

## بهینه سازی مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی

سید خطیب الاسلام صدر نژاد (استاد)

سروش پرویزی (کارشناسی ارشد)

### چکیده

در حالیکه تقاضای انرژی هر روز در جهان در حال افزایش است، تغییر الگوی مصرف و راه های بکارگیری انرژی در دنیای امروز برای پیشرفت اقتصادی کشورها اهمیت حیاتی دارد. نیاز به کارخانه های کوچک فولاد سازی برای تولید فولادهای مخصوص و یا با کیفیت برتر، کاهش سرمایه گذاری اولیه، تعدیل هزینه های تولید، کاهش آلودگی زیست محیطی و افزایش تولید قراضه در سالهای اخیر باعث گسترش روز افزون فولاد سازی در کوره های قوس الکتریکی شده است. مشکل اساسی این کوره ها مصرف زیاد انرژی الکتریکی است. لذا بهینه سازی مصرف انرژی در این بخش اهمیت دارد. با توجه به ضرورت تقلیل مصرف انرژی و افزایش روز افزون نیاز به محصولات صنعتی به ویژه فولادهای دارای کیفیت بالا، بهینه سازی مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی از اولویتهای تحقیقاتی کشور نیز تلقی می شود. در این پژوهش راهکارهای کاهش انرژی الکتریکی مصرفی کوره های قوس الکتریکی با استفاده از پیش بینی رفتار کوره توسط نرم افزار مبتنی بر قوانین علمی و داده های تجربی بررسی شده است. طرح و ساخت نرم افزار با استفاده از روابط ترمودینامیکی و موازنه های جرم و انرژی انجام شده و از مقالات علمی، اطلاعات عملی کوره های الکتریکی شرکت فولاد خوزستان و نرم افزارهای موجود استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:** کوره قوس الکتریکی، بهینه سازی انرژی، موازنه انرژی، موازنه جرمی، بازدهی

### مقدمه

نحوه مصرف انرژی در ایران متناسب با ساختار اقتصادی، میزان تولید و صنعت کشور نیست. به دلیل ارزانی انرژی و یارانه دولتی، شاهد مصرف غیربهینه، اتلاف، مصرف زدگی و فقدان فرهنگ صرفه جویی هستیم [۱]. یارانه سالانه بخش انرژی در سالهای اخیر در کشور

معادل ۱ تا ۱۳ میلیارد دلار بوده است. مصرف انرژی در جهان در سال های اخیر یک تا دو درصد رشد داشته است. در حالی که این رشد در ایران پنج تا هشت درصد در سال بوده است. براین اساس رشد مصرف انرژی در ایران بیش از پنج برابر متوسط رشد مصرف انرژی در جهان بوده است. این موضوع هم به دلیل توسعه سریع صنعت و هم به سبب مصرف بی رویه انرژی بوده است.

بخش بزرگی از انرژی الکتریکی کشور در حال حاضر صرف تولید فولاد در کوره های قوس الکتریکی می شود. روش قوس الکتریکی سهم بزرگی از تولید فولاد جهان و کشور را در شرایط حاضر به عهده دارد. این روش به دلایل متعدد در تمام دنیا در حال گسترش بوده [۲] و سهم عمده ای از تولید فولاد جهان را به خود اختصاص داده است. علاوه بر مصرف قابل توجه انرژی توسط صنعت فولاد در مقایسه با سایر صنایع، دانستن این نکته که در یک مجتمع تولید فولاد، حدود ۷۰ درصد برق توسط کوره های قوس الکتریکی مصرف می شود، اهمیت کوره های قوس الکتریکی را از بعد مصرف انرژی نشان می دهد [۴،۳]. سهم هزینه انرژی در یک مجتمع تولید فولاد به مراتب بیشتر از این سهم در سایر صنایع است. به طوری که پس از هزینه های پرسنلی، هزینه انرژی رتبه دوم را دارا است. کاهش مصرف انرژی در صنایع تولید فولاد به روش برقی لذا موضوعی مهم برای تحقیق و بررسی می باشد [۵،۳].

