



امکان‌سنجی بکارگیری فناوری کوره خورشیدی در صنایع فولادسازی

کمال عباسپورثانی – استادیار گروه تبدیل انرژی – دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان

بهاره فرهمند پور – شرکت بهینه سازی مصرف سوخت

E-mail: k.abaspour@tiau.ac.ir

چکیده: ذوب فولاد فرآیندی انرژی‌بر و کوره بزرگترین منبع مصرف‌کننده انرژی الکتریکی می‌باشد. پیش‌گرمایش قراضه قبل از ورود به کوره باعث حفظ میزان قابل توجهی از انرژی و توان می‌گردد. توان مورد نیاز جهت پیش‌گرمایش قراضه تا دمای $500-600^{\circ}\text{C}$ در شرکت فولاد آلیاژی ایران (یزد) با توجه به شرایط کار و سطح تولید کارخانه حدوداً 5 MW است. در صورت استفاده از فناوری کوره خورشیدی برای تامین این انرژی با در نظر گرفتن راندمان اپتیکی ردیاب ($0/6$) و راندمان گیرنده مرکزی (حدود $0/8$) توان قابل جذب از انرژی خورشیدی معادل $10/5\text{ MW}$ خواهد بود که برای تامین آن با احتساب میزان متوسط تابش خورشیدی 600 W/m^2 حدود 13000 m^2 سطح مفید ردیاب خورشیدی مورد نیاز می‌باشد. در این فناوری خورشیدی، میدان‌نوری شامل 290 ردیاب خورشیدی که سطح هر کدام 36 m^2 می‌باشد، در منطقه‌ای به وسعت $1/2$ هکتار آرایش یافته‌اند. ارتفاع برج $17/5\text{ m}$ است که در بالای آن یک آینه محدب با سطح منعکس‌کننده 61 m^2 طرح ریزی شده است. به منظور بهره‌برداری بیشتر و حداقل توان اتلاف در تجمع پرتوهای نوری و ایجاد گرمای یکنواخت، پاتیل قراضه از 8 قسمت خوشه‌ای شکل ساخته شده است. هزینه تقریبی ساخت این تاسیسات خورشیدی شامل ردیاب، گیرنده مرکزی، پاتیل، سکوی‌نگذارنده و قطعات یدکی بالغ بر 42 میلیارد ریال پیش‌بینی می‌شود.

واژه های کلیدی: پیش‌گرمایش آهن قراضه، تبدیل انرژی خورشیدی دما بالا، صرفه جویی انرژی و فولاد.

Feasibility Study of Utilizing Solar Furnace Technology in Steel Making Industry

K. abbaspourani, Ass. Prof., the Faculty of Mechanical Engineering, Takestan Islamic Azad University

B. Farahmandpour, Iran Organization of Fuel Consumption Optimization

E-mail: k.abbaspour@tiau.ac.ir

Abstract: The casting industry in Iran is one the most energy consumer industries. According to the national statistics it consumes 33.6% of the produced electricity where 50-80 percent of that contributes in melting process. Therefore if we could able to preheat scrap to a suitable temperature, then the energy saving can be achieved in melting furnaces. The results of recent studies show that the preheating of scrap up to $400-500^{\circ}\text{C}$ reduces the energy demand by 30-60 KW per each ton produced steel. In this paper after reviewing the current methods of preheating scrap in arc electric furnaces (AEFs), an emerging technology of solar furnace called tower reflector (TR), is described. Here, the results of feasibility study of the purposed technology for implementation in the Iran Alloy Steel Company (IASC), as a case study briefly is discussed. The results show that the preheating of scrap to a temperature of 500°C leads to an energy saving of 400 GJ/ hour. Along the same lines, regarding capital and running cost, it would last less than five years to pay back the investment.

Keywords: Solar Energy, solar furnace, techno-economical assessment, and EAF.

۱- مقدمه

شرکت فولاد آلیاژی ایران که در سال ۱۳۸۷ به بهره‌برداری رسید با تولید انواع فولاد آلیاژی یکی از صادرکننده‌های عمده این تولید به کشورهای اروپایی می‌باشد. انواع فولادهای تولیدی در این شرکت عبارتند از: فولادهای ابزار سرد و گرم، فنر، عملیات حرارتی پذیر، سخت شونده، نیتريدینگ، خوش تراش، بلبرینگ، قاب پلاستیک، تیغ اره، ضد زنگ کرم دار، ضد زنگ کرم- نیکل، میکرو آلیاژ، دما بالا، کربنی و مخصوص. انواع پروفیل‌های تولیدی در شرکت عبارتند از: میلگرد، چهارگوش، شش گوش، تسمه، شمش و پروفیل ویژه.

مساحت دیوی قراضه این شرکت در حدود ۶۰۰۴۲ هکتار می‌باشد که در آن قراضه به صورت فله‌ای و غیر صنعتی تفکیک و ذخیره می‌شود. ابعاد مورد قبول جهت شارژ کوره ۷۰ سانتیمتر مربع است که از طریق برش و بعد از آن با پرس مکانیکی در ابعاد مکانیکی در ابعاد مورد قبول جهت شارژ کوره استفاده می‌شود. مشکل اساسی در تنوع قراضه‌ها، رنگ قراضه است که موجب تولید هیدروژن در ذوب می‌گردد و مشکل عمده روغن اندود بودن برخی از قراضه‌ها است که کیفیت پایین و زمان ذوب بالا را باعث می‌شود. مصرف روزانه قراضه در حدود ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ تن می‌باشد. چنگک سبد قراضه‌ها بالای دمای 200°C کار نمی‌کند، بنابراین می‌بایست سیستم پیشگرمایش قراضه را درون خود سبدها تعبیه کرد. برای شارژ کوره چهار سبد موجود می‌باشد که هر کدام در حدود نیم ساعت زمان برای پر شدن لازم دارند. حجم هر سبد در حدود ۲۸ متر مکعب (با قطر ۴/۵ و ارتفاع ۵/۵ متر) است.

