

مدل سازی عددی و طراحی ریکوپراتور به منظور پیش گرمایش هوا در هیتر ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری، مطالعه موردی: ایستگاه هسا اصفهان

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
 کارشناس ارشد، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران
 کارشناس ارشد، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران
 کارشناس ارشد، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران
 کارشناس ارشد، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران

ابراهیم افشاری*
 علی ابراهیم پور
 تقی علیان
 امیر پاشایی
 داوود طاووسی

چکیده

در این مقاله، به بررسی استفاده از یک ریکوپراتور، مدلسازی عددی و طراحی آن به منظور پیش گرم کردن هوای ورودی به هیتر با بازیافت گرمای دودکش هیتر در ایستگاه تقلیل فشار گاز پرداخته می شود. نتایج نشان می دهند که استفاده از ریکوپراتور با کویل ۶ اینچی باعث می شود دمای هوای پیش گرم شده ۶۰ درجه افزایش یابد. این افزایش دما باعث صرفه جویی مصرف سوخت به اندازه ۹٪ نسبت به هیترهای رایج (هیتر بدون پیش گرمکن هوا) می شود. همچنین، با کاهش گام کویل دمای خروجی حدود ۱۹ کلوین افزایش می یابد؛ هر چند با کاهش گام کویل وزن کویل در حدود ۲۳۸ کیلوگرم افزایش می یابد. با افزایش دبی ورودی به هیتر و همچنین کاهش دمای محیط، دمای خروجی کویل کاهش می یابد. بهترین سناریو در حالتی است که قطر کویل ۶ اینچ و فاصل کویل از مرکز دودکش زیاد باشد؛ در حالت هایی که دمای بدنه دودکش ثابت و بدنه دودکش عایق باشد، میزان صرفه جویی در مصرف سوخت ۱۰٪ و ۱۰/۵٪ می باشد. همچنین، افت فشار داخل کویل هوا و دار داخل دودکش بسیار ناچیز است.

واژه های کلیدی: هیتر، ایستگاه تقلیل فشار گاز، ریکوپراتور - تلفات حرارتی، مصرف سوخت.

Numerical Simulation and Design a Recuperator to Preheat the Air in Urban Gas Pressure Regulating Stations, Case Study: Isfahan HESA Station

E. Afshari Department of Mechanical Engineering, Faculty of Eng, Isfhan University, Isfahan, Iran
A. Ebrahimpour Research Scientist, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran
T. Alian Research Scientist, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran
A. Pashaie Research Scientist, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran
D. Tavoosi Research Scientist, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran

Abstract

Numerical modeling and design of a recuperator for the purpose of pre-heating the inlet air to the heater to with recycling the heat generated from the heater stack at gas pressure reduction station is assessed here. The results indicate that applying a recuperator with a 6" coil leads to an increase in preheated air by 60°C. This increase reduces fuel cost by about 9% in relation to the conventional heaters. By reducing coil گام the output temperature increases by 19 Kelvin, and the coil weight increases by about 238 kg. An increase in inlet flow of the heater and a decrease in environ temperature, lead to a decrease in coil temperature. The best scenario becomes possible when the 6" coil is at a fixed distance from the stack and the stack is isolated; here the savings in fuel consumption is 10% for the first and 10.5% for the second situations. The air pressure drop in the inner coil and in the stack is insignificant.

Keywords: Heater - Gas pressure reducing station - Recuperator- waste heat- Fuel Consumption.

۱- مقدمه

نیاز است. همچنین خطرات و حوادث جاده ای که ممکن است به وجود آید. برای فشرده کردن گاز در فشار بالا به مخزن های مستحکمی نیاز است که بتواند فشار گاز را تحمل کند که وزن و هزینه زیادی دارد. با توجه به این موارد و وجود مسافت طولانی بین مراکز تولید و مصرف کنندگان گاز طبیعی در کشور ما، ترجیح داده می شود که از خطوط اصلی گاز استفاده شود. هر چند که این روش هم مشکلات خاص خود را دارد. از جمله این که باید فشار گاز در لوله را افزایش دهیم (در حدود ۱۰۰۰ psi) که این افزایش فشار نیاز به کار کمپرسورهای قوی و همچنین لوله های قوی برای تحمل فشار بالای

ایران با داشتن ۱۵/۵ درصد از ذخایر گازی جهان بعد از روسیه به ۲۶/۳ در رتبه دوم جهان از نظر ذخایر گازی قرار دارد. ایران دومین صادر کننده گاز است و علاوه بر صادرات، مصرف گاز در داخل کشور هم زیاد می باشد و حتی می توان گفت یکی از انرژی های اصلی مصرفی در کشور می باشد. فشرده کردن گاز در مخزن ها و کیسول های مخصوص و انتقال آن به وسیله تریلر روش اول و انتقال گاز از طریق خطوط لوله دومین روش برای انتقال گاز طبیعی است. برای انتقال گاز از طریق تانکر به میزان زیادی مخزن، جاده، نیروی انسانی و ...

گاز دارد. برای آن که گاز قابل مصرف در منازل یا صنایع باشد؛ باید قبل از ورود گاز به شهر فشار آن کاهش پیدا کند که این کاهش فشار در چند مرحله انجام می‌شود. در ابتدا در ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری فشار آن به 250 psi کاهش می‌یابد و بعد از آن در ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری، فشارش به 60 psi کاهش می‌یابد. بعد از آن در رگلاتورهای درب منازل از نیز به فشار 0.25 psi می‌رسد و آماده مصرف می‌گردد [۱ و ۲]. ظرفیت ایستگاه تقلیل فشار گاز وابسته به جمعیت شهر بوده و تا 1000000 متر مکعب بر ساعت می‌رسد. این ایستگاهها بخش مهمی از سیستم گاز رسانی به شهر را تشکیل می‌دهند و بررسی آنها جهت ساخت تجهیزات جدید، کاهش مصرف انرژی، کاهش آلاینده‌گی و... مهم و حائز اهمیت است.

