

## تحلیل انرژی و انرژی کارخانه فولاد بویر صنعت یاسوج

کوروش گودرزی<sup>۱\*</sup>، مرتضی بحرانی<sup>۲</sup>، هاشم هوشیار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

kgoudarzi@yu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج

morteza\_bahrani@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانش آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج

hashemhooshyar@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، فرایند تولید شمش فولاد متعلق به کارخانه فولاد بویر صنعت یاسوج که خود شامل سه مرحله فرایند ذوب در یک کوره القایی، پیش گرمایش و ریخته گری مداوم می باشد، مورد تحلیل انرژی و انرژی قرار گرفته است. پس از موازنه انرژی و انرژی هر سه مرحله به صورت جداگانه، مقادیر انرژی های منتقل شده از طرق گوناگون و سهم هریک، انرژی های اتلافی و سهم هریک و نیز بازده های انرژی و انرژی هر مرحله محاسبه و در نهایت، فرایند کلی مورد تحلیل و بررسی قرار داده شد. با بررسی نتایج راهکارهایی از جمله پیش گرمایش مواد ورودی به کوره القایی، طراحی درپوش برای آن، افزایش مقادیر مواد تزریق شده به کوره که سهم عمده ای در واکنش های گرمازا دارند، از جمله کک و فرومنگنز و طراحی درپوش برای فرایند پیش گرمایش پیشنهاد شد.

واژه های کلیدی: کارخانه تولید فولاد، کوره القایی، بازده انرژی و انرژی.

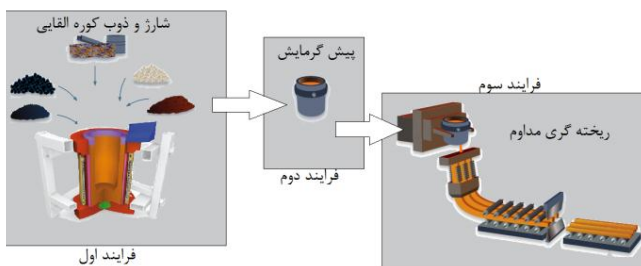
## ۱. مقدمه

از کوره ذوب قوس الکتریکی و ذوب القایی. کوره‌های ذوب قوس الکتریکی به‌علت بیشتر بودن ظرفیت تولیدشان، همواره در کارخانه‌های تولید فولاد کاربری بیشتری داشته‌اند [۹]. در عوض کوره‌های القایی به‌علت کوچک‌تر بودن، در صنایع کوچک ریخته‌گری فلز مانند بخش ریخته‌گری مربوط به صنایع خودروسازی، تراکتورسازی و... کاربرد زیادی دارند [۱۰]. دلایل اصلی استفاده از ذوب القایی، بازده حرارتی بالای آن و نیز کارکرد تمیز آن می‌باشد.

در سال‌های اخیر سوتنز و همکاران [۱۱] به مقایسه فناوری‌های درمان گرد و غبار ناشی از کوره قوس الکتریکی با استفاده از راندمان انرژی پرداختند. آن‌ها عملکرد کلی ترمودینامیکی و بهره‌وری از فناوری‌های درمان کوره را با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی و ترکیب عامل‌های غالب بدون نیاز به بررسی هر فرایند بررسی کردند. از آنجاکه بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع انرژی‌بر مانند فولاد یک ضرورت انکارناپذیر است و تحلیل انرژی به‌عنوان روشی که توانایی محاسبه کیفیت انرژی در کل فرایند را به‌صورت کمی دارد شناخته شده است، در این تحقیق با استفاده از آنالیز انرژی و انرژی بازگشت‌ناپذیری‌ها و اتلافات در فرایند تولید فولاد در کارخانه تولید فولاد بویصر صنعت واقع در شهر یاسوج شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از نتایج آنالیز راهکارهایی ارائه و تأثیر آن‌ها ارزیابی شده است.

## ۲. معرفی سیکل تولید فولاد کارخانه بویصر صنعت

در تحقیق پیش‌رو به تحلیل انرژی و انرژی سیکل تولید شمش فولاد کارخانه فولاد بویصر صنعت پرداخته شده است. شماتیکی از آن سیکل در شکل (۱) ارائه شده است. این سیکل شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول آن فرایند ذوب در کوره القایی با فرکانس متوسط از نوع دوقلو به ظرفیت هر کدام ۱۰ تن و به قدرت ۵ مگاوات است که مشخصات فنی آن در جدول (۱) ارائه شده است. مرحله دوم، فرایند پیش‌گرمایش پاتیل و قیف و مرحله سوم و آخر نیز فرایند ریخته‌گری مداوم است.



شکل (۱): شماتیکی از مراحل تولید شمش فولاد

صنعت فولاد و آهن بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در میان سایر صنایع است. بر اساس تحقیقات [۱] تقریباً ۱۲٪ انرژی تولیدشده در جهان، در بخش آهن و فولاد مصرف می‌شود. گزارشات بیسو و همکاران [۲] نشان می‌دهد که بعد از هزینه‌های پرسنلی، انرژی دومین عامل پرهزینه (تقریباً ۲۰٪ کل هزینه‌ها) در این صنعت است. بر این اساس، مطالعه درخصوص مصرف انرژی در صنایع فولاد و بهینه‌سازی آن چند سالی است که مورد توجه محققان می‌باشد. در این مقاله به برخی از کارهای قبلی انجام‌شده در این زمینه اشاره می‌شود.

امروزه استفاده از روش انرژی و به‌کار بستن قانون دوم ترمودینامیک در آنالیز سیستم‌های مهندسی، بر دیگر روش‌ها ترجیح داده می‌شود، زیرا این نوع آنالیز دارای دقت بیشتر، قابل اعتمادتر و از همه مهم‌تر دارای نتایج معنی‌دارتری است. انرژی معادل است با بیشترین کار قابل حصول هنگامی که یک سیستم با یک حجم کنترل از حالت اولیه خود به حالت مرده می‌رسد [۳]. در سال‌های اخیر، محققان زیادی از روش انرژی برای آنالیز فرایندهای صنعتی استفاده کرده‌اند. کامدالی و همکاران [۴] با آنالیز انرژی یک کوره قوس الکتریکی، بازده را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند و انرژی سیستم را ۵۵٪ برآورد نمودند. بیسو و همکاران [۲] تأثیر پارامترهای طراحی را در یک کوره قوس الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. بر پایه این تحقیق، میزان بازده انرژی یک کوره قوس نمونه در صورت بازیافت کل انرژی خروجی کوره، ۵۵٪ است و در صورتی که از بازیافت انرژی خروجی از کوره توسط سرباره و آب خنک‌کن صرف‌نظر شود، این میزان بازده به ۵۲٪ می‌رسد. حاجی‌دولو و همکاران [۵] تأثیر پیش‌گرمایش آهن اسفنجی بر افزایش بازده و کارایی کوره‌های قوس الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند.

