

# مقایسه راندمان و عملکرد سیستم‌های تولید انرژی CHP و بویلر چگالشی

داود امینی مقدم فاروج<sup>۱</sup> - سعید آزاد<sup>۲</sup> - سید محمود ابوالحسن علوی<sup>۳</sup> - مصطفی خسروپور عربی<sup>۴</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی مکانیک حرارت و سیالات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد ۲- فارغ التحصیل کارشناسی مکانیک طراحی جامدات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد ۳- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد ۴- دانشجوی کارشناسی مکانیک حرارت و سیالات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

۱- [Davood.Amini.Moghaddam@gmail.com](mailto:Davood.Amini.Moghaddam@gmail.com)

۲- [Saeidazad.mec@gmail.com](mailto:Saeidazad.mec@gmail.com)

۳- [M\\_A\\_alavi2002@yahoo.com](mailto:M_A_alavi2002@yahoo.com)

۴- [Mkamecheng@gmail.com](mailto:Mkamecheng@gmail.com)

## چکیده

استفاده از CHPها و یا بویلرهای چگالشی در سیستم‌های گرمایشی صنعتی و خانگی (در صورت انتخاب صحیح) راندمان تولید انرژی حرارتی را بالا می‌برد. برای رسیدن به این هدف باید شرایط محیط استفاده از این سیستم به دقت بررسی گردد. باید در نظر داشت که شرط اولیه استفاده از بویلرهای چگالشی این است که دمای آب برگشتی باید حدود  $10^{\circ}\text{F}$  از دمای اشباع بخار آب حاصل از احتراق (موجود در محصولات احتراق) پایین‌تر باشد. دمای اشباع این بخار آب به پارامترهای دیگری چون نوع سوخت و مقدار هوای اضافی نیز وابسته بوده و در حدود  $110^{\circ}\text{F}$  تا  $135^{\circ}\text{F}$  است، در صورتیکه دمای آب برگشتی در بویلرهای غیرچگالشی  $180^{\circ}\text{F}$  می‌باشد. همچنین باید به الگوریتم انتخاب CHP نیز دقت شود تا نسبت میزان برق تولیدی به حرارت تولیدی آن، متناسب با نیاز ساختمان باشد. در این تحقیق سعی شده است، دلایل بیشتر بودن راندمان در بویلرهای چگالشی و روش‌های محاسبه راندمان آن بررسی شده، بررسی انواع CHP و پارامترهای موثر بر انتخاب آن بررسی شده و همچنین جواب مناسبی به مقادیر راندمان بالای ۱۰۰٪ که در بعضی از منابع برای بویلرهای چگالشی ادعا می‌شود، داده شود. نتایج نشان می‌دهند که راندمان این بویلرهای چگالشی در بیشینه خود به حدود ۹۶٪، و راندمان CHPها در بیشینه به ۹۰٪ می‌رسد که مقادیر بسیار مناسبی می‌باشند.

## کلید واژه

بویلر چگالشی- راندمان بویلر- تولید برق و حرارت- تولید همزمان- تولید پراکنده- CHP

همزمان علاوه بر صرفه اقتصادی، شامل مزایای قابل توجه دیگری نیز می‌گردد.

- توسعه بخش خصوصی
- امکان تولید برق و گرما به صورت همزمان
- پیک سایه
- بهبود کیفیت توان و قابلیت اطمینان
- به کارگیری منابع سوخت متنوع
- پشتیبانی از شبکه
- تولید برق اضطراری
- کاهش آلودگی های زیست محیطی

سیستم‌های تولید همزمان دارای راندمان بالایی هستند، به‌ویژه تولید همزمان برق و حرارت می‌تواند باعث افزایش راندمان تولیدات پراکنده تا بیش از ۹۰ درصد گردد [۶].

در این مقاله سعی شده است تا با بررسی انواع و راندمان سیستم‌های یاد شده مقایسه‌ای در مورد نحوه انتخاب و استفاده از آنها انجام گردد.

## ۲ - سیستم‌های تولید برق و حرارت (CHP)

همانطور که از نام این سیستم‌ها پیداست، آنها توانایی تولید انرژی الکتریکی (برق) و انرژی گرمایی (حرارت) را در یک زمان دارند. این سیستم‌ها به دو صورت صعودی و نزولی می‌باشند. در سیستم‌های صعودی منبع اولیه انرژی برای تولید برق در یکی از فناوری‌های تولید همزمان به کار رفته و از حرارت که محصول جانبی به شمار می‌رود در فرآیند تولید صنعتی استفاده می‌گردد. اما در سیستم‌های نزولی از حرارت تولید شده در فرآیند صنعتی برای تولید برق استفاده می‌گردد. این سیستم در صنایع محدودی مانند صنعت شیشه که در آن دما گازهای خروجی به میزان قابل توجهی بالا می‌باشد قابل استقرار است [۷].

در واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، تلفات به حداقل رسیده و بازده کلی این واحدها بین ۸۰ تا ۹۰ درصد خواهد بود. این در حالی است که در یک نیروگاه متداول بازده حرارتی بین ۲۷ تا ۵۵ درصد بوده که بیشترین کارایی

نظام اقتصادی کشور همواره با ابتکارات و قانون‌گذاری، بر بازده مصرف انرژی در تمام بخش‌ها تاکید داشته است. به خصوص در سال اخیر با اجرای قانون هدفمندسازی یارانه‌ها، اصلاح الگوی مصرف و بالا بردن توان تولید انرژی اهمیت ویژه‌ای یافته است. باتوجه به راندمان پایین تولید انرژی حرارتی و انرژی الکتریکی در کشور، بررسی و شناخت سیستم‌های نوین تولید انرژی حرارتی و الکتریکی ضروری به نظر می‌رسد.

بویلرهای چگالشی نسل جدیدی از بویلرها می‌باشند که توانایی تولید آب گرم به منظور گرمایش ساختمان و آب گرم بهداشتی را دارند. این گونه از بویلرها برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰ تولید شده‌اند [۱]. بزرگترین مزیت آنها بیشتر بودن راندمانشان نسبت به انواع غیرچگالشی می‌باشد. تا به حال تحقیق‌های بسیاری در مورد میزان این راندمان صورت گرفته است. این تحقیق‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود:

● تحقیقات آزمایشی که معمولاً براساس شرایط کارکرد سالیانه بویلر انجام می‌شوند. مانند منابع [۲]، [۳] و [۴]

● تحقیقات محاسباتی که در آنها از روش‌های تحلیلی یا عددی استفاده شده است. از جمله این تحقیق‌ها می‌توان به منبع [۵] اشاره نمود.