بارگیری شارژ معمولاً به وسیله دلوهایی که توسط جرتقیل-های متحرک الکترومغناطیسی جابجا می‌شوند، به کوره حمل می‌شود. قبل از اینکه قراضه به کوره ریخته شود، بعضی انواع کربن‌زها نظیر آنتراسیت، کک و یا الکترودهای خرد شده را معمولاً در ته کوره قرار می‌هند تا جوشش مطلوب و مناسب به دلیل وجود کربن زیاد، در ذوب حاصل می‌شود. خط تولید

تکنولوژی انرژی خورشیدی توانایی فوق العاده برای تولید گرما با ظرفیت بالا را دارا می‌باشد. طبق تخمین‌ها پیک تمرکز در تکنولوژی هلیوستات می‌تواند به ۲۰۰۰۰ و میانگین تمرکز به ۱۰۰۰۰ در نیروگاه‌های بزرگ واقعی برسد [۱]. چنین پیشرفتهایی در اپتیک و تکنولوژی‌های دمای بالای خورشیدی منجر به دست آوردهای بزرگتر و بازده بالاتر و کاهش هزینه قابل توجه تر در فرآیند حرارت خورشید می‌شود. این سطح جدید کارایی، دسترسی خورشید را به کاربردهایی با دماهای بسیار بسیار زیاد امکان پذیر می‌سازد، مانند توربین‌های گازی آینده، فرآیندهای دما بالای شیمی گرمایی و فرآیند دینامیک گازها و جایگاه انرژی خورشیدی به عنوان منبع رایگان موجود جهت کاربردهای قوی تر انرژی حرارتی و تولید الکتریسته در مقدار بیشتر را ارتقاء می‌دهد. استفاده از فناوری کوره خورشیدی جهت پیش گرمایش مواد خام (قراضه‌ها) قبل از ورود به کوره ذوب فولاد باعث حفظ میزان قابل توجهی از انرژی و توان می‌گردد و از آن می‌توان به عنوان روش نوین کاربرد انرژی‌های نو در جهت صرفه جویی انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نام برد.

در این مقاله ابتدا مروری بر فرآیند تولید شرکت فولاد آلیاژی ایران، روشهای متداول کاهش مصرف انرژی در صنعت فولادسازی و روش‌های رایج پیشگرمایش قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی ارائه می‌گردد. سپس پتانسیل انرژی تابشی خورشید در شهر یزد و امکان بکارگیری فناوری کوره خورشیدی برای پیشگرمایش قراضه بررسی می‌شود و نهایتاً طرح فنی سیستم کوره خورشیدی برای پیشگرمایش قراضه در شرکت فولاد آلیاژی ایران پیشنهاد و هزینه‌های طرح محاسبه شده است.

۲- فرآیند تولید در شرکت فولاد آلیاژی ایران (یزد)

سرباره‌گیری و ۴۸۰ کیلووات ساعت برای ذوب نیروی برق مصرف می‌شود. برای پیش‌گرمایش پاتیل مذاب در هر کوره یک مشعل منظور شده که دمای مشعل در حدود $1100 - 1200^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. مشعل‌ها به صورت عمودی هستند و هر پاتیل در حدود ۱ الی ۱/۵ ساعت به وسیله مشعل تحت حرارت قرار می‌گیرد. این مشعل‌ها از نوع گازی می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات پاتیل قراضه و در جدول ۲ مشخصات کوره ذوب در شرکت فولاد آلیاژی یزد نشان داده شده است.

۳- روشهای کاهش مصرف انرژی در صنعت فولادسازی

ذوب فولاد یک فرآیند انرژی‌بر است و کوره بزرگترین منبع مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد که حدود ۹۶ تا ۹۹ درصد کل الکتریسیته مصرفی مربوط به کوره می‌باشد. روش‌های صرفه‌جویی انرژی در فرآیند ذوب عبارتند از [۲ و ۳]:

الف) کاهش دادن اتلاف انتقال الکتریسیته

با کوتاه کردن مسافت بین کوره و منبع تولید کننده توان می‌توان اتلافات حدود ۱/۵٪ انتقال الکتریسیته را کاهش داد.

ب) ایجاد پوشش روی دهنه کوره

اتلافات ناشی از تابش گرمای سطح ذوب (حدود ۲٪) در دماهای 1500°C و 650°C به ترتیب حدود ۷۰-۶۰ و ۹۰-۸۰ کیلووات ساعت بر متر مربع تخمین زده شده است. در جهت کاهش اتلافات تابش توصیه می‌شود که دهنه کوره پوشیده نگه داشته شود، این پوشش نیاز به یک لوله هواکش دارد که مانند هود دود و ذرات گرد و غبار را به بیرون هدایت می‌کند. این روش نه تنها باعث کاهش اتلافات گرما و حفظ انرژی می‌شود بلکه باعث کنترل پراکندگی دود در اتمسفر محل کار سالن تولید کننده، حفظ کارگران از گرما مفرط، جلوگیری از حوادث ناشی از پاشیدن مواد مذاب داغ نیز می‌گردد.

شرکت در مرحله اول بر اساس استفاده از دو کوره قوس الکتریکی، دو واحد کوره پاتیلی (Ladel Furnace) LF، یک واحد تانک خلاء (Vacumm Degassing) VD و یک واحد (Vacuum Oxygen Decarburization) VOD در واحد ذوب بنا نهاده شده است. در مرحله دوم یک کوره قوس الکتریکی و یک واحد LF اضافه خواهد شد. ظرفیت کوره قوس الکتریکی ۴۰ تن و از نوع (Eccentric Bottom Tapping) EBT با توان اسمی ۳۶ مگاوات است. این کوره‌ها برای شارژ ۱۰۰ درصد قراضه یا ۸۰ درصد آهن اسفنجی و ۲۰ درصد قراضه طراحی شده است.

پس از اتمام مراحل ذوب در کوره قوس الکتریکی، مذاب به درون پاتیل تخلیه شده و بمنظور انجام عملیات متالورژی ثانویه به LF منتقل می‌گردد. در کوره پاتیلی که مجهز به سیستم همزن القایی و دمش گاز آرگون است، عملیات تصفیه و احیاء فولاد، سولفورزدایی و هموژن نمودن ترکیب شیمیایی و دمای فولاد انجام می‌گیرد.

گاز مصرفی در واحد ذوب در حدود ۶۰۰۰ متر مکعب می‌باشد که در طول ۲۴ ساعت در حدود ۱۶ بار یا بیشتر شارژ می‌شوند. زمان فرآیند ذوب در حدود ۱:۳۰ دقیقه به طول می‌انجامد که بسته به نوع قراضه این زمان تغییر می‌کند. بر طبق تخمین‌های اولیه قرار بود که در حدود ۲۰ درصد قراضه در هر شارژ تولید مصرف شود که در حال حاضر ۱۰۰ درصد قراضه مصرف می‌شود.

برای شارژ کوره ۸ الی ۱۰ بار سبدهای مخصوصی پر می‌شود که در حدود ۴۵ الی ۵۰ تن قراضه وارد هر ذوب می‌گردد، که در نتیجه تولید روزانه در حدود ۹۰ تن می‌باشد. مقدار سرباره هر ذوب در حدود ۳ الی ۴ تن می‌باشد که بسته به درجه قراضه نیز این مقدار فرق می‌کند. دمای ذوب در حدود 1620°C می‌باشد که در نتیجه مقدار ۴۰ کیلووات ساعت برای

در اثر فرسایش تغییر می‌کند. جهت کاهش مصرف انرژی فرسایش ایجاد شده در جداره کوره باید تعمیر شود و قطر استاندارد کوره ثابت بماند.