گورن‌وال در مطالعه‌ای ضمن مطالعه جریان انرژی در فرایندهای صنعتی، سیکل تولید فولاد شامل کوره الکتریکی را به روش انرژی مطالعه کرده و اتلافات انرژی و انرژی آن را مورد محاسبه قرار داده است [۶]. نوبویوکی شیکاگیو و همکاران نیز در مطالعه‌ای کارخانه تولید فولاد در ژاپن را از لحاظ انرژی مورد تحلیل قرار داده و از این روش برای بهینه‌سازی آن استفاده کرده است [۷].

فناوری مورد استفاده کارخانه مورد مطالعه برای تولید ذوب، ذوب به روش القا می‌باشد که از کوره‌های ذوب القایی بدین منظور استفاده می‌شود. استفاده از القا جهت ذوب، تقریباً از دهه ۹۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته است [۸]. صنعتی که برای ذوب فلزات از انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند، به دو گونه از یکدیگر مجزا می‌شوند: استفاده

جدول (۱): مشخصات فنی کوره القایی

مقدار	متغیر
۳۲	تعداد حلقه‌های کویل القاگر (N)
۱۸۰۰	جریان در کویل (I)A
$1/37 \times 10^{-8}$	مقاومت الکتریکی مس در $25^\circ\text{C}$ ، $m(\rho_c)\Omega$
۰/۷۳۰	شعاع داخلی القاگر (D <sub>in</sub> )m
۱۴۶/۷۷۶۶	طول کلی لوله مسی، (L <sub>c</sub> )m
۷۵۰	مساحت مقطع عرضی لوله القاگر (A <sub>c</sub> )mm <sup>2</sup>
$3/9 \times 10^{-3}$	ضریب دمایی مس در $25^\circ\text{C}$ ، $K^{-1}(\alpha\theta_0)$

### ۳. معادله‌های انرژی و انگرژی

در ادامه، روابط کلی مورد نیاز برای تحلیل انرژی و انگرژی سیکل مورد مطالعه ارائه شده است. فرض‌هایی که در طول تمامی محاسبات لحاظ شده، به شرح زیر است:

۱. تمامی فرایندهای سیکل به صورت پایا رخ می‌دهد.

۲. از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود.

اولین رابطه مربوط به موازنه جرم است که در حالت کلی به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$\dot{m}_{in}$  دبی جرمی ورودی و  $\dot{m}_{out}$  دبی جرمی خروجی است. موازنه انرژی به صورت عمومی با رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \quad (2)$$

$\dot{E}_{in}$  انرژی ورودی به سیستم و  $\dot{E}_{out}$  انرژی خروجی از سیستم است. رابطه (۲) را می‌توان به صورت رابطه (۳) نیز نوشت:

$$\dot{Q}_{net} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (3)$$

$\dot{Q}_{net}$  انتقال حرارت خالص و  $\dot{W}_{net}$  کار خالص است.  $h_{in}$  آنتالپی ورودی و  $h_{out}$  آنتالپی خروجی است. رابطه کلی موازنه انگرژی با رابطه‌های (۴) و (۵) بیان می‌شود:

$$\sum X_{in} - \sum X_{out} = X_{loss} \quad (4)$$

$$X_{heat} - X_{work} + X_{mass,in} - X_{mass,out} = X_{loss} \quad (5)$$

همچنین می‌توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{in} X_{in} - \sum \dot{m}_{out} X_{out} = X_{loss} \quad (6)$$

با توجه به اینکه از اثر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است، بنابراین انگرژی ویژه (X) در شرایط یکنواخت به صورت رابطه زیر است:

$$X = X^{ph} + X^{ch} \quad (7)$$

$X^{ph}$  انگرژی فیزیکی و  $X^{ch}$  انگرژی شیمیایی است. با جایگذاری عبارت اخیر برای حالت ورودی و نیز حالت مرده برای حالت خروجی، انگرژی ترمومکانیکی با رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$X^{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

عبارات رابطه (۸) با روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) بیان می‌شود:

$$(s_i - s_{i0}) = \int_{T_0}^T (\bar{c}_p / T) dT \quad (9)$$

$$(h_i - h_{i0}) = \int_{T_0}^T \bar{c}_p dT \quad (10)$$

$$X_{loss} = \int_1^2 T_0 dS_{gen} \quad (11)$$

بازده انرژی و انگرژی را می‌توان به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) نوشت:

$$\eta_I = \frac{E_{useful}}{E_{in}} \quad (12)$$

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{ex} X_{ex}}{\sum \dot{m}_{in} X_{in}} = 1 - \frac{X_{loss, total}}{\sum \dot{m}_{in} X_{in}} \quad (13)$$

اتلاف انگرژی کلی سیکل برابر با مجموع برگشت‌ناپذیری‌های رخ

داده در تک‌تک اجزای سیکل است.

### ۱.۳. معادله‌های تعادلی برای مراحل سیکل تولید فولاد

پس از ارائه روابط کلی، به بررسی این رابطه‌ها برای سه فرایند سیکل مورد مطالعه پرداخته می‌شود. پس از بررسی روابط برای هر مرحله نتایج به دست آمده از بررسی نمونه مورد مطالعه به صورت جداگانه ارائه شده است.

**کوره القایی:** روابط کلی پیشین برای کوره القایی به صورت روابط

(۱۴) تا (۱۶-۳) درمی‌آید.

