

بررسی ترمواکونومیک استفاده از بویلرهای چگالشی در منازل استان خوزستان

سید علی اشرفی زاده*^۱، پژمان کیان پور^۲، سید علی معظمی^۳

^۱ استادیار دانشگاه آزاد دزفول، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول ایران ، aliashrafizadeh@yahoo.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول ، دانشگاه آزاد اسلامی ، دزفول، ایران

چکیده

پکیج‌های چگالشی یا همان بویلرهای چگالشی یکی از جدیدترین سیستم‌های گرمایشی هستند که در بازار دنیا عرضه می‌شود. این نوع از پکیج‌ها یا بویلرها، با راندمان بالایی (معمولاً بیش از ۹۰٪) کار می‌کنند. در سیستم پکیج‌های چگالشی از انرژی دود حاصل از احتراق برای پیش گرمایش آب سرد ورودی به پکیج (بویلر) استفاده می‌شود. آن‌ها ممکن است با گاز یا گازوییل کار کنند و از آنجایی که بخار آب تولیدشده در طی سوختن در بویلر را به کندانسه تبدیل می‌کنند به آن‌ها پکیج چگالشی می‌گویند. در این مقاله، ابتدا راندمان پکیج چگالشی و سنتی باهم مقایسه می‌شود و سپس توجیه ترمواکونومیکی استفاده از این پکیج‌ها در ساختمان‌های مسکونی استان خوزستان، ارائه خواهد شد. نتایج بیانگر صرفه‌جویی قابل ملاحظه در میزان گاز مصرفی و هزینه پرداختی خانوار است. همچنین کاهش میزان آلودگی هوا در استفاده از پکیج چگالشی، قابل ملاحظه است.

واژه های کلیدی: ترمواکونومیک، بویلرهای چگالشی، سیستم‌های گرمایشی، استان خوزستان

۱- مقدمه

با توجه به رشد سالانه ۱۱ تا ۱۲ درصدی تقاضای گاز در سطح کشور و مصرف روزانه ۵۴۰،۰۰۰،۰۰۰ متر مکعب گاز در فصل سرد در بخش خانگی و حداکثر تولید ۵۷۰،۰۰۰،۰۰۰ متر مکعب گاز طبیعی در کل پالایشگاه‌های کشور، لزوم جلوگیری از هدر رفت انرژی و به‌کارگیری تجهیزات گازسوز پربازده در کشور امری ضروری به نظر می‌رسد.

یکی از مهم‌ترین وسایل گازسوز تولید گرما در بخش خانگی، پکیج‌های گرمایشی است که مقدار قابل توجهی انرژی از طریق گازهای خروجی از دودکش آن‌ها وارد محیط شده و تلف می‌شوند. برای جلوگیری از تلفات در این بخش از سال ۱۹۷۰ میلادی ساخت بویلرهای چگالشی آغاز گردید. در پکیج‌های ساده (غیر چگالشی) فقط از گرمای محسوس سوخت استفاده می‌شود؛ درحالی‌که حدود ۲۰ درصد انرژی سوخت به صورت گرمای نهان بخار آب در محصولات احتراق می‌باشد [۱-۲].

حداکثر راندمان پکیج ساده مورد آزمایش ۹۰/۵ درصد است. این در حالی است که در پکیج چگالشی راندمان تا ۱۱۲ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین راندمان بخاری‌های تولیدی در ایران ۶۰ درصد و آبگرم‌کن‌ها ۷۰ درصد می‌باشد. با توجه به این‌که در عمل این وسایل گرمایشی در نقطه‌ی طراحی کار نمی‌کنند، راندمان متوسط آن‌ها کمتر از ۵۰ درصد است که تلفات بسیار بیشتری را نسبت به پکیج‌های چگالشی دارا می‌باشند [۳].

سالانه حدود ۳۰۰،۰۰۰ پکیج گرمایشی در کشور تولید و در حدود همین مقدار نیز واردات می‌گردد که ۱۰ درصد آن از نوع چگالشی می‌باشد؛ بنابراین در صورت به‌کارگیری پکیج‌های چگالشی بجای نوع ساده آن و نیز سایر تجهیزات گرمایشی، می‌توان به میزان قابل توجهی در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی نمود [۳].

