



### بازیافت توان از دمای خروجی دودکش گرمکن های ایستگاههای تقلیل فشار با بکارگیری سل های ترموالکتریک

علی کیانی فر، امین کاظمی، حمیده شیخانی، سیدایمان پیش بین

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- پژوهشگر امور پژوهش و فناوری شرکت گاز استان خراسان رضوی.

۴- رئیس بخش پژوهش و فناوری شرکت گاز استان خراسان رضوی.

amin.com2007@gmail.com

#### چکیده

گاز طبیعی معمولاً وقتی به مصرف کننده می رسد فشار آن باید مقدار زیادی در درون ایستگاههای تقلیل فشار کاهش یابد. در این ایستگاهها طبق معادله حالت گازها همزمان با افت فشار در حجم ثابت دمای گاز نیز دچار افت می شود، بدلیل اینکه دمای گاز در هنگام ورود به ایستگاه حدود ۱۵ درجه سانتی گراد می باشد این افت دما می تواند موجب میعان و یا یخ زدگی ترکیبات گاز و در نتیجه مسدود شدن مجاری عبوری در ایستگاه شود، لذا جهت جلوگیری از این اتفاق از گرمکن ها جهت پیش گرم کردن گاز در ورودی استفاده می شود. انرژی مورد نیاز گرمکن را با قسمتی از گاز خروجی ایستگاه تامین می کنند، قسمت اعظم گرمای حاصله از سوختن این گاز توسط دودکش به محیط منتقل می شود. در این متن سعی شده با استفاده از نتایج تجربی حاصل از تحقیقات میدانی، میزان انرژی هدر رفته از دودکش گرمکن ها محاسبه شده و چگونگی بازیابی انرژی و میزان انرژی حاصله از بازیافت این حرارت خروجی توسط سلول های ترمو الکتریک توضیح داده شود. پس از بررسی های انجام گرفته بر روی هیتر نمونه مشخص گردید که می توان با استفاده از دمای بالای بدنه دودکش گرمکن ها به عنوان دمای سمت گرم سلول های ترموالکتریک، و دمای محیط عنوان دمای سمت سرد سلول می توان از این اختلاف دمای موجود روزانه به میزان  $83/6 \text{ kwh}$  به ازای هر متر از طول دودکش انرژی الکتریکی تولید نمود.

**کلمات کلیدی:** ایستگاههای تقلیل فشار، گرمکن ها، اثر ترموالکتریک، سلولهای ترموالکتریک

#### ۱. مقدمه

با توجه به فشار بالای گاز طبیعی در داخل خطوط لوله انتقال گاز بین شهری که بالاتر از 700 psi می باشد و لزوم کاهش شدید فشار گاز در ایستگاههای تقلیل فشار گاز طبیعی قبل از اینکه مورد استفاده قرار بگیرد می توان در بحث ممیزی انرژی و همچنین بازیابی توان و انرژی در قسمت های مختلف این ایستگاه دست به پژوهش های مختلفی زد. کارهای زیادی تا کنون در این زمینه صورت گرفته و با توجه به اینکه کشور ما جزو تولید کننده های بزرگ گاز در دنیا می باشد میتوان ادعا کرد تعداد زیادی از مقالات منتشر شده در این زمینه توسط پژوهشگران کشورمان تدوین شده است مثلاً از جمله کار های انجام شده می توان به مقاله منتشر شده در سال ۲۰۰۷ توسط محمود فرزانه ، حسن افتخاری و منصور منظری توکی که در آن قابلیت تولید الکتریسیته و تبرید در ایستگاههای تقلیل فشار محاسبه شده است [2] از دیگر کارها میتوان به مقاله بیژن



هنرور، سعید سمیع پور، محمد یکتا که در آن استفاده از گرمکن های خورشیدی در ایستگاه ها بجای گرمکن های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. [4]

در سال ۲۰۰۷ واگنر انجلو<sup>۱</sup>، مارسیا مانلی<sup>۲</sup> و اف. اچ. میلانز<sup>۳</sup> دست به طراحی یک گرمکن بوسیله چرخه ترمو سیفون دو فازی زدند که در نتیجه آن توانستند به گرمکن های پر بازده تر و همچنین کوچکتر دست پیدا کنند. [10]