(و) بهبود طرز کار شارژ کوره

با بکار بردن موارد ذیل می‌توان طرز کار شارژ کوره را بهبود بخشید.

- موادخام که شارژکننده کوره هستند تا حد امکان فشرده شوند.
- بهتر است ابتدا قراضه‌هایی که دمای ذوب پایین دارند وارد کوره شوند که این باعث بهبود فاکتور توان می‌شود.
- وجود مواد مذاب داخل کوره باعث می‌شود که مواد سردی که وارد کوره می‌شوند راحتتر و سریعتر ذوب شوند.
- تراشه های فلزی و سایر قطعات ریز چگالی کمی دارند و نمی‌توانند به طور موثر گرم شوند. اینگونه قطعات فلزی برای ذوب باید وارد مواد مذاب شوند. تراشه ها ممکن است بر اثر نیروی مغناطیسی جذب دیواره کوره شوند که در این حال باید منبع تغذیه خاموش شود تا با وقفه ایجاد شده تراشه ها از دیواره کوره جدا شوند.

(ز) پیش گرمایش پاتیل

مطابق جدول (۳) دمای بارگیری ذوب می‌تواند به میزان 50°C با پیش گرمایش پاتیل تا دمای $200-300^{\circ}\text{C}$ کاهش یابد این عملکرد روی هم رفته باعث ذخیره سازی انرژی می‌شود سایر مضرات استفاده از پاتیل سرد که این مضرات می‌تواند با پیشگرمایش پاتیل از بین برود شامل موارد زیر است.

- چسبندگی مواد مذاب به جداره داخلی پاتیل به علت اختلاف دمای زیاد

(ج) نگهداشتن درجه حرارت بارگیری تا کمترین دمای ممکن تا حد امکان پایین نگه داشتن دمای بارگیری انرژی ورودی مورد نیاز و میزان اتلاف حرارتی کوره (از طریق تابش و رسانش) با دمای بارگیری مذاب متناسب است و کاهش دمای بارریزی باعث کاهش اتلافات انرژی می‌شود. جدول (۳) حفظ انرژی در اثر کاهش دمای بارریزی در دو حالت پاتیل پیش گرم شده ($200-300^{\circ}\text{C}$) و پاتیل سرد را نشان می‌دهد. آهنگ تغییرات اتلاف حرارت از کوره از طریق رسانش و تابش وابسته به دمای بارگیری است که این ارتباط در بازده دمای $1650-1500$ حدود $0.2 \text{ kW}^{\circ}\text{C}$ می باشد که این نشان می دهد که با کاهش دمای بارگیری به میزان 50 تا 100°C ، اتلاف انرژی به میزان 10 kW تا 20 kW کاهش می‌یابد.

(د) بهبود مواد تغذیه کننده کوره

میزان مواد زائد موجود در آهن قراضه ها باعث اتلاف انرژی میزان $1/5\%$ می‌باشد. آهن قراضه هایی که کمترین مواد زائد و آلودگی را داشته باشند باعث کاهش این اتلافات می‌شود برای نیل به این اهداف می‌توان دو راهکار را در پیش گرفت.

- به کاربردن آهن قراضه های تمیز با کیفیت بالا با کمترین مقدار آلودگی

- ذخیره سازی این مواد قراضه روی سطوح آسفالت یا سنگفرش شده و استفاده از یک پوشش در برابر بارندگی این روش علاوه بر کاهش انرژی مصرفی باعث کاهش آلودگی هم می‌شود.

(ه) کنترل تحویل توان به کوره

حداقل توان مصرفی مورد نیاز کوره بر اساس حداکثر ظرفیت کوره تامین می‌شود. آهنگ توان مصرفی کوره وابسته به ضخامت کوره می‌باشد که باید توجه داشت که ضخامت کوره

طرف دیگر هدایت یافته تا حرارت لازم را قبل از ذوب فرآهم نماید. عموماً این سیستم در کوره های قوس الکتریکی با یک الکتروود DC بکار می رود. در پوسته دوم برای شارژ بعدی کوره گازهای گرم ناشی از حرارت ذوب از میان قراضه عبور می‌کند. عموماً در این سیستم فقط شارژ اولیه پیش گرم می‌شود و بنابراین اغلب واحدهای ذوب با شارژ منفرد کار می‌کند. عموماً کوره های دو پوسته ای ارزانتر از دو کوره قوس الکتریکی مجزا بوده، زیرا با میزان تولیدی یکسان آنها فقط با یکسری الکتروود کار می کنند. بر اساس گزارش صنایع Nippon [۴] با بهره‌گیری از کوره‌های دو پوسته‌ای مصرف انرژی به میزان ۲۶۰ کیلو وات ساعت بر هر تن فولاد تولیدی با دمای پیش‌گرمایش حدود 900°C صرفه جویی شده و در نتیجه نسبت به کوره‌های قوس الکتریکی معمولی ۳۰٪ مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

▪ آسیب دیدن جداره داخلی پاتیل به علت اختلاف دمای آنی اعمال شده بر اثر ورود مواد مذاب

۴- پیش گرمایش آهن قراضه

حدود ۶۰ درصد از کل میزان انرژی لازم برای رسیدن به دمای بارگیری ($1650^{\circ}\text{C} - 1550^{\circ}\text{C}$) در بازده‌ای که دمای قراضه را از 20°C (در دمای اتاق) به دمای مذاب (حدود 1150°C) می‌رسانیم، مصرف می‌شود. متداولترین روش پیش گرمایش قراضه از طریق بازیافت انرژی گازهای خروجی است. از گازهای خروجی از کوره های ذوب با دمای بالا می‌توان برای پیش‌گرمایش قراضه تا دمای ۴۵۰ الی ۶۰۰ درجه سانتیگراد استفاده نمود. روش های رایج پیش‌گرمایش قراضه با استفاده از گازهای خروجی عبارتند از:

۴-۱- پیش گرمایش از طریق کوره های محوری:

عموماً این کوره در بالای کوره قوس الکتریک نصب می‌شود به طوری که گازهای خروجی از منطقه ذوب به سمت بالا جریان یافته و از میان قراضه برای شارژ بعدی کوره عبور می‌کند. در کوره‌های دو محوری تا حدود ۱۸۰ کیلو وات ساعت بر تن فولاد تولیدی و در کوره های تک محوری حدود ۱۳۵ کیلووات ساعت بر هر تن فولاد تولیدی امکان صرفه جویی انرژی وجود دارد. به منظور عملی نمودن کوره محوری، حداقل ظرفیت تولیدی ۴۵ تن بوده و کوره می‌باید مجهز به مشعل گازها بوده بطوریکه میزان کافی در بالای کوره گاز وجود داشته باشد.