معادله موازنه انرژی به صورت رابطه‌های:

$$E_{elec} + \sum n_i [\bar{h}_o^\circ + \Delta \bar{h}]_i = \sum n_e [\bar{h}_o^\circ + \Delta \bar{h}]_e + \sum Q_{loss} \quad (14)$$

و عبارات معادله (۱۴) به صورت روابط (۱۵-۱) تا (۱۵-۳) است:

$$\sum_{ex} n_{ex} X_{ex} = n_{LS} X_{LS} + n_{slag} X_{slag} + n_{st-in-slag} X_{st-in-slag} + n_{S-gas} X_{S-gas} + n_{C-water} X_{C-water} \quad (۳-۱۶)$$

پیش گرمایش پاتیل و قیف: دومین فرایندی که در این سیکل مطرح است. فرایند پیش گرمایش پاتیل و قیف می باشد که در این قسمت به تحلیل انرژی و انرژی این بخش پرداخته می شود. روابط مورد استفاده در تحلیل های پیش رو برای این مرحله به شکل روابط (۱-۱۷) تا (۴-۱۷) می باشد.

$$\sum n_i [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_i = \sum n_e [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_e + \sum Q_{loss} \quad (۱-۱۷)$$

$$\sum n_i [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_i = \sum n_{oxygen} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{oxygen} + \sum n_{nat-gas} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{nat-gas} \quad (۲-۱۷)$$

$$\sum n_e [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_e = \sum n_{stack-gas} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{stack-gas} \quad (۳-۱۷)$$

$$\sum Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} \quad (۴-۱۷)$$

روابط موازنه انرژی برای فرایند پیش گرمایش با روابط (۱-۱۸) تا (۳-۱۸) بیان می شود:

$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = \sum_{ex} n_{ex} X_{ex} + \sum X^Q + X_{loss} \quad (۱-۱۸)$$

$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = n_{air} X_{air} + n_{nat-gas} X_{nat-gas} + X^{ch} \quad (۲-۱۸)$$

$$X^{ch} = \{ n_{CO_2} X_{CO_2} + n_{H_2O} X_{H_2O} \} - \{ n_{CH_4} X_{CH_4} + n_{C_2H_6} X_{C_2H_6} + n_{C_3H_8} X_{C_3H_8} \} \quad (۳-۱۸)$$

$$\sum_{ex} n_{ex} X_{ex} = n_{S-gas} X_{S-gas} \quad (۴-۱۸)$$

بخش ریخته گری مداوم: سومین و آخرین جزء این سیکل بخش ریخته گری مداوم است که رابطه انرژی برای این بخش، به صورت روابط (۱-۱۹) تا (۴-۱۹) بیان می شود:

$$\sum n_i [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_i + E_{elect} = \sum n_e [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_e + \sum Q_{loss} \quad (۱-۱۹)$$

$$\sum n_i [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_i = \sum n_{Lst} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{Lst} + \sum n_{C-water} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{C-water} \quad (۲-۱۹)$$

$$\sum n_e [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_e = \sum n_{Solid\ steel} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{Solid\ steel} + \sum n_{Hot-water} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{Hot-water} + \sum n_{A-W-vapor} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{A-W-vapor} \quad (۳-۱۹)$$

$$\sum n_i [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_i = \sum n_{scrap} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{scrap} + \sum n_{pig} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{pig} + \sum n_{fluxes} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{fluxes} + \sum n_{coke} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{coke} + \sum n_{deoxmaterials} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{deoxmaterial} + \sum n_{oxygen} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{oxygen} + \sum n_{C-water} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{C-water} \quad (۱-۱۵)$$

$$\sum n_e [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_e = \sum n_{Lst} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{Lst} + \sum n_{slag} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{slag} + \sum n_{dust} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{dust} + \sum n_{S-gas} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{S-gas} + \sum n_{st-in-Slag} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{st-in-Slag} + \sum n_{C-water} [\bar{h}^{\circ}_o + \Delta \bar{h}]_{C-water} \quad (۲-۱۵)$$

$$\sum Q_{loss} = \sum Q_{cond-wall} + \sum Q_{cond-bot} + \sum Q_{conv-top} + \sum Q_{rad-top} + P_c \quad (۳-۱۵)$$

موازنه انرژی برای کوره القایی با روابط (۱-۱۶) تا (۳-۱۶) بیان می شود:

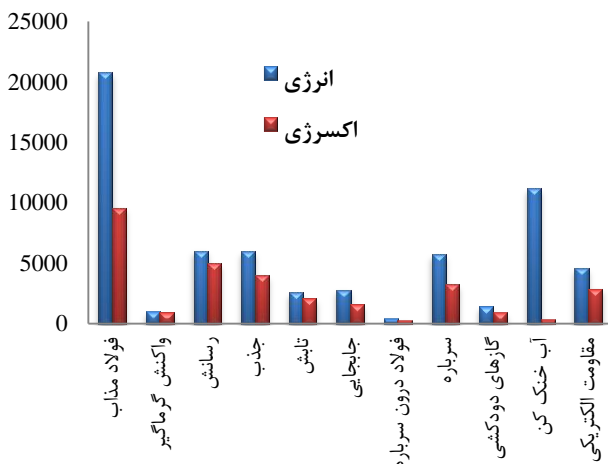
$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = \sum_{ex} n_{ex} X_{ex} + \sum X^Q + X_{loss} \quad (۱۶)$$

$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = n_{scr} X_{scr} + n_{CW} X_{CW} + X^{elec} + X^{ch} \quad (۱-۱۶)$$

$$X^{ch} = \{ n_{Fe_2O_3} X_{Fe_2O_3} + n_{FeO} X_{FeO} + n_{CO} X_{CO} + n_{SiO_2} X_{SiO_2} + n_{MnO} X_{MnO} + n_{P_2O_5} X_{P_2O_5} + n_{Cr_2O_3} X_{Cr_2O_3} + n_{CaS} X_{CaS} + n_{O} X_{O} + n_{CaO} X_{CaO} + n_{CO_2} X_{CO_2} + n_{Al_2O_3} X_{Al_2O_3} + n_{Al_2O_3} X_{Al_2O_3} + n_{ZnO} X_{ZnO} + n_{H_2O} X_{H_2O} \} - \{ n_{Fe} X_{Fe} + n_{O} X_{O} + n_{C} X_{C} + n_{Si} X_{Si} + n_{Mn} X_{Mn} + n_{P} X_{P} + n_{Cr} X_{Cr} + n_{CaO} X_{CaO} + n_{S} X_{S} + n_{CaCO_3} X_{CaCO_3} + n_{Al} X_{Al} + n_{Ca} X_{Ca} + n_{Zn} X_{Zn} \} \quad (۲-۱۶)$$