در سال ۲۰۰۹ ابراهیم خلیلی و اسماعیل هیبتیان میزان تلفات حرارتی را در گرمکن های غیر مستقیم مورد بررسی قرار دادند. [7]

در سال ۲۰۱۰ سیف الله سعدالدین و سعید رستگار تحلیل اگزرژی در ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی دروازه شهری<sup>۴</sup> را انجام داده و میزان انرژی هدر رفته و مقدار اتلاف قابل پیشگیری را به صورت ماهانه مورد بررسی قرار دادند. [1]

در زمینه استفاده از سلولهای ترموالکتریک میتوان به مقاله منتشر شده در سال ۲۰۱۱ توسط علی کیانی فر، سید ایمان پیش بین، مهدی افضل و محمد جعفری که در آن تولید توان با استفاده از سلول های ترموالکتریک و گرمای خورشید و پیشرفت ها و برخی کاربردهای مولد ترموالکتریک خورشیدی بیان گردید. همچنین معایب و موانع موجود در به کارگیری این مولدها و روش های اصلاح کارایی آنها بررسی شد [3]. همچنین می توان به مقاله منتشر شده در سال ۲۰۱۱ توسط سی رامش کومار<sup>۵</sup> و همکارانش اشاره کرد که به بررسی تجربی بازیافت حرارت از موتورهای احتراق داخلی با استفاده از سلول های ترموالکتریک پرداخته اند. [8] ویا مقاله منتشر شده توسط الکساندر هگمانز<sup>۶</sup> و همکارانش اشاره کرد که در سال ۲۰۱۰ به بررسی استفاده از ژنراتورهای ترمو الکتریک برای بازیابی حرارت از موتورهای دیزل پرداخته اند. [5]

در مورد استفاده از سلول های ترمو الکتریک در ایستگاههای تقلیل فشار گاز طبیعی به جرعت میتوان گفت تا کنون بررسی در این زمینه انجام نگرفته است.

## ۲. نگاهی دقیق تر به گرمکن ها

برای اینکه تغییرات دمای گاز را هنگامی که فشار آن تغییر می نماید بهتر مورد بررسی قرار گیرد نیازمند شناخت قوانین گازها می باشد. نتایج این قوانین تجربی به صورت رابطه ریاضی ذیل بیان می شود:

$$\frac{P.V}{T} = N \times R \quad (1)$$

که در آن  $V$  حجم گاز  $P$  فشار و  $T$  دمای آن می باشد و  $N$  تعداد مول و  $R$  ثابت گازها نامیده می شود.

اکنون اگر حجم ثابتی از گاز را  $V$  بنامیم و فشار و دمای آن را از  $P_1$  و  $T_1$  به  $P_2$  و  $T_2$  تغییر دهیم طبق رابطه بالا

خواهیم داشت:

$$\frac{P_1.V_1}{T_1} = NR \quad (2)$$

$$\frac{P_2.V_2}{T_2} = NR \quad (3)$$

و چون  $N$  و  $V$  در دو رابطه ثابت است:

1 Wagner Angelo

2 Marcia Mantelli

3 F.H.Milanez

4 CGS

5 C. Ramesh KUMAR

6 Alexander Heghmanns



$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \Rightarrow P_1 T_2 = P_2 T_1 \quad (4)$$