در این میان برخی تعاریف از راندمان بویلرهای چگالشی مطرح گردیده است که با استناد به آن راندمان آنها بیش از ۱۰۰٪ معرفی می‌گردد و شرکت‌های تولیدی و حتی شرکت‌های معتبر از این اعداد در کاتالوگ‌های خود استفاده نموده‌اند.

معمولاً برق مورد نیاز واحدهای صنعتی، تجاری و مسکونی از نیروگاه‌های عمده کشور تامین می‌گردد در حالی که نیاز حرارتی تمام آنها در همان محل تولید می‌شود. اما روش دیگری که از دیرباز مورد توجه قرار گرفته است، تولید همزمان برق و حرارت. فناوری تولید همزمان از ابتدای قرن بیستم به عنوان یک روش اقتصادی برای رفع نیاز کارخانه‌ها به انرژی و همچنین بازیافت حرارت از انرژی‌های اتلافی مطرح گردیده است. استفاده از فناوری تولید

مربوط به نیروگاه های سیکل ترکیبی میباشد [۸].

از مهمترین سیستم های تولید همزمان برق و حرارت می توان به موتورهای پیستونی، توربین های گاز و میکروتوربین ها اشاره کرد.

## ۲-۴ - موتورهای پیستونی

موتورهای درون سوز پیستونی از متداول ترین تکنولوژی های منابع ترکیبی برق و حرارت بوده و در بارهای کمتر از ۵KW سریعترین رشد را در بازار داشته اند. این محرکها قابلیت بهره برداری با انواع سوخت گاز طبیعی، گازوییل و بنزین را دارا می باشند. بازه ظرفیت موتورهای پیستونی مورد استفاده در تولید توان از چندین کیلووات تا حدود ۱۰MW می باشد. موتورهای پیستونی به دو گروه عمده احتراق جرقه ای و احتراق تراکمی تقسیم می گردند. موتورهای احتراق جرقه ای با گاز طبیعی کار کنند ولی می توان آنها را برای کار با پروپان، گازوئیل یا گازهای بازیافتی نیز تنظیم نمود. موتورهای احتراق تراکمی که اغلب موتورهای دیزلی نامیده می شوند با سوخت دیزل یا مازوت کار می کنند و می توان آنها را برای کار به صورت دوگانه سوز نیز تنظیم نمود. با توجه به آلودگی ناشی از استفاده از موتورهای دیزلی اکنون برای تولید برق در مدت طولانی (بیش از ۵۰۰ ساعت در سال)، موتورهایی که گاز طبیعی می سوزانند گزینه مناسب تری می باشند. در نسل جدید موتورهای با سوخت گاز طبیعی، هزینه اولیه کم و راه اندازی سریع بوده و در صورت نگهداری مناسب قابلیت اطمینان بالایی دارند. بازه الکتریکی موتورهای گازسوز از ۲۸ درصد (ارزش حرارتی خالص) برای موتورهای کوچکتر از ۱۰۰MW و بیش از ۴۳ درصد برای موتورهای احتراقی بزرگتر از ۳MW می باشد. حرارت گازهای داغ خروجی و سیستم خنک کاری این موتورها را می توان برای تولید آب داغ یا بخار کم فشار استفاده نمود. بازده کلی سیستم CHP با در نظر گرفتن برق و انرژی حرارتی مفید در هنگام استفاده از موتورهای گازسوز معمولا در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد می باشد. با حساسیتهای اقتصادی و زیست محیطی که در طول سه دهه گذشته اعمال شده است، فناوری موتورهای پیستونی پیشرفت زیادی کرده و منجر به افزایش بازده سوخت و کاهش آلودگی شده است. در موتورهای گازسوز پیشرفته با بهبود طراحی کنترل احتراق سطح تولید

NO<sub>x</sub> به ۵۰ppm رسیده است. کاربرد موتورهای پیستونی برای تولید برق در تامین بار کمکی، بار پیک، تقویت شبکه و کاربردهای همزمان تولید برق و حرارت که نیاز به آب داغ، بخار کم فشار یا چیلرهای جذبی دارند، می باشد. وقتی این موتورها برای سرمایه ش مورد استفاده قرار می گیرند، خروجی حرارتی موتور پیستونی می تواند در یک چیلر جذبی تک مرحله ای استفاده شود [۸].

با توجه به این که موتورهای پیشرفته گازهای آگزوز خنک تری دارند، بازیافت حرارت فقط می تواند به صورت بخار باشد. مثلا یک موتور دیزل ۴,۲MW می تواند ۱,۵MW بخار و ۳,۱MW آب گرم و داغ تولید کند. با توجه به این که کل مصرف سوخت برای این موتور حدود ۱۰MW بوده است، بازده کل مجموعه به حدود ۸۸ درصد می رسد [۹].

## ۲-۴ - توربین های گازی

یک سیستم ساده و کم هزینه تولید ترکیبی برق و حرارت می تواند با ترکیب یک توربین گاز و یک بویلر بازیافت حرارت ایجاد شود. بیشترین استفاده از انرژی گازهای خروجی برای تولید بخار در مولدهای بدون مشعل می باشد. بدین صورت که گازهای خروجی از توربین گاز می تواند به عنوان یک منبع مستقیم انرژی برای بویلرهای HRSG استفاده گردد. در این سیکل مقدار گرمایی که می تواند بازیافت شود به درجه حرارت گازهای خروجی و نوع سوخت استفاده شده در توربین گازی وابسته است. چنانچه سوخت مایع باشد، دمای گازهای خروجی را می توان تا دمای ۱۲۰ تا ۱۷۰ درجه کاهش داد و اگر سوخت گاز طبیعی باشد دمای گازهای خروجی را می توان تا دمای ۶۰ تا ۱۰۰ درجه کاهش داد. اگر دما بیشتر کاهش یابد احتمال رسیدن به نقطه شبنم و خوردگی سولفیدی وجود خواهد داشت. توربین های گازی در اندازه های مختلف از چند صد کیلووات تا چند صد مگاوات موجود می باشند [۱۰].

