^3$  (کننتور PU03 واحد فولادسازی این کارخانه) بوده است. همان طور که قبلاً ذکر گردید استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت باعث مصرف اکسیژن می‌گردد. استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت علاوه بر کاهش مصرف انرژی، باعث افزایش دمای پاتیل در حال پیشگرمایش و در نتیجه کاهش افت دمایی مذاب می‌شود. در جدول ۵-۶ مقادیر کاهش ماهانه مصرف سوخت، افزایش انرژی ناشی از تولید اکسیژن (در صورتی که اکسیژن اضافی تولیدی فعلی قادر به رفع نیاز مشعل‌های اکسیژن/سوخت نباشد) و حداقل انرژی صرفه‌جویی شده ناشی از افزایش دمای کوره تا  $15^\circ\text{C}$  مشخص شده است. به عنوان مثال در صورتی که ۸۰ درصد مشعل‌های مخصوص پیشگرمایش واحد فولادسازی، اکسیژن/سوخت شوند و ۶۰ درصد اکسیژن مورد نیاز این مشعل‌ها توسط واحد اکسیژن (به صورت مازاد بر استفاده) تامین شود، ماهانه در حدود ۱۴۰،۰۰۰ نرمال مترمکعب در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد. در صورتی که ۴۰ درصد باقیمانده اکسیژن مورد نیاز برای مشعل‌ها با مصرف ویژه انرژی برابر  $1/4 \text{ kWh/Nm}^3$  تولید شود، انرژی الکتریکی اضافی مورد نیاز جهت تامین این مقدار اکسیژن اضافی برابر  $7/3 \text{ kWh/Ton}$  خواهد بود. لازم به ذکر است به دلیل افزایش دمای پاتیل و کاهش افت دمایی مذاب، کاهش انرژی الکتریکی ناشی از کاهش دمای tapping برابر  $4 \text{ kWh/Ton}$  خواهد بود.

جدول ۵-۶. تاثیر استفاده از مشعل‌های اکسیژن/سوخت به عنوان پیش‌گرمایش پاتیل و تاندیش در واحد فولادسازی

درصد مشعل‌هایی که Oxy-Fuel شده اند	میزان اکسیژن تامین شده در واحد اکسیژن <sup>۱</sup>	افزایش انرژی مصرفی واحد اکسیژن	کاهش ماهانه مصرف سوخت	حداقل انرژی صرفه‌جویی شده ناشی از افزایش دمای کوره
	%	KWh/ton	Nm <sup>3</sup>	KWh/ton
100	40	13.6	172685	5
	60	9.1		
	80	4.5		
	100	0.0		
80	40	10.9	138148	4
	60	7.3		
	80	3.6		
	100	0.0		
60	40	8.2	103611	3
	60	5.4		
	80	2.7		
	100	0.0		
40	40	5.4	69074	2
	60	3.6		
	80	1.8		
	100	0		
20	40	2.7	34537	1
	60	1.8		
	80	0.9		
	100	0.0		

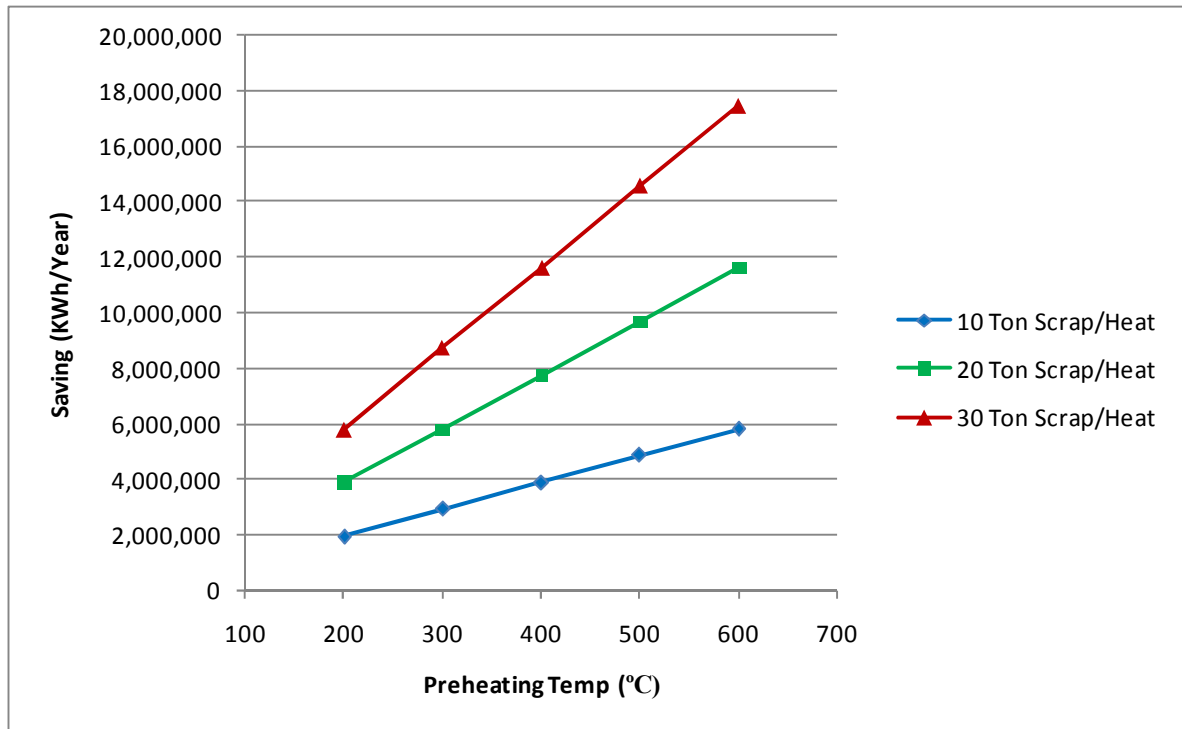
<sup>۱</sup> این مقدار برابر اکسیژنی است که در واحد اکسیژن بصورت مازاد بر استفاده، تولید می‌شود و در حال حاضر به دلیل عدم وجود کاربری مناسب به اتمسفر تخلیه می‌شود.

## ➤ راهکارهای پرهزینه

## ✓ استفاده از سیستم پیشگرمایش قراضه

در قسمت‌های قبل به فرآیندهای مختلف پیشگرم کردن قراضه پرداخت شد. در این قسمت به بررسی میزان صرفه‌جویی ناشی از استفاده از این سیستم‌های برای کوره قوس الکتریکی کارخانه مورد نظر، پرداخته می‌شود. در حدود ۲۰ درصد از انرژی تولیدی در کوره قوس یک و ۱۶ درصد از انرژی تولیدی کوره قوس شماره ۲ دو بصورت دود تلف می‌شود. با کمک این سیستم، از گازهای تلف شده به صورت دود برای پیشگرم کردن قراضه در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از سیستم پیشگرم قراضه علاوه بر کاهش مصرف انرژی به دلیل افزایش دمای قراضه، باعث کاهش میزان حرارت تلف شده داکت خروجی کوره قوس به دلیل کاهش دمای دود می‌گردد که این امر می‌تواند منجر به کاهش دبی آب خنک‌کن و در نتیجه کاهش مصرف انرژی گردد. همچنین به دلیل کاهش زمان Power On باعث افزایش میزان تولید می‌گردد، که در قسمت بعد به بررسی این تاثیر نیز پرداخته می‌شود.