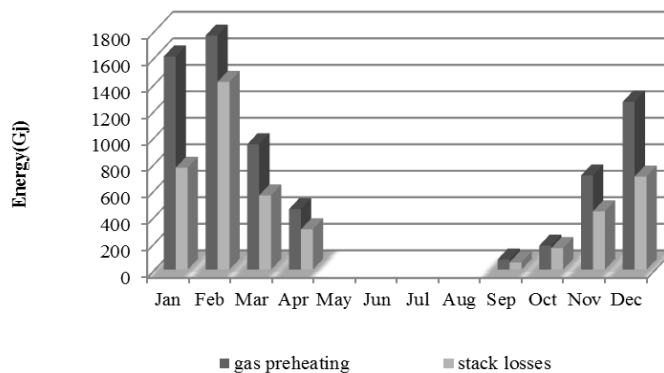
مشاهده می گردد که اگر فشار گازی در حجم ثابت از P1 به P2 کاهش یابد دمای آن نیز از T1 به T2 کاهش خواهد یافت. همانگونه که مشاهده می گردد کاهش فشار گاز در حجم ثابت باعث کاهش دمای آن خواهد شد لذا در ایستگاهها، تقلیل فشار همواره با کاهش دمای گاز همراه است. مشکلات ناشی از این کاهش دما در تأسیسات گاز رسانی عبارتند از: هنگامی که دمای گاز به نقطه شبنم گاز نزدیک شود بخار مایعات همراه با گاز اعم از آب و ئیدروکربوهای سنگین تر به صورت مایع در آمده و در دمای پایین محیط در تأسیسات ایجاد یخزدگی می نمایند.[6]

جهت بررسی روند جریان انرژی در یک گرمکن باید به ثبت اطلاعات آن پرداخته شود، در جدول (۱) اطلاعات ثبت شده از یک گرمکن ایستگاه تقلیل فشار ارائه گردیده است که شامل دما و فشار گاز ورودی به ایستگاه و گرمکن ، دمای گاز خروجی از گرمکن ، دمای محصولات احتراق در ورودی دودکش گرمکن ، انرژی مورد استفاده جهت گرمایش ، انرژی خروجی از دودکش و دمای متوسط محیط می باشد.

جدول (۱) اطلاعات ثبت شده از گرمکن یک ایستگاه تقلیل فشار

Month	Heater inlet temp. (°c)	Heater inlet gas pressure (psi)	Heater outlet temp. (°c)	Stack inlet temp. (°c)	Stack surface temp. (°c)	Preheating $\dot{E}_{NG}$ (Gj)	Stack losses $\dot{E}_{Stack}$ (Gj)	Average ambient temp. (°c)				
Jan	8	702	35.7	367	118	1609	768.5	10.3				
Feb	6.8	694	38.7	476	153	1766	1416.3	8.5				
Mar	7.1	707	35	438	141	946	560.2	13.7				
Apr	11	718	32	427	137	456	303.7	15.2				
May	15	725	Heater is off						21			
Jun	18.2	728										27.5
Jul	17.3	731										29.6
Aug	19.4	737										25.4
Sep	19.6	780	29.8	453	146	76	54.4	14.2				
Oct	14	763	31.4	471	152	181	161.6	12.8				
Nov	12	740	33.5	398	128	710	439.5	8.9				
Dec	10	720	36.3	381	122	1266	702.3	5.1				

این اطلاعات نشان می دهد که قسمت اعظمی از انرژی مورد استفاده توسط گرمکن از طریق دودکش آن به محیط منتقل شده و تلف می گردد که در نمودار شکل (۱) این امر به وضوح مشهود می باشد. لذا می توان از این انرژی جهت تولید الکتریسیته استفاده نمود که در ادامه به چگونگی این امر پرداخته شده است.



شکل (۱) مقایسه انرژی مورد نیاز برای گرمایش گاز و تلفات از دودکش

### ۳. اثر ترموالکتریک و سلولهای ترموالکتریک

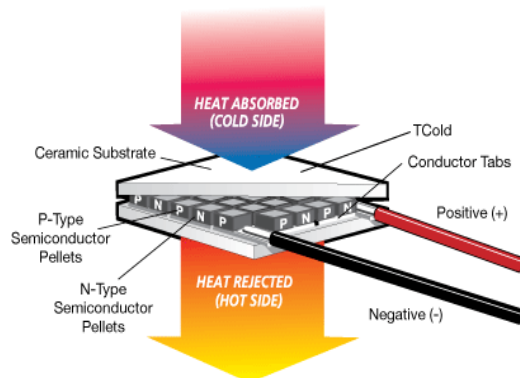
ترموالکتریک از شارش گرما که بر اثر اختلاف دما به وجود می آید برق تولید می کند. وقتی که گرما از قسمت گرم به سرد شارش می کند حامل های بار (الکترون یا حفره) در ماده نیز به قسمت سرد رانده می شوند. ولتاژی که در اثر این فرآیند به وجود می آید با اختلاف دمای بین دو صفحه با ضریبی به نام ضریب سی بک<sup>۷</sup> با هم متناسب هستند.