کاهش فشار در ایستگاه تقلیل فشار گاز با تغییر دیگر خواص گاز همراه است که ممکن است باعث بروز مشکلات فرآیندی (برای مثال تشکیل هیدرات‌ها) گردد. در واقع با کاهش فشار گاز طبیعی در ایستگاه تقلیل فشار گاز، دمای آن کاهش می‌یابد که می‌تواند منجر به یخ‌زدگی و تشکیل هیدرات گردد که باعث می‌شود لوله‌ها صدمه ببینند و مسیر گاز مسدود گردد. برای جلوگیری از این مشکلات باید قبل از کاهش فشار گاز، دمای آن را افزایش داد و آن را از طریق هیتر گرم کرد. به علت طراحی نامناسب هیترهای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز طبیعی، معمولاً بازده آنها بسیار پایین‌تر از مقدار ایده‌آل می‌باشد. به همین دلیل مقدار قابل ملاحظه‌ای از انرژی حرارتی سوخت از طریق گازهای خروجی از دودکش به هدر می‌رود؛ به طوری که دود خروجی از دودکش دمای بالایی دارد که وارد محیط می‌شود. از این‌رو یکی از راهکارهای افزایش بازده بازیافت انرژی گرمایی گازهای خروجی از دودکش می‌باشد. از جمله روش‌های بازیافت حرارت اتلافی از دودکش استفاده از این حرارت برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی به هیتر توسط یک ریکوپراتور می‌باشد.

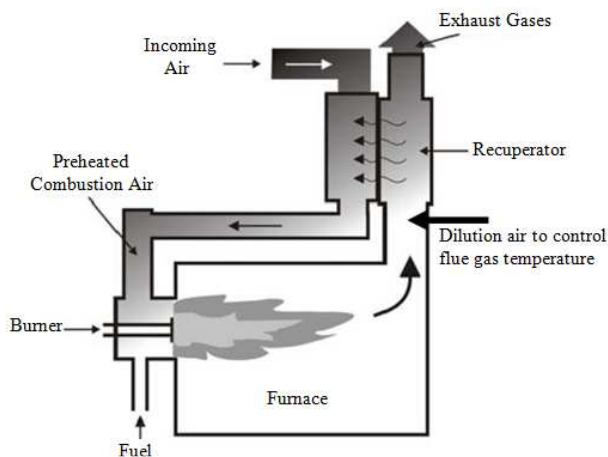
تاکنون مطالعاتی انجام شده است که تاثیر استفاده از ریکوپراتور و پیش گرم کردن هوای ورودی به مشعل بر عملکرد مشعل و مجموعه کل سیستم شامل مشعل را به اثبات رسانده‌اند. برای نمونه می‌توان به مطالعه کارامارکویش و همکارانش [۳] اشاره کرد. آنها آنالیز انرژی و اکسرژی و مدلسازی انتقال حرارت از یک کوره دوار یک شرکت تولید منیزیم را با و بدون ریکوپراتور انجام داده و مقایسه کردند. ریکوپراتور ارائه شده آنها هم از طریق جابجایی و هم از طریق تشعشع حرارت را منتقل می‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد اتلاف حرارت بدون استفاده از ریکوپراتور $26/35\%$ است که این مقدار با استفاده از ریکوپراتور به 17% می‌رسد. سزجو و همکارانش [۴] تاثیر پیش‌گرم کردن هوای ورودی به سیستم مشعل احتراق موازی در یک کوره در مقیاس آزمایشگاهی را بررسی کردند. بیشترین دمای به دست آمده در حالت بدون پیش گرم کردن و با پیش گرم کردن به ترتیب 1275 و 1300 درجه سلسیوس به دست می‌آید که نشان دهنده تاثیر مثبت پیش‌گرم کردن بر عملکرد مشعل است. مطالعه عددی یک ریکوپراتور برای میکرو توربین گازی در یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت خانگی در انگلستان توسط کلی و تنسلی [۵] انجام شد. ریکوپراتور مورد استفاده آنها از نوع کوپلی لوله به لوله است. آنها نشان دادند این مبدل بیشترین کارایی و کمترین افت فشار را

همراه با طول زیاد لوله دارد

در این مقاله، به شبیه‌سازی عددی یک ریکوپراتور کوپلی، به منظور بازیافت گرمای دودکش یک هیتر در ایستگاه تقلیل فشار گاز (ایستگاه هسا اصفهان) پرداخته شده است و دمای هوایی که توسط گازهای خروجی از دودکش گرم شده است، محاسبه گردیده است. از این هوای گرم به عنوان هوای ورودی در هیتر استفاده شده است. محاسبه صرفه‌جویی در مصرف سوخت ایستگاه و میزان افت فشار به واسطه ریکوپراتور اضافه شده به ایستگاه از اهداف اصلی این مقاله است. همچنین، بررسی تاثیر ابعاد هندسی کوپل در ریکوپراتور و شرایط کاری ریکوپراتور بر دمای خروجی از ریکوپراتور و به تبع آن میزان صرفه جویی در مصرف سوخت از دیگر اهداف این مقاله است.