در شکل ۵-۲۲ میزان کاهش مصرف انرژی الکتریکی سالانه در هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه (براساس داده‌های بهره‌برداری) در اثر استفاده از قراضه پیشگرم شده، نشان داده شده است. در این نمودار تنها صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از قراضه پیشگرم ارائه شده است. همان طور که انتظار می‌رود با افزایش تناژ قراضه پیشگرم شده در هر ذوب، میزان صرفه‌جویی انرژی حاصله نیز بیشتر خواهد شد. محاسبات نشان می‌دهند که در صورت استفاده از ۱۰ تن قراضه پیشگرم شده در هر ذوب، به ازای هر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای قراضه مصرف ویژه انرژی کوره در حدود  $8/3 \text{ KWh/Ton}$  کاهش خواهد یافت. با دو برابر شدن میزان استفاده از قراضه پیشگرم (۲۰ تن به ازای هر ذوب)، کاهش مصرف ویژه انرژی کوره نیز دو برابر خواهد شد.

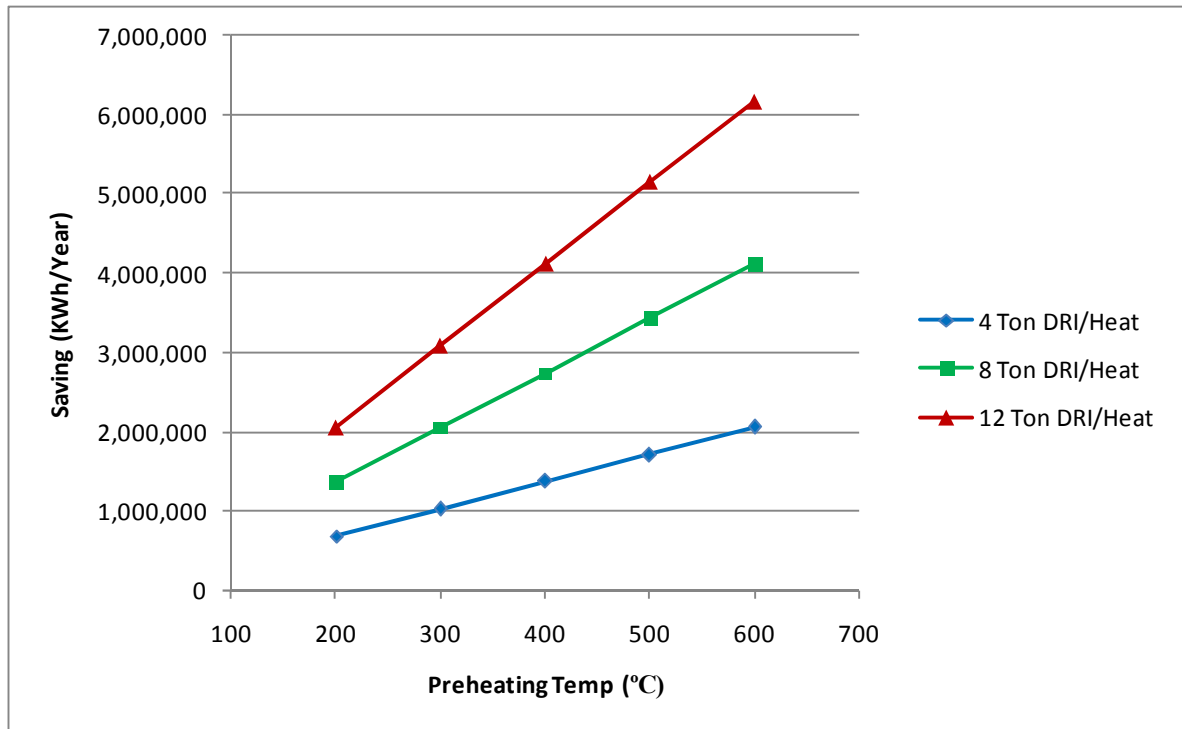


شکل ۵-۲۲. تاثیر پیشگرمایش قراضه بر کاهش مصرف انرژی برای هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده

#### ✓ استفاده از سیستم پیشگرمایش آهن اسفنجی

جزئیات سیستم‌های پیشگرمایش آهن اسفنجی در قسمت‌های قبل ارائه شد. در این قسمت به بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی گرم در کارخانه حاضر (بر اساس داده‌های بهره‌برداری این کارخانه) پرداخته می‌شود. در شکل ۵-۲۳ تاثیر استفاده از آهن اسفنجی گرم در هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی این کارخانه (بر اساس داده‌های بهره‌برداری کوره‌ها)، ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود به دلیل اینکه در این کارخانه از آهن اسفنجی نسبت به قراضه، کمتر استفاده می‌شود لذا صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی گرم کمتر از قراضه گرم خواهد بود. استفاده از آهن اسفنجی گرم به دلیل کاهش مصرف انرژی کوره، باعث کاهش زمان Tap to Tap می‌گردد که این موضوع به افزایش تولید و در نتیجه افزایش صرفه‌جویی اقتصادی منجر خواهد شد که این موضوع در قسمت‌های بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

محاسبات نشان می‌دهند در صورت استفاده از ۴ تن آهن اسفنجی گرم در هر ذوب، به ازای هر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای پیشگرمایش آهن اسفنجی مصرف ویژه انرژی کوره در حدود ۲/۹ KWh/Ton کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است با ۲ برابر شدن تناژ آهن اسفنجی گرم در هر ذوب، میزان کاهش مصرف ویژه انرژی نیز ۲ برابر خواهد شد.



شکل ۵-۲۳. تاثیر پیشگرمایش آهن اسفنجی بر کاهش مصرف انرژی برای هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی

#### ✓ استفاده از قراضه خرد شده

برای بهره‌برداری بهتر از قراضه، از شردر<sup>۱</sup> (دستگاه خردکن قراضه) برای خرد کردن قراضه استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها در ظرفیت‌های مختلف ساخته می‌شوند. در جدول ۵-۷ مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر<sup>۲</sup> از قبیل توان موتور دستگاه، حداکثر اندازه قراضه و میزان تولید قراضه خرد شده در هر ساعت ذکر شده است. متوسط قراضه مصرفی دو کوره قوس حدود ۳۰ تن بر ساعت است. بنابراین با توجه به داده‌های جدول ۵-۷، برای این کارخانه شردر ردیف اول (با توان مصرفی ۷۵۰ کیلووات) قابل استفاده است.