صنعت فولاد در ایران توانایی های بالقوه فراوانی دارد که از آنها به خوبی استفاده نشده است. مصرف نسبتاً بالای انرژی الکتریکی در این صنعت اقتصاد عملیات را تحت تاثیر قرار داده و بر گسترش فناوری های تولید فلز به عنوان یک پایه اساسی رشد صنعتی، تاثیر بازدارنده داشته است [۱]. مع هذا با تاسیس واحد های کوچک تولید فولاد در دهه های اخیر، کاربرد کوره های برقی اعم از قوس الکتریکی و یا القایی رشد چشم گیری داشته است [۷،۶]. پیشرفت های فراوانی در دهه های اخیر در زمینه کاهش هزینه تولید، ممانعت از آلودگی محیط زیست، افزایش ظرفیت ساخت و بهبود کیفیت فلزات اساسی مانند فولاد انجام شده است [۸]. استفاده از کوره قوس الکتریکی پر توان UHP<sup>۱</sup> و سیستم آبگرد<sup>۲</sup> برای حفظ و گسترش جایگاه روش قوسی در رقابت با سایر روش های فولاد سازی مفید و موثر واقع شده است. تلاش های انجام شده در زمینه های کاهش مصرف برق، کاهش مصرف الکتروود و تقلیل مصرف مواد نسوز همراه با کوشش برای کم کردن آلایندگی های محیط زیست، افزایش سرعت تولید فلز، بالا بردن بازدهی فولاد سازی و اصلاح سیستم های برقی همواره مورد توجه قرار داشته است [۶-۱۱]. استفاده از شبیه سازی فرآیند و طراحی و ساخت نرم افزارهای کنترل کننده عملیات، بهینه سازی فعالیتهای تولید فلز را به شدت تسهیل کرده و پیشرفتهای قابل توجهی را در راستای فناوری و هنر فولادسازی به ارمغان آورده است [۷-۱۹].