این توربین ها حرارت بالایی تولید می کنند که می تواند برای گرمایش ناحیه ای یا صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. کم بودن هزینه نگهداری و بالا بودن کیفیت حرارت اغلب باعث می شود توربین گازی انتخاب مناسبی برای بسیاری از CHP های صنعتی و تجاری بزرگتر از ۱ مگاوات باشد. وضعیت فعلی در صنعت برق کشور بدین گونه است که از

توربین گاز فقط برای تولید برق استفاده می شود، اما می توان با کمک یک مبدل بازیافت حرارتی راندمان نیروگاه را بالا برد. به علاوه می توان با کاربرد توربین گازی در چرخه ترکیبی، با استفاده از حرارت خروجی از توربین، بخار پرفشار تولید نمود و از آن در یک توربین بخار، به منظور تولید توان بیشتر استفاده کرد. چرخه های ساده توربین گازی که تنها برای تولید برق مورد استفاده قرار می گیرند دارای بازدهی نزدیک به ۳۵ درصد می باشند، در صورتی که با استفاده از CHP می توان بازده را به ۶۰ تا ۸۰ درصد ارتقاء داد. توربین های گازی از کم آلاینده ترین تجهیزات تولید توان بوده و مقدار NOx در گاز خروجی آنها بسیار کم است. همچنین مقدار CO<sub>2</sub> بر واحد کیلووات ساعت که در توربین های گازی تولید می شود کمتر از دیگر فناوری های فسیلی می باشد. دمای بالای گاز خروجی از توربین های گازی که حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد انرژی سوخت ورودی را تشکیل می دهد، قابلیت تولید بخار فرآیند با فشار و دمای بالایی در حدود ۱۲۰۰ psig و ۹۰۰° F درجه فارنهایت را دارد و همچنین می توان از آن در فرآیندهای صنعتی برای گرمایش یا خشک کردن استفاده کرد. نمونه متداولی از کاربرد توربین گاز در مجموعه های CHP تجاری و غیر صنعتی و دانشگاهی با چرخه ساده، توربین گاز ۵MW می باشد که در آن حدود ۸MW حرارتی، بخار (یا آب گرم) با فشار ۱۵۰ تا ۴۰۰ psi در یک مولد بخار بازیافت حرارت تولید می شود و به یک سیستم حرارت مرکزی برای تامین گرما در زمستان و یا به چیلر جذبی برای سرد کردن محیط در تابستان منتقل نمود. محفظه احتراق اغلب توربین های گازی ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ BTU بر فوت مکعب استاندارد می باشد که شامل گاز طبیعی می شود. فشار محفظه احتراق توربین های گاز از ۷۵ تا ۳۵۰ psig می باشد که فشار خط لوله گاز طبیعی همیشه از این مقدار بالاتر است، اما هنگام اندازه گیری در ورود به شهر، عبور از سیستم توزیع و اندازه گیری برای تحویل به مصرف کننده کاهش می یابد. بسته به محل قرارگیری مجموعه توربین گاز در سیستم گاز، ممکن است به کمپرسور گاز نیاز باشد تا فشار سوخت را با توجه به سیستم احتراق و کنترلر جریان توربین تنظیم نماید [۸].

## ۴ ۲ - میکروتوربین ها

میکروتوربین ها توربین های کوچک گازی هستند که سوخت

مایع و گازی را می سوزانند تا یک جریان گاز پراثرژی را جهت چرخاندن شفت ژنراتور الکتریکی در سرعت بسیار بالا (در حد چندین هزار دور در دقیقه) تولید نمایند. میکروتوربین ها دارای یک بخش بهبود ساز می باشند. بهبودساز باعث افزایش راندمان میکروتوربین می گردد. در یک سیستم میکروتوربین، یک کمپرسور شعاعی هوای ورودی را متراکم می کند، سپس هوا با استفاده از حرارت گاز خروجی توربین، در بهبودساز پیشگرم می شود. هوای خروجی از بهبودساز در محفظه احتراق با سوخت مخلوط شده و گاز داغ حاصل از احتراق با عبور از توربین منبسط می گردد. توربین کمپرسور را به راه انداخته و در مدلهای تک محوره ژنراتور را نیز به کار می اندازد. مدلهای تک محوره، معمولاً با سرعت ۶۰۰۰۰ دور بر دقیقه و بالاتر کار کرده و توان الکتریکی با فرکانس بالا و متغیر تولید می نمایند. این توان نخست با یکسوسازی، به جریان DC و سپس به جریان متناوب با فرکانس ۶۰ یا ۵۰ هرتز تبدیل می گردد. میکروتوربین ها بر اساس سیکل ترمودینامیکی توربین های گاز بزرگ که سیکل برایتون نامیده می شود کار می کنند. میکروتوربین ها دارای حجم بسیار کمی بوده و به راحتی به شبکه متصل می شوند. قطعات مکانیکی کمی داشته و لذا هزینه های نگهداری و تعمیرات کمی دارند. ظرفیت تولید برق آنها از ۲۵ تا ۵۰ KW بوده و از نظر سوخت مصرفی انعطاف پذیری بالایی دارند، به طوری که می توان از گاز طبیعی، پروپان و گازهای متساعد از زباله در آن استفاده نمود. بازده تولید برق برای میکروتوربین ها ۲۵ تا ۳۰ درصد متغیر بوده و دمای گاز خروجی در حدود ۵۰۰F می باشد که نشان از منبع گرمایی مناسبی در خروجی دارد. به علاوه تولید NO<sub>x</sub> این مولدها از موتورهای درون سوز کمتر است. در کاربردهای تولید همزمان توان و گرما، گرمای گاز خروجی جهت مصارف مختلف به کار گرفته می شود. چنین سیستمی با توجه به راندمان بالای آن در مقایسه با تولید برق به تنهایی بسیار سودمند می باشد. به عنوان مثال در بیمارستانی که در مقاله کاوسی نژاد و اردهالی مورد بررسی قرار گرفته است، با استفاده از میکروتوربین می توان راندمان حرارتی را به ۸۵ درصد رسانید.

## ۴ ۲ - نحوه انتخاب

با توجه به تنوع انتخاب برای سیستم های CHP، لازم است

الکتريکی حاصل شده است [۴].

### ۳-۱ - بهبود در فرآیند احتراق

در حال حاضر بهترین راه برای انتقال حرارت حداکثری و یکنواخت برای دیگهای کوچک، انتقال حرارت بصورت تشعشی تشخیص داده شده است. برای رسیدن به این نوع انتقال حرارت، سطح شعله را افزایش می‌دهند. عمدتاً سطح شعله از طریق شاخه ای کردن شعله افزایش می‌یابد. بدین دلیل نسل جدیدی از مشعل‌ها به نام مشعل‌های فوری‌گس<sup>۱</sup> یا شعله خزه‌ای تولید گردیدند [۱۲] که شکل ظاهری آنها همانگونه که در شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شوند بصورت توری بوده و بجای تولید یک شعله هزاران شعله با طول کم بوجود می‌آورد.