۲- چگالشی

چگالشی زمانی رخ می‌دهد که دمای بخار آب کمتر از دمای نقطه شبنم بخار آب موجود در محصولات احتراق شود. در صنعت، این فرآیند معمولاً بر اثر انتقال حرارت بین بخار و یک سطح سرد به وجود می‌آید. گرمای نهان بخار به سطح انتقال یافته و مایع چگالشی می‌یابد [۴]. دمای نقطه شبنم برای بخار آب موجود در محصولات احتراق به عوامل متعددی از قبیل درصد هوای اضافه، میزان دی‌اکسید کربن موجود، فشار جزئی بخار و ارتفاع از سطح دریا یا فشار محیط وابسته است [۵].

مقدار گرمای نهان تبخیر آب در دمای جوش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ۲۲۵۷ کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد که نسبت به گرمای محسوس، مقدار قابل توجهی است [۶]. گرمای نهان، آنتالپی تغییر فاز می‌باشد که در معادله ذیل نشان داده شده است:

$$Q = H_g - H_f = H_{fg} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا H_g ، آنتالپی حالت بخار، H_f آنتالپی حالت مایع و H_{fg} آنتالپی تبخیر است.

اساس کار پکیج چگالشی

در بویلرهای چگالشی برای گرم کردن آب از مشعل‌هایی استفاده می‌شود که معمولاً از گاز متان به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. واکنش انجام شده در فرآیند احتراق متان به صورت زیر است:

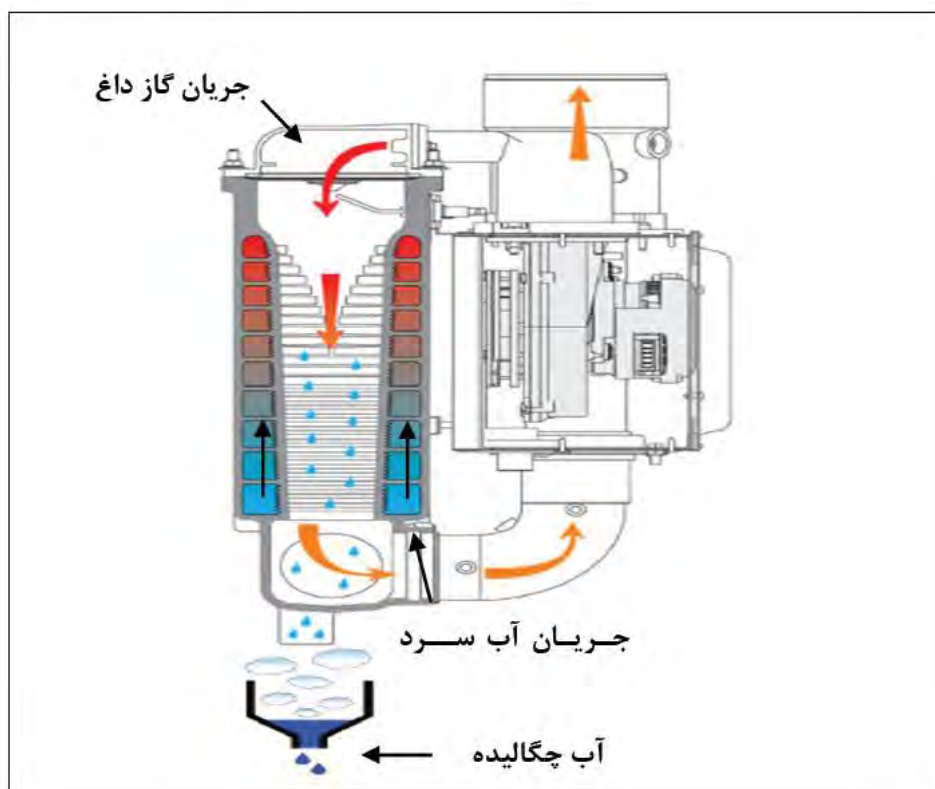


همان‌گونه که از این فرآیند مشخص است، گازهای خروجی دارای رطوبت بوده و علاوه بر این دمای بالایی نیز دارند. در پکیج‌های غیر چگالشی، تقطیر این گازها ممکن نیست چراکه باعث خرابی پکیج و کوتاه شدن عمر مفید آن می‌شود. اگر طراحی سیستم به حد کافی بالا بودن درجه حرارت آب برگشتی را تضمین ننماید، پکیج‌های دارای لوله فولادی و مسی دچار خرابی می‌شوند [۷]. بنابراین به علت عدم به‌کارگیری مبدل حرارتی چگالشی در مسیر خروج گازهای خروجی دودکش پکیج‌های ساده، از انرژی نهان بخار آب استفاده نمی‌شود.