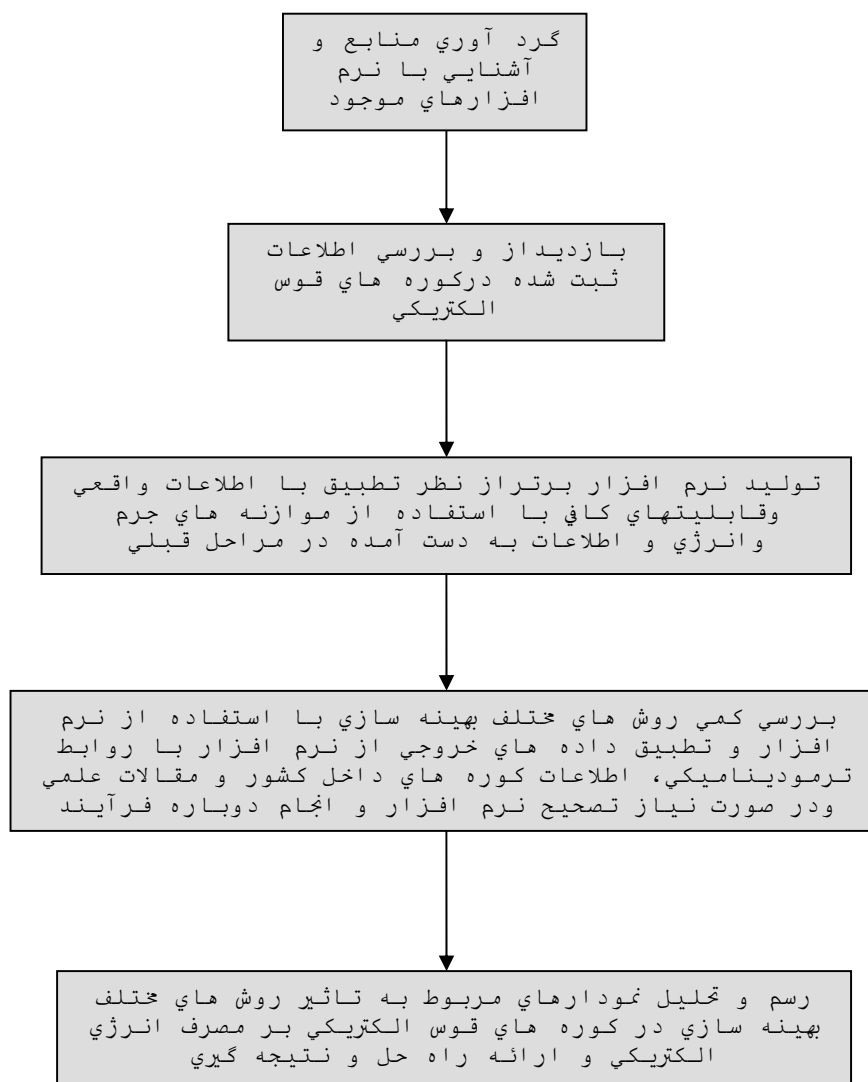
## روش تحقیق

برای بهینه سازی مصرف انرژی ابتدا باید پارامترهای موثر در موازنه انرژی کوره قوسی را شناسایی کرد. نکته اساسی در مورد کوره های قوس الکتریکی ورود هر دو مقوله بقای جرم و انرژی در موازنه انرژی است. بنابراین لازم است پس از بررسی روش های انتقال حرارت از کوره و ارائه روابطی برای محاسبه آن، مبانی متالورژیکی فرآیند نیز شناسایی شده و روابط حاکم بر واکنش های شیمیایی و معادلات

<sup>۱</sup> - Ultra High Power

<sup>۲</sup> - Water Cooling Panel

ترمودینامیکی استخراج شوند. پس از به دست آوردن روابط حاکم بر فرآیند، ناگزیر از حل عددی آنها به کمک رایانه هستیم. علاوه بر یک نرم افزار توانا برای محاسبه پارامترهای اساسی سیستم، به ورودی‌های معتبر و منطبق بر واقعیت نیز نیاز است. در این رابطه اطلاعات فیزیکی و شیمیایی مربوط به مواد حاضر در کوره قوسی و واکنش‌های میان آنها باید مشخص شود. برای جمع‌آوری اطلاعات از کتاب‌ها، مقالات و اطلاعات واقعی معمولاً استفاده می‌شود. در نهایت با رسم نمودارهای مختلف، تاثیر هر پارامتر بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره به صورت کمی نشان داده می‌شود [۱۴-۱۷]. مراحل استفاده شده برای انجام این تحقیق در شکل ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱ - فلوجارت پژوهش.

حل معادلات موازنه جرم و انرژی در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel انجام شد. برای این کار شش برگه<sup>۳</sup> با عناوین Data، Mass Balance، Energy Balance، Slag Composition و Practical Calculation طراحی شد. استفاده از نرم افزار Excel به سبب سادگی و گرافیکی بودن شیوه کار بود که تعدد تعداد فرمول ها و داده ها را به خوبی پاسخ گو بود.

## نتایج و بحث

مهمترین عوامل موثر بر میزان مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی را به دو گروه می توان تقسیم کرد. گروه اول پارامترهایی که در اجرا نیاز به تجهیزات ویژه ای مانند مشعلهای سوخت در داخل کوره دارد. گروه دوم عواملی که به تغییر شرایط کوره مانند بار کردن و ذوب وابسته است. فهرست روش های متداول برای بهینه سازی عملیات کوره های قوس الکتریکی به قرار زیر است:

- افزایش دمای بار ورودی کوره
- سیستم مسدود کننده ورود هوا به کوره
- به کار گیری همزن
- تزریق کربن و اکسیژن به صورت همزمان
- مشعل های سوخت جامد و مایع با اکسیژن
- اضافه کردن ترکیبات گرمازا به بار کوره (نظیر منیزیم و سیلیسیم)
- استفاده از مشعل های گازی
- استفاده از بازوهای آلومینیومی برای الکترودها
- سوزاندن گاز خروجی در سطح فلز مذاب<sup>۴</sup>
- افزایش درصد آهن اسفنجی در شارژ
- افزایش درجه فلزی آهن اسفنجی
- ایجاد سرباره پفکی خصوصا در کوره های توان بالا
- افزایش ورود کربن توسط آهن اسفنجی و قراضه
- اضافه کردن مواد کربن دار به صورت توده ای
- کاهش تعداد توقفات کوره
- تغییر توان لحظه ای کوره