۲- افزایش دمای هوای ورودی به محفظه احتراق

همان طور که در مقدمه بیان شد زمانی که فشار گاز طبیعی کاهش پیدا می‌کند دمایش نیز کم می‌شود که ممکن است به یخ زدگی لوله‌ها و تجهیزات منجر شود به منظور جلوگیری از این عمل، باید قبل از ورود به رگلاتور گاز گرما شود. این عمل به کمک یک هیتر که در ایستگاه تقلیل فشار گاز نصب می‌شود، انجام می‌گیرد. انرژی این گرمایش می‌تواند با استفاده از انرژی الکتریکی (هیتر الکتریکی) و یا از انرژی گرمایی ناشی از احتراق بخشی از گاز طبیعی خط لوله (هیتر گازی) حاصل شود. از عوامل تاثیرگذار بر بهبود راندمان حرارتی هیترهای گازی، پیش‌گرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق است. منبع حرارتی این گرمایش می‌تواند جریان گاز-های داغ حاصل از احتراق باشد که از دودکش خارج می‌شود و دمای بالایی دارد [۶]. مطابق شکل ۱ با نصب یک مبدل حرارتی در مسیر گازهای داغ حاصل از احتراق هنگام ترک دودکش، بخش زیادی از این حرارت جذب و به هوای ورودی به محفظه احتراق منتقل خواهد شد. ریکوپراتورها، مبدل‌های حرارتی انتقال حرارت گاز به گاز هستند که در مسیر دودکش نصب می‌شوند. صفحات یا لوله‌های داخلی حرارت را از گازهای داغ از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی دریافت می‌کنند و به هوای تازه و سرد ورودی انتقال می‌دهند، بدون آنکه منجر به اختلاط جریان‌ها شوند.



شکل ۱- ریکوپراتور نصب شده به منظور پیش گرمایش هوای ورودی به مشعل هیتر

۳-۲- مشخصات ریکوپراتور

با توجه به هندسه دودکش هیترو و میزان تحمل بار مبدل، از ریکوپراتور نوع کوپلی استفاده شده است که دارای بیشترین بازده جهت دریافت حرارت از خروجی دودکش می‌باشد. طرح قرارگیری مبدل درون دودکش به صورت کوپل تک لوله لحاظ می‌شود و قطر لوله کوپل (2r) طراحی شده ۶ اینچ می‌باشد. کوپل در وسط دودکش نصب می‌شود و جریان هوایی که قرار است از درون لوله کوپل پیش گرم شود، از طریق گاز دودکش که بیرون دیواره کوپل جریان دارد انتقال پیدا می‌کند. مزیت این کار این است که تمام سطح کوپل در معرض گاز دودکش قرار می‌گیرد و انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود. با توجه به این که کوپل مورد نظر درون دودکش با قطر ۶۳ سانتیمتری قرار می‌گیرد، قطر کوپل یعنی (2R_c) طبق رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$R_c = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} D_{stack} - 2r \right) + \frac{1}{2} (2r) = \frac{1}{4} D_{stack} \quad (1)$$

در رابطه بالا، D_{stack} قطر داخلی دودکش بوده و برابر ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است، با توجه به رابطه ۱ قطر کوپل برابر ۲۵ سانتیمتر می‌باشد. همچنین فاصله کوپل از مرکز و دیواره را می‌توان به کمک رابطه ۲ محاسبه کرد.

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} D_{stack} - r \right) \quad (2)$$

با توجه به رابطه ۲ فاصله کوپل از مرکز و دیواره برابر ۵/۳۵ سانتیمتر می‌باشد.

ارتفاع کوپل نیز نقش موثری بر روی سطح مقطع عبور گاز دودکش دارد که بهترین حالت آن وقتی است که $H_c = \infty$ باشد. (یعنی کوپل به صورت یک لوله عمود باشد). مقدار انسداد دودکش بر اساس رابطه ۳ مشخص می‌گردد.

$$block \% = \frac{H_c = \infty \text{ or coil area}}{\text{area without coil}} \quad (3)$$

مطابق معادله ۳ این مقدار برابر است با ۹/۳۲٪ می‌باشد. در بدترین حالت $H_c = 2r$ می‌باشد، که در این حالت کوپل به یک حلقه تبدیل می‌شود. که مقدار انسداد آن (در بدترین حالت) بر اساس رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$block \% = \frac{H_c = 2r \text{ or coil area}}{\text{area without coil}} \quad (4)$$

مطابق معادله ۴ این مقدار برابر با ۵۵/۵۳٪ است. با توجه به اینکه مقداری از سطح مقطع دودکش که توسط کوپل مسدود می‌شود به مقدار H_c بستگی دارد، مقدار مجاز انسداد دودکش با توجه به مراجع ۳۰٪ در نظر گرفته می‌شود. مقدار H_c از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$H_c = 2D_c \tan \left(\frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{d^2}{0.3D_{stack}^2} \right) \right) \quad (5)$$

مطابق رابطه ۵، H_c برابر ۰/۲ متر است. رابطه ۶ مقدار زاویه هر دور کوپل (α) را نشان می‌دهد.

با افزایش دمای هوای ورودی به مشعل، تاثیر افزایش دمای هوای واکنش دهنده بر افزایش دمای شعله آدیباتیک بیشتر می‌شود. با توجه به این نکته سعی می‌شود تا حد ممکن دمای هوای ورودی به مشعل افزایش یابد تا انرژی بیشتری بازیابی شود. مزایای استفاده از ریکوپراتورها عبارت‌اند از:

- ۱) کم بودن وزن سیال عبوری (هوا) در ریکوپراتور، که در نتیجه افت فشار آن در عبور از لوله‌ها و مبدل گرمایی کمتر می‌گردد.
 - ۲) در ریکوپراتورها، وزن سیال همراه با فلز نسبت به اکونومایزرها کمتر است؛ در نتیجه برای نگه داشتن روی دودکش، به استقامت و زیرسازی کمتری نیاز است.
 - ۳) چون گاز طبیعی سوخت پاک است، مشکل کثیفی و رسوب گرفتگی مجراها وجود ندارد که در نتیجه نیاز به نگهداری، مراقبت و بازدید کمتری دارد.
- ریکوپراتورها معایبی نیز دارند که عبارت‌اند از:
- ۱) ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گازها از مایعات کمتر است و در نتیجه برای انتقال گرمای مشابه با اکونومایزر نیاز به مساحت بیشتری از مبدل است.
 - ۲) کم بودن ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و محدودیت در اندازه-ی ریکوپراتورها سبب می‌شود که راندمان ریکوپراتورها نسبت به سایر مبدل‌های گرمایی تفاوت عمده‌ای نداشته باشد.