شکل ۱: مشعل‌های نسل جدید فوری‌گس



شکل ۲: شعله‌های بوجود آمده روی مشعل فوری‌گس

در داخل توری مخلوط سوخت و هوا که قبلاً در مخلوط کن<sup>۲</sup>، مخلوط شده اند وجود داشته و در روی توری شعله‌های کوچک دیده می‌شود. بدلیل کوتاه بودن طول این شعله‌ها، مبدل حرارتی باید به مشعل نزدیک باشد. در زیر یک نمونه از بویلر چگالشی شرکت Baxi آورده شده

<sup>1</sup> Furigas burner  
<sup>2</sup> Mixer

تا یک مجموعه تولید همزمان را به گونه ای انتخاب کرد که هم بار الکتريکی، گرمایی و سرمایی را تامین کرده و هم اینکه مجموع هزینه‌های اولیه از حداکثر سرمایه گذاری اولیه ممکن، بیشتر نشود. از طرف دیگر، سود کل فروش برق مازاد به شبکه بیشتر باشد. انتخاب تجربی سیستم‌های تولید همزمان (شامل ظرفیت ونوع، دستگاه CHP و بویلر گازی کمکی و سایر اجزا) ممکن است بهینه نباشد و حتی منجر به مصرف سوخت و آلاینده‌گی بیشتر و خسارات مالی گردد. بنابراین می‌توان برای انتخاب بهینه سیستم از مدل TOSCS استفاده نمود. این مدل که برای سیستم‌های تولید همزمان متصل به شبکه در نظر گرفته شده است را می‌توان تنها با حذف پارامترهای مربوط به شبکه، در سیستم‌های تولید همزمان منفرد به کار برد. این مدل خطی و پیوسته است و توسط یک بانک اطلاعاتی تغذیه می‌گردد. این بانک شامل اطلاعات شرکت‌های تولید کننده دستگاه‌ها و ظرفیت‌های متنوع آنها می‌باشد. بدیهی است که میزان دقت و تنوع نتایج بدست آمده با حجم مدل ارتباطی مستقیم دارد. با این مدل برای سیستم تولید همزمان می‌توان ظرفیت بهینه اجزای سیستم را تعیین کرد. برای مثال، این مدل بیان می‌کند که کدام ظرفیت از دستگاه تولید همزمان از کدام شرکت سازنده مناسب است. این مدل علاوه بر این بانک اطلاعاتی، پارامترها و ضرایب مختلفی جهت لحاظ کردن بازده اقتصادی دستگاه‌ها دارا می‌باشد که از آن جمله می‌توان به هزینه تعمیرات و نگه داری، قیمت سوخت، حداکثر سرمایه گذاری ممکن، قیمت برق فروشی و... اشاره کرد. این مدل در واقع با در نظر گرفتن شرایط موجود، بهترین انتخاب را از میان اطلاعات بانک خود گزینش می‌کند. بنابراین همزمان با در نظر گرفتن تامین بارها، اجزای بهینه سیستم انتخاب می‌شوند. در نتیجه حداکثر سود کل نتیجه می‌دهد. میزان قابلیت این مدل به گستردگی و کامل بودن بانک اطلاعاتی آن بستگی دارد [۱۱].

### ۳- بررسی ساختمان بویلرهای چگالشی

بویلرهای چگالشی به منظور افزایش راندمان (در مقایسه با بویلرهای قدیمی تر غیرچگالشی) طراحی گردیده اند. این افزایش راندمان از طریق افزایش بهره وری در احتراق، چگالش بخار آب موجود در محصولات احتراق، بازیابی انرژی محصولات احتراق و جذب انرژی گرمایشی موتورهای

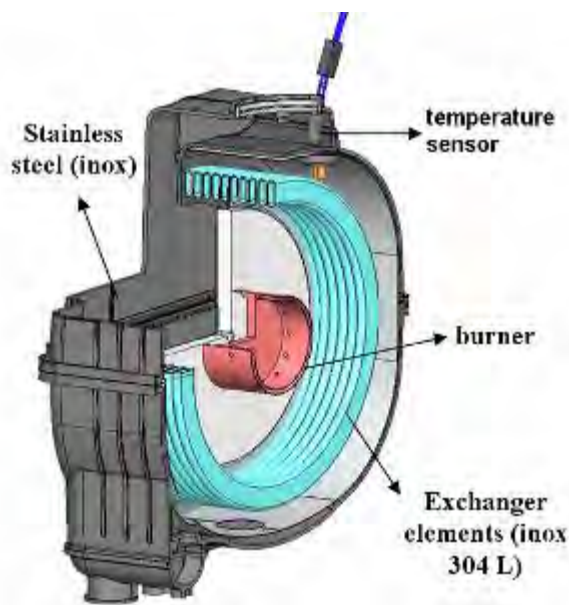
### ۴ ۳ - چگالش بخار آب موجود در محصولات

#### احتراق

در بویلرهای چگالشی دمای محصولات احتراق پایین آورد شده و از نقطه شبنم بخار آب موجود در محصولات احتراق عبور می‌کند. در این فرآیند دمای آب برگشتی به بویلر معمولاً  $10^{\circ}\text{F}$  [۴] پایین تر از دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق می باشد (دمای آب برگشت به بویلر حداقل باید  $7^{\circ}\text{F}$  [۴] پایین تر از دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق باشد تا چگالش رخ دهد) تا با چگالش بخار آب، مقداری از انرژی مصرفی را بازیاب نماید. به دلیل کم بودن مقدار و انواع مواد آلاینده در فرآیند احتراق، آب حاصل از چگالش سمی نبوده و می‌توان آن را از طریق سیفون تخلیه کرد. ولی به هر حال این آب تا حدی اسیدی بوده و می‌تواند به بویلر و سایر اجزای آن که با آب حاصل از چگالش در ارتباط هستند آسیب بزند. بدین دلیل مبدل حرارتی از مواد مقاوم در مقابل خوردگی مانند استیل ساخته می‌شود [۱۲]. این امر باعث افزایش قیمت این بویلرها نسبت به انواع غیرچگالشی می‌گردد.