جدول (۳): نتایج تحلیل انرژی کوره القایی

متغیر	انرژی (E)(MJ)
$E_{Lst}$	۲۰۷۶۷/۵۹
$E_{exodth-react}$	۱۷۳۵۳/۴۶
$E_{cond}$	۶۰۲۲/۵۳
$E_{abs}$	۵۹۳۸/۹۳
$Q_{radly-top}$	۲۵۶۵/۱۲
$Q_{conv-top}$	۲۷۷۸/۹۴
$E_{st-in-stag}$	۳۹۹/۵۶
$E_{slag}$	۵۷۴۲/۲۸
$E_{S-gas}$	۱۴۰۸/۸۹
$E_{C-water}$	۱۱۲۰۵/۷۸
$P_c$	۴۵۱۳/۴۴
$E_{endoth-reac}$	۱۰۰۰/۴۱
مجموع	۴۵۰۰۰



شکل (۲): مقایسه انرژی و انرژی اجزای مختلف کوره القایی

مقایسه انرژی و انرژی اجزای مختلف کوره القایی در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انرژی و انرژی کوره القایی نشان می‌دهد که سهم عمده انرژی ورودی را انرژی الکتریکی تشکیل می‌دهد که دومین بخش شامل واکنش‌های شیمیایی گرمایی است که در سیستم رخ می‌دهد.

در باره انرژی‌های خروجی همان‌طور که قابل پیش‌بینی است، سهم عمده متعلق به فولاد مذاب است، بنابراین قابلیت بازیابی بالایی دارد.

بعد از فولاد مذاب بیشترین انرژی خروجی از طریق خروج آب خنک کن از سیستم منتقل می‌شود که مقدار انرژی این عضو نشان می‌دهد که گزینه خوبی برای بهینه‌سازی نیست. تفاضل بین مقادیر انرژی و انرژی گزینه‌هایی چون اتلاف از طریق رسانش، جذب توسط

$$\sum Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{radly} \quad (4-19)$$

و رابطه موازنه انرژی به صورت روابط (۱-۲۰) تا (۳-۲۰) است:

$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = \sum_{ex} n_{ex} X_{ex} + \sum X^Q + X_{loss} \quad (1-20)$$

$$\sum_{in} n_{in} X_{in} = n_{Lst} X_{Lst} + n_{C-water} X_{C-water} + X^{elect} \quad (2-20)$$

$$\sum_{ex} n_{ex} X_{ex} = n_{S-steel} X_{S-steel} + n_{H-water} X_{H-water} + n_{A-W} X \quad (3-20)$$

## ۴. نتایج تحلیل انرژی و انرژی

### ۴.۱. نتایج موازنه انرژی و انرژی برای کوره القایی

جدول (۲) ارائه‌کننده موازنه جرمی انجام شده برای کوره القایی است. جدول (۳) موازنه انرژی برای کوره القایی مورد مطالعه را نشان می‌دهد و جدول (۴) نمایش‌دهنده موازنه انرژی انجام شده برای کوره القایی است. مقایسه مقادیر انرژی و انرژی اجزای مختلف نیز در شکل (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): نتایج موازنه جرمی کوره القایی

مقدار (kg)	مواد
	مواد ورودی به کوره القایی
۹۸۰۰	آهن قراضه
۳۲۰۰	آهن اسفنجی
۶۰	کک
۲۱۰	مواد دی اکسیدیزاسیون
۵۸۰	اکسیژن
۲۲۴۰۰۰	آب خنک‌کن
۲۳۷۸۵۰	مجموع
	مواد خروجی از کوره
۱۰۰۰۰	فولاد مذاب
۲۸۵۰	سرباره
۳۰۰	فولاد در سرباره
۷۰۰	گازهای دودکشی
۲۲۴۰۰۰	آب خنک کن
۲۳۷۸۵۰	مجموع

جدول (۶): نتایج موازنه انرژی در پاتیل

متغیر	انرژی (MJ)(E)
$E_{\text{exodth-react}}$	۱۵۶۶۳/۲۱
$E_{\text{cond}}$	۵۴۶/۴۱
$E_{\text{abs}}$	۱۳۰۳۷/۰۲
$Q_{\text{rady}}$	۴۷۰/۲۵
$Q_{\text{conv}}$	۵۳۰/۳
$E_{\text{S-gas}}$	۱۰۹۳/۶۳

جدول (۷): نتایج موازنه انرژی در قیف

متغیر	انرژی (MJ)(E)
$E_{\text{exodth-react}}$	۱۹۲۴/۴۸
$E_{\text{cond}}$	۷۵/۸۲
$E_{\text{abs}}$	۶۳۴
$Q_{\text{rady}}$	۱۷۱/۷۹
$Q_{\text{conv}}$	۱۵۱/۲۳
$E_{\text{S-gas}}$	۲۵۷/۶۴

از جمله نتایجی که می‌توان از نتایج تحلیل‌ها گرفت، بالا بودن مقادیر اتلافات انرژی و انرژی این بخش می‌باشد که بسیار بالاست و با یک ارزیابی ساده و مقایسه مقادیر انرژی و انرژی این متغیرها نیاز به‌بازبینی در نحوه کارکرد این بخش و بهینه‌سازی آن بسیار واضح به‌نظر می‌رسد. این بازبینی شامل بازبینی در لزوم پیش‌گرمایش این وسایل است و نیز با در نظر داشتن مقادیر مربوط به متغیرهای اصلی که شامل اتلاف از طریق رسانش، جابجایی و تشعشع که مقادیر اصلی در اتلاف انرژی می‌باشد، لزوم ارائه راهکارهایی برای بازبینی این اتلافات است.

جدول (۸): موازنه انرژی برای پیش‌گرمایش پاتیل

متغیر	انرژی (MJ)(X)
انرژی ورودی به سیستم (پاتیل)	۰
گاز طبیعی	۰
اکسیژن	۰
واکنش‌های گرمازا	۷۷۷/۵۰
مجموع	۷۷۷/۵۰
انرژی ورودی مواد خروجی از سیستم	۰
گازهای دودکشی	۶۰۹/۶۴
اتلافات انرژی	۷۱۶۷/۸۶
مجموع	۷۷۷/۵۰

لایه‌های بدنه کوره، سرباره و مقاومت الکتریکی کوئل نشان می‌دهند که قابلیت بالایی برای بهینه‌سازی دارد.