۳- طراحی ریکوپراتور

۳-۱- اندازه‌گیری دبی هوا و سوخت ورودی به مشعل

برای طراحی ریکوپراتور، نیاز به پارامترهای ورودی به این مبدل (دبی هوای، دمای سیالات، فشار و ...) است. دبی ورودی به ریکوپراتور به کمک دبی هوای ورودی به مشعل و با جمع کردن آن با دبی سوخت به دست می‌آید. این دبی مشخص نبوده و برای تعیین آن یک آزمایش ترتیب داده شده و اندازه‌گیری گردید. با توجه به ساختار ورودی هوا به مشعل هیترو، به ساخت یک تبدیل جهت عبور هوا با ابعاد کوچکتر جهت محاسبه سرعت سیال ورودی به هیترو نیاز بود. ابعاد این تبدیل با اندازه‌گیری ابعاد داخلی دریچه هوای ورودی به هیترو، تعیین گردید. با متصل کردن تبدیل به مشعل، یک سنسور سرعت سنج جهت اندازه‌گیری سرعت هوای ورودی به مشعل هیترو روی آن نصب شد. سرعت متوسط (در طی چندین بار اندازه‌گیری) ۱۷/۵ متر اندازه‌گیری شد و از این‌رو دبی حجمی هوا تعیین گردید (۴۸۷/۴۵ متر مکعب بر ساعت). به کمک کنتور نصب شده بر روی سوخت ورودی به مشعل، مصرف سوخت هیترو نیز اندازه‌گیری شد (۵۰ متر مکعب بر ساعت).

علاوه بر دبی‌ها، نیاز به ابعاد هندسی و شرایط عملکردی جهت طراحی ریکوپراتور می‌باشد. با توجه به این که طراحی صورت گرفته به طور خاص بر روی هیترو حساس است؛ در این هیترو، ارتفاع دودکش (۷/۵ متر)، قطر دودکش (۶۳ سانتیمتر)، دمای محیط (۵ درجه سلسیوس) و دمای گازهای خروجی از هیترو (۴۰۰ درجه سلسیوس) اندازه‌گیری و مشخص شد.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (11)$$

R ثابت گاز می باشد.

از مدل اغتشاشی $RNG K-\epsilon$ به دلیل این که در این مطالعه دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل های اغتشاشی دارد، استفاده شده است [۸]. به منظور حل معادلات بالا، ۶ شرایط مرزی شامل: دیواره کوئل، دیواره استک (دودکش)، ورودی کوئل، ورودی استک (دودکش) خروجی کوئل و خروجی استک، است. با توجه به اطلاعات مربوط به کوئل و دودکش از جمله دبی هوای ورودی، قطر لوله کوئل و دودکش که توسط آزمایش ها و محاسبات به دست آمد، نوع شرایط مرزی ورودی کوئل و ورودی استک به صورت دبی جرمی ورودی در نظر گرفته می شود. دمای سیال ورودی به کوئل ۲۸۳ کلوین لحاظ می گردد. دمای دیواره دودکش دمایی مشخص و قابل اندازه گیری است، لذا نوع شرایط حرارتی دودکش را دمایی با دمایی مشخص در نظر گرفته می شود. دمای دیواره دودکش با توجه به شرایط آب و هوایی ایستگاه، ثابت و برابر ۳۵۳ کلوین در نظر گرفته شد. بر روی دیواره کوئل نیز شرط مرزی دیوار (نفوذناپذیر و عدم لغزش) اعمال شده و از نظر حرارتی نیز شرط مرزی کوئل بین بیرون و درون کوئل در نظر گرفته شده است. با توجه به طولانی بودن طول دودکش و کوئل، شرط مرزی توسعه یافتگی جریان و دما (با مشخص بودن فشار خروجی دودکش که برابر فشار اتمسفر است) در خروجی دودکش و کوئل اعمال شده است.

۵- نتایج

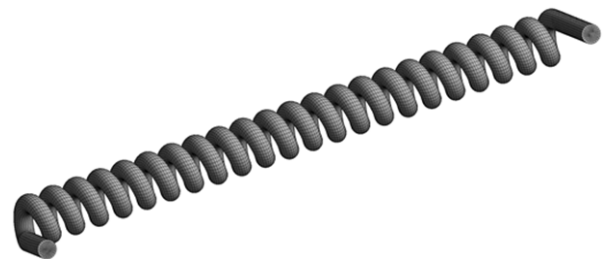
به منظور صحت سنجی نتایج، دمای خروجی دودکش اندازه گیری شده (۳۸۱ کلوین) و با دمای به دست آمده از نتایج عددی در خروجی دودکش (۳۹۲ کلوین) مقایسه گردیده است. مشاهده می شود که نتایج سازگاری خوبی با نتایج تجربی دارد (خطای کمتر از ۳ درصد). در شکل ۳ کانتور دمای هوای خروجی کوئل نشان داده شده است. هوای خروجی کوئل در واقع همان هوای ورودی به مشعل (هوای پیش گرم شده) است. همان طور که مشاهده می شود دما تا ۳۵۰ درجه کلوین افزایش می یابد. در مقایسه با حالتی که ریکوپراتور استفاده نمی شود (دمای هوای ورودی به مشعل در حالتی که از ریکوپراتور استفاده نمی شود ۲۸۳ کلوین است)، دمای ورودی به مشعل حدود ۶۰ درجه افزایش یافته است. یعنی از گازهای خروجی دودکش در ریکوپراتور استفاده شده و دمای هوا به اندازه ۶۰ درجه افزایش یافته است.

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{H_c}{2D_{stack}} \right) \quad (6)$$

مطابق رابطه ۶، α برابر ۲۲/۶ درجه است.