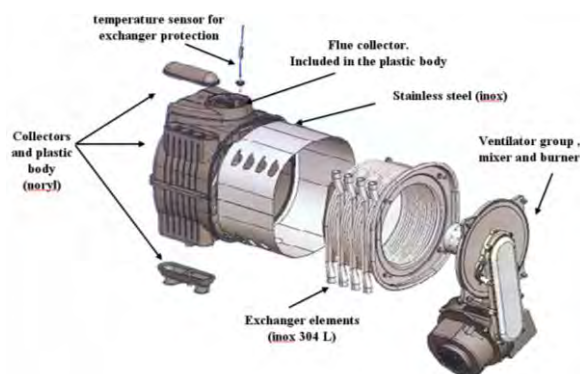
### ۴ ۳ - استفاده از پمپ غرق در آب<sup>۱</sup>

در صورتیکه این بویلرها در قالب پکیج یونیت‌های گرمایشی به کار روند، غالباً از پمپ های غرق در آب برای به جریان در آوردن آب در آنها استفاده می‌شود. در این پمپ‌ها روتور و محفظه داخلی استاتور کاملاً غرق در آب است. انرژی مصرفی در این پمپ‌ها به دو بخش انرژی مکانیکی و اتلافات گرمایی تقسیم می‌گردد. انرژی مکانیکی آنها در مسیر حرکت آب در لوله‌ها به گرما تبدیل می‌شود، پس به هدر نمی‌رود. اتلافات حرارتی موتور نیز که در آب می‌باشد بصورت انرژی گرمایی بوده و باعث گرم شدن آب می‌گردد. در واقع می‌توان گفت راندمان حرارتی این پمپ  $100\%$  است.



شکل ۳: جایگیری مشعل و مبدل حرارتی در داخل بویلر

استفاده از این مشعلها باعث شده است تا راندمان احتراق به بیشینه خود رسیده و در عین حال با تنها  $2,8\%$  هوای اضافه بتوان احتراقی ایده آل را بوجود آورد [۱۳]. کاهش هوای اضافی نیز باعث کاهش دبی گازهای خروجی شده و راندمان احتراق را بالا می‌برد. استفاده از این مشعل‌ها باعث کاهش آلاینده‌هایی چون  $\text{No}_x$  به زیر  $10\text{ppm}$  گردیده و نگرانی را در مورد آلودگی آب حاصل از احتراق نیز تا حد زیادی از بین برده است. در زیر نمایی از قطعات داخلی بویلر آورده شده است [۱۲].

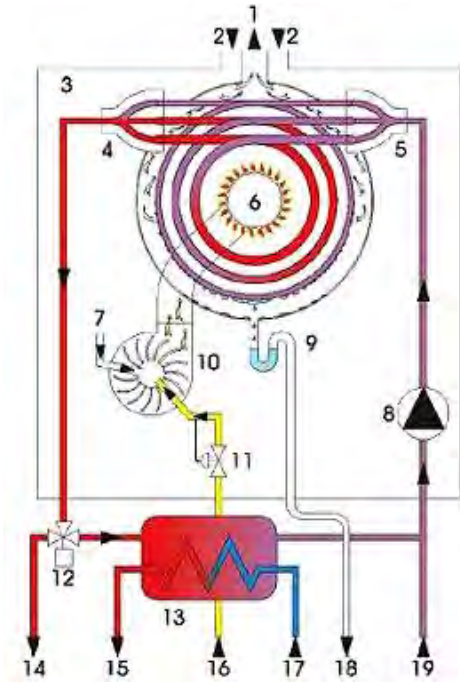


شکل ۴: نمایی از قطعات و چیدمان بویلر چگالشی شرکت Baxi

<sup>1</sup> Wet Rotor Pumps

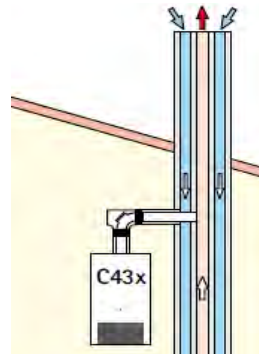
### ۳ ۴ - استفاده از مبدل دو لوله ای<sup>۱</sup> به عنوان

#### دودکش



شکل ۶: نمودار جریان در داخل یک پکیج گرمایشی چگالشی

محصولات احتراق پس از عبور از مرحله چگالش وارد دودکش و یا در واقع مبدل پوسته و لوله می‌شوند. معمولاً شرکت‌های سازنده حداقل طول مجاز آن را ۴ متر معرفی می‌نمایند [۱۲]. در این مبدل دود از لایه داخلی و هوای بیرون از لایه خارجی عبور می‌کند. این امر باعث می‌شود تا مقدار زیادی از انرژی گرمایی محصولات احتراق<sup>۲</sup> بازبازی شود. لازم به ذکر است که چیدمان و طراحی مشعل و مبدل حرارتی به گونه‌ای انجام می‌گیرد که دمای محصولات احتراق در هنگام ورود به دودکش، بالاتر از دمای اشباع بخار آب موجود در آن باشد. پس در داخل دودکش فرآیند چگالش رخ نخواهد داد. ولی باید در مورد نحوه نصب و طول دودکش دقت شود تا در داخل آن چگالش رخ ندهد. در شکل ۵ نمایی از دودکش پکیج گرمایشی شرکت Wolf آورده شده است [۱۶].



شکل ۵: نمایی از دودکش دوجداره پکیج گرمایشی چگالشی شرکت Wolf آلمان

همین طور که در شکل دیده می‌شود در این بویلر از یک مشعل تشعشعی با تغذیه پیش آمیخته<sup>۳</sup> استفاده شده است که اجزای آن از قرار زیر می‌باشد. ۱- خروجی محصولات احتراق از بویلر. ۲- ورودی هوای پیش گرم به محفظه پکیج. ۳- هوای پیش گرم وارد شده به محفظه پکیج. ۴- آب گرم خروجی از مبدل حرارتی. ۵- آب ورودی به مبدل حرارتی. ۶- مخلوط سوخت و هوا در داخل مشعل تشعشعی. ۷- ورودی هوا به دمنده مخلوط کن<sup>۴</sup>. ۸- پمپ غرق در آب. ۹- آب چگالش یافته در خروجی بویلر و ورودی سیفون. ۱۰- مخلوط سوخت و هوا در ورودی مشعل. ۱۱- رگولاتور ورودی گاز شهری (سوخت) به مخلوط کن. ۱۲- شیر سه راهه قطع و وصل کننده مدار آب گرمایشی ساختمان. ۱۳- مبدل حرارتی تولید آب گرم مصرفی. ۱۴- آب گرم گرمایشی ساختمان. ۱۵- آب گرم مصرفی. ۱۶- ورودی سوخت. ۱۷- ورودی آب سرد مصرفی. ۱۸- لوله خروجی سیفون. ۱۹- ورودی آب گرمایشی به پکیج.