جدول ۵-۷. مشخصات یک دستگاه خردکن قراضه فلزی ساخت شرکت بکر

Driving Power (KW)	Operation Width (mm)	Output (ton/hr)
750	2000	20-35
1000	2000	25-45
1120	2000	40-60
1250	2500	60-80

<sup>1</sup> shredder

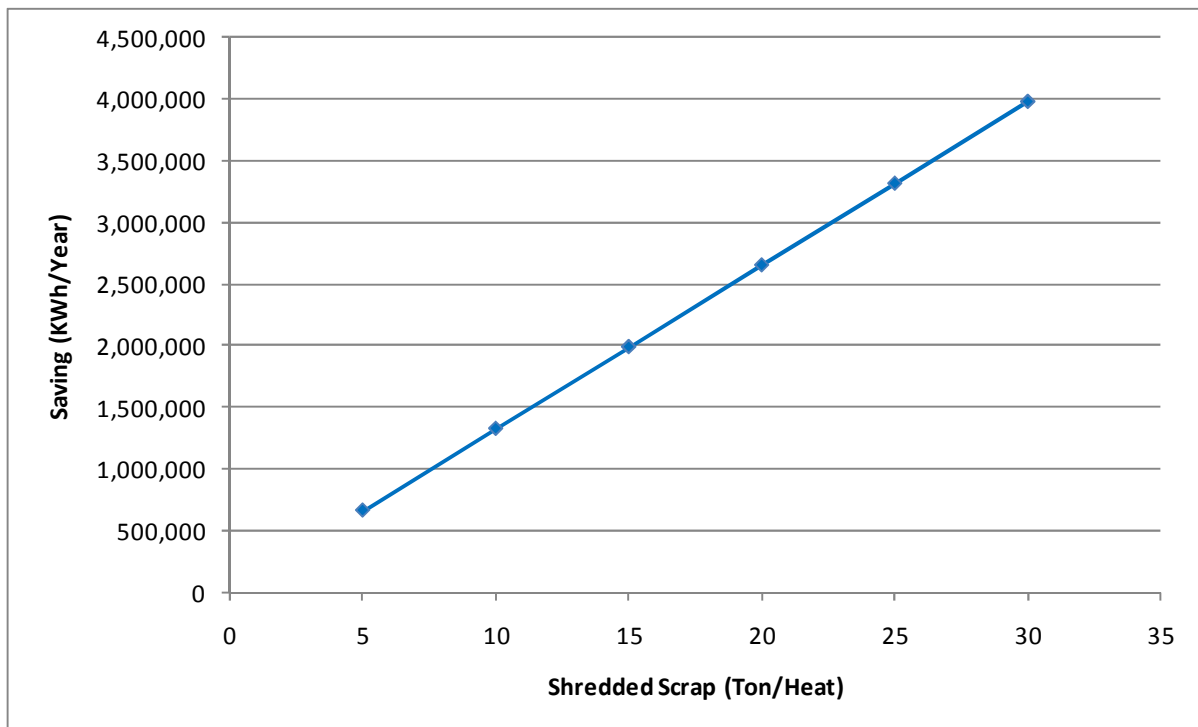
<sup>2</sup> BECKER



برای محاسبه میزان صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از قراضه خرد شده، از ضرایب مدل کوهل استفاده شده است. در این رابطه  $G_{Shr}$  تناژ قراضه خرد شده،  $G_A$  تناژ مذاب تولیدی و  $\Delta W$  میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی است.

$$\Delta W = 50 * G_{Shr}$$

در شکل ۵-۲۴ تاثیر استفاده از قراضه خرد شده در هر کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد بر کاهش مصرف انرژی کوره ارائه شده است. در این شکل انرژی الکتریکی مصرفی دستگاه خردکننده قراضه نیز در نظر گرفته شده است. در واقع این شکل بیانگر خالص کاهش مصرف انرژی در اثر استفاده از قراضه خرد شده می‌باشد.



شکل ۵-۲۴. تاثیر استفاده از قراضه خرد شده بر کاهش مصرف انرژی در هر کدام از کوره‌های قوس الکتریکی

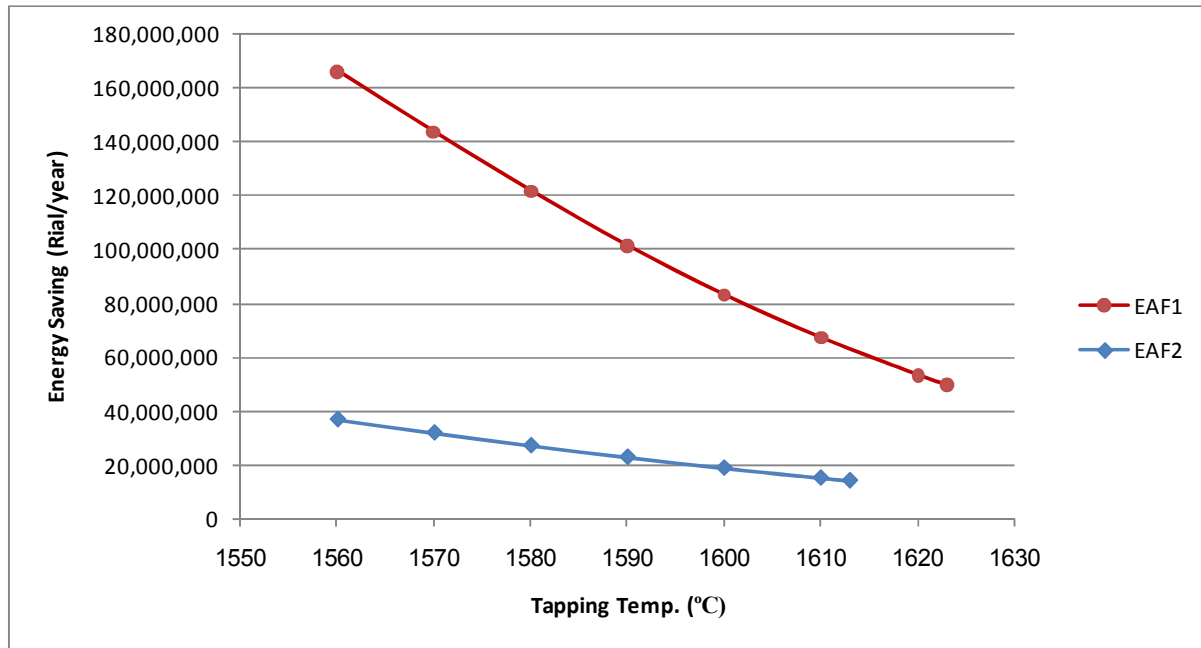
## ۵-۲. تحلیل اقتصادی راهکارهای ارائه شده