$$V = \alpha \Delta T \quad (5)$$

با اتصال یک نیمه رسانای نوع p و یک نیمه رسانای نوع n به طور سری، مجموع ولتاژی که تولید می شود را می توان به یک مصرف کننده انتقال داد. یک ماده ترموالکتریک خوب، ضریب سی بکی بین  $100 \mu V / K$  و  $300 \mu V / K$  دارد. بنابراین برای دست یابی به چند ولت در مصرف کننده به تعداد زیادی ترموالکتریک که به طور سری بسته شده اند نیاز داریم. در شکل (۲) عملکرد یک سلول ترمو الکتتریک بصورت شماتیک نمایش داده شده است. یک مولد ترموالکتریک گرما را با ضریب  $\eta$  به توان الکتریکی تبدیل می کند.

$$P = \eta Q \quad (6)$$

این مقدار گرما خیلی وقت ها به اندازه مبدل گرمایی که برای گرم کردن قسمت گرم ترموالکتریک استفاده می شود بستگی دارد. معمولا مبادله کننده گرما خیلی بزرگتر از ترموالکتریک می باشد، وقتی در طراحی ترموالکتریک برای اندازه ی آن با محدودیت مواجه هستیم تلاش برای رسیدن به حداکثر توان الکتریکی بر رسیدن به حداکثر بازدهی اولویت پیدا می کند در این حالت اختلاف دما (و همچنین  $\eta$  که در ادامه توضیح داده می شود) ممکن است نصف اختلاف دمای بین منبع سرد و گرم باشد. [9]



شکل (۲) تصویر از عملکرد یک سلول ترمو الکتتریک [9]

ضریب مبدل های ترموالکتریک  $\eta$  به شدت به اختلاف دما بستگی دارد

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (7)$$

علت این امر آنست که مولد های ترموالکتریک مانند تمام ماشین های گرمایی نمی توانند بازدهی بیشتر از بازدهی ماشین کارنو ( $\Delta T / T$ ) داشته باشند.

بازدهی مولد های ترموالکتریک به صورت زیر تعریف می شود.

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (8)$$

<sup>7</sup> seebeck

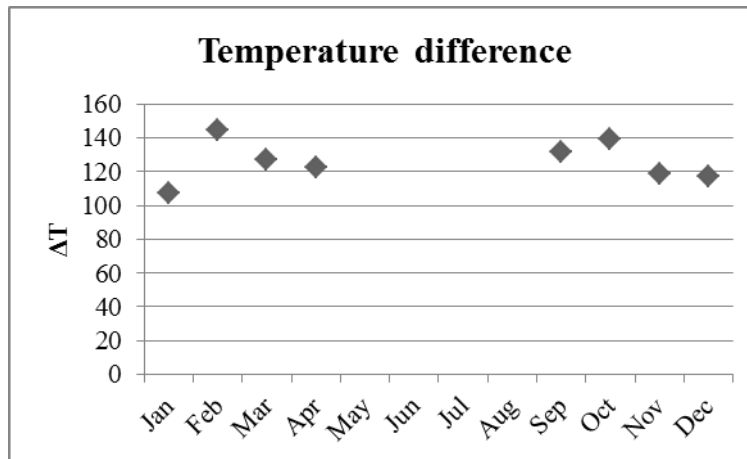


که عبارت اول بازدهی ماشین کارنو است و  $ZT$  شاخص شایستگی وسیله<sup>۸</sup> است. چون محاسبه بازدهی ترموالکتریک ممکن است پیچیده باشد از میانگین شاخص شایستگی  $ZT$  که به عنوان تقریبی از  $ZT$  پذیرفته می شود استفاده می شود.