### ۳ ۵ - نمودار جریان در بویلر چگالشی

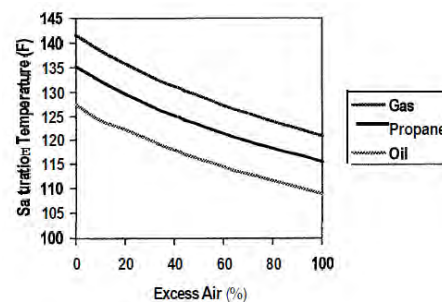
در شکل ۶ نمودار جریان سیال یک بویلر چگالشی که در داخل یک پکیج گرمایشی استفاده شده، آورده شده است [۱۲].

<sup>3</sup> Premix  
<sup>4</sup> Mixer

<sup>1</sup> Shell&Tube  
<sup>2</sup> Sensible Heat

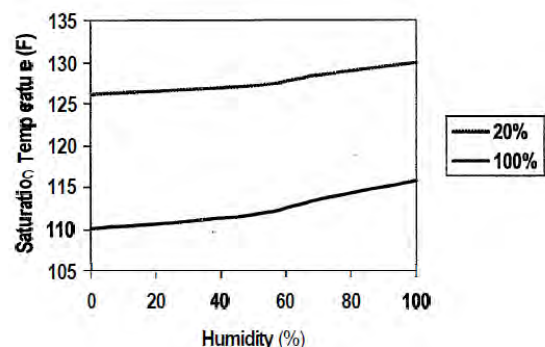
### ۳ ۶ - پارامترهای موثر بر راندمان بویلرهای چگالشی

دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق به مقدار نیتروژن موجود در سوخت، هوای اضافی احتراق و رطوبت هوای محیط وابسته می‌باشد [۴] که در ادامه تاثیرات تمامی این پارامترها بر دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق و در نتیجه بر راندمان بویلر بررسی می‌شود. شکل شماره ۷ دمای اشباع را بر اساس تغییرات هوای اضافی برای سوخت‌های گاز شهری، پروپان و نفت سفید در شرایط هوای محیطی با ۷۰٪ رطوبت و  $70^{\circ}F$  نشان می‌دهد [۴].



شکل ۷: دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق بر اساس تغییرات هوای اضافی برای سوخت‌های مختلف

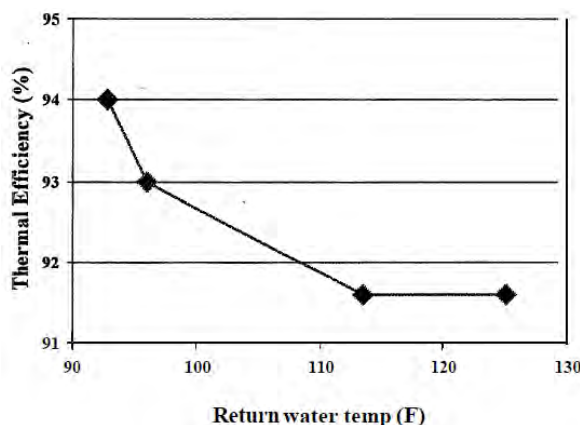
همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد هوای اضافی، دمای اشباع بخار آب کاهش می‌یابد. این کاهش دمای اشباع، به دلیل کم شدن غلظت بخار آب در محصولات احتراق است. همچنین برای سوخت‌های دارای هیدروکربن‌های سنگین‌تر دمای اشباع کمتر است. شکل ۸ نیز تاثیرات رطوبت نسبی را بر روی دمای اشباع بخار آب نشان می‌دهد.



شکل ۸: دمای اشباع بخار آب در محصولات احتراق بر اساس تغییرات رطوبت نسبی هوا در دمای  $70^{\circ}F$  برای پروپان در دو حالت هوای اضافی

در شکل ۸ دیده می‌شود که افزایش مقدار رطوبت نسبی هوا به چه مقدار باعث افزایش دمای اشباع بخار آب موجود در محصولات احتراق می‌شود. هنگامی که رطوبت نسبی هوا افزایش می‌یابد، بویلر باید انرژی بیشتری را برای افزایش دمای حجم ثابتی از هوا صرف کند. فرآیند چگالش که پس از فرآیند احتراق انجام می‌شود، مقدار زیادی از این انرژی را بازیاب می‌نماید. ولی باز هم مقداری از آن، از دودکش خارج می‌شود. در مقایسه با بویلرهای غیرچگالشی، افزایش رطوبت هوا تاثیر بسیار کمتری بر روی راندمان بویلرهای چگالشی دارد. این در حالی است که افزایش رطوبت هوا به مقدار زیادی راندمان بویلرهای غیرچگالشی را کاهش خواهد داد. همچنین دیده می‌شود که با افزایش هوای اضافی دمای اشباع بخار آب کاهش می‌یابد.

در تحقیقاتی که در آزمایشگاه BNL دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا<sup>۱</sup> صورت پذیرفته است، راندمان حرارتی یک بویلر چگالشی با سوخت نفت سفید بررسی شده است [۴]. بر اساس این تحقیق آزمایشگاهی، شکل ۳ نشان دهنده راندمان بویلر برحسب تغییرات دمای آب برگشتی است و افزایش راندمان را با کاهش دمای آب برگشتی نشان می‌دهد.



شکل ۹: راندمان حرارتی سوخت نفت سفید در یک بویلر چگالشی بر اساس دمای آب برگشتی، تحقیق شده در آزمایشگاه BNL

<sup>1</sup> The BNL laboratory of U.S. Department of Energy

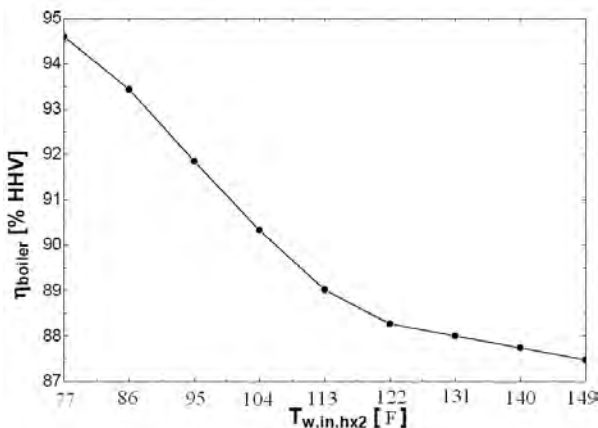


شکل ۱۱: تغییرات راندمان حرارتی یک بویلر چگالشی در حالت پایدار بر اساس تغییرات دمای آب برگشتی

در نهایت در مرجع [۵] مقدار تغییرات راندمان بویلرهای چگالشی برحسب دمای آب برگشتی به روش تحلیل احتراق آورده محاسبه شده که در شکل ۱۲ این نتایج آورده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای آب ورودی به بویلر، راندمان حرارتی بویلر چگالشی کاهش می‌یابد.