سرعت مجاز برای هوا در مبدل کوئلی نیز ۳۰ متر بر ثانیه می باشد [۷]. کوئل به کمک نرم افزار Ansys 15.0 طراحی می شود. با توجه به پیچیده بودن هندسه کوئل، مش بندی به صورت با سازمان بوده و از تعداد ۱۵۵۱۵۰ گره و ۱۴۱۱۰۸ المان تشکیل شده است تا نتایج حل عددی مستقل از تعداد شبکه باشد. شکل ۲ نشان دهنده هندسه کوئل طراحی شده به همراه شبکه محاسباتی است. نوع المان در مش بندی کوئل به صورت هگز است. همانند کوئل، مدل شبکه دودکش به صورت ترکیبی از با سازمان و پیچشی و سه گوش می باشد و از تعداد ۴۱۶۶۱۵ گره و از ۱۱۰۶۷۱۴ المان تشکیل شده است.

مطابق تحلیل عددی در نرم افزار، جهت تحلیل دقیق تر و همگرایی نتایج، میزان بیشترین انحراف خصوصیت مش نباید از ۰/۹۸ بیشتر باشد. این امر پس از بررسی هندسه طراحی و تغییرات اندازه المان ها در مش بندی محقق گردید.



شکل ۲- کوئل ریکوپراتور به همراه مش بندی

۴- معادلات حاکم بر جریان داخل کوئل و دودکش

به دلیل پیچیدگی جریان، فرض می شود جریان اولیه و مخلوط گازهای جریان ثانویه گاز کامل هستند. همچنین، جریان دائم در نظر گرفته می شود. بر اساس این فرضیات، معادلات حاکم شامل معادلات بقا جرم، مومنوم، انرژی و معادله حالت به صورت زیر بیان می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

در معادله بالا، u سرعت و ρ چگالی مخلوط گاز می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (9)$$

p و τ_{ij} ترتیب فشار و تانسور تنش مخلوط گاز و μ_{eff} ویسکوزیته دینامیکی موثر می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + P)) = \vec{\nabla} \cdot \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij}) \right) \quad (10)$$

E انرژی کل، K_{eff} ضریب هدایت گرمایی موثر و T دما است. به منظور ارتباط دما، فشار و چگالی از معادله حالت گاز کامل استفاده می شود.

می‌باشد. با افزایش گام کوپل، تعداد دور کوپل کمتر می‌شود و متقابلاً سیال عبوری از روی کوپل با سطح کمتری در ارتباط می‌باشد. با افزایش تعداد دور کوپل (یا کاهش گام) دمای خروجی حدود ۱۹ کلوین افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش راندمان هیتر می‌باشد. هر چند با افزایش تعداد دور کوپل (یا کاهش گام) وزن کوپل در حدود ۲۳۸ کیلوگرم افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وزن بسیار بیشتر ریکوپراتور و نیاز به وجود سازه بیشتری جهت نگه داری کوپل درون دودکش است.

۵-۳- تاثیر فاصله کوپل از مرکز دودکش

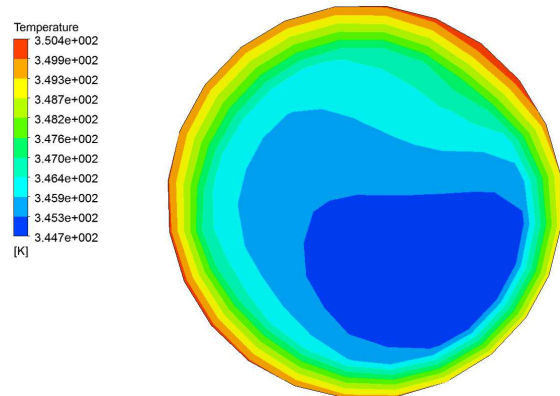
از پارامترهای مهم طراحی ریکوپراتور بررسی تاثیر فاصله کوپل از بدنه دودکش می‌باشد. بررسی صورت گرفته بر روی کوپل ۶ اینچ و با دبی هوای عبوری در حالت پایدار هیتر می‌باشد. در این بررسی، قطر دودکش و قطر کوپل ثابت است؛ ولی H_c بر اساس میزان درصد انسداد بدترین و بهترین حالت (مقدار مجاز انسداد دودکش با توجه به مراجع ۳۰٪ در نظر گرفته می‌شود [۷، ۹]) در نظر گرفته شده است. جدول ۳ نتایج تاثیر فاصله بر روی دما و فشار خروجی کوپل و دودکش را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، میانگین دمای خروجی کوپل با افزایش فاصله از مرکز دودکش افزایش می‌یابد. این افزایش دما با افزایش وزن کوپل و همچنین با افزایش فشار دودکش همراه خواهد بود.

۵-۴- تاثیر دبی هوای ورودی به هیتر

در ایستگاه تقلیل فشار گاز، چون ممکن است به طور همزمان از دو یا چند هیتر استفاده شود و یا در ساعت‌های مختلف از ظرفیت هیتر به طور کامل استفاده شود/یا نشود؛ دبی هوای ورودی به هیتر متغیر است. دبی‌های در نظر گرفته شده برای هیتر علاوه بر دبی قید شده در بخش شرایط مرزی، ۸۰۰ متر مکعب برای هوا و ۸۰ متر مکعب برای سوخت، ۱۱۰۰ متر مکعب برای هوا و ۱۱۰ متر مکعب برای سوخت و همچنین ۱۴۰۰ متر مکعب بر ساعت برای هوا و ۱۴۰ متر مکعب برای سوخت در نظر گرفته شد. مطابق جدول ۴، با افزایش دبی ورودی به هیتر، دمای خروجی کوپل کاهش می‌یابد و این تغییر دما در حدود ۱۱ درجه است. با توجه به افزایش سرعت هوا، سیال فرصت افزایش دمای کمتری را دارد و لذا دمای خروجی کوپل نیز اندکی کاهش می‌یابد.