### ۵-۲-۱. راهکارهای کم‌هزینه

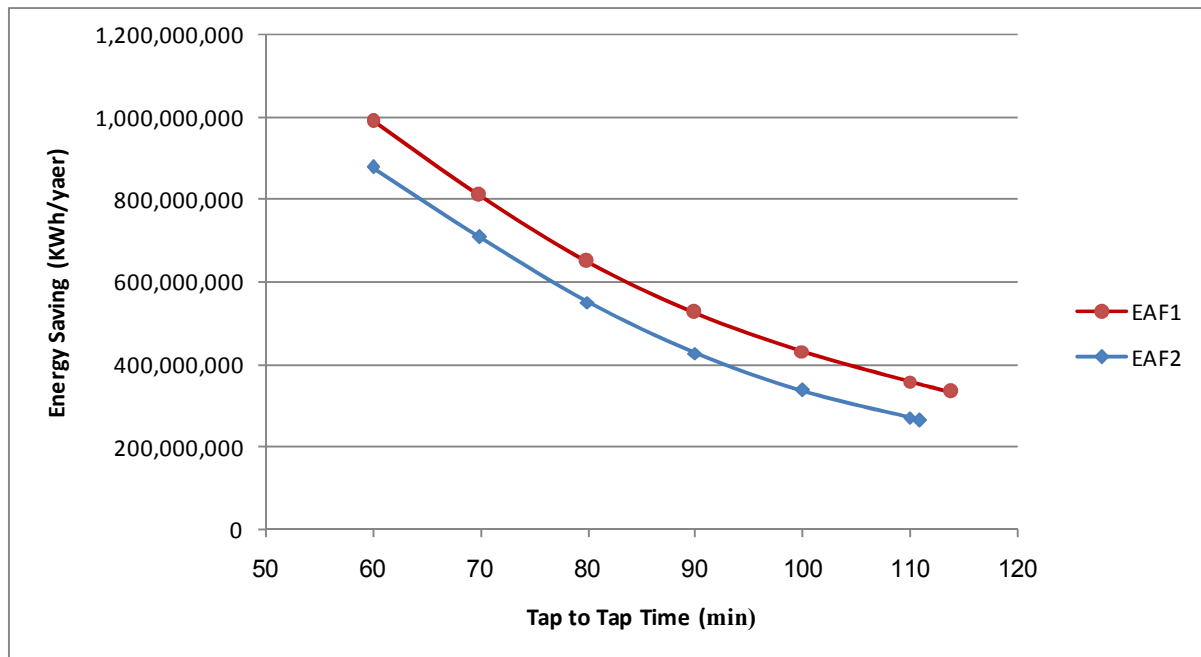
#### ➤ کوره‌های قوس الکتریکی

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، از جمله راهکارهای کم‌هزینه در واحد فولادسازی، بهبود شرایط بهره‌برداری از جمله دمای تخلیه، زمان ذوب و لانس اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. در این قسمت به ارائه میزان صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از بهبود شرایط بهره‌برداری پرداخته شده است. لازم به ذکر است بهبود شرایط

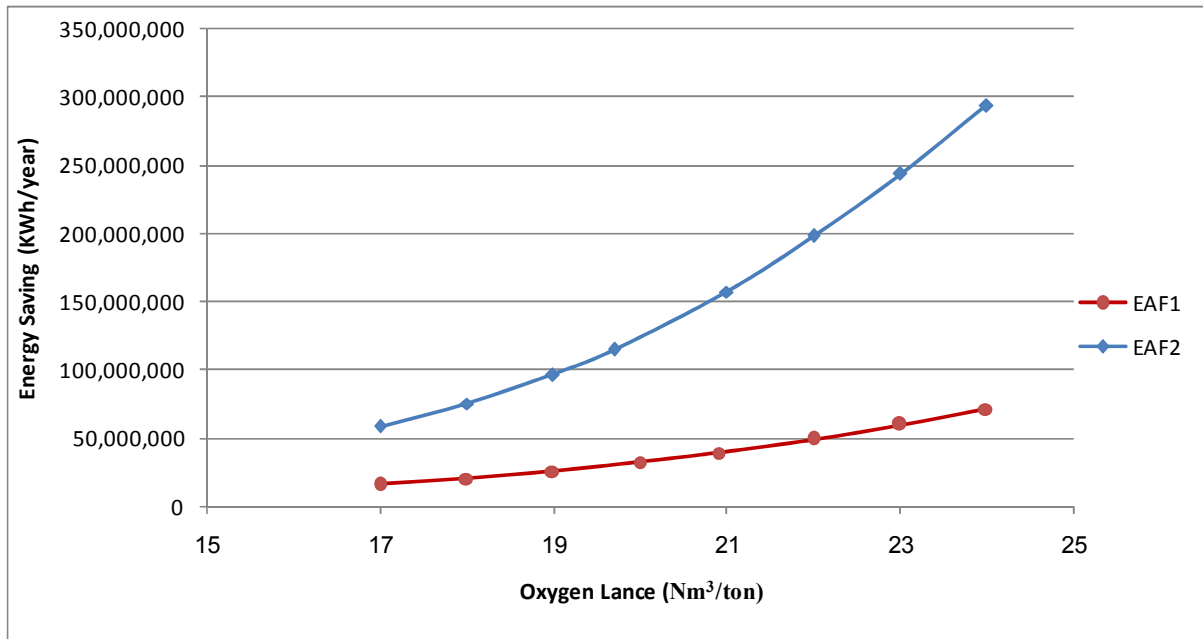
بهره‌برداری نیازمند صرف هزینه خاصی نمی‌باشد و لذا زمان بازگشت سرمایه آنها، عملاً ناچیز می‌باشد. در شکل ۵-۲۵ تا شکل ۵-۲۷ میزان صرفه‌جویی اقتصادی سالانه ناشی از بهبود شرایط بهره‌برداری ۳ پارامتر، ارائه شده است. برای انجام محاسبات هزینه هر کیلووات‌ساعت برق برابر ۳۹۰ ریال در نظر گرفته شده است.



شکل ۵-۲۵. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش دمای تخلیه در کوره‌های قوس الکتریکی



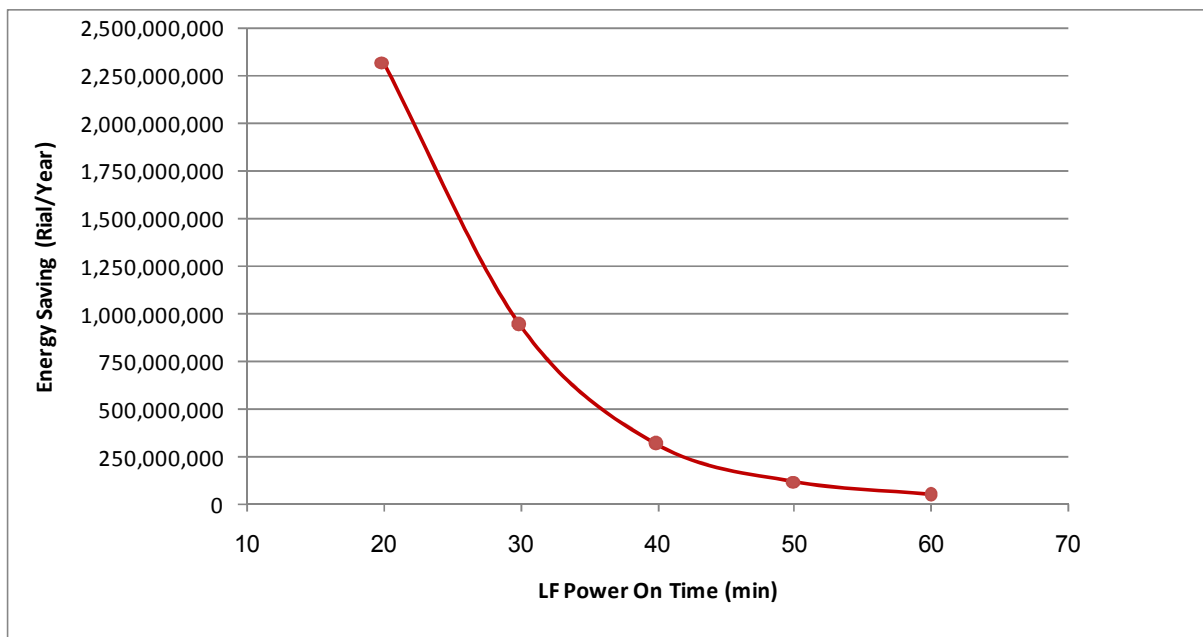
شکل ۵-۲۶. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش زمان ذوب در کوره‌های قوس الکتریکی