جدول ۱: داده‌های عملیاتی برای محاسبه راندمان حرارتی فصلی بویلرهای چگالشی برای شرایط آب و هوایی شهر بوستن<sup>۱</sup> آمریکا

Temperature Bin	Hours in Bin	Avg. Ambient T in Bin	Fraction of Peak Heating Load	Fraction of Annual Heating Load	Supply Water T (F)	Return Water T (F)	Condensing Mode	Boiler Thermal Efficiency
54-68 F	1497	61	0%	0%	86	84	Yes	92.9%
41-54 F	1675	47.5	6%	7%	110	112	Yes	89.2%
28-41 F	2258	35	35%	55%	133	116	-50%	88.1%
14-28 F	627	21	67%	29%	147	129	No	86.8%
0-14 F	124	7.5	99%	8%	160	140	No	86.1%
(13)- 0 F	11	-7.5	134%	1%	160	140	No	86.1%
Average Boiler Thermal Efficiency								87.6%



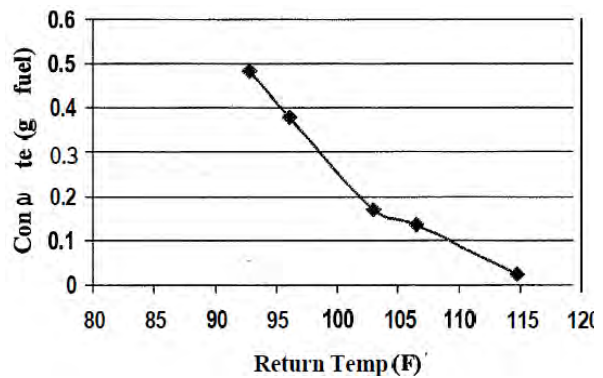
شکل ۱۲: راندمان حرارتی بویلر چگالشی (بر پایه ارزش حرارتی بالا) براساس تغییرات دمای آب ورودی بویلر با سوخت گاز در بار کامل<sup>۲</sup> و ۶٪ O<sub>2</sub> در محصولات احتراق

### ۳-۴ تعاریف تجاری برای راندمان بویلرهای چگالشی

در منابع مختلفی چون [۱]، [۱۴] و [۱۵] از معادله مشهور زیر استفاده شده است تا با استفاده از راندمان بویلر بر اساس سوزاندن سوخت با ارزش حرارتی بالا، معادله‌ای برای

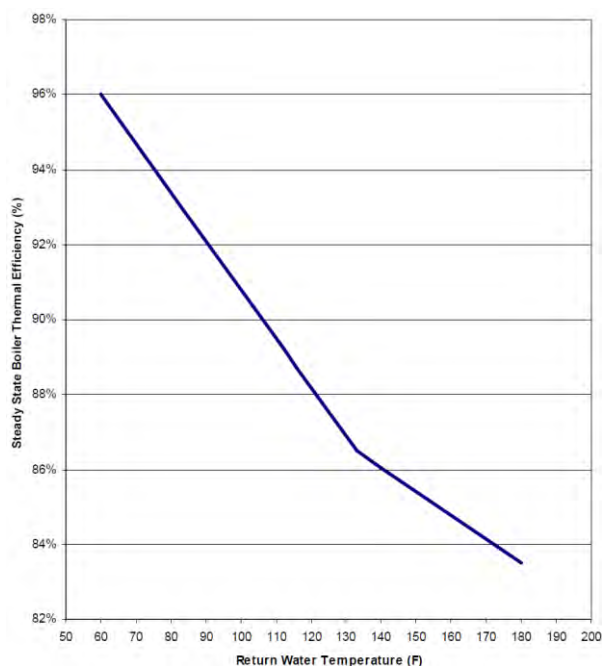
<sup>1</sup> Boston  
<sup>2</sup> Full load

در این تحقیق میزان آب چگالش یافته براساس تغییرات دمای آب برگشتی نیز اندازه گیری شده است. تحقیقات نشان داده است که این بویلر به آب برگشتی با دمای زیر ۱۱۵ ° احتیاج دارد تا شروع به چگالش نماید و این دما ۷ درجه فارنهایت کمتر از نقطه شبنم آب است [۴]. در شکل ۱۰ میزان آب چگالش یافته براساس تغییرات دمای آب برگشتی نشان داده شده است که با افزایش دما میزان آب چگالش یافته کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: میزان آب چگالش یافته براساس دمای آب برگشتی در بویلر چگالشی با سوخت نفت سفید. آزمایش شده در آزمایشگاه BNL

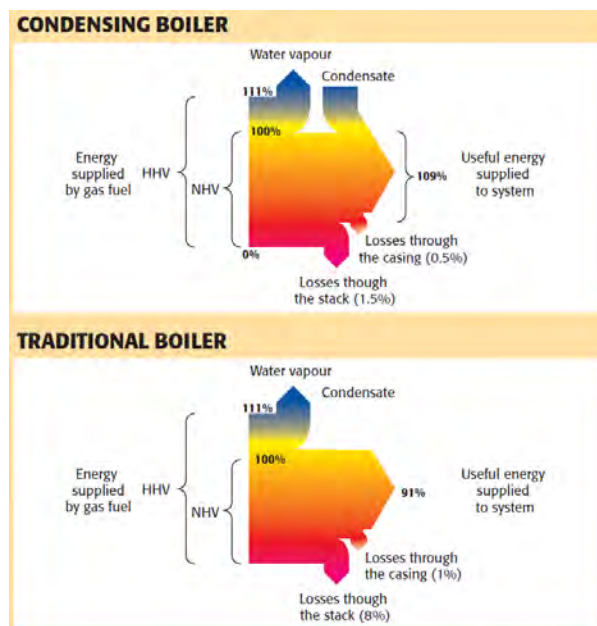
در یک تحقیق سالانه که در سال ۲۰۰۵ انجام شده است [۲] نیز میزان تغییرات راندمان بویلر چگالشی بر حسب تغییرات دمای آب برگشتی بررسی شده است که نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است و مانند شکل ۳ با کاهش دما راندمان افزایش می‌یابد.



representative fuels	$Q_{iv}$ (kJ/kg.m <sup>3</sup> )	$Q_{iv}$ (kJ/kg.m <sup>3</sup> )	$\eta_{lv, max}$ (%)	$\eta_{lv, max}$ (%)
0° diesel oil	45935	42900	107.1	100
100° heavy oil	43439	40600	107.0	100
200° heavy oil	44662	41860	106.7	100
natural gas	40337	36533	110.4	100
coke oven gas	19788	17589	112.5	100
stoke gas	3311	3265	101.4	100
Liquefied petroleum gas	123477	114875	107.5	100
brown coal	13680	12288	111.3	100
anthracitic coal ( II )	25948	25435	102.0	100
poor coal	21662	20901	103.6	100
bituminous coal ( II )	18607	17693	105.2	100

اگر مقدار واقعی  $\eta_{Hv}$  در  $\eta_{lv}$  ضرب شود، راندمان واقعی آن بدست می‌آید. بر این اساس راندمان ارزش حرارتی پایین بویلر، وابسته به، نسبت ارزش حرارتی بالا به ارزش حرارتی پایین سوخت است و هرچه این مقدار بیشتر شود راندمان بیشتر خواهد شد.