برای کاهش تلفات مسیر دودکش و بازیافت حرارت نهان، بویلرهای چگالشی علاوه بر اجزای کلی یک بویلر، مجهز به مبدل حرارتی چگالشی در مسیر دودکش می‌باشند. این مبدل حرارتی چگالشی با بازیابی گرمای گازهای خروجی که در سیستم‌های همرفتی به‌طور مستقیم به محیط اطراف تخلیه می‌شوند، بازده سیستم گرمایشی را ۱۲ درصد افزایش می‌دهند. دمای گازهای خروجی در یک بویلر همرفتی در حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و یا بیشتر است، درحالی‌که با استفاده از سیستم‌های چگالشی و جذب گرمای این گازها، دمای خروج آن‌ها به حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. گرمای حاصل از این کاهش دما با استفاده از یک مبدل حرارتی به آب موجود در سیستم منتقل شده و آن را پیش گرم می‌کند. این عمل منجر به کاهش انرژی مورد نیاز برای گرم کردن آب می‌شود. علاوه بر این، در این دما بخار آب چگالیده شده و از گرمای آن استفاده می‌شود. از آنجاکه گرمای نهان

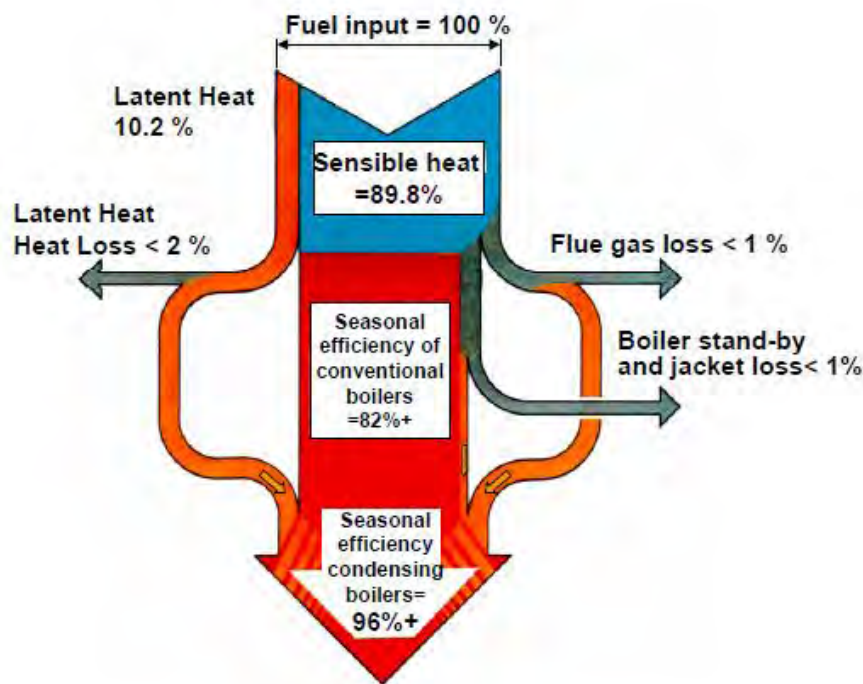
تبخیر آب بسیار زیاد است مقدار انرژی آزاد شده از چگالش آب بسیار زیاد است. به همین دلیل پکیج‌های چگالشی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بیش‌ترین میزان چگالش را نتیجه دهند [۸].

در شکل ۱، یک بویلر چگالشی نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مسیر جریان محصولات احتراق و جریان مایعات تقطیر شده هم‌جهت و در خلاف جهت با جریان آب سرد برگشتی به سیستم می‌باشد تا انتقال حرارت بهینه صورت گیرد.