## ۲.۴. نتایج موازنه انرژی و انرژی فرایند پیش‌گرمایش

نتایج موازنه جرم برای فرایند پیش‌گرمایش پاتیل و قیف انتقال مذاب در جدول (۵) گزارش شده است.

جداول (۶) و (۷) به ترتیب گزارش‌کننده نتایج عددی حاصل از موازنه انرژی برای فرایند پیش‌گرمایش پاتیل و قیف است. جداول (۸) و (۹) نتایج عددی حاصل از موازنه انرژی به ترتیب برای پاتیل و قیف را در حین فرایند پیش‌گرمایش به نمایش درآورده است.

جدول (۴): نتایج موازنه انرژی برای کوره القایی

متغیر	انرژی (MJ)(X)
انرژی ورودی به کوره القایی	۰
آهن قراضه تزریقی	۰
کک	۰
مواد گداز آور	۰
اکسیژن	۰
آب خنک‌کن	۱۷/۹۲۲۲
انرژی الکتریکی	۴۵۰۰۰
واکنش‌های شیمیایی	۱۵۲۹۴/۵۵
مجموع	۶۰۳۱۲/۴۷
انرژی خروجی از کوره القایی	۰
فولاد مذاب	۹۵۶۱/۸۰۳۵
سرباره	۳۲۶۱/۳۵
فولاد درون سرباره	۲۸۶/۸۴۳
گازهای دودکشی	۹۲۳/۵۴۸
آب خنک‌کن	۳۵۸/۲
واکنش‌های شیمیایی گرماگیر	۹۲۸/۱۴
اتلاف انرژی	۴۴۹۹۲/۵۹
مجموع	۶۰۳۱۲/۴۷

جدول (۵): نتایج موازنه جرم فرایند پیش‌گرمایش

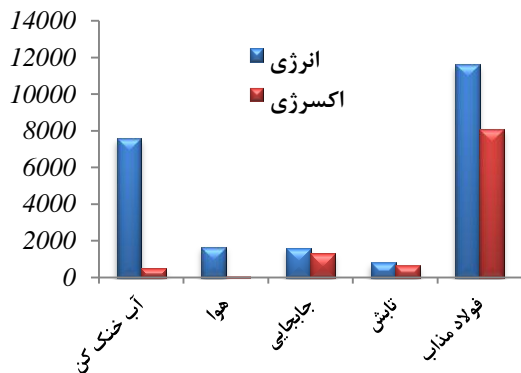
مواد	مقدار برای قیف (kg)	مقدار برای پاتیل (kg)
مواد ورودی		
گاز طبیعی	۸۰	۱۶۰
اکسیژن	۴۰۰	۶۵۰
مجموع	۴۸۰	۸۱۰
مواد خروجی		
گازهای دودکشی	۴۸۰	۸۱۰
مجموع	۴۸۰	۸۱۰

جدول (۹): موازنه انرژی برای پیش‌گرمایش تانیش

متغیر	انرژی (MJ)(X)
انرژی ورودی به سیستم (قیف)	۰
گاز طبیعی	۰
اکسیژن	۱۵۹۴/۸۷
واکنش‌های گرمازا	۱۵۹۴/۸۷
مجموع	۱۷۴/۴۵
انرژی مواد خروجی از (قیف)	۱۴۲۲/۰۴
گازهای دودکشی	۱۵۹۴/۸۷
اتلافات انرژی	۰
مجموع	۰

جدول (۱۲): نتایج موازنه انرژی برای بخش ریخته‌گری

پارامتر	انرژی (MJ)(X)
انرژی ورودی به سیستم	۸۰۷۰
فولاد مذاب	۰
هوا	۴/۳۰۱
آب خنک کن	۲۵۹/۲
الکتروسیته	۸۳۳۳/۵
مجموع	۰
انرژی خروجی از سیستم	۴۲/۶۸
فولاد جامد	۵۱۲/۲۴
هوا	۷۷۷۸/۵۷
آب خنک کن	۸۳۳۳/۵
اتلافات انرژی	۰
مجموع	۰



شکل (۳): مقایسه انرژی و انرژی پارامترهای مختلف

با دقت در نتایج به دست آمده از تحلیل انرژی و انرژی بخش ریخته‌گری مداوم می‌توان دریافت که بخش اعظم انرژی و انرژی ورودی به سیستم از طریق ورود فولاد مذاب به سیستم وارد می‌شود که قرار است در این بخش توسط آب خنک‌کن گرفته و فولاد سخت گردد، اما انرژی کسب شده توسط آب که دارای بیشترین مقدار در پارامترهای خروجی است، انرژی بسیار ناچیزی دارد. این تفاوت ما را متوجه این نکته می‌سازد که این انرژی قابلیت ناچیزی برای بازگشت پذیری و بهینه‌سازی دارد.

#### ۴.۴. تحلیل انرژی و انرژی سیکل تولید فولاد

اکنون پس از بررسی تک‌تک اجزای سیکل تولید فولاد، نوبت به بررسی سیکل کلی می‌رسد. بدین منظور شکل‌های (۴) تا (۶) و جدول (۱۳) ارائه شده است. شکل (۴) نشان‌دهنده نمودار سن کی<sup>۱</sup> جریان انرژی در بخش‌های مختلف سیکل تولید شمش فولاد می‌باشد که سهم انرژی‌های مختلف در آن مشخص شده است. شکل (۵) نمودار جریان انرژی در بخش‌های مختلف سیکل مورد مطالعه می‌باشد که سهم انرژی‌های

#### ۴.۳. نتایج موازنه انرژی و انرژی بخش ریخته‌گری مداوم

جدول (۱۰) ارائه‌کننده نتایج موازنه جرم برای بخش ریخته‌گری مداوم است. جدول (۱۱) نتایج مربوط به موازنه انرژی و جدول (۱۲) نتایج موازنه انرژی را گزارش کرده است. مقادیر انرژی و انرژی انتقالی از طرق مختلف از بخش ریخته‌گری مداوم در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۱۰): نتایج موازنه جرم برای بخش ریخته‌گری مداوم