۴-۲- پیش گرمایش از طریق کوره های دو پوسته:

در سیستم دو پوسته‌ای، در حالیکه بخشی از کوره تولید فولاد می‌نماید، طرف مقابل با قراضه شارژ می‌شود. در این سیستم گازهای خروجی از طرف عملیاتی توسط لوله کشی به

۵- تابش سنجی در شهر یزد

برای تعیین تابش در شهر یزد برنامه ای با نرم افزار Matlab نوشته شده که ورودی آن، ضریب صافی هوا در هر ماه در شهر یزد (مطابق با جدول ۴)، شیب آرایه، طول و عرض جغرافیایی محل (طول جغرافیایی یزد $E 54 24$ $L=54.4$) و عرض جغرافیایی آن $N 31 54$ $Q=31.9$)، [۵] و خروجی آن تابش روی سطح شیبدار بر حسب W/m^2 رابطه زیر است، [۶]:

(۱)

$$I_T = I_b R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g (I_b + I_d) \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

که در رابطه فوق، β ، شیب صفحه، ρ_g ، ضریب انعکاس زمین، R_b ، نسبت کسینوس زاویه تابش خورشید به کسینوس زاویه سمت الرأس، I_T : تابش کل خورشید بر روی صفحه جمع‌کننده، I_b و I_d به ترتیب مولفه مستقیم و پراکنده تابش خورشید بر روی صفحه افق می‌باشد.

مطابق شکل (۲) قراضه را به صورت مکعبی با ابعاد cm ۷۰ در نظر می گیریم. دمای قراضه ها که در مقابل نور آفتاب قرار می گیرند طبق رابطه زیر تعیین می شود:

(۵)

$$I.A = \rho C_p V \frac{dT}{dt} + h_w A (T - T_a)$$

در رابطه (۵) ρ چگالی فولاد (7820 kg/m^3)، V حجم قراضه، C_p ظرفیت گرمایی ویژه فولاد (45 Cal/KgC^0)، A مساحت، I شدت تابش فرودی بر روی سطح قراضه و h_w ضریب هدایت همرفت باد است که برای سرعت باد $0 < V < 5 \text{ ms}^{-1}$ از رابطه زیر تعیین می شود [۹]:

(۶)

$$h_w = 5.7 + 3.8 V$$

می توان رابطه (۵) را با قرار دادن $Z = T - T_a$ و $V = A.L$ و تقسیم بر $\rho C_p L$ ، به صورت زیر خلاصه کرد:

(۷)

$$\frac{dZ}{dt} + \frac{h_w}{\rho C_p L} Z = \frac{I}{\rho C_p L}$$

با این فرض که میزان تابش و دمای هوا در یک ساعت ثابت است معادله (۷) را حل می کنیم. معادله (۸) تغییرات دمای قراضه در طول یک ساعت را نشان می دهد.

کل انرژی تابش خورشید روی یک سطح افقی در یزد در یک سال برابر با $2.31 \text{ MWh/m}^2 \text{ year}$ است. در شکل (۱) متوسط انرژی تابشی روزانه خورشید در یزد نشان داده شده است.

۶- تخمین افزایش دمای قراضه در اثر تابش خورشید

در این بخش دمای قراضه ها در زیر تابش مستقیم نور خورشید بدون بکارگیری سیستم پیش گرمایش بررسی می شود. دمای هوا در زمان t از رابطه زیر به دست می آید [۸]:

(۲)

$$T - \bar{T} = \frac{1}{2} A_t \text{Cos } \omega(t - 15)$$

که $\omega = \frac{2\pi}{24}$ و از طرفی \bar{T} و A_t از روابط زیر به دست می آیند [۸]:

(۳)

$$\bar{T} = \frac{1}{2} (T_x + T_n)$$

$$A_t = (T_x - T_n) \quad (۴)$$

در روابط بالا T_x متوسط ماهانه ماکزیمم دما و T_n متوسط ماهانه مینیمم دمای هوا می باشد. در جدول (۵) متوسط ماهانه ماکزیمم و مینیمم دمای هوای یزد آورده شده است.

در قراضه ها دما به صورت تابعی از زمان و مکان است. به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای فولاد و در نظر گرفتن این واقعیت که عملاً این قراضه ها یکپارچه نیستند و لابه لای قراضه ها هوا وجود دارد، می توان جهت ساده تر شدن محاسبات از اختلاف جزئی دما در داخل قراضه صرف نظر کرد و دما را تنها تابعی از زمان در نظر گرفت.

بنابراین، لازمه ساخت آنها وسایل اپتیکی دقیق نمی‌باشد و موارد

کاربرد آنها هم وسیع می‌باشد.

ج) گردآورنده های تولید کننده دما و چگالی انرژی خیلی بالا که مستلزم وسایل کانونی دقیق و روش پیگردی پیوسته حرکت ظاهری خورشید می‌باشند، [۱۰].

گردآورنده های متمرکز کننده انواع مختلفی دارند و می‌توانند در روشهای مختلفی دسته‌بندی شوند. در این متمرکزکننده ها سطوح بازتاب کننده می‌توانند استوانه‌ای، کروی یا تخت باشند. همچنین این سطوح می‌توانند پیوسته یا قطعه قطعه باشند. بنا بر نقطه دید و تشکیل تصویر متمرکز کننده ها را می‌توانند به دو نوع تصویر ساز و غیر تصویری تقسیم کرد. متمرکزکننده های تصویر ساز می‌توانند روی یک خط یا یک نقطه نور خورشید را متمرکز کنند.

دریافت کننده مرکزی جهت گردآوری مقدار بیشتری انرژی در یک نقطه است، در این مورد تابش مستقیم خورشید توسط یکسری آینه های قابل کنترل به طور مستقل به نام هلیوستات به سمت دریافت کننده مرکزی که در بالای یک برج واقع شده است، منعکس می‌شود. چندین سبک مختلف جهت یابی مختلف خورشیدی در متمرکزکننده ها وجود دارد، پنج سبک متداول جهت یابی خورشید عبارتند از [۱۱، ۱۲]:

- محور افقی شرق به غرب با تنظیم یکبار در روز: در این حالت متمرکزکننده فقط یکبار در روز طوری تنظیم می‌شود که پرتو مستقیم تابش خورشید در ظهر خورشیدی عمود بر صفحه پذیرش باشد
- محور افقی شرق به غرب با تنظیم پیوسته: محور به طور افقی در جهت شرق به غرب واقع شده و گردآورنده به طور پیوسته روی محور شرق به غرب طوری می‌چرخد که تابش مستقیم خورشید حداقل زاویه برخورد را با سطح پذیرش در هر لحظه از زمان داشته باشد.