شکل ۱: شماتیک بویلر چگالشی

شکل ۲ نمایی از نحوه عملکرد و تقسیم انرژی را در یک پکیج چگالشی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نمایش داده شده است، گرمای ورودی به سیستم به دو نوع محسوس و نهان دسته‌بندی می‌شود. توانایی اصلی پکیج‌های چگالشی در استفاده از انرژی نهانی می‌باشد که در گازهای خروجی از محفظه احتراق وجود دارد. با استفاده از این مقدار گرمای نهان با استفاده از سیستم چگالشی بیش از ۹۶ درصد از گرمای ورودی به سیستم به آب منتقل می‌شود.



شکل ۲: نحوه تقسیم انرژی در یک پکیج چگالشی

پکیج‌های چگالشی علاوه بر کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از هدر رفتن آب، منجر به کاهش تولید انواع آلاینده‌های محیط‌زیست به خصوص کاهش چشمگیر آلاینده NOx می‌شوند به گونه‌ای که کلاس آلوده‌کنندگی NOx را از کلاس ۵ در پکیج‌های معمولی به کلاس ۱ در پکیج‌های چگالشی تغییر داده‌اند که در جدول ۱ آورده شده است [۸].

جدول ۱: کلاس‌بندی آلاینده‌گی NOx بر اساس استاندارد BS EN 483

کلاس	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	کلاس ۵
میزان آلاینده‌گی NO _x	۲۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۰
	mg/KWh	mg/KWh	mg/KWh	mg/KWh	mg/KWh

۳- راندمان

مقدار کل گرمای ایجادشده توسط پکیج متناسب با مقدار گاز سوخته شده می‌باشد [۹].

$$\text{راندمان} = (\text{دستگاه توسط شده انجام کار} / \text{دستگاه به شده داده کار}) \quad (۳)$$

$$\text{راندمان} = (\text{آب به شده داده انتقال حرارت}) / \text{خروجی قدرت} / (\text{دستگاه توسط شده سوخته انرژی کل مقدار}) \text{ اسمی درت} \quad (۴)$$

در پکیج‌های سنتی درجه حرارت دود بالای ۱۰۰ درجه سلیسیوس می‌باشد و آب موجود در دود به حالت بخار بوده و لذا ارزش حرارتی گاز پایین می‌باشد [۹].

به عنوان مثال در یک پکیج سنتی با سوخت گاز طبیعی و قدرت خروجی $23/8 \text{ K/w}$ یا 20468 cal/h با مصرف گاز $2/7 \text{ m}^3/\text{h}$ داریم:

$$2/7 * 8125 = 21937/5 \text{ Kcal/h}$$

$$\eta = E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$$

$$\eta = (86462/83912/5) * 366 = 91/1\%$$

(۵) مصرف گاز * ارزش حرارتی گاز = قدرت اسمی حرارت

برای نشان دادن تفاوت بین راندمان پکیج های چگالشی و سنتی از محصولات حاصل از احتراق با ارزش حرارتی پایین استفاده می کنیم. همچنین برای یک پکیج چگالشی با قدرت خروجی $21/856 \text{ K/W}$ و مصرف گاز به مقدار $2/54 \text{ m}^3/\text{h}$ داریم:

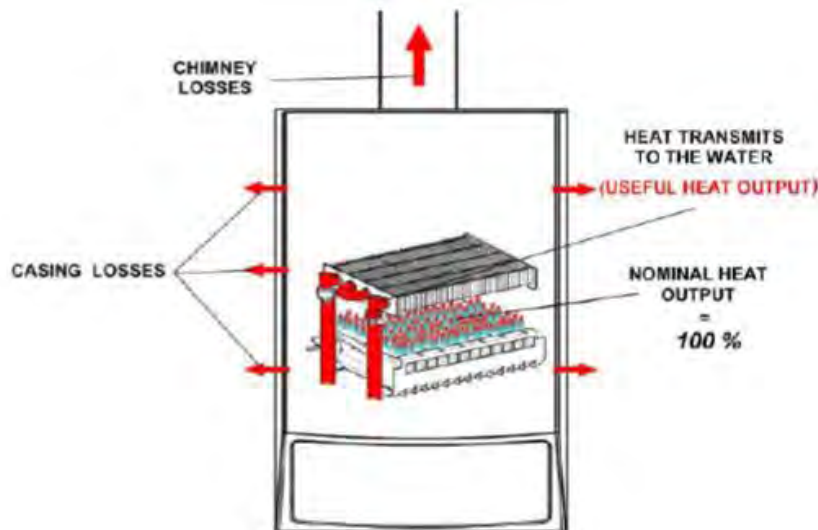
(۶) ارزش حرارتی پایین گاز * گاز ورودی = قدرت اسمی