مواد	مقدار (kg/s)
مواد ورودی به سیستم	۳/۷۰۴
فولاد مذاب	۹/۵
هوا	۱۷/۷۸
آب خنک	۳۰/۹۸۴
مجموع	۳/۷۰۴
مواد خروجی از سیستم	۹/۵
فولاد جامد	۱۷/۷۸
هوا	۳۰/۹۸۴
آب داغ	۰
مجموع	۰

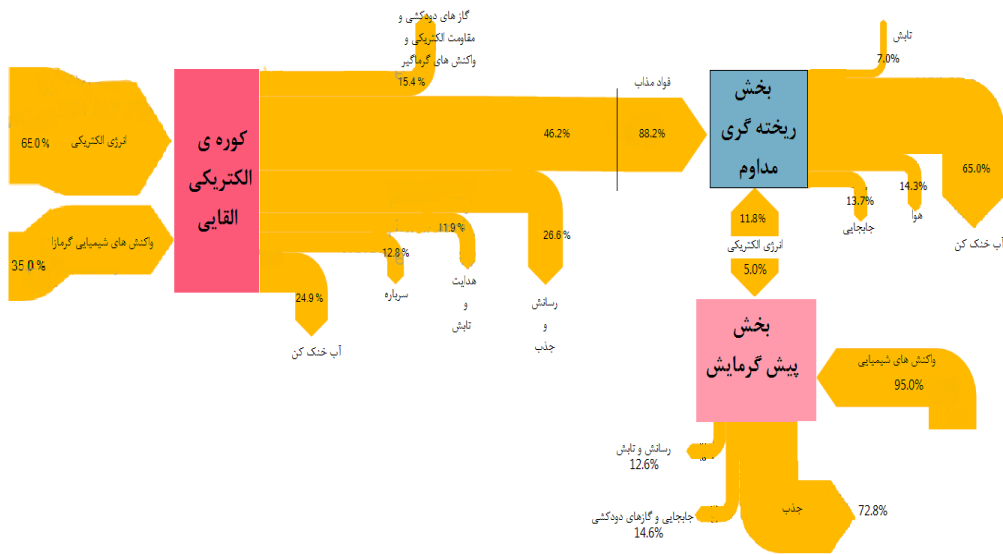
جدول (۱۱): انرژی‌های ورودی و خروجی از بخش ریخته‌گری مداوم

متغیر	انرژی (MJ)(E)
$E_{Lst}$	۱۱۶۳۴/۳۲
$Q_{radly-top}$	۸۰۹/۶۲
$Q_{conv-top}$	۱۵۹۹/۹۸
$E_{Air}$	۱۶۶۳/۶۶
$E_{C-water}$	۷۵۶۱/۰۶
$E_{Elec}$	۲۵۹/۲

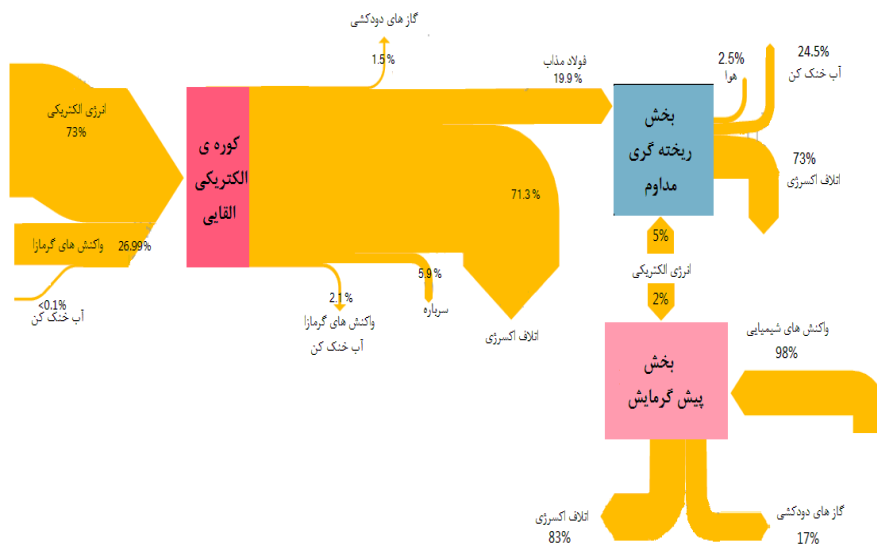
## تحلیل انرژی و انرژی کارخانه فولاد بویصر صنعت یاسوج... ۶۷

می‌کند که بخش‌های مختلفی از سیکل را که موجب هدررفت انرژی می‌شود، شناسایی و اصلاح گردد. چنان‌که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بازده انرژی برای کوره القایی است.

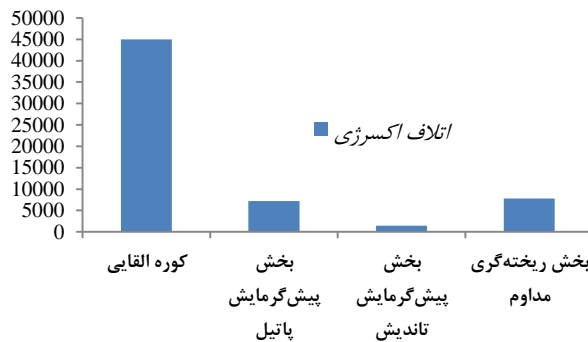
مختلف در آن مشخص شده است. شکل (۶) ارائه‌کننده مقادیر اتلافات انرژی است. جدول (۱۳) نیز بازده‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک را برای بخش‌های مختلف سیکل نشان می‌دهد. بازده قانون دوم کمک