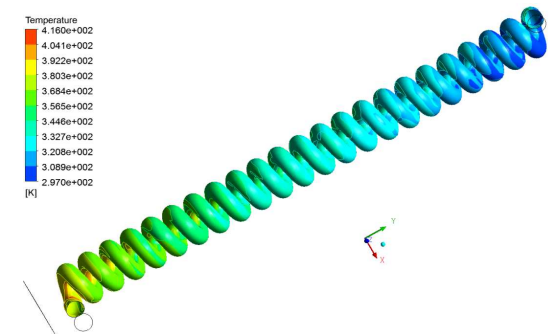
۵-۵- تاثیر دمای ورودی به هیتر

با توجه به شرایط آب و هوایی در ایستگاه تقلیل فشار گاز، در فصول زمستان دمای محیط تا منفی ۲۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. به همین علت پارامتر تغییر دمای ورودی به کوپل نیز یکی از مهمترین پارامترهای تحلیل می‌باشد. با توجه به اهمیت این پارامتر بر بازده هیتر، دماهای محیط مختلف بر روی خروجی کوپل بررسی شده است. با توجه به شرایط آب و هوایی ایستگاه هسا، دماهای مورد بررسی از ۱۵ درجه سلسیوس تا منفی ۲۰ درجه سلسیوس متغیر می‌باشند. در جدول ۵ تغییرات دمایی خروجی کوپل و دودکش بر حسب دماهای ورودی مختلف به کوپل نشان داده شده است. همان-



شکل ۳- کانتور دمایی خروجی کوپل

از دیگر پارامترهای مهم، بررسی دمای داخل کوپل می‌باشد که بر انتخاب جنس کوپل تاثیر گذار است. همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود دما در انتهای خروجی از کوپل افزایش پیدا می‌کند. دما در انتهای کوپل به ۴۱۶ درجه کلوین می‌رسد.



شکل ۴- کانتور دمایی هوای داخل کوپل

۵-۱- تاثیر قطر لوله کوپل

پس از بررسی دمای خروجی کوپل ۶ اینچ، دیگر قطرهای لوله کوپل (۷ و ۸ اینچ) نیز بررسی گردید. بدین ترتیب با همان دبی هوای ورودی و سوخت محاسبه شده برای هیتر، نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد، با این تفاوت که گام برای کوپل ۷ اینچ برابر ۰/۲۹ و برای کوپل ۸ اینچ ۰/۴۱۶ می‌باشد. مطابق جدول ۱، دمای خروجی کوپل ۸ اینچ کمتر از کوپل ۷ اینچ می‌باشد و دمای خروجی کوپل ۶ اینچ از دیگر کوپل‌ها بیشتر می‌باشد. با توجه به اهمیت میزان دمای خروجی در افزایش راندمان مشعل هیتر، کوپل ۶ اینچ جهت استفاده به عنوان ریکوپراتور مناسب می‌باشد. دیگر مزیت استفاده از کوپل ۶ اینچ وزن کمتر آن است؛ به طوری که ریکوپراتور با کوپل ۶ اینچی حدود ۱۰۰ کیلوگرم کمتر از ریکوپراتور با کوپل ۸ اینچ می‌باشد. باید توجه داشت که هر چند که افت فشار کوپل ۶ اینچی نسبت به دو کوپل دیگر بیشتر است؛ ولی این افت فشار برای هر سه کوپل بسیار کم می‌باشد.

۵-۲- تاثیر گام کوپل

با توجه به مشخص شدن بهترین قطر لوله کوپل، تاثیر گام بر روی کوپل ۶ اینچ بررسی شد. در جدول ۲، این تاثیر با تغییر کوپل در چهار گام مختلف ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۳۵ و ۰/۴ ارائه شده است. دبی‌های وارد شده برای هر دو کوپل یکسان و مقدار آن برابر حالت پایدار هیتر

طور که ملاحظه می‌شود، دمای خروجی کویل با کاهش دمای محیط کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری که با کاهش دمای محیط از ۲۸۸ کلوین به ۲۵۳ کلوین، دمای خروجی دودکش حدود ۱۰ درجه کلوین کاهش می‌یابد.

۵-۶- تاثیر دمای بدنه دودکش

دودکش هیترهای مورد استفاده در ایستگاه‌های تقلیل فشار معمولاً بدون سطح عایق می‌باشند و مقداری از گرمای دودکش را به محیط اطراف انتقال می‌دهد. این گرما با توجه به اختلاف دمای دودکش و محیط متفاوت می‌باشد. هر چقدر این اختلاف بیشتر باشد، میزان انتقال حرارت بیشتر می‌شود و در نتیجه گرمای بیشتری از گازها به بیرون رفته و در نتیجه حرارت کمتری به کویل درون دودکش انتقال

پیدا می‌کند. بررسی پارامتر دمای دودکش در چند دمای مختلف و تحلیل این دما بر روی دمای خروجی کویل و دودکش می‌تواند شاخص مناسبی برای طراحی دودکش در حالت عایق را به همراه داشته باشد. پس از بررسی دمای بدنه دودکش در حالت‌های مختلف، به تحلیل ریکوپراتور در هنگامی که دودکش عایق باشد نیز پرداخته و به مقایسه اختلاف این دو با یکدیگر پرداخته خواهد شد. جدول ۶ نتایج تاثیر دمای بدنه دودکش در ۴ دمای مختلف ۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ درجه سلسیوس و همچنین در حالتی که بدنه در حالت عایق باشد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود هنگامی که دیواره دودکش در حالت عایق قرار گیرد، گرمای بیشتری به گاز منتقل می‌شود. و دمای خروجی کویل افزایش می‌یابد.