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{pK} \quad (9)$$

که  $\alpha$  ضریب سی بک،  $p$  رسانش الکتریکی،  $K$  رسانش گرمایی و  $T$  دما می باشد. [9]

با استفاده از سلول ترموالکتریک می توان از دمای سطح بدنه دودکش برای گرم کردن سمت گرم سلول ترموالکتریک و از دمای هوای محیط به عنوان دمای سمت سرد سلول استفاده کرد و انرژی الکتریکی تولید نمود. برای گرمکن مورد مطالعه می توان بطور متوسط اختلاف دمای سطح دودکش و دمای محیط را بعنوان  $\Delta T$  رابطه (۷) در نظر گرفت. لازم بذکر است که دمای بدنه دودکش بدلیل انتقال حرارت با محیط کاهش می یابد پس از نصب سلول روی دودکش این انتقال حرارت از بین رفته و دمای سطح دودکش بیشتر از مقدار اندازه گیری شده می شود در نتیجه دمای سمت گرم سلول بیشتر شده و  $\Delta T$  افزایش می یابد که باعث افزایش بازده سلول ترموالکتریک می گردد. برای ماههای مختلف سال مقدار  $\Delta T$  مطابق نمودار شکل (۳) می باشد.

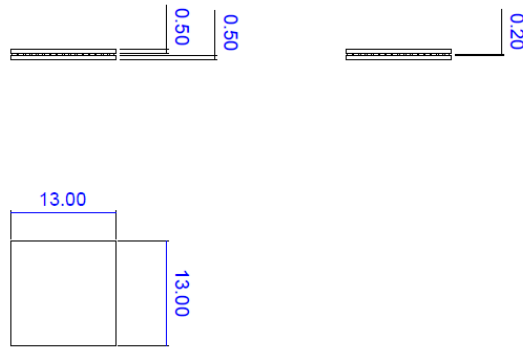


شکل (۳) متوسط اختلاف دمای دو سمت سلول ترموالکتریک در طول سال

اگر متوسط مقدار در طول سال در نظر گرفته شود می توان از روی آن سلول ترموالکتریک مناسب را با استفاده از کاتالوگ شرکت های تولید کننده سلولهای ترموالکتریک انتخاب نمود. بادر نظر گرفتن مقدار متوسط  $125^{\circ}C$  برای  $\Delta T$  اقدام به انتخاب سلول می گردد.

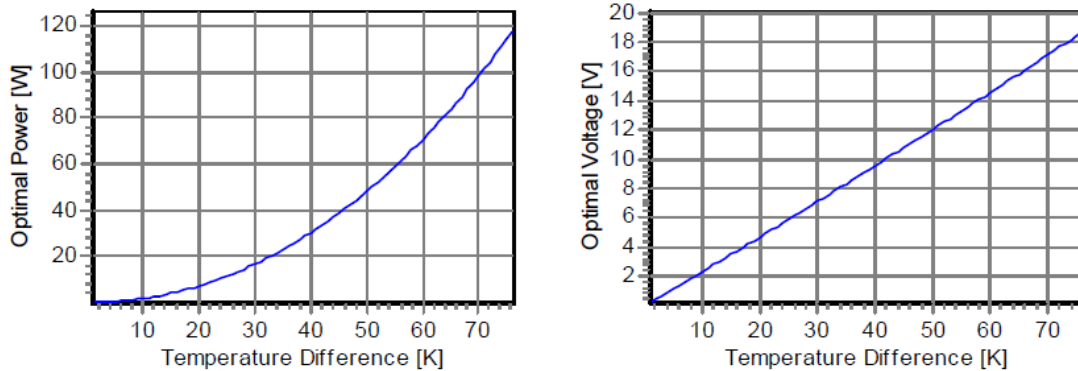
برای یک سلول ترموالکتریک با مشخصات 1MD06-127-02 محصول کمپانی TECcad Lite منحنی های کارکرد ارائه گردیده است که از روی آنها می توان تولیدی از این اختلاف دما در گرمکن موجود را محاسبه نمود. در شکل (۴) شماتیک و مشخصات سلول انتخابی ارائه گردیده است و در شکل (۵) نمودار توان و ولتاژ سلول بر حسب اختلاف دمای دو سمت سرد و گرم سلول ترسیم گردیده است.