$$2/54 * 8125 = 20619 \text{ Kcal/h}$$

(۷) قدرت اسمی / قدرت خروجی = راندمان

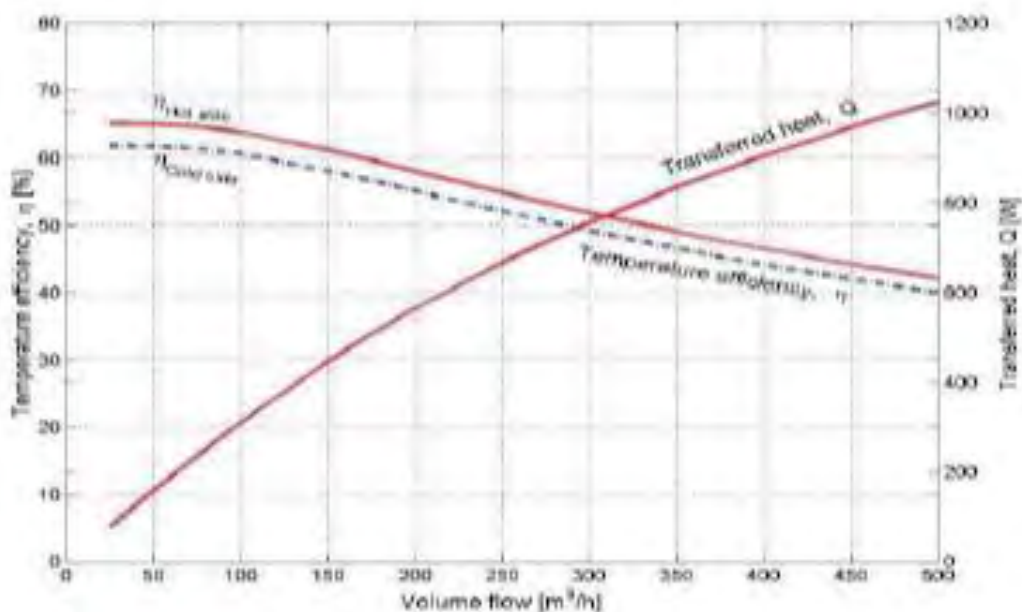
$$\eta = (21856/20619) * 100 = 106\%$$

همان طور که مشاهده می شود میزان اختلاف بازده برای یک بویلر چگالشی قابل ملاحظه است. شکل ۳، بخش های مختلف خروج حرارت را در یک پکیج چگالشی نشان می دهد.



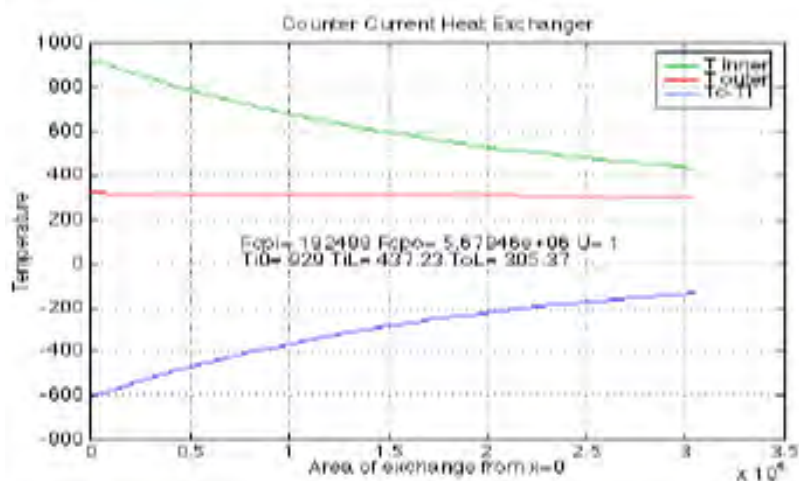
شکل ۳: شماتیک اتلافات و بازدهی پکیج چگالشی