(۸)

$$T_m = (T_a)_m + \frac{I_m}{h_w} + \left[T_{m-1} - (T_a)_{m-1} - \frac{I_{m-1}}{h_w} \right] e^{-\frac{h_w t}{\rho C_p L}}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, k$$

k معرف تعداد ساعات آفتابی است. در واقع T_m همانند

T_a و I_m ، ماتریسی از n سطر (n تعداد روزهای سال است.) و k ستون می‌باشد که با توجه به اینکه تابش و دمای محیط در یک ساعت ثابت است با قرار دادن $t = 3600$ s، مقدار T_m بعد از گذشت یک ساعت بدست می‌آید. خاطر نشان می‌شود که T_{m-1} دمای قراضه، $T_{a_{m-1}}$ دمای هوا و I_{m-1} شدت تابش در ساعت قبلی است و دمای قراضه در ابتدای طلوع خورشید برابر با دمای محیط فرض شده است.

شکل (۳) و (۴) بترتیب تغییرات دما و حداکثر دمای یک قطعه مکعبی قراضه فولادی به ابعاد ۷۰ cm در مقابل تابش خورشیدی در یزد در ماه های مختلف سال را نشان می‌دهند.

۷- متمرکزکننده‌های خورشیدی و ردیابی و جهت یابی خورشید

گردآورنده های خورشید را می‌توان به سه نوع تقسیم کرد:

الف) گردآورنده های تخت که بدون متمرکز کننده عمل می‌کنند و کاربرد آنها به طور کلی برای گرمایش (آب و هوا، حوضچه های خورشیدی و آب شیرین کن های خورشیدی) می‌باشد.

ب) گردآورنده های مابین دماهای زیاد و کم که افزایش دانسیته انرژی آنها با ضریب ۱۰ تا ۱۲ می‌باشد و معمولاً نیازی به پیگردی دقیق خورشید نداشته و تنها لازم است گاهی چرخانده شوند این نوع پیگردی، یک کانون روشن به وجود نمی‌آورد

مد های ۱ و ۲ کمترین مقدار دریافتی تابش مستقیم خورشیدی را دارا می باشند.

۸- صرفه جویی انرژی در شرکت فولاد آلیاژی یزد

در این بخش انرژی لازم برای پیش گرمایش قراضه در محدوده دمای متعارف 250°C الی 500°C و صرفه جویی انرژی و اقتصادی حاصل از آن بررسی می گردد.

جدول ۷ مشخصات ترموفیزیکی فولاد تولیدی در شرکت فولاد آلیاژی یزد را نشان می دهد.

انرژی لازم برای رساندن دمای قراضه به دمای ذوب:

(۹)

$$Q_1 = 0.53 \times (1560 - 25) = 814 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

انرژی لازم برای ذوب فولاد:

(۱۰)

$$Q_2 = 280 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

انرژی لازم برای رساندن فولاد مذاب به دمای 1600°C :

(۱۱)

$$Q_3 = 0.45 \times (1650 - 1560) = 41 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

(۱۲)

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1135 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}} = 315 \frac{\text{kWh}}{\text{ton}}$$

بنابراین بطوری که مشاهده می شود از کل انرژی مورد نیاز جهت تهیه مذاب حدود $71/7$ درصد جهت پیشگرمایش قراضه تا دمای ذوب می شود، $24/7$ درصد جهت ذوب قراضه پیش گرم شده و فقط $3/6$ درصد جهت ذوب نمودن مذاب مصرف می شود.

■ محور افقی شمال به جنوب: محور به طور افقی در جهت شمال به جنوب واقع شده و گردآورنده به طور پیوسته روی محور شمال به جنوب طوری می چرخد که تابش مستقیم خورشید حداقل زاویه برخورد را با سطح پذیرش در هر لحظه از زمان داشته باشد.

■ محور شمال به جنوب با شیب ثابت: محور در جهت شمال به جنوب با شیبی ثابت برابر با عرض جغرافیایی آن منطقه یا به عبارتی موازی با محور زمین است. در این حالت کلکتور روی محوری موازی با محور زمین و با سرعت زاویه ای برابر و در خلاف جهت با حرکت محور زمین (۱۱۵۰ در ساعت) می چرخد. در این چرخش در ظهر خورشیدی سطح پذیرش دارای شیب ثابت و رو به جنوب است.

■ محور شمال به جنوب با شیب متغیر: در این حالت محور کانونی در جهت شمال به جنوب و شیبدار است و کلکتور به طور پیوسته (با سرعت زاویه ای متغیر) موازی با محور کانونی می چرخد و طوری تنظیم می شود که تابش مستقیم خورشید در همه زمانها به طور عمود بر سطح پذیرش برخورد کند.

در عمل سبک های جهت یابی و ردیابی ۲،۳ و ۴ بیشتر متداولند. سبک ۵ به دلیل پیچیدگی و سبک ۱ به دلیل عدم ایجاد تصویر روی محور کانونی معمولاً مورد استفاده قرار نمی گیرند. در شکل (۵) تابش مستقیم خورشیدی در مرداد و بهمن ماه در ساعت های مختلف روز و در شکل (۶) انرژی حاصل از تابش مستقیم خورشیدی در ماه های مختلف سال و در شکل (۷) انرژی سالانه حاصل از تابش مستقیم خورشیدی در مد های مختلف جهت یابی خورشیدی در یزد نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۷) مشاهده می نمایید بالاترین مقدار تابش مستقیم دریافتی مربوط به مد های جهت یابی ۵ و ۴ می باشد و

برج منعکس کننده شناخته می‌شود به صورت طرح واره در شکل ۸ نشان داده شده است. اجزای اصلی این سیستم عبارتند از میدان هلیوستات (ردیابهای خورشیدی) در اطراف برج، منعکس کننده هذلولی شکل در بالای برج و متمرکز کننده‌های ثانویه که در بالای پاتیل قراضه قرار گرفته‌اند.