<sup>8</sup> figure of merit



Type	Parameters								
	$\Delta T_{max}$ [K]	$Q_{max}$ [W]	$I_{max}$ [A]	$U_{max}$ [V]	$\tau$ [s]	R [Ohm]	Cold Size [mm <sup>2</sup> ]	Hot Size [mm <sup>2</sup> ]	Height [mm]
1MD06-127-02	77	72.23	6.38	18.93	0.39	2.19	13.0x13.0	13.0x13.0	1.27

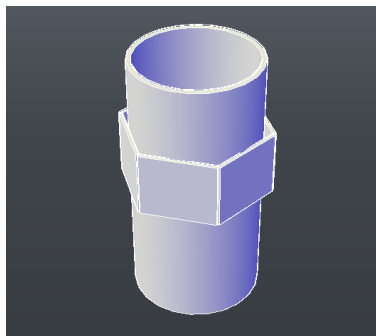
شکل (۴) اطلاعات کاتالوگ مربوط به سلول مورد نظر



شکل (۵) نمودار توان تولیدی و اختلاف پتانسیل بر حسب اختلاف دمای دوطرف سلول

حداکثر اختلاف دمای کاری این سلول برابر  $77 \text{ }^\circ\text{K}$  می باشد با توجه به اینکه مقدار متوسط  $\Delta T$  در گرمکن موجود  $125 \text{ }^\circ\text{K}$  می باشد، لذا این سلول در حالت ایده آل خود کار می کند. همانطور که در نمودار توان تولیدی بر حسب اختلاف دمای دوطرف سردوگرم مربوط به این سلول ملاحظه می گردد می توان با اختلاف دمای موجود مقدار  $116 \text{ W}$  انرژی الکتریکی تولید نمود.

برای یک متر از طول دودکش می توان با توجه به ابعاد سلول که  $5 \text{ mm} \times 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  و قطر دودکش که در گرمکن مورد مطالعه  $60 \text{ cm}$  می باشد به طور متوسط  $36$  عدد سلول در  $6$  ردیف  $6$  عددی مطابق شکل (۶) نصب نمود و به میزان  $4/18 \text{ Kw}$  توان الکتریکی بدست آورد.



شکل (۶) نحوه قرارگیری سلولها روی دودکش گرمکن



اگر ساعات کارکرد گرمکن بطور متوسط در طول روز ۲۰ ساعت فرض شود می توان روزانه  $83/6$  Kwh الکتریسیته تولید نمود به با در نظر گرفتن هرکیلووات ساعت برق به قیمت ۲۰۰۰ ریال، مقدار  $385,440,000$  ریال از دیدگاه ملی در مصرف برق صرفه جویی نمود. این اطلاعات در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول (۲) میزان تولید الکتریسیته و مبلغ صرفه جویی شده به ازای یک متر طول دودکش

متوسط توان تولیدی روزانه (Kwh)	۸۳/۶
متوسط توان تولیدی سالانه (Kwh)	۲۰,۴۸۲
قیمت هرکیلووات ساعت از دیدگاه ملی (ریال)	۲,۰۰۰
میزان صرفه جویی سالانه از دیدگاه ملی (ریال)	۴۰,۹۶۴,۰۰۰

مقادیر بالا برای یک متر از طول دودکش محاسبه گردیده است، برای گرمکن مورد مطالعه با طول دودکش ۸ متر میزان تولید الکتریسیته و هزینه ها در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول (۳) میزان تولید الکتریسیته و مبلغ صرفه جویی شده برای دودکش گرمکن مورد مطالعه

متوسط توان تولیدی روزانه (Kwh)	۶۶۹
متوسط توان تولیدی سالانه (Kwh)	۱۶۳,۸۵۶
قیمت هرکیلووات ساعت از دیدگاه ملی (ریال)	۲,۰۰۰
میزان صرفه جویی سالانه از دیدگاه ملی (ریال)	۳۲۷,۷۱۲,۰۰۰

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

در این متن نحوه عملکرد ایستگاههای تقلیل فشار و خصوصا گرمکن های آن به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفت همچنین به معرفی اثر ترمو الکتریک و نحوه کار سلولهای ترمو الکتریک و معادلات حاکم بر کار آن ارائه گردید. روزانه مقدار عظیمی از انرژی به صورت حرارت از طریق دودکش گرمکن های ایستگاه تقلیل فشار هدر می رود و با توجه به تعداد زیاد گرمکن های موجود در کشور می توان گفت از طریق بازیابی این حرارت اتلافی می توان به منبع قابل توجهی از انرژی دست یافت.