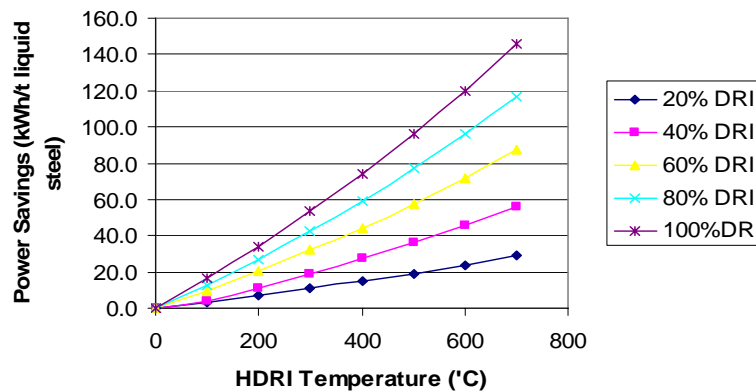
مهمترین عوامل موثر بر مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی در اینجا بررسی می شوند. ممکن است منحنی های ارائه شده با منحنی های واقعی کاملا<sup>۵</sup> همخوانی نداشته باشند. این اختلاف ناشی از تعدد عوامل تاثیر گذار بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره های قوسی است. بی شک شبیه سازی ابزار بسیار مهمی برای بررسی اثر یک پارامتر در مصرف انرژی و بهینه سازی مصرف انرژی در فرآیند

<sup>3</sup> - Sheet

<sup>4</sup> - Burner

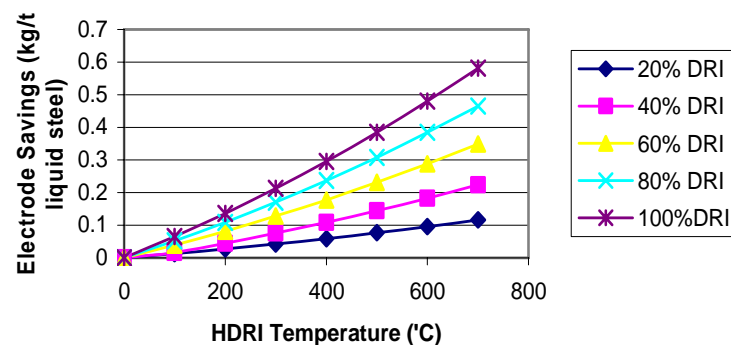
<sup>5</sup> - Post Combustion

است. شکل ۲ تاثیر دما و میزان شارژ گرم ورودی به کوره بر میزان انرژی صرفه جویی شده در فرآیند فولاد سازی در کوره قوس الکتریکی را نشان می دهد. ملاحظه می شود که با افزایش میزان شارژ داغ ورودی به کوره و افزایش دمای شارژ میزان انرژی صرفه جویی شده افزایش می یابد.

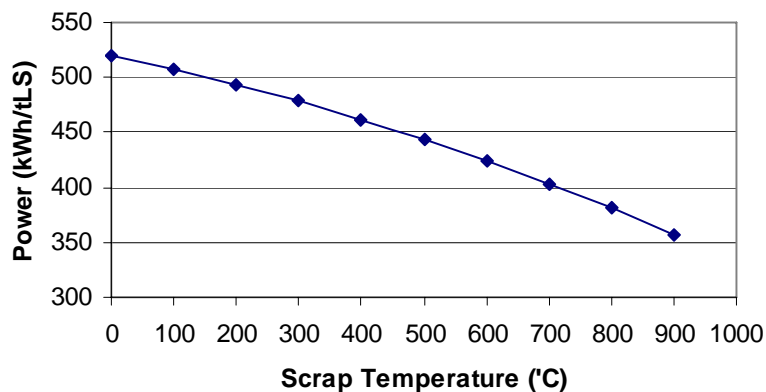


شکل ۲- صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی با تغییر پارامترهای دما و درصد آهن اسفنجی