در این طرح ظرفیت سیستم برای پیش‌گرمایش ۲۵۰ هزار تن قراضه در نظر گرفته شده است. میانگین آهنگ پیش‌گرمایش ۵۷ تن در ساعت می‌رسد. آهنگ پیش‌گرمایش قراضه مابین ۳۱ الی ۸۲ تن در ساعت متغیر می‌باشد، که این تغییر آهنگ پیش‌گرمایش به واسطه تغییر در شار انرژی خورشیدی در روزهای مختلف شهر یزد را نشان می‌دهد. پاتیل قراضه از فولاد کربن ساخته شده و دارای دریچه هیدرولیک برای تخلیه قراضه گرم می‌باشد. ظرفیت این پاتیل در حدود ۴۹ تن قراضه می‌باشد و تمام مدت در دمای 500°C نگهداشته می‌شود. پیش‌گرمایش فقط در ساعات آفتابی (تقریباً ۴۴۰۰ ساعت در سال در شهر یزد) انجام خواهد شد و قراضه بطور پیوسته حدود ۵۷ تن در ساعت برای ۸۰۴۰ ساعت در سال به سمت مراحل بعدی فرآیند تهیه فولاد جریان خواهد داشت. ابعاد پاتیل قراضه دارای قطر ۳/۳ متر و ارتفاع ۱/۵ متر می‌باشد. در این فناوری خورشیدی، ۲۹۰ ردیاب خورشیدی که سطح هر کدام ۳۶ متر مربع می‌باشد، در منطقه ای به وسعت ۱/۲ هکتار آرایش یافته‌اند. ارتفاع برج ۷۱/۵ متر است که در بالای آن آینه محدب با سطح منعکس کننده ۶۱ متر مربع طرح‌ریزی شده است. به منظور بهره‌برداری بیشتر و حداقل اتلاف توان در تجمع پرتوهای نوری، در این طرح پاتیل قراضه از ۸ قسمت خوشه‌ای شکل ساخته شده است که می‌تواند گرمای یکنواختی را در سطح قراضه ایجاد کند

۱۰- برآورد هزینه ساخت و بهره‌برداری فناوری خورشیدی

با توجه به مصرف ویژه انرژی الکتریکی در جدول ۲ (607 kWh/ton)، راندمان تبدیل انرژی در بخش ذوب ۰/۵۱۹ می‌باشد و راندمان کل با فرض راندمان ۰/۳۲ نیروگاه‌ها برابر با ۰/۱۶۶ خواهد بود.

انرژی لازم برای پیش‌گرمایش قراضه از دمای 25°C تا 250°C

(۱۳)

$$Q_{ph1} = 0.53 \times (250 - 25) = 119 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

انرژی لازم برای پیش‌گرمایش قراضه از دمای 25°C تا 500°C

(۱۴)

$$Q_{ph2} = 0.53 \times (500 - 25) = 252 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}$$

بنابراین با پیش‌گرمایش قراضه تا دمای 250°C و 500°C به ترتیب ۱۰/۴ و ۲۲ درصد صرفه جویی انرژی در کوره‌های ذوب ایجاد می‌شود. در جدول ۴ صرفه جویی انرژی و اقتصادی پیش‌گرمایش قراضه با فرض هزینه یک کیلووات ساعت برق معادل ۱۸۰ ریال و در نظر گرفتن ۳۳۵ روز کاری آمده است. با توجه به هزینه سرمایه گذاری تقریبی جهت ساخت و نصب سیستم پیش‌گرمایش خورشیدی حداکثر برابر با ۴۲ میلیارد ریال بازگشت سرمایه برای پیش‌گرمایش قراضه تا دمای 500°C برابر است با:

$$(15) \quad \text{سال } 4/8 = 41900/8650 = \text{مدت بازگشت سرمایه}$$

۹- فن آوری کوره خورشیدی برای پیش‌گرمایش قراضه

راهکار پیشنهادی برای پیش‌گرمایش قراضه آهن که به نام

[3] Environmental Technology Program for Industry, (ETPI), "Environmental Report of steel Melting Sector", Karachi, Pakistan, April 2001.

[4] BCS, Incorporated, "Advanced Melting Technologies: Energy saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry", Technical report preparal for ITP Metal Casting, Nov. 2005.

[۵] سالنامه آماری هواشناسی ۱۳۷۷-۱۳۷۸، وزارت راه و ترابری سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۰.

[6] Duffie, J.A. and Beckman, W.A, "Solar engineering of thermal processes", Johan Wiley & sons, Inc., New York, second edition, 1991.

[۷] میرحسینی، سید عباس، "تعیین ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، گروه مهندسی سیستم های انرژی، ۱۳۸۰.

[8] Bahadori, M.N., and Chamberlain, M.J, "Simplification of Weather Data to Evaluate Daily and Monthly Energy Needs of Residential Building", Solar Energy Journal, Vol.36, No 6, pp. 499-504. ,1986.

[9] H.McAdams, W., "Heat Transmission", McGraw Hill(1954).

[۱۰] قائم مقامی، ج، آزاد، ع، پناهنده، ح، گنولا، ف، "انرژی خورشیدی طراحی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۸.

[11] Sukhatme, S., "Solar Energy Principles of Thermal Collection and Storage", Second Edition, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1996.

[12] Rabl, A., "Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators", Solar Energy, vol. 18, pp. 497-511, 1976.

برآورد مالی برای ساخت و بهره‌برداری طرح بر اساس استعلام قیمت‌های تجهیزات نوری، مواد و لوله در سال ۱۳۸۶ و بادر نظر گرفتن هزینه تولید انرژی برق به میزان ۲۱۷ ریال بر هر کیلووات ساعت انجام شده است. هزینه خرید مهندسی و نیروی انسانی ۱۰ درصد هزینه کل طرح و هزینه‌های پیشبینی نشده بطور کلی ۱۵ درصد تخمین زده شده است. نرخ ارز نیز هر دلار معادل ۹۰۰۰ ریال است. کل هزینه اجرای طرح ۴۱/۹ میلیارد ریال تخمین زده شده که هزینه ردیابهای خورشیدی ۱/۳۵ میلیون ریال بر متر مربع و هزینه برج ۹/۶ میلیارد ریال (۴/۵ میلیون ریال بر متر مربع) است. جدول ۱۰ خلاصه هزینه ساخت و بهره‌برداری از کوره خورشیدی پیش گرمایش قراضه تا دمای ۵۰۰°C را نشان می‌دهد.

۱۱- نتیجه گیری

علیرغم هزینه بالای نصب و راه اندازی سیستم خورشیدی پیشنهادی، شرکت فولاد آلیاژی ایران می‌تواند با بهره‌گیری از این سیستم جهت پیش‌گرمایش قراضه، و با توجه به تابش بالای خورشیدی در شهر یزد، علاوه بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی از مزایای دیگر این روش شامل کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، کاهش هزینه انرژی، افزایش بازدهی تولید و جلوگیری از ایجاد بخار در فرآیند ذوب استفاده نماید.

۸- مراجع

[1] Akiba Segal, "A new optical conception prevails over the design of the central solar plants", Chemical Research Support Dept. Solar Optics Design and Mathematical Modeling Unit Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 2007.

[2] Demonstration Projects, Environmental Report, Steel Melting Sector, pp 31-34, April 2001.

[13] Segal, A. and Epstein, M.– "Practical Considerations in Designing Large Scale Beam Down Optical Systems", J. of Solar Energy Engineering, Volume 130, Issue 1 , 011009, 2008.