دمای زیاد گازهای خروجی از دودکش گرمکن های ایستگاه های تقلیل فشار با استفاده از اطلاعات آماری و اختلاف زیاد آن با دمای محیط با توجه به رابطه (۸) می توان از این اختلاف دمای قابل ملاحظه بسته به ماده ترمو الکتریک انتخابی مناسب که در پارامتر (ZT) اثر دارد به بازده های بالایی دست یافت. طبق نتایج بدست آمده می توان روزانه به میزان  $83/6$  kwh به ازای هر متر از طول دودکش انرژی الکتریکی تولید نمود. از این انرژی الکتریکی می توان بعنوان مثال در روشنایی مورد نیاز ایستگاههایی که در نقاط دور افتاده شهری قرار دارند و دسترسی به خطوط انتقال قدرت الکتریکی ندارند استفاده کرد، با توجه به اینکه هزینه نصب و انتقال انرژی الکتریکی به این ایستگاه ها قابل توجه می باشد می توان گفت زمان بازگشت سرمایه در اجرای این طرح بسیار کوتاه می باشد.



### ۵. قدردانی

این تحقیق با استفاده حمایت‌های علمی و مالی شرکت گاز استان خراسان رضوی انجام شده که در اینجا از آنها تشکر و قدردانی می‌شود.

### ۶. منابع

۱. سعدالدین، سیف الله و رستگار، سعید؛ تحلیل انرژی در ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی دروازه شهری، مجله مدل سازی در مهندسی، شماره ۲۲، ۱۳۸۹
۲. فرزانه، محمود، افتخاری، حسن و توکلی، منصور؛ استفاده از ایستگاه های تقلیل فشار گاز طبیعی برای تولید برق و تبرید، ششمین همایش ملی انرژی، 98-F-EEF-579، ۱۳۸۶
۳. کیانی فر، علی، پیش بین، سید ایمان، افضل، مهدی و جعفری، محمد؛ مروری بر تولید توان با استفاده از سلول های ترموالکتریک و گرمای خورشید، اولین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین نگهداشت انرژی، ۱۳۹۰
۴. هنرور، بیژن، سمیع پور، سعید و یکتا، محمد؛ کاربرد گرمکن خورشیدی در ایستگاه های تقلیل فشار گاز طبیعی، اولین همایش ملی گاز ایران، ۱۳۸۵
5. Heggmanns, Alexander, Schimke, Robert, Beitelschmidt, Michael, Geradts, Karlheinz- Thermoelectric generator systems for waste heat usage in diesel electric vehicles, 2010
6. Katz, D.L., Kobayashi, D., Vary, J.A., Elenbaas, J.R., Poettmann, F.H., Weinaug, C.F. (1956), - Handbook of Natural Gas Engineering, Chapter 16, pp. 597-654, McGraw-Hill Co., New York.
7. Khalili, Ebrahim Heybatian, Esmaeil 2009 -Efficiency and heat losses of indirect water bath heater installed in natural gas pressure reduction station evaluating a case study in Iran, the 8<sup>th</sup> international energy conference
8. KUMAR, C. Ramesh, SONTALIA, Ankit, and GOEL ,Rahul- EXPERIMENTAL STUDY ON WASTE HEAT RECOVERY FROM AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING THERMOELECTRIC TECHNOLOGY, THERMAL SCIENCE, Year 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 1011-1022
9. Melcor, "Thermoelectric Handbook". Available from: <http://www.Laridtech.com> (2011).
10. W. Angelo, M. H. Mantelli, F. H. Milanez 2007 "DESIGN OF A HEATER FOR NATURAL GAS STATIONS ASSISTED BY TWO-PHASE LOOP THERMOSYPHON" 14<sup>th</sup> International Heat Pipe Conference