شکل ۴، میزان تغییرات راندمان پکیج چگالشی را بر اساس تغییرات دبی سیال ورودی نشان می‌دهد [۳]. بر اساس این نمودار، با افزایش حجم سیال ورودی به پکیج، راندمان سیستم در مقایسه با گرمای گرفته شده کاهش می‌یابد؛ بنابراین برای تعیین بازدهی مناسب، باید میزان دبی سیال ورودی به سیستم کنترل شود.



شکل ۴: تغییرات راندمان بر اساس تغییرات دبی ورودی

شکل ۵، اثر تغییرات سطح مبدل روی اختلاف دمای ایجاد شده در سیال ورودی را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار با افزایش سطح مبدل حرارتی بکار رفته در یک پکیج چگالشی، میزان تبادل حرارت بین سیال سرد و گرم افزایش می‌یابد. لذا دمای محصولات حاصل از احتراق به میزان مطلوبی کاهش یافته و به دنبال آن افزایش بازده روی می‌دهد.



شکل ۵: اثر تغییرات سطح مبدل روی اختلاف دمای ایجاد شده در سیال ورودی و خروجی

۵- مزایای تکنولوژی چگالشی

- ۱- کاهش آلودگی محیط زیست به علت کاهش گازهای حاصل از فرایند احتراق،
- ۲- مصرف انرژی مینیم و در نتیجه بیشترین بازده ممکن
- ۳- قابلیت مدولاسیون و گرمایش مناطق حرارتی مختلف [۱۰].

۶- مفهوم ترمواکونومیک

ترمواکونومیک علم صرف جویی انرژی بر اساس ترکیب قانون دوم ترمودینامیک و مفاهیم اقتصادی است. تحلیل ترمواکونومیک بر این پایه استوار است که انرژی تنها مفهوم منطقی برای نسبت دادن هزینه به ناکارآمدی‌های سیستم و فعل و انفعالاتی است که سیستم با محیط خود تجربه می‌کند. لذا برای بهبود طراحی سیستم‌ها، انرژی با مفاهیم اقتصادی ترکیب می‌شود و با حداقل کردن قیمت و زمان کارکرد سیستم‌ها می‌توان بهترین و کارآمدترین سیستم را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی شناسایی کرد. در واقع در تحلیل ترمواکونومیک با دادن ارزش اقتصادی به جریان‌های انرژی و انرژی، بین هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های جریان انرژی و انرژی نوعی تعادل برقرار می‌شود به نحوی که تولید محصول سیکل ترمودینامیکی با حداقل هزینه کل و بیشترین میزان بهره‌وری صورت پذیرد. اساساً در این روش، تلاش بر به حداقل رساندن یک تابع هدف است که در آن برای هم‌سطح سازی عبارات، به میزان اتلافات و عدم بهره‌وری در سیستم ارزش اقتصادی داده می‌شود و با به حداقل رساندن تابع هدف، هم میزان این اتلافات و هم هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم، به کمترین مقدار رسانده می‌شود [۱۱].

۷- توجیه ترمواکونومیکی طرح

از تاریخ ۱۳۸۹/۰۹/۲۸، در راستای هدفمند شدن یارانه‌ها، تعرفه‌ی گاز در هر استان متناسب با آب و هوای آن مکان محاسبه می‌گردد. در این راه، استان‌های کشور به ۵ اقلیم آب و هوایی تقسیم‌بندی شده است که استان خوزستان در اقلیم ۵، قرار دارد. با توجه به جدول ۲، داریم:

جدول ۲: تعرفه‌ی گاز در اقلیم‌های پنج‌گانه در ماه‌های سرد سال

دامنه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مصرف	۳۰۰ تا	۴۰۰-۳۰۱	۵۰۰-۴۰۱	۶۰۰-۵۰۱	۷۰۰-۶۰۱	۸۰۰-۷۰۱	۹۰۰-۸۰۱	۱۰۰۰-۹۰۱	۱۱۰۰-۱۰۰۱	۱۲۰۰-۱۱۰۱	۱۳۰۰-۱۲۰۱	مازاد
اقلیم ۱ (متر)											۱۲۰۱	بر

۱۳۰۰												مکعب)
مازاد	-۱۲۵۰	۱۰۵۱-۱۱۵۰	۹۵۱-۱۰۵۰	۸۵۱-۹۵۰	۷۵۱-۸۵۰	۶۵۱-۷۵۰	۵۵۱-۶۵۰	۴۵۱-۵۵۰	۳۵۱-۴۵۰	۲۵۱-۳۵۰	تا ۲۵۰	اقلیم ۲ (متر)
بر	۱۱۵۱											مکعب)
۱۲۵۰												
مازاد	-۱۲۰۰	۱۰۰۱-۱۱۰۰	۹۰۱-۱۰۰۰	۸۰۱-۹۰۰	۷۰۱-۸۰۰	۶۰۱-۷۰۰	۵۰۱-۶۰۰	۴۰۱-۵۰۰	۳۰۱-۴۰۰	۲۰۱-۳۰۰	تا ۲۰۰	اقلیم ۳ (متر)
بر	۱۱۰۱											مکعب)
۱۲۰۰												
مازاد	-۱۱۵۰	۹۵۱-۱۰۵۰	۸۵۱-۹۵۰	۷۵۱-۸۵۰	۶۵۱-۷۵۰	۵۵۱-۶۵۰	۴۵۱-۵۵۰	۳۵۱-۴۵۰	۲۵۱-۳۵۰	۱۵۱-۲۵۰	تا ۱۵۰	اقلیم ۴ (متر)
بر	۱۰۵۱											مکعب)
۱۱۵۰												
مازاد	۹۵۱-۱۰۵۰	۸۵۱-۹۵۰	۷۵۱-۸۵۰	۶۵۱-۷۵۰	۵۵۱-۶۵۰	۴۵۱-۵۵۰	۳۵۱-۴۵۰	۲۵۱-۳۵۰	۱۵۱-۲۵۰	۷۶-۱۵۰	تا ۷۵	اقلیم ۵ (متر)
بر												مکعب)
۱۰۵۰												
۴۸۳۰	۴۴۱۶	۳۸۶۴	۳۴۵۰	۳۰۳۶	۲۶۲۲	۲۲۰۸	۱۵۱۸	۱۲۴۲	۹۶۶	۶۹۰	۴۱۴	قیمت هر متر مکعب (ریال)

متوسط مصرف هر خانوار = ۳۵۰ مترمکعب

قیمت هر مترمکعب = ۱۲۴۲ ریال

تعداد مشترکان گاز در استان خوزستان، بر اساس آمار شرکت گاز استان تا شهریور ۱۳۹۴ = ۸۶۵۰۰۰ مشترک بر این اساس، گاز بهای هر واحد مسکونی در ماه برابر ۴۳۴،۷۰۰ ریال برای پکیج‌های سنتی است. با توجه به اختلاف راندمان ۱۱ درصدی پکیج‌های سنتی با پکیج‌های چگالشی، مصرف میانگین هر خانوار ۳۱۱ مترمکعب و گاز بهای آن ۳۸۶،۲۶۲ ریال خواهد شد که معادل ۴۸،۴۳۸ ریال در هر ماه به ازاء هر مشترک صرفه‌جویی مالی می‌شود. میزان صرفه‌جویی در ۵ ماه برای کل مشترکان ۲۰۹،۴۹۴،۳۵۰ هزار ریال خواهد بود.

مجموع هزینه صرفه‌جویی انرژی را که در نتیجه استفاده از سیستم گرمایش پکیج چگالشی حاصل می‌شود توسط رابطه زیر بیان می‌کنیم.

$$C_f = E_W C_E PWF \quad (۸)$$

(C_E) هزینه گاز مصرفی، (E_W) مجموع اتلاف انرژی برای یک سیستم گرم‌کننده و (PWF) ضریبی است که با افزایش میزان قیمت انرژی را در طول مدتی مشخص در نظر می‌گیرد. با توجه به نرخ افزایش قیمت گاز، مقدار (PWF) توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$(PWF) = \frac{1}{IR} \left[1 - \frac{1}{(1+IR)^N} \right] \quad (۹)$$

که (IR) درصد افزایش قیمت سالیانه گاز می‌باشد.