شکل ۵-۲۷. صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از افزایش میزان لانس اکسیژن در کوره‌های قوس الکتریکی

### ➤ کوره‌های پاتیلی

در شکل ۵-۲۸ میزان صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش زمان Power On در کوره‌های پاتیلی کارخانه ارائه شده است. لازم به ذکر است مقادیر ارائه شده برای مجموع دو کوره می‌باشد. با توجه به این محاسبات، به عنوان مثال با توجه به شرایط بهره‌برداری فعلی کارخانه خسارت مالی ناشی از بیشتر بودن زمان Power On در کوره‌های پاتیلی این کارخانه از مقدار ۳۰ دقیقه، سالیانه خسارت مالی بالغ بر ۹۰۰ میلیون ریال را به همراه خواهد داشت.



شکل ۵-۲۸. خسارت اقتصادی ناشی از زیاد بودن زمان Power On در کوره‌های پاتیلی

### ➤ بویلر (مربوط به کارگاه تولید بخار)

همان طور که قبلاً ذکر گردید کاهش هوای اضافی می‌تواند نقش موثری در کاهش مصرف انرژی بویلر داشته باشد. در قسمت‌های قبل میزان صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی ناشی از کاهش هوای اضافی ارائه گردید. در این قسمت با در نظر گرفتن قیمت گاز طبیعی برابر ۷۰۰ ریال به ازای هر نرمال متر مکعب، صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش هوای اضافی محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول ۵-۸ ارائه شده است. با توجه به نتایج محاسبات در صورتی که اکسیژن اضافی موجود در دود خروجی برابر ۶ درصد شود، سالانه بالغ بر ۱۰۰,۰۰۰ نرمال مترمکعب گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد که این مقدار معادل سالانه ۷ میلیون تومان خواهد بود.

جدول ۵-۸. هزینه صرفه‌جویی شده در اثر کاهش درصد اکسیژن اضافی در بویلر کارگاه تولید بخار

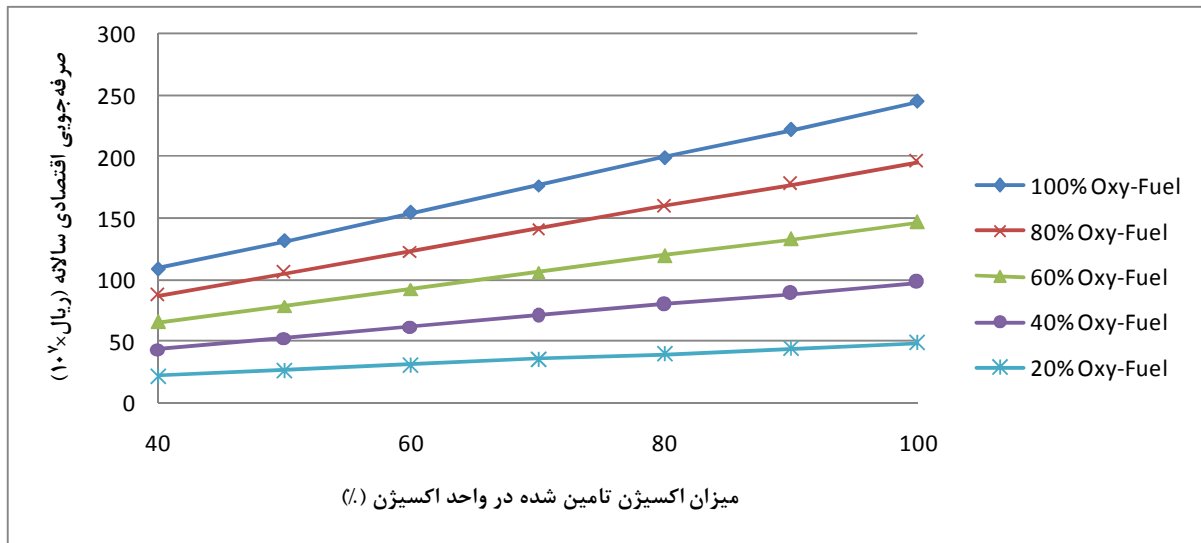
میزان اکسیژن	میزان گاز صرفه‌جویی شده	هزینه صرفه‌جویی سالانه
%	Nm <sup>3</sup>	Rial*10 <sup>7</sup>
8	65366	4.6
6	100228	7.0
4	126887	8.9

### ۵-۲-۲. راهکارهای هزینه متوسط

در قسمت‌های قبل محاسبات مربوط به کاهش مصرف سوخت، کاهش مصرف انرژی الکتریکی ناشی از کاهش دمای tapping و همچنین افزایش مصرف انرژی الکتریکی (در صورت نیاز به تولید اکسیژن اضافی برای مشعلهای اکسیژن/سوخت) ارائه گردید. در این قسمت محاسبات اقتصادی این عوامل و همچنین سودآوری اقتصادی ناشی از کاهش زمان ذوب (و در نتیجه افزایش تولید) ارائه شده است. نتایج این محاسبات برای این واحد، در شکل ۵-۲۹ ارائه شده است. برای انجام محاسبات (همانند قسمت‌های قبل) هزینه انرژی الکتریکی مصرفی برابر ۳۹۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت، و هزینه هر نرمال متر مکعب گاز طبیعی ۷۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. در این نمودار تاثیر کلیه پارامترهایی که قبلاً ذکر گردید، با هم در نظر گرفته شده است. بر طبق این نتایج مثلاً در صورتی که تمام مشعلهای پیشگرمایش واحد فولادسازی اکسیژن/سوخت شوند و ۸۰ درصد اکسیژن مورد نیاز آنها از اکسیژن مازاد بر استفاده واحد اکسیژن تامین شود (و بقیه اکسیژن مورد نیاز آنها با مصرف انرژی ویژه‌ای برابر  $1/4 \text{ KWh/Nm}^3$  تهیه گردد)، صرفه‌جویی خالص اقتصادی حاصل سالانه در حدود ۲۰۰ میلیون تومان خواهد بود. لازم به ذکر است این مقدار با در نظر گرفتن صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی ناشی از کاهش دمای Tapping، افزایش مصرف انرژی الکتریکی به دلیل تولید ۲۰ درصد اکسیژنی که واحد اکسیژن باید علاوه بر تولید معمول، تولید نماید<sup>۱</sup> و همچنین سودآوری اقتصادی ناشی از کاهش زمان ذوب و

<sup>۱</sup> واحد اکسیژن فعلی و یا واحد اکسیژن در حال احداث

افزایش تولید محاسبه شده است.