[14] Segal, A. and Epstein, M., "The Optics of the Solar Tower Reflector", Solar Energy, 69 (Suppl), pp. 229-241, 2001.

[15] Winston, R., "Principles of Solar Concentrator of a Novel Design", Solar Energy, pp. 89–95, 1974.

جدول (۳) حفظ انرژی با کاهش دمای بارگیری [۲]

پارامتر	پاتیل پیش گرم	پاتیل سرد
کاهش دما در حال بارگیری به درون پاتیل	۵۰	۱۰۰
کاهش دما در بارریزی به درون قالب طی مدت ۵ دقیقه با آهنگ کاهش دما 20C/min	۱۰۰	۱۰۰
کل کاهش در دما	۱۵۰	۲۰۰
حداقل دمای بارریزی مناسب	۱۴۰۰	۱۴۰۰
حداقل دما برای بارگیری	۱۵۵۰	۱۶۰۰
دمای بارگیری	۱۶۰۰	۱۶۰۰
میزان امکان کاهش ما در بارریزی	۵۰-۱۰۰	۰-۵۰

جدول ۱. مشخصات پاتیل قراضه در شرکت فولاد آلیاژی ایران

پارامتر	واحد	مقدار
قطر دهانه بالا	متر	۳/۳
ارتفاع	متر	۴
جنس	-	فولاد
ضخامت	سانتی متر	۳
ارتفاع قراضه در	متر	۴ (تا انتها)

جدول ۲. مشخصات کوره ذوب الکتریک در شرکت فولاد آلیاژی

ایران

مشخصات کوره	مقدار	واحد
ظرفیت	۴۰	ton
تعداد دفعات شارژ کوره در	۱۵	/day
مصرف روزانه قراضه آهن	۷۴۱	ton
تولید روزانه فولاد	۶۳۰	ton
مصرف انرژی روزانه	۳۸۲	Kwh/dy
مصرف آهن قراضه در هر شارژ	۴۹/۴	ton
خروجی مذاب در هر شارژ	۴۲	ton
مصرف انرژی در هر شارژ	۲۵۵	kwh
انرژی مصرفی مخصوص کوره	۶۰۷	Kwh/ton
ورودی روزانه قراضه آهن	۷۴۱	ton
تولید روزانه مذاب	۶۳۰	ton
انرژی مصرفی روزانه	۳۸۲	kwh
مصرف مخصوص انرژی	۶۰۷	Kwh/ton

جدول (۴) ضریب صافی هوادر یزد در ماههای مختلف سال [۷]

فروردین	۰/۶۱
اردیبهشت	۰/۶۸
خرداد	۰/۷۴
تیر	۰/۷۳
مرداد	۰/۷۷
شهریور	۰/۷۶
مهر	۰/۷۴
آبان	۰/۶۵
آذر	۰/۶۴
دی	۰/۶
بهمن	۰/۶۲
اسفند	۰/۵۹

جدول (۷) مشخصات ترموفیزیکی فولاد تولیدی در شرکت فولاد

آلیاژی یزد

مقدار	واحد	مشخصات
۰/۵۳	Kj/kg ⁰ C	گرمای ویژه فولاد به حالت
۰/۴۵	Kj/kg ⁰ C	گرمای ویژه فولاد به حالت
۱۵۶۰	⁰ C	دمای ذوب فولاد
۱۶۵۰	⁰ C	دمای ذوب ریزی
۲۵	⁰ C	دمای محیط
۲۸۰	Kj/kg	گرمای نهان ذوب فولاد

جدول ۸ صرفه جویی انرژی و هزینه در پیش گرمایش قراضه

دمای پیش گرمایش ⁰ C		
۵۰۰	۲۵۰	صرفه جویی انرژی الکتریکی ویژه (kWh/ton)
۱۸۸/۲	۸۹/۲	
۳۹۷۲۰	۱۸۸۲۶	صرفه جویی انرژی الکتریکی در سال (kWh/ton)
۸۶۵۰	۴۱۰۰	صرفه جویی هزینه انرژی (MRial/year)

جدول ۹. مشخصات کوره خورشیدی برای پیش گرمایش قراضه در

فولاد آلیاژی یزد

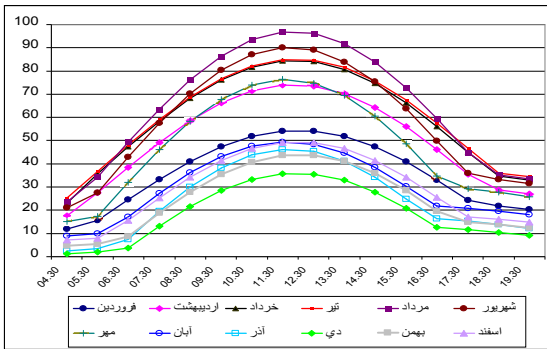
مشخصات	پارامتر
۱۰۴۴۰ متر مربع	مساحت کل سطح ردیابهای خورشیدی
۰/۴۲، شمالی	آرایش و تراکم میدان ردیابها
۶۱ متر مربع	مساحت سطح منعکس کننده برج
۴/۳ متر	شعاع موثر انعکاس
۷۱/۵ متر	ارتفاع منعکس کننده
۷۵ متر	فاصله کانونی منعکس کننده برج
۱۰ مگا وات	توان بازتابش منعکس کننده
۱۶۴ کیلووات بر متر مربع	حداکثر شار گرمایی روی منعکس کننده
۸ مگاوات	توان ورودی به پاتیل قراضه
۹۵ درصد	کل بازده نوری

جدول (۵) متوسط ماهانه ماکزیمم دما (T_{max}) و متوسط ماهانهمینیمم دمای هوا (T_{min}) در یزد [۸]

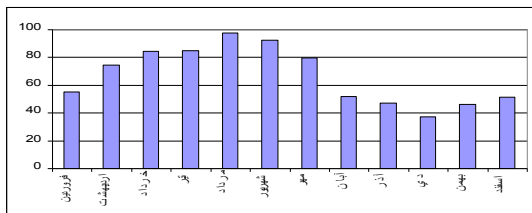
ماه های سال	T_{max}	T_{min}
فروردین	۲۴/۴	۱۱/۴
اردیبهشت	۳۱/۷	۱۷/۰
خرداد	۳۷/۷	۲۲/۴
تیر	۳۸/۷	۲۴/۹
مرداد	۳۸/۲	۲۲/۹
شهریور	۳۶/۳	۲۰/۵
مهر	۸/۴	۱۴/۶
آبان	۲۲/۳	۸/۴
آذر	۱۶/۸	۲/۱
دی	۱۲/۸	۰/۹
بهمن	۱۶/۲	۴/۲
اسفند	۱۸/۴	۶/۸