هزینه الکتروود در کوره های قوس الکتریکی بسیار بالاست. افزایش شارژ داغ زمان فولادسازی را کاهش داده و از سوی دیگر میزان انرژی الکتریکی مصرفی برای تولید فولاد را کاهش می دهد. کاهش مصرف انرژی الکتریکی منجر به کاهش مقدار الکتروود مصرفی در تولید فولاد می شود. در شکل ۳ تاثیر دما و مقدار بار داغ بر میزان مصرف الکتروود در کوره های قوس الکتریکی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما و مقدار شارژ داغ، مصرف الکتروود به ازای هر تن فولاد مذاب کاهش می یابد. در شکل ۴ تاثیر افزایش دمای قراضه بر انرژی الکتریکی مصرفی در یک کوره ۱۵۰ تنی با ۹۰٪ شارژ به صورت قراضه نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش دمای قراضه، میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز برای ذوب قراضه کاهش می یابد.

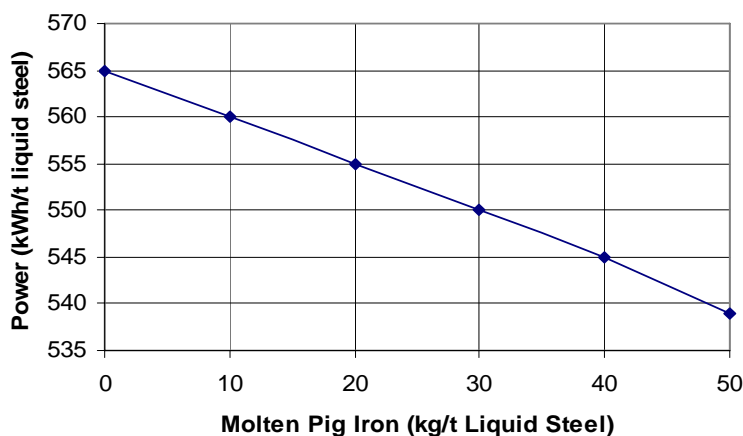


شکل ۳- صرفه جویی در الکتروود مصرفی با تغییر پارامترهای دما و درصد آهن اسفنجی

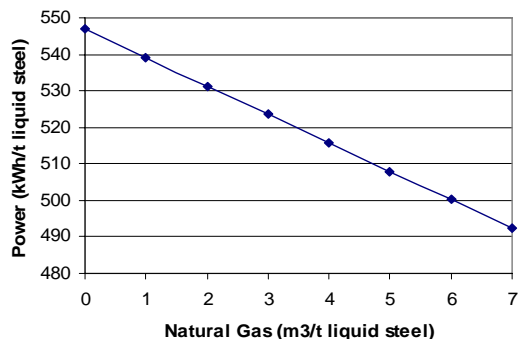


شکل ۴- اثر افزایش دمای قراضه بر انرژی الکتریکی مصرفی در کوره ۱۵۰ تنی با ۹۰٪ با به صورت قراضه