شکل ۵-۲۹. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از مشعلهای اکسیژن/سوخت به منظور پیشگرمایش پاتیلها و تاندیشهای واحد فولادسازی

### ۵-۲-۳. راهکارهای پرهزینه

#### ➤ استفاده از سیستم پیشگرم قراضه

جزئیات سیستم پیشگرم قراضه و همچنین میزان صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از این سیستم در قسمت‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت صرفه‌جویی اقتصادی حاصل از استفاده از این سیستم ارائه شده است. همان طور که قبلاً ذکر گردید استفاده از این سیستم علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی باعث افزایش میزان تولید (به دلیل کاهش زمان Power On) خواهد شد که این مورد از دیدگاه اقتصادی ارزش زیادی دارد. برای انجام محاسبات هزینه هر کیلو وات‌ساعت انرژی الکتریکی برابر ۳۹۰ ریال و سودآوری هر کیلو محصول برابر ۱۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. صرفه‌جویی اقتصادی به ازای ۳۳۰ روز کاری در سال محاسبه شده است.

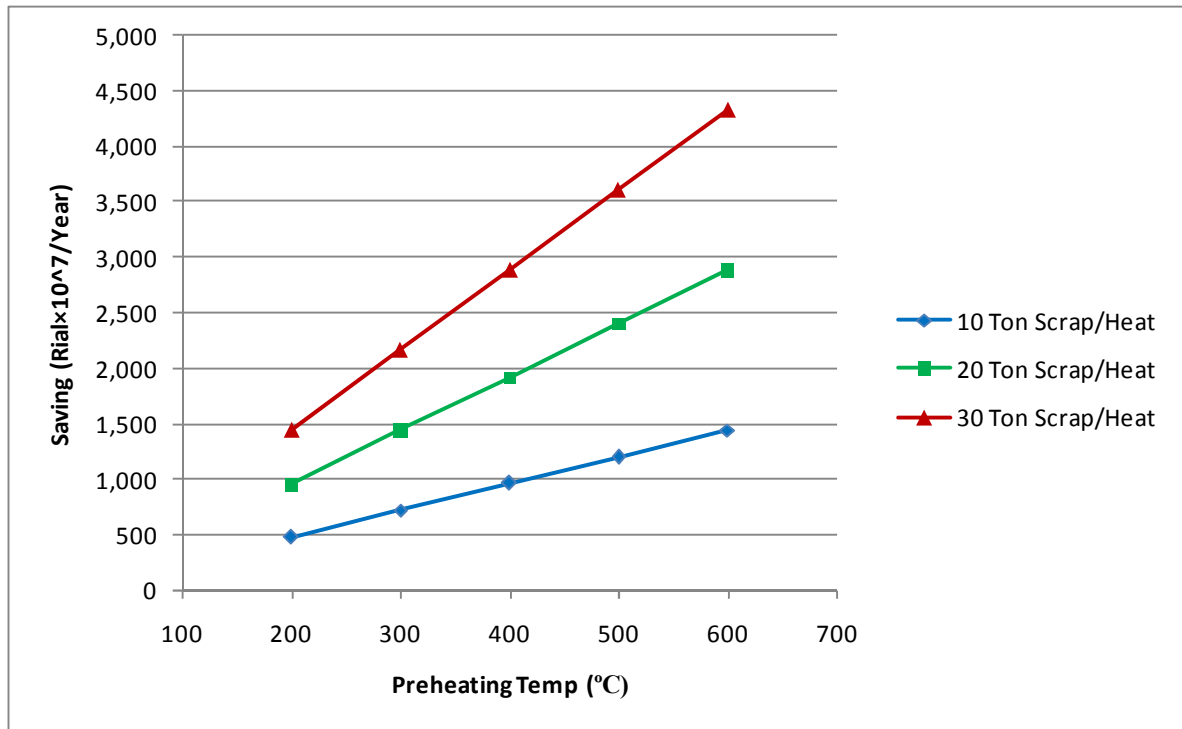
در جدول ۵-۹ مدت زمان صرفه‌جویی در هر ذوب در اثر پیشگرم کردن قراضه و تعداد روزهایی که در آنها صرفه‌جویی زمان تولید به اندازه یک ذوب می‌شود، ارائه شده است. در این جدول نتایج محاسبات اقتصادی ناشی از استفاده از قراضه پیشگرم نیز ارائه شده است. با توجه به نتایج محاسبات، در صورتی که مثلاً در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده در گزارش حاضر، از ۲۰ تن قراضه گرم با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در یکی از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ممیزی شده استفاده شود، در حدود ۸:۳۰ دقیقه در زمان هر ذوب صرفه‌جویی خواهد شد که در این صورت هر ۱/۱ روز این کوره قادر خواهد بود یک ذوب بیشتر تولید نماید.

در شکل ۵-۳۰ مجموع صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از استفاده از قراضه پیشگرم شده، ارائه شده است. با توجه به این نمودار، مثلاً در حالتی که در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه ی حاضر، از ۲۰ تن قراضه پیشگرم شده با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در هر ذوب استفاده شود، سودآوری اقتصادی حاصل سالانه برابر ۲۴۰۰ میلیون

تومان به ازای هر کوره خواهد بود.