شکل (۴): نمودار سن کی جریان انرژی در سیکل تولید فولاد



شکل (۵): نمودار سن کی جریان انرژی در سیکل تولید فولاد



شکل (۶): اتلاف انرژی بخش‌های مختلف سیکل تولید فولاد



جدول (۱۳): بازده‌های انرژی و آگزرژی

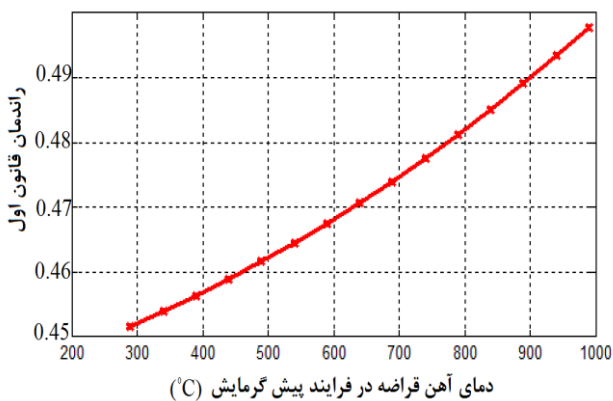
عنوان	بازده انرژی، $\eta_I$	بازده آگزرژی، $\eta_{II}$
کوره القایی	۰/۴۶۱۵	۰/۲۵۴۰
پیش‌گرمایش پاتیل	۰/۲۶۶۵	۰/۱۱۳۶
پیش‌گرمایش قیف	۰/۲۵۶۷	۰/۱۰۷۹
ریخته‌گری مداوم	-	۰/۰۶۶۶
سیکل کلی تولید فولاد	۰/۴۴۸۵	۰/۲۱۳۵

#### ۵.۴. بحث در نتایج

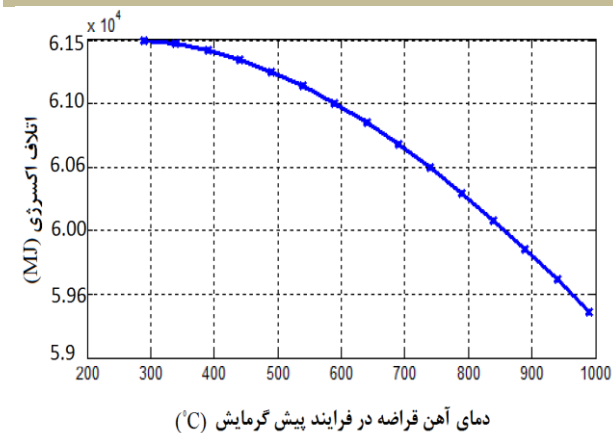
با توجه به بازده‌های انرژی و آگزرژی بخش‌های مختلف سیکل و نیز مقایسه اتلافات آگزرژی این بخش‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که مهم‌ترین بخش این سیکل از حیث بهینه‌سازی انرژی کوره القایی است. بنابراین بیشترین تمرکز برای بهینه‌سازی باید بر روی کوره القایی انجام گیرد. از سوی دیگر، بازده انرژی برای سیکل تولید فولاد ۴۴/۸۵ و بازده آگزرژی ۲۱/۳۵ می‌باشد که این اختلاف نشان دهنده امکان بالای سیکل برای بهینه‌سازی است. مقایسه مقادیر اتلافات انرژی در بخش‌های مختلف سیکل همراه با مقادیر آگزرژی معادل آن‌ها این امکان را فراهم می‌کند که هر بخش از سیکل، به چه میزان قابلیت بازیابی دارد. برای مثال در کوره القایی که به‌عنوان مهم‌ترین بخش این سیکل شناخته شد، در هر بار فرایند ذوب‌گیری، ۲۲۴ تن آب خنک‌کن استفاده می‌شود. این حجم آب با دمای  $17^{\circ}\text{C}$  وارد شده و با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  سیستم را ترک می‌کند. با در نظر گرفتن نتایج تحلیل انرژی، در طی این فرایند انرژی زیادی منتقل می‌شود که ۱۸٪ از انرژی خروجی را شامل می‌شود. اما از نقطه نظر تحلیل آگزرژی مشاهده می‌شود که فقط ۱٪ آگزرژی خروجی سیستم را شامل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آگزرژی آب بسیار پایین است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نشان می‌دهد که واکنش‌های شیمیایی نقش مهمی را در بخش کوره و نهایتاً تولید بازی می‌کنند. در سیستم مورد مطالعه آن‌ها سهمی حدود ۲۸٪ در انرژی ورودی و حدود ۲۵٪ در آگزرژی ورودی را دارا می‌باشند. سهم‌های اشاره‌شده حاکی از آن است که واکنش‌های شیمیایی امکان زیادی برای بازیابی انرژی دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند پیش‌گرم کردن مواد اولیه در فرایند احتراق، راندمان انرژی را بالا برد. مقادیر اتلاف انرژی و آگزرژی از طرق مختلف نشان می‌دهد که کدام نقاط از سیکل برای بازیابی مناسب‌ترند و نیز اینکه کدام راهکارها مناسب‌تر است که با توجه به این نکات در ادامه راهکارهایی ارائه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

**پیش‌گرمایش آهن قراضه:** با توجه به مقادیر بالای انرژی و آگزرژی مربوط به فولاد مذاب خروجی می‌توان نتیجه گرفت که این پارامتر در

بهبود عملکرد کوره القایی و در نهایت بهبود سیکل کلی می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. از جمله راهکارهای برای کاهش اتلافات، در نظر گرفتن فرایند پیش‌گرمایش برای مواد ورودی است. برای بررسی تأثیر پیش‌گرمایش مواد ورودی، تأثیر پیش‌گرمایش آهن قراضه که از مواد اصلی ورودی به کوره مورد مطالعه می‌باشد بر پارامترهای اصلی سیکل تولید فولاد، یعنی بازده‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک و اتلاف آگزرژی آن با رسم نمودار تغییرات آن‌ها در شکل‌های (۷) تا (۹) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۷) نمودار تغییرات بازده قانون اول ترمودینامیک با تغییرات دمای آهن قراضه ورودی، شکل (۸) نمودار تغییرات اتلافات آگزرژی با تغییرات دمای آهن قراضه ورودی و شکل (۹) نمودار تغییرات بازده قانون دوم ترمودینامیک با تغییرات دمای آهن قراضه ورودی را نشان می‌دهند. همه این نمودارها فرض ما مبنی بر بهبود عملکرد سیکل با انجام پیش‌گرمایش را تأیید می‌کنند، چون همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش تدریجی دمای آهن قراضه ورودی به سیستم تمامی متغیرهای مورد مطالعه رو به افزایش می‌نهند.