از تفاضل میزان صرف جویی در مصرف گاز به وسیله سیستم پکیج چگالشی و مابه‌التفاوت قیمت سیستم‌های چگالشی با سیستم‌های سنتی می‌توان میزان صرفه‌جویی در هزینه کلی پرداخت قبوض گاز در مدت ۱۲ سال عمر مفید از سیستم پکیج چگالشی به دست آورد.

۸- نتیجه گیری

در مطالعه ترمواکونومیک انجام شده پیرامون استفاده از بویلرهای چگالشی در منازل مسکونی استان خوزستان با توجه به اختلاف قیمت ۳۰۰ هزار تومانی سیستم سنتی و چگالشی، علاوه بر مزیت های صرفه جویی در مصرف گاز که خدمتی ملی و انتقال سرمایه به آیندگان است، در راستای جلوگیری از ورود گازهای آلاینده به محیط زیست که اقدامی با ارزش جهانی و بشری است و نیز کیفیت گرمایشی در ایجاد هوای مطبوع که موضوع اصلی می باشد، در طول حدود دوازده سال، اختلاف هزینه پرداختی از محل صرفه جویی باز گردانده می شود. لذا با انجام یک برنامه ریزی میان مدت، می توان ضمن بهره گیری از کیفیت گرمایشی بهتر پکیج های چگالشی نسبت به پکیج های ساده، از مواهب صرفه جویی سوخت، صرفه جویی مالی و نیز کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی، بهره جست.

۹- مراجع

- [1] Field, A. A., 1974. Reclaiming latent heat in flue gases. Heating-Piping-Air Conditioning; 46(11):85-7.
- [2] Shook, J. R., 1991. Recover heat from flue gas, Chemical Engineering Progress; 87(6):49-54.
- [۳] صباح، سمانه، پیش بین، سید ایمان و ط مقیمان، سید ایمان، تأثیر به کارگیری پکیج چگالشی بر بهینه سازی مصرف انرژی، دومین همایش ملی اقلیم، ساختمان و بهینه سازی مصرف انرژی، اصفهان، سازمان بهره وری انرژی ایران.
- [4] Sonntag, Borgnakke, V. Wylen. Fundamentals of Thermodynamics, 5th Edition.
- [5] F. Haase, H. Koehne. 1999. Design of scrubbers for condensing boilers, Progress in Energy and Combustion Science 25, 305-337.
- [6] Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition.
- [7] McNair HP, Shiret AR. 1985. Factors that influence the annual efficiency of domestic wet central heating systems. Gas Energy Management; 25(3):90-3.
- [۸] محمدی، محمدعلی، ۱۳۹۱، معیار انتخاب فنی و اقتصادی مبدل های حرارتی واحدهای مسکونی با رویکرد بهینه سازی مصرف انرژی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز،
- [۹] اشرفی زاده، سیدعلی دریکوند، اسد و جافری، فرزانه، ۱۳۹۳، تحلیل ترمواکونومیک استفاده از بویلرهای چگالشی در مدارس استان لرستان، کنفرانس سراسری الکترونیکی محیط زیست و انرژی ایران، صفاشهر، مؤسسه بین المللی آموزشی و پژوهشی خوارزمی.
- [۱۰] اشرفی زاده، سیدعلی و باولی بهمنی، مالک، ۱۳۹۳، تحلیل ترمواکونومیک استفاده از بویلرهای چگالشی در مدارس استان مرکزی، اولین کنفرانس بین المللی محیط زیست، تهران، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
- [۱۱] یعقوبی، محمود و مختاری، ابوالحسن، ۱۳۸۸، انرژی و آموزش ترمواکونومیک و کاربرد آن در مهندسی، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، شماره ۳۹، سال دهم، ص ۱۱۳-۱۳۲.