جدول ۵-۹. تاثیر استفاده از قراضه پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی

تناژ قراضه پیشگرم استفاده شده در هر ذوب	دمای پیشگرم قراضه	مدت زمان صرفه جویی در هر ذوب	تعداد روزهایی که در آنها صرفه جویی زمان تولید به اندازه یک ذوب است	میزان انرژی صرفه جویی شده سالانه	هزینه صرفه جویی شده به دلیل کاهش مصرف انرژی	سودآوری اقتصادی ناشی از افزایش تولید به دلیل کاهش زمان ذوب
Ton	°C	min		GWh/Year	(Rial×10 <sup>7</sup> )/Year	(Rial×10 <sup>7</sup> )/Year
10	200	1.7	5.3	1.94	75.7	405.4
	300	2.5	3.5	2.91	113.6	608.1
	400	3.4	2.7	3.88	151.4	810.8
	500	4.2	2.1	4.85	189.3	1013.5
	600	5.1	1.8	5.82	227.2	1216.2
20	200	3.4	2.7	3.88	151.4	810.8
	300	5.1	1.8	5.82	227.2	1216.2
	400	6.8	1.3	7.77	302.9	1621.5
	500	8.5	1.1	9.71	378.6	2026.9
	600	10.2	0.9	11.65	454.3	2432.3
30	200	5.1	1.8	5.82	227.2	1216.2
	300	7.6	1.2	8.74	340.7	1824.2
	400	10.2	0.9	11.65	454.3	2432.3
	500	12.7	0.7	14.56	567.9	3040.4
	600	15.3	0.6	17.47	681.5	3648.5



شکل ۵-۳۰. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از قراضه پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه فولاد مورد نظر

#### ➤ استفاده از آهن اسفنجی گرم

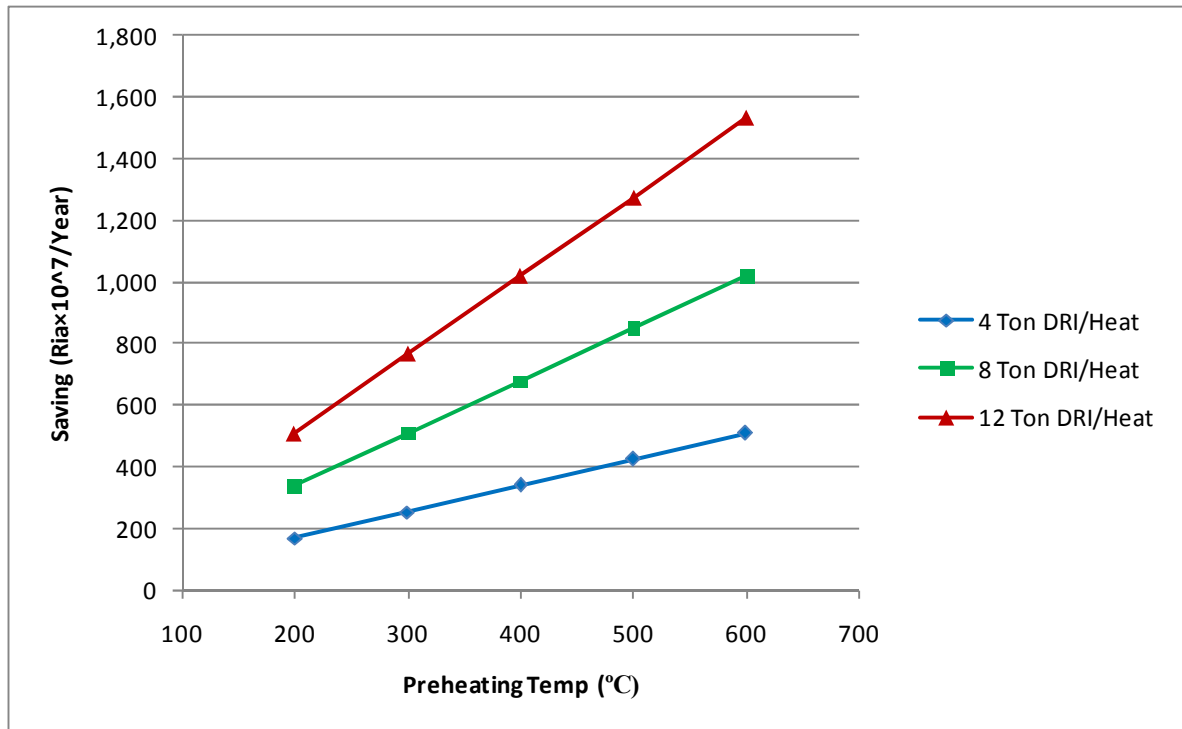
در قسمت‌های قبل تاثیر استفاده از آهن اسفنجی گرم در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه حاضر ارائه گردید. در این قسمت تحلیل‌های اقتصادی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی گرم ارائه شده است. همان که قبلاً ذکر گردید استفاده از آهن اسفنجی گرم، علاوه بر کاهش مصرف انرژی به دلیل کاهش زمان ذوب و افزایش تولید نیز باعث سودآوری اقتصادی می‌گردد. در جدول ۵-۱۰ زمان کاهش یافته در هر ذوب به دلیل استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده و همچنین تعداد روزهایی که در آن کاهش زمان هر ذوب به اندازه‌ای شده که کوره قادر باشد یک ذوب اضافی تولید نماید، ارائه شده است. در این جدول همچنین صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی و سودآوری اقتصادی ناشی از افزایش تولید نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است برای انجام محاسبات (همانند قسمت قبل) هزینه انرژی الکتریکی مصرفی برابر ۳۹۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت و سودآوری ناشی از تولید هر کیلوگرم محصول برابر ۱۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

در شکل ۵-۳۱ مجموع سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده، ارائه شده است. ارقام ارائه شده در این نمودار شامل صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش مصرف انرژی و همچنین سودآوری اقتصادی ناشی از افزایش تولید می‌باشد.

جدول ۵-۱۰. تاثیر استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی

تناژ آهن اسفنجی پیشگرم استفاده شده در هر ذوب	دمای پیشگرم آهن اسفنجی	مدت زمان صرفه جویی در هر ذوب	تعداد روزهایی که در آنها صرفه جویی زمان تولید به اندازه یک ذوب است	میزان انرژی صرفه جویی شده سالانه	هزینه صرفه جویی شده به دلیل کاهش مصرف انرژی	سودآوری اقتصادی ناشی از افزایش تولید به دلیل کاهش زمان ذوب
Ton	°C	min		GWh/Year	(Rial×10 <sup>7</sup> )/Year	(Rial×10 <sup>7</sup> )/Year
4	200	0.6	15.0	0.7	26.7	143.2
	300	0.9	10.0	1.0	40.1	214.8
	400	1.2	7.5	1.4	53.5	286.4
	500	1.5	6.0	1.7	66.9	358.0
	600	1.8	5.0	2.1	80.2	429.6
8	200	1.2	7.5	1.4	53.5	286.4
	300	1.8	5.0	2.1	80.2	429.6
	400	2.4	3.8	2.7	107.0	572.8
	500	3.0	3.0	3.4	133.7	716.0
	600	3.6	2.5	4.1	160.5	859.3
12	200	1.8	5.0	2.1	80.2	429.6
	300	2.7	3.3	3.1	120.4	644.4
	400	3.6	2.5	4.1	160.5	859.3
	500	4.5	2.0	5.1	200.6	1074.1
	600	5.4	1.7	6.2	240.7	1288.9