جدول ۱- تغییرات دما، فشار و سرعت برای کویل‌های مختلف با دبی یکسان

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	جرم کویل (Kg)	دمای خروجی کویل (K)	قطر لوله کویل (in)
۴/۴۱	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۵۱۱/۹۲	۳۴۵/۹	۶
۶	۱۴۶/۹۲	۳۷۵/۶۹	۴۵۵/۱۳	۳۴۰/۳	۷
۱۴/۷۷	۷۴/۱۵	۳۶۹/۱	۴۰۶/۱۲	۳۳۲/۵	۸

جدول ۲- نتایج تاثیر گام بر روی کویل با قطر لوله ۶ اینچ

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	جرم کویل (Kg)	دمای خروجی کویل (K)	گام کویل
۴/۴۱	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۵۱۱/۹۲	۳۴۵/۹	۰/۲
۳/۸۵	۳۶۶/۱	۳۸۵/۶۱	۴۱۵/۳۴	۳۳۹/۸۳	۰/۲۵
۳/۴۲	۳۱۹/۱	۳۹۰/۸۹	۳۵۱/۸۷	۳۳۵/۱۱	۰/۳
۳/۳۵	۳۱۱/۹۷	۳۸۹/۱۸	۳۰۶/۴۴	۳۳۱/۱۶	۰/۳۵
۲/۸	۲۴۵/۵۸	۳۸۹	۲۷۴/۱۸	۳۲۷/۱۴	۰/۴

جدول ۳- تاثیر فاصله کویل از مرکز دودکش با یک کویل با قطر لوله ۶ اینچ

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	جرم کویل (Kg)	دمای خروجی کویل (K)	فاصله کویل
۳/۲	۴۸۰/۵۳	۳۸۶/۱۲	۴۴۹/۵۵	۳۴۰/۷۵	۰/۱۲
۳/۵	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۵۱۱/۹۲	۳۴۵/۹	۰/۱۳
۶/۷۴	۳۸۲/۵	۳۷۴/۳	۵۵۶/۶۱	۳۵۳/۱۵	۰/۱۵

جدول ۴- نتایج تحلیل دبی‌های مختلف برای کویل با قطر لوله ۶ اینچ

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	دمای خروجی کویل (K)	دبی کویل (m ³ /h)
۴/۴۱	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۳۴۵/۹	۴۸۷
۱۲/۰۸	۱۰۰۸/۰۹	۳۹۲/۳۲	۳۴۰/۷	۸۰۰
۲۳/۱	۱۸۸۴/۱۹	۳۹۵/۹۴	۳۳۷/۴۱	۱۱۰۰
۳۶/۰۲	۳۰۱۲/۸	۳۹۸/۴	۳۳۵/۳۱	۱۴۰۰

جدول ۵ - نتایج دماهای ورودی مختلف به کویل با قطر لوله ۶ اینچ

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	دمای خروجی کویل (K)	دما ورودی کویل (K)
۴/۵	۳۸۲/۷	۳۸۳/۰۵	۳۴۸/۹۷	۲۸۸
۴/۴۱	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۳۴۵/۹	۲۸۳
۴/۴۹	۳۸۲/۷	۳۸۰/۷۲	۳۴۳/۲۳	۲۷۸
۴/۵	۳۸۲/۷	۳۷۹/۴۷	۳۴۰/۲۵	۲۷۳
۴/۵	۳۸۲/۷	۳۷۷/۵۶	۳۳۷/۳۷	۲۶۸
۴/۵	۳۸۲/۷	۳۷۶/۴	۳۳۴/۶۴	۲۶۳
۴/۵	۳۸۲/۷	۳۷۳/۶۹	۳۲۸/۸	۲۵۳

جدول ۶ - نتایج تحلیل برای دماهای مختلف بدنه دودکش و در حالت بدنه عایق کویل با قطر لوله ۶ اینچ

اختلاف فشار دودکش (Pa)	اختلاف فشار کویل (Pa)	دمای خروجی دودکش (K)	دمای خروجی کویل (K)	دما بدنه دودکش (K)
۴/۴۱	۳۸۲/۶	۳۸۱/۹۶	۳۴۵/۹	۲۵۳
۴/۴۷	۳۸۲/۷	۳۷۸/۷۸	۳۴۴/۷۳	۲۴۳
۴/۳۸	۳۸۲/۷	۳۷۵/۰۲	۳۴۳/۴۴	۲۳۳
۴/۶۱	۳۸۲/۷	۳۷۱/۹۷	۳۴۲/۱۶	۲۲۳
۴/۴۷	۳۸۲/۷	۴۱۱/۷۴	۳۴۸/۴۵	عایق

۵-۷- مصرف سوخت

با پیش گرم کردن هوا می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد؛ زیرا درصد کمتری از انرژی حاصل از احتراق صرف افزایش دمای هوای ورودی شده تا به دمای احتراق برسد. به منظور محاسبه میزان صرفه‌جویی در مقدار مصرف سوخت در حالتی که از پیش گرمایش هوا استفاده شده است، دمای گازهای خروجی احتراق در دو حالت (۱) هوا بدون پیش گرمایش و (۲) هوا با پیش گرمایش مساوی قرار داده شده و میزان مصرف سوخت محاسبه شده است.

در حالتی که دمای هوای ورودی به محفظه احتراق ۲۸۳ کلوین است و با فرض دبی سوخت و هوا به ترتیب برابر ۵۰ و ۴۸۷/۴۵ متر مکعب بر ساعت، دمای گازهای خروجی محفظه احتراق ۱۶۵۳ درجه می‌باشد. در حالتی که از کویل ۶ اینچ استفاده شود، دمای خروجی ریکوپراتور ۳۴۷ درجه کلوین، به دست آمد. اگر این دما، دمای هوای ورودی به محفظه احتراق در نظر گرفته شود و در نظر بگیریم که دمای خروجی از محفظه احتراق همان ۱۶۵۳ درجه کلوین باشد، دبی سوخت ۴۵/۴۶ متر مکعب در ساعت محاسبه می‌شود. در مقایسه با دبی سوخت ۵۰ متر مکعب بر ثانیه (در حالتی که پیش گرمایش هوا وجود ندارد)، ۹٪ در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌شود. سناریوی دیگر این است که دمای محیط پایین‌تر باشد (به عنوان نمونه ۱۰- درجه سلسیوس)؛ یعنی دمای هوای ورودی در حالتی که ریکوپراتور وجود نداشته باشد، برابر ۱۰- درجه سلسیوس باشد. در این حالت دبی سوخت ۴۵/۲ متر مکعب بر ساعت به دست می‌آید. به عبارتی ۹/۶٪ در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌شود. اگر دمای دیواره دودکش عایق فرض شود نیز میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت ۹/۵٪ به دست می‌آید. بهترین سناریوها در حالتی است که فاصل کویل از مرکز