شکل (۷): تغییرات بازده قانون اول سیکل با تغییرات دمای آهن قراضه در پیش‌گرمایش

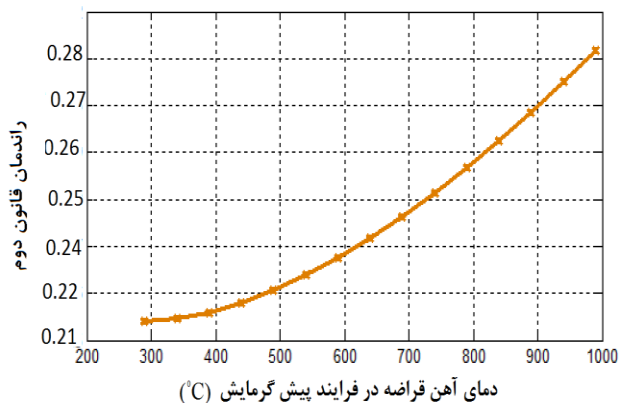


شکل (۸): تغییرات اتلافات آگزرژی سیکل با تغییرات دمای آهن قراضه در پیش‌گرمایش

فرو منگنز و کک است، مشخص می‌شود که این جزء نیز قابلیت بازیابی بالایی را دارد. البته برای بررسی این پیشنهاد، یعنی افزودن بیشتر مواد مذکور به سیستم، نیاز به مطالعات متالورژیکی می‌باشد که از تخصص و حوصله این تحقیق بیرون است، اما به عنوان پیشنهاد قابل بررسی مطرح می‌شود.

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله، تحلیل انرژی و انرژی سیکل تولید فولاد کارخانه فولاد یاسوج انجام شده است. این تحلیل برای شناسایی عوامل تخریب انرژی و در نتیجه آن تعیین پتانسیل‌های لازم برای بهبود عملکرد سیکل صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بخش مربوط به کوره القایی که فرایند ذوب در آن رخ می‌دهد، در مقایسه با دیگر مراحل سیکل مورد مطالعه بیشترین پتانسیل بهینه‌سازی را دارد. نتایج نشان می‌دهد که واکنش‌های شیمیایی نقش مهمی را در بخش کوره و نهایتاً تولید بازی می‌کنند. در سیستم مورد مطالعه آن‌ها سهمی حدود ۲۸٪ در انرژی ورودی و حدود ۲۵٪ در انرژی ورودی دارند. یعنی واکنش‌های شیمیایی پتانسیل زیادی برای بازیابی انرژی دارد. بر این اساس می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند پیش‌گرم کردن مواد اولیه (آهن قراضه و آهن اسفنجی تزریق‌شده به کوره) در فرایند احتراق، نصب درپوش برای بخش پیش‌گرمایش سیکل به منظور جلوگیری از حرارت اتلافی آن و تزریق بیشتر موادی که منجر به واکنش‌های گرمای اصلی در کوره می‌شوند، عملکرد سیکل را بهبود و مصرف انرژی را کاهش داد.



شکل (۹): تغییرات بازده قانون دوم سیکل با تغییرات دمای آهن قراضه در پیش‌گرمایش

استفاده از انرژی اتلافی در بخش پیش‌گرمایش سیکل: با توجه به مقادیر انرژی و انرژی اتلافی در بخش پیش‌گرمایش نیاز به بهبود عملکرد در این بخش بسیار واضح است. با توجه به اینکه در بخش قبل تأثیر مثبت پیش‌گرمایش مواد ورودی به کوره در بهینه‌سازی سیکل تأیید شد، می‌توان برای بازیابی انرژی و بهینه‌سازی بخش پیش‌گرمایش پاتیل و قیف سیکل، از حرارت اتلافی این بخش برای پیش‌گرمایش مواد ورودی به کوره بهره جست. بدین منظور با تعبیه سرپوش ویژه برای پاتیل و قیف در حین فرایند پیش‌گرمایش می‌توان هم از اتلاف انرژی از طریق فرایند جابجایی و نیز تشعشع جلوگیری نمود و هم از حرارت مازاد برای انجام فرایند پیش‌گرمایش مواد ورودی به کوره استفاده کرد.

افزایش انرژی آزادشده از واکنش‌های شیمیایی گرمای: با دقت در مقادیر انرژی و انرژی آزادشده از واکنش‌های گرمای در حین فرایند ذوب در کوره القایی که نتیجه تزریق مواد همچون فروسیلیس،

### ۶. مراجع

- [1] Camdali, U., "The Second Law Analysis of Thermodynamics in Steel Production by Electric Arc Furnace Method at a Steel Manufacturing Company", Istanbul Technical University Institute of Science & Technology, Ph.D. Thesis, (in Turkish), 1998.
- [2] Bisio, G., Rubatto G., Martini R., "Heat Transfer, Energy Saving and Pollution Control in UHP Electric Arc Furnaces", Energy 25, pp.1047-1066, 2000.
- [3] Moran, J. and Talwar, N., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 3rd Edition, McGraw Hill, New York, 1994.
- [4] Camdali U., Tunc M., "Exergy Analysis and Efficiency in an Electric Arc Furnace", Int. J. Energy Res. 23, pp.2255-2267, 2003.
- [5] Hajidavallo, E., and Alagheband, A. "Thermal Analysis of Sponge Iron Using Waste Energy of EAF", Materials Processing Technology, 2008.
- [6] Wall G., "Exergy Flows in Industrial Processes", Energy, Vol. 13, No.2, pp.197-208, 1988.
- [7] Shigaki N., Akiyama T., Tsukihashi F., "Exergy Analysis of Steel Production Processes", Material Transaction, Vol. 43, No.3, 2002, pp.379 - 384.
- [8] Davies E.J. and Simpson P.G., "Induction Heating Handbook", London: McGraw-Hill, 1979.
- [9] معراجیان حسین، منتصر کوهساری شهرام، «بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع ذوب القایی»، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۰۰۶.
- [۱۰] معراجیان حسین، کوره‌های القایی گذشته، حال، آینده، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، فروردین ۸۴
- [11] Suetens T., Klaasen B., Van Acker K., Blanpain B., "Comparison of Electric Arc Furnace Dust Treatment Technologies Using Exergy Efficiency", Journal of Cleaner Production, Vol.65, pp. 152-167, 2014.