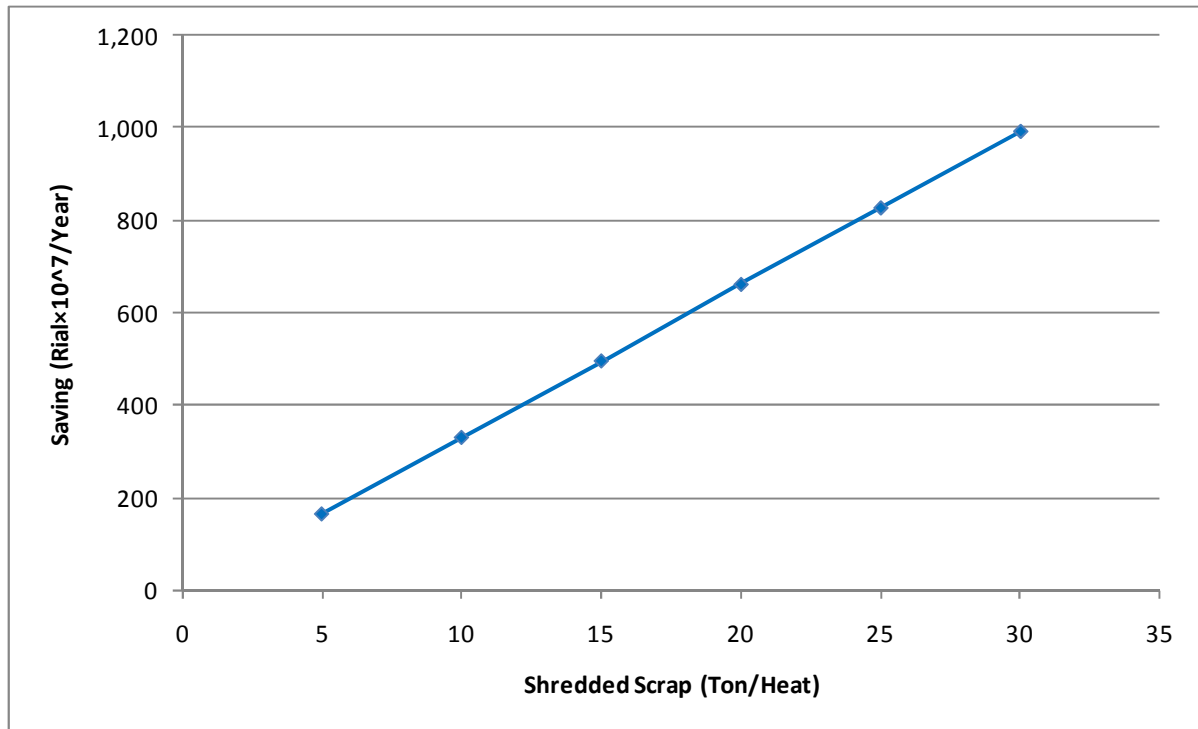
شکل ۵-۳۱. سودآوری اقتصادی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی پیشگرم شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی

#### ✓ استفاده از قراضه خرد شده

همان طور که قبلاً ذکر گردید استفاده از قراضه خرد شده نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی خواهد شد بلکه به دلیل کاهش زمان ذوب باعث افزایش میزان تولید می‌گردد. از طرف دیگر دستگاه خردکننده قراضه برای خرد کردن قراضه انرژی مصرف می‌کند. بنابراین برای محاسبات اقتصادی لازم است کلیه این موارد مد نظر قرار گیرد. در جدول ۵-۱۱ و شکل ۵-۳۲ خلاصه این نتایج ارائه شده است. برای انجام محاسبات اقتصادی (همانند قسمت‌های قبل) هزینه انرژی الکتریکی مصرفی برابر ۳۹۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت و سودآوری ناشی از تولید هر کیلوگرم محصول برابر ۱۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است دستگاه خردکننده قراضه انتخاب شده دارای مشخصات ارائه شده در قسمت فنی راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد فولادسازی می‌باشد.

جدول ۵-۱. تاثیر استفاده از قراضه خرد شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی واحد فولادسازی

Ton	تناژ قراضه خرد شده مورد استفاده در هر ذوب	KWh/ton steel	انرژی مصرفی دستگاه خردکننده	KWh/Heat	صرفه‌جویی انرژی ناشی از استفاده از قراضه خردشده	min	مدت زمان صرفه‌جویی در هر ذوب	تعداد روزهایی که در آنها صرفه‌جویی زمان تولید به اندازه یک ذوب است	(Rial×107)/Year	سودآوری اقتصادی ناشی از افزایش تولید به دلیل کاهش زمان ذوب	(Rial×107)/Year	هزینه صرفه‌جویی شده به دلیل کاهش مصرف انرژی	(Rial×10 <sup>7</sup> )/Year	هزینه اضافی ناشی از مصرف انرژی دستگاه خردکننده
5	2.7	250	0.6	15.4	139.8	26.1	0.3							
10	5.5	500	1.2	7.7	279.6	52.2	0.6							
15	8.2	750	1.8	5.1	419.4	78.3	0.9							
20	10.9	1000	2.3	3.9	559.2	104.4	1.1							
25	13.6	1250	2.9	3.1	699.0	130.6	1.4							
30	16.4	1500	3.5	2.6	838.8	156.7	1.7							



شکل ۵-۳۲. سودآوری اقتصادی ناشی از قراضه خرد شده در هر یک از کوره‌های قوس الکتریکی

## مراجع

- [1] Jones, R.T., et al., Some myths about DC arc furnaces. Southern African Pyrometallurgy, 2011.
- [2] BCS, Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry. 2005: ITP Metal Casting.
- [3] <http://www.chinaproductselect.com/supplier/150460007/China-EAF-DC-EAF-18.html>. 2012.
- [4] Direct current electric arc furnace. Center for materials production (CMP-063), 1991.
- [5] <http://nptel.iitm.ac.in>, Lecture 16 Developments in EAF steelmaking. 2012.
- [6] [www.millennium-steel.com](http://www.millennium-steel.com), Environmental control and the CONSTEEL process. 2012.
- [7] [http://www.corefurnace.com/meltshop\\_01.html](http://www.corefurnace.com/meltshop_01.html). 2012.
- [8] Bouganosopoulos, G. and V. Papantoniou, Start-Up Experience and Results of Consteel® at the SOVEL Meltshop. Iron & Steel Technology, 2008.
- [9] Midrex, shaft furnace technology. 2012.
- [10] Voelker, B. and R. Bailey, Benefits of Hot DRI Charge to the EAF. Direct from Midrex, 2nd, 2007: p. 7-8.
- [11] Ames, T. and J. Kopfle, *The Economics of Hot DRI Charging*. Direct from Midrex, 2nd, 2007: p. 7-9.
- [12] Kopfle, J., J.M. McClelland, and G.E. Metius, *Green Steelmaking with The Midrex Direct Reduction Process*. Millennium Steel 2007: p. 21-24.
- [13] HARADA, T. and H. TANAKA, *Future Steelmaking Model by Direct Reduction Technologies*. ISIJ International, 2011. 51(8): p. 1301-1307.
- [14] Weinberg, F.J., nature, 1971. 233(24): p. 239-241.
- [15] Marcel Dekker, Metal industries, 2004.
- [16] PT. Krakatau Steel, Burner control system in ladle drying and preheating process.
- [17] Linde Gas Division, Linde Gas Headquarters, Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach, Germany.