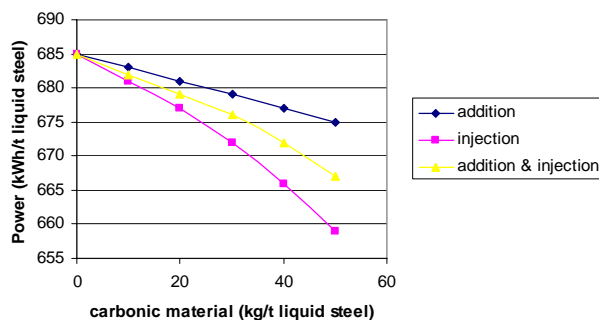
در شکل ۵ اثر شارژ کردن چدن مذاب به یک کوره قوس الکتریکی نشان داده شده است. به علت گرمای محسوس قابل توجه و نیز حرارت حاصل از اکسیداسیون سیلیسیم، منگنز و کربن، میزان انرژی الکتریکی لازم در فرآیند فولادسازی در اثر افزایش چدن مذاب کاهش می یابد. شکل ۶ تاثیر گاز طبیعی محترق شده در مشعل های کوره را بر مصرف برق در کوره قوس الکتریکی نشان می دهد. در شکل ۷ اثر افزودن مواد کربنی به کوره به روشهای تزریقی، توده ای و تلفیقی نشان داده شده است. با افزایش مواد کربن دار به علت حرارت ناشی از اکسیداسیون کربن، مصرف انرژی الکتریکی کوره کاهش می یابد. شکل ۷ همچنین نشان می دهد که افزودن مواد کربنی به صورت تزریقی در مقایسه با روش کپه ای تاثیر بیشتری بر صرفه جویی انرژی الکتریکی دارد. در شکل ۸ تاثیر تزریق اکسیژن و مواد کربنی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش مقدار کربن شارژ شده و دبی اکسیژن تزریق شده به کوره، مصرف انرژی الکتریکی کاهش می یابد.



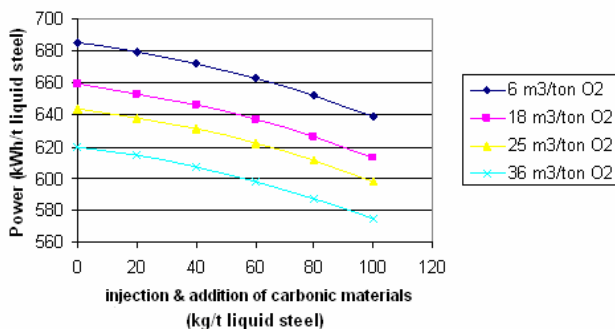
شکل ۵ - تاثیر اضافه کردن چدن مذاب بر مصرف انرژی در یک کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی



شکل ۶- تاثیر مصرف گاز طبیعی بر کاهش انرژی الکتریکی مورد نیاز در کوره های قوس الکتریکی

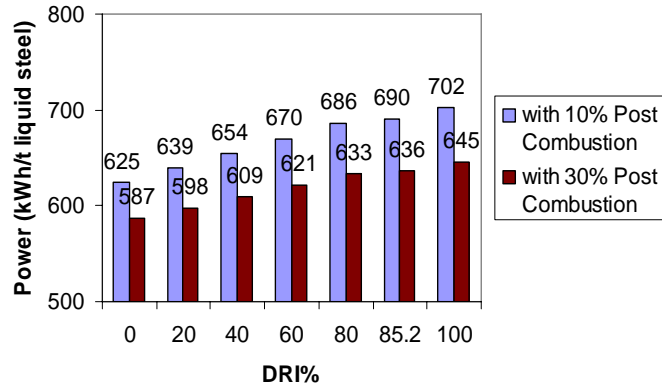


شکل ۷- مقایسه اثر افزودن ماده کربنی به صورت توده ای و تزریقی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره ۱۵۰ تنی

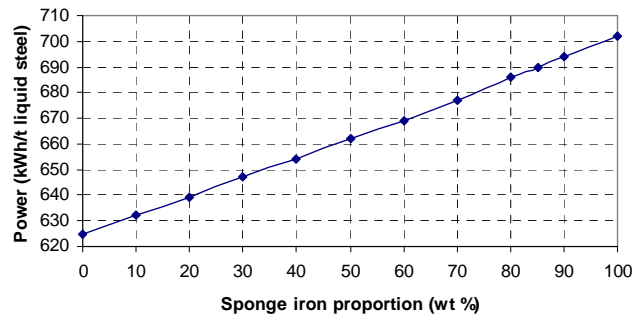


شکل ۸- تاثیر تزریق اکسیژن و مواد کربنی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی

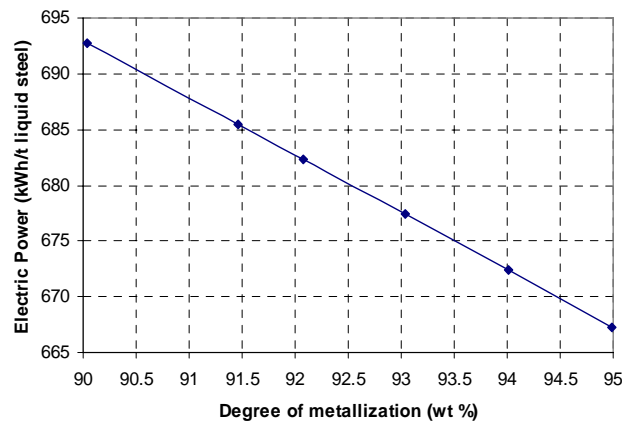
در شکل ۹ تاثیر درصدهای مختلف آهن اسفنجی و احتراق ثانویه بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره ۱۵۰ تنی نشان داده شده است. با افزایش مقدار DRI شارژ شده به کوره، مصرف برق افزایش می یابد. شکل ۹ همچنین نشان می دهد که احتراق ثانویه کربن باعث صرفه جویی در انرژی الکتریکی می شود. شکل های ۱۰ و ۱۱ تاثیر درصد آهن اسفنجی و درجه فلزی شدگی بر مصرف انرژی



شکل ۹- تاثیر درصدهای مختلف آهن اسفنجی و احتراق ثانویه بر مصرف انرژی کوره ۱۵۰ تنی



شکل ۱۰- تاثیر درصد آهن اسفنجی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره

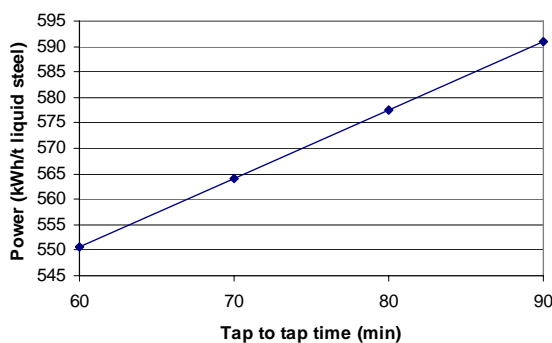


شکل ۱۱- تاثیر درجه فلزی بر مصرف انرژی الکتریکی با ۱۰۰٪ آهن اسفنجی

در کوره قوس الکتریکی را نشان می دهند. ملاحظه می شود که با افزایش درجه فلزی آهن اسفنجی مصرف انرژی الکتریکی کوره کاهش می یابد. در شکل ۱۲ تاثیر زمان بین دو تخلیه بر انرژی مصرفی در کوره ۱۵۰ تنی که با استفاده از روش Practical Calculation



محاسبه شده، نشان داده شده است. ملاحظه می شود که کاهش فاصله زمانی میان دو تخلیه تاثیر به سزایی بر کاهش انرژی الکتریکی مورد نیاز کوره دارد.



شکل ۱۲- تاثیر زمان بین دو تخلیه بر انرژی مصرفی در کوره ۱۵۰ تنی با استفاده از Practical Calculation

## نتیجه گیری

- با انجام این پژوهش مشخص شد که به طرق زیر می توان در میزان انرژی مصرفی در کوره های قوس الکتریکی صرفه جویی کرد:
- ۱- افزایش دما و مقدار آهن اسفنجی شارژ داغ شده به کوره: این کار علاوه بر صرف جویی در مصرف انرژی منجر به کاهش مصرف الکتروود نیز در فرآیند فولادسازی می شود
  - ۲- افزایش دمای پیشگرم قراضه شارژ شده به کوره
  - ۳- استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت جایگزین انرژی الکتریکی
  - ۴- افزودن مواد کربن دار و تزریق اکسیژن به کوره: بر مبنای تحقیقات انجام شده تاثیر افزودن کربن بر میزان انرژی مصرفی در حالت تزریقی بیشتر از افزایش کپه ای است.
  - ۵- افزایش درجه فلزی آهن اسفنجی و کاهش فاصله زمانی میان دو تخلیه.