جدول (۶) سرعت باد در ماه های مختلف سال در یزد [۵]

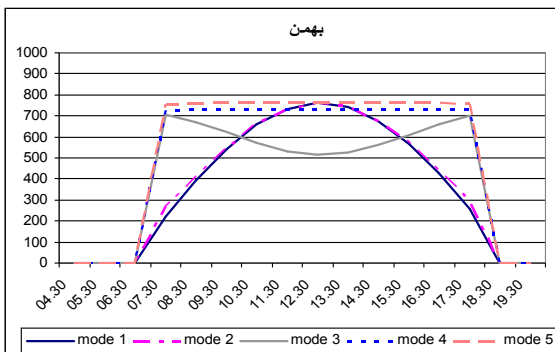
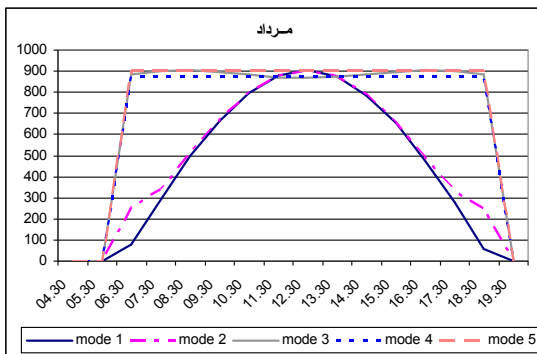
ماه های سال	مقدار	واحد
فروردین	۵	m/s
اردیبهشت	۴	m/s
خرداد	۴	m/s
تیر	۴	m/s
مرداد	۳	m/s
شهریور	۳	m/s
مهر	۳	m/s
آبان	۴	m/s
آذر	۳	m/s
دی	۴	m/s
بهمن	۴	m/s
اسفند	۴	m/s



شکل (۳) تغییرات دمای یک قطعه مکعبی قراضه فولادی به ابعاد ۷۰ cm در مقابل تابش خورشیدی یزد



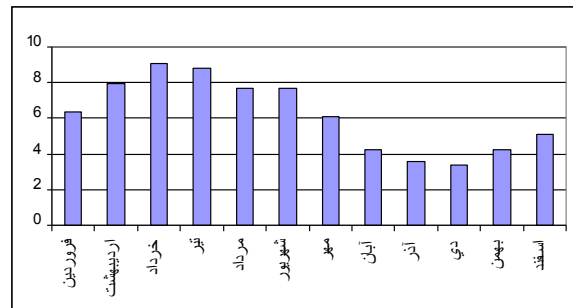
شکل (۴) حداکثر دمای قطعه مکعبی قراضه فولادی به ابعاد ۷۰ cm در مقابل تابش خورشیدی یزد



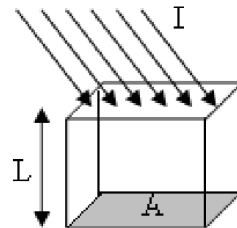
شکل (۵) تابش مستقیم خورشیدی در مرداد و بهمن ماه در مدهای مختلف جهت یابی خورشیدی در یزد بر حسب W/m^2day

جدول ۱۰. خلاصه هزینه ساخت و بهره برداری از کوره خورشیدی پیش گرمایش قراضه تا دمای $500^{\circ}C$

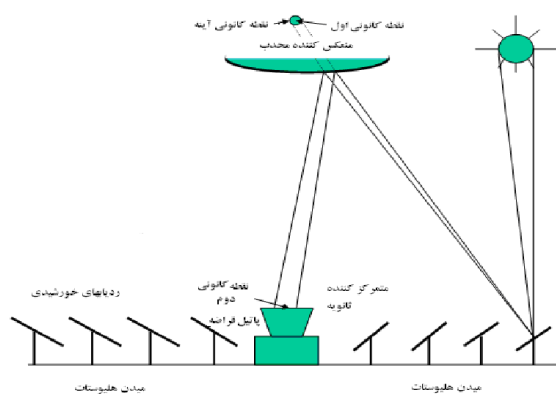
پارامتر	هزینه به میلیارد ریال
ردیابهای خورشیدی	۱۴/۰۹۴
منعکس کننده	۰/۲۷۹
برج	۹/۶۰۳
جمع تجهیزات میدان آینه	۲۳/۹۷۶
هزینه های عمرانی طرح و وسایل	۸/۸۷۷
عایق کاری	۰/۰۸۱
مهندسی برق	۰/۱۵۳
هزینه نیروی انسانی	۳/۳۴۸
هزینه پیش‌بینی نشده	۵/۴۶۵
جمع کل	۴۱/۹
ارزش اندوخته روزانه (میلیون ریال)	۲۵/۸
ارزش اندوخته سالانه (میلیون ریال)	۸۶۵۰
مدت بازگشت سرمایه	کمتر از ۵ سال



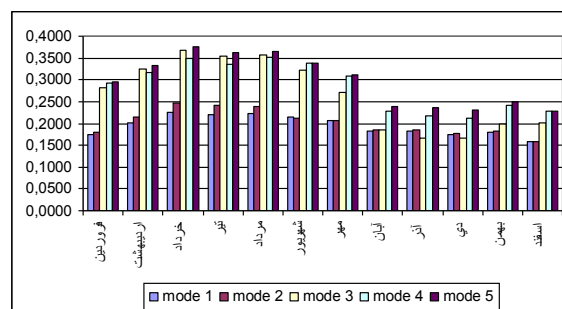
شکل (۱) متوسط انرژی تابشی روزانه خورشید در یزد بر حسب kWh/m^2day



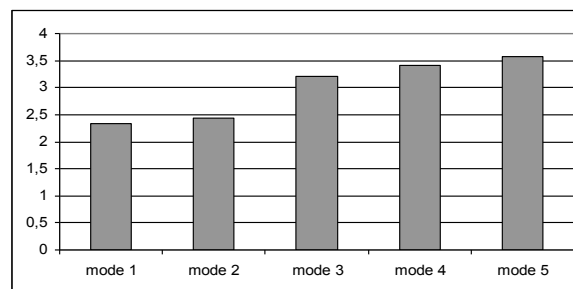
شکل (۲) قراضه فولادی به صورت مکعبی با ابعاد ۷۰ cm



شکل (۸) سیستم پیش گرمایش قراضه با گیرنده مرکزی و منعکس کننده‌های تخت



شکل (۶) تابش مستقیم خورشیدی در ماههای مختلف سال در مدهای مختلف جهت یابی خورشیدی در یزد بر حسب MWh/m^2mon



شکل (۷) انرژی سالانه حاصل از تابش مستقیم خورشیدی در مدهای مختلف جهت یابی خورشیدی در یزد بر حسب MWh/m^2year