دودکش زیاد باشد (۰/۱۵ سانتیمتر). در دو حالتی که دمای بدنه دودکش ثابت باشد و حالتی که بدنه دودکش عایق باشد، میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت به ترتیب ۱۰٪ و ۵/۱۰٪ می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به طراحی و شبیه‌سازی عددی یک ریکوپراتور کویلی، به منظور بازیافت گرمای دودکش یک هیتر در ایستگاه تقلیل فشار گاز (ایستگاه هسا اصفهان) پرداخته شد. از مزایای استفاده از ریکوپراتورها کم بودن وزن سیال عبوری (هوا) در ریکوپراتور است که در نتیجه افت فشار آن در عبور از لوله‌ها و مبدل گرمایی کمتر شده و باعث می‌شود نیاز به انرژی کمتری برای جابه‌جایی آن باشد. همچنین با توجه به وزن سیال ریکوپراتورها نیاز به فلز کمتری نسبت به اکونومایزرها دارند که در نتیجه برای نگهداری آنها بر روی دودکش به استقامت و زیرسازی کمتری نیاز است. با توجه به سیال عبوری، مشکل رسوب در مجراها وجود ندارد. از معایب عمده ریکوپراتورها می‌توان به پایین بودن ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی گازها اشاره کرد که در نتیجه نیاز به مساحت بیشتری از مبدل می‌باشد و بنابراین نیاز به فلز بیشتری می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهند:

(۱) استفاده از ریکوپراتور باعث می‌شود دمای هوای پیش‌گرم شده ۶۰ درجه افزایش یابد. این افزایش دما باعث صرفه‌جویی مصرف سوخت به اندازه ۹٪ نسبت به هیترهای رایج (هیتر بدون پیش گرمکن هوا) می‌شود.

(۲) با ثابت ماندن دبی، تغییرات محسوسی برای دماهای خروجی در قطر-های مختلف کویل ملاحظه می‌شود. اختلاف دمای میانگین خروجی

کویل ۶ اینچ و کویل ۸ اینچ ۱۳/۴ درجه می‌باشد. لذا با توجه به ظرفیت هیتر در صورت افزایش دبی هوای ورودی به هیتر، کویل با قطر ۶ اینچ بهترین گزینه جهت عبور هوای ورودی به مشعل می‌باشد. (۳) با افزایش تعداد دور کویل (یا کاهش گام) دمای خروجی در حدود ۱۹ کلوین افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده افزایش راندمان هیتر می‌باشد. هر چند با افزایش تعداد دور کویل (یا کاهش گام) وزن کویل در حدود ۲۳۸ کیلوگرم افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وزن بسیار بیشتر ریکوپراتور و نیاز به وجود سازه بیشتری جهت نگهداری کویل درون دودکش است.

(۴) با افزایش دبی ورودی به هیتر و همچنین کاهش دمای محیط، دمای خروجی کویل کاهش می‌یابد.

(۵) میانگین دمای خروجی کویل با افزایش فاصله از مرکز دودکش افزایش می‌یابد. این افزایش دما با افزایش وزن کویل و همچنین با افزایش فشار دودکش همراه خواهد بود. به منظور افزایش فاصله کویل از مرکز دودکش میزان انسداد را باید در نظر گرفت.

(۶) بهترین سناریو برای ایستگاه تقلیل فشار گاز هسا اصفهان با قطر دودکش ۵۵ سانتیمتر، طول ۵/۵ متر و دبی سوخت ۴۵/۲ متر مکعب بر ساعت در حالتی است که قطر کویل ۶ اینچ و فاصل کویل از مرکز دودکش زیاد باشد. در دو حاتی که دمای بدنه دودکش ثابت باشد و حالتی که بدنه دودکش عایق باشد، میزان صرفه جویی در مصرف سوخت به ترتیب ۱۰٪ و ۱۰/۵٪ می‌باشد.

(۷) افت فشار داخل کویل هوا و دار داخل دودکش بسیار ناچیز است.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی شرکت گاز استان اصفهان، امور پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۸- مراجع

- [1] Fanoy Gas L.L.C, Gas Field Servicing Company, 2014; <http://www.fanoygas.com/gallery.html>.
- [2] EN-FAB, Inc. Engineering, fabrication and packaging company, 2015; <http://www.en-fabinc.com>.
- [3] Karamarkovi V., Marasevi M., Karamarkovi R. and Karamarkovi M., Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns, Applied Thermal Engineering, Vol. 54, pp. 470-480, 2013.
- [4] Szego G.G., Dally B.B. and Nathan G.J., Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system, Combustion and Flame, Vol. 156, pp. 429-438, 2009.
- [5] Clay A. and Tansley G.D., Exploration of a simple, low cost, micro gas turbine recuperator solution for a domestic combined heat and power unit, Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 2676-2684, 2011.
- [6] <http://kankash2008.blogfa.com/post-8.aspx>
- [۷] حیدری، م، شرکت بهینه سازان صنعت تاسیسات، "مطالعه و بررسی روش‌های مختلف بازیافت انرژی از گازهای خروجی هیترها در ایستگاه‌های CGS استان اردبیل و مقایسه فنی و اقتصادی آنها و ارائه طراحی مناسب جهت پیاده سازی روش پیشنهادی"، شرکت گاز استان اردبیل، امور پژوهشی، اسفند ۱۳۹۰.
- [8] Pulkrabek W. W., Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall; 2ed, 2003.
- [9] Fabian C.L. Designing a helical -coil heat exchanger, Chemical Engineering, Vol. 13, pp. 85-88, 1982.