## تشکر و قدردانی

از همکاری مدیریت و پرسنل تحقیقات و فناوری و نیز مدیریت و پرسنل واحد فولادسازی شرکت فولاد خوزستان به سبب مهیا سازی شرایط لازم برای پیشبرد اهداف پژوهش و راهنمایی های راه گشا در طول انجام این پژوهش سپاسگزاری می شود.

## مراجع

1. <http://www.techstudies.org/ogp/text.php?adr=archive/83/8304/Q8304163.htm&sub=0>
۲. عبدالله اعزازی اردی و سید مهدی طیبی جزایری، "نگاهی به آینده فولاد در جهان"، سمپوزیوم فولاد، اهواز، شرکت فولاد خوزستان، اسفند ۱۳۷۹، ۷۷۵-۷۹۱.

۳. محمود فرازی، "فولادسازی"، اصفهان، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۹.
4. Rathaba, L.P., "Model Fitting for Electric Arc Furnace Refining", MSc Thesis, Faculty of Electric Engineering, University of Pretoria, November 2004.
  5. Bejan, A. and Mamut, E., "Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems", Kluwer, Netherlands, 1999.
  6. Camdali, Ü. and Tunc, M., "Exergy Analysis and Efficiency in an Industrial AC Electric Arc Furnace", Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 2003, 2255-2263.
  7. Pfeifer, H. and Kirschen, M., "Thermodynamic Analysis of EAF Energy Efficiency and Comparison with a Statistical Model of Electric Energy Demand", Elektrowärme Int., Vol. 46, 1988, 71-77.
  8. Sadrnezhad, K., "Sulfur Species in Particulates Emitted from Reducing Coal Combustion and Pyrometallurgical Furnaces", Journal of Engineering, I. R. Iran, Vol. 1, No. 1, 1988, 73-78.
  9. Camdali, Ü., Tunc M. and Karakas A., "Second Law Analysis of Thermodynamics in the Electric Arc Furnace at a Steel Producing Company", Energy Conversion and Management, Vol. 44, 2003, 961-973.
  10. Sadrnezhad, K. and Elliott, J.F., "The Melting Rate of DRI Pellets in Steelmaking Slags", Iron and Steel International, 1980, 327-339.
  11. Sadrnezhad, K., "Continuous Melting of Metallized Ore Pellets", Iron and Steel International, 1981, 309-314.
  12. Sadrnezhad, K. and Simchi, A., "Simulation of the Iron Smelting-Reduction Process", Journal of Materials Science and Technology, Vol. 15, No. 2, 1999, 121-127.
۱۳. صدرنژاد، س.خ. و سرکمری، م.، "شبه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی"، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ۳-۴ اسفند ۱۳۷۹، اهواز، شرکت فولاد خوزستان، ۱۱۳-۱۲۳.
14. Sadrnezhad, K., "Effect of Impurities on Energy Requirements in Electric Steelmaking with DRI", Scientia Iranica, Vol. 3, Nos. 1,2&3, 1996, 113-119.
۱۵. صدرنژاد، خ.، "فولاد آمیخته: اهمیت، انواع و موارد مصرف"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۶۶، ۴۱-۵۵.
16. Sadrnezhad, K., "Direct Reduced Iron: An Advantageous Charge Material for Induction Furnaces", Journal of Engineering, I. R. Iran, Vol. 3, Nos. 1&2, 1990, 37-47.
  17. Sadrnezhad, K., "Effect of Inoculation on Microstructure and Properties of C-Mn Steels", Proceedings of Recrystallization'90, Wollongong, Australia, 1990, 381-386.
  18. Sadrnezhad, S.K., Gharavi, A. and Namazi, A., "Software for Kinetic Process Simulation", IJE Transactions A: Basics, Vol. 16, No. 1, 2003, 61-72.
  19. Hashemi, B., Nemati, Z.A. and Sadrnezhad, S.K., "Oxidation Mechanisms in MgO-C Refractories", China's Refractories, Vol. 13, No. 2, 2004, 13-18.