در شکل ۱۳ مقایسه‌ای در این مورد بین بویلرها چگالشی و غیرچگالشی برگرفته از کالاتوگ شرکت Ferroli آورده شده است [۱۷].



شکل ۱۳: مقایسه ای بین راندمان بویلرهای چگالشی و غیرچگالشی براساس اتلافات بخار آب

#### ۴ - نتیجه‌گیری

از آنجا که هزینه انتقال و توزیع برق سهم بالایی از هزینه تولید انرژی را دربرمی‌گیرد، (این میزان برای شبکه‌های رایج تا ۵۰۰ دلار برای هر KW می‌رسد و در مسیر انتقال و توزیع الکتریسیته تا ۷ درصد انرژی هدر می‌رود)، لذا استفاده از تولید پراکنده و تولید همزمان هزینه تولید انرژی

راندمان بویلر براساس سوزاندن سوخت با ارزش حرارتی پایین<sup>۱</sup> محاسبه شود.

$$\eta_{Lv} = \frac{G (h_{out} - h_{in})}{B \cdot Q_{lv}} \quad (1)$$

در معادله (۱)  $\eta_{Lv}$  راندمان بویلر را براساس سوخت با ارزش حرارتی پایین نشان می‌دهد. G دبی آب عبوری از بویلر،  $h_{out}$ ،  $h_{in}$  به ترتیب انتالی آب ورودی و خروجی به یا از بویلر، B دبی گاز مصرفی و  $Q_{Lv}$  ارزش حرارتی پایین سوخت می‌باشد.

از معادله (۱) می‌توان معادله (۲) را نیز چنین نوشت.

$$\eta_{Hv} = \frac{G (h_{out} - h_{in})}{B \cdot Q_{Hv}} \quad (2)$$

که در آن  $\eta_{Hv}$  راندمان بویلر را در هنگامی که از سوخت با ارزش حرارتی بالا<sup>۲</sup> استفاده می‌کند و  $Q_{Hv}$  ارزش حرارتی بالای سوخت و سایر پارامترها مانند معادله (۱) می‌باشند. از تقسیم این دو معادله بر هم نتیجه می‌شود.

$$\eta_{Lv} = \frac{Q_{Hv}}{Q_{Lv}} \eta_{Hv} \quad (3)$$

در صورتیکه بویلر آدیباتیک فرض شود، برابر ۱۰۰٪ خواهد شد و در این صورت:

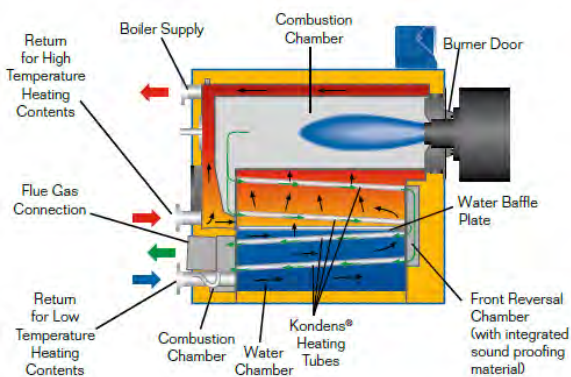
$$\eta_{Lv, max} = \frac{Q_{Hv}}{Q_{Lv}} \quad (4)$$

$\eta_{Lv, max}$  همواره بزرگتر از ۱ است. در حقیقت این تعریف به معنای این است که راندمان بویلرهای غیرچگالشی ۱۰۰٪ در نظر گرفته شود و براساس آن، نسبت راندمان بویلرهای چگالشی به راندمان بویلرهای غیرچگالشی نوشته شود که البته این مقدار بزرگتر از ۱ خواهد بود. این میزان برای گاز شهری در بیشینه خود به ۱۱۲٫۵٪ می‌رسد. پس  $\eta_{Lv}$  از قرار زیر است.

جدول ۲: حداکثر مقدار راندمان حرارتی بویلر چگالشی براساس سوخت با ارزش حرارتی پایین

<sup>1</sup> LHV (Low Heat Value)

<sup>2</sup> HHV (High Heat Value)



شکل ۱۴: مشعل شعله آبی با سوخت گازوئیل در بویلر چگالشی

این مشعل دوده تولید نمی‌کند و در نتیجه می‌توان بدون نگرانی از سمی شدن آب حاصل از چگالش، این فرآیند را انجام داد [۱۸].

در هنگام انتخاب بویلرهای چگالشی باید به استانداردهای نصب و راه اندازی آنان توجه نمود. رعایت حداقل طول دودکش، زوایای دودکش، انتخاب درست توان دستگاه (به منظور پایین نگه داشتن دمای آب برگشتی و همچنین احتراق مناسب)، طراحی سیستم هیدرونیک مناسب و ... تا حد زیادی در راندمان بویلر موثر می‌باشند.

در جدول زیر آنالیز سود مالی بین B<sup>1</sup>CHP، بویلر غیرچگالشی و بویلر چگالشی برای ساختمان اداره فدرال شهر سیاکس آمریکا<sup>۲</sup> آورده شده است [۳].

System Type	Installed Cost of System	Annual Energy Consumption (Therm Eq.)	Energy Cost	Maintenance Cost	Net Present Cost	Net Present Cost Compared to Conventional Gas Boiler
Condensing Gas Boiler	\$154,791	48,465	\$350,969	\$75,131	\$580,891	(\$38,028)
Conventional Gas Boiler	\$130,204	60,639	\$439,129	\$49,587	\$618,920	-
BCHP	\$463,950	254,648	(\$507,884)	\$702,477	\$658,543	\$39,623

\*Results are based on 20-year system life

شکل ۱۴: نتایج آنالیز مالی برای ساختمان اداره فدرال شهر سیوکس آمریکا

در پایان باید گفت که CHP ها و بویلرهای چگالشی می‌توانند مکمل‌های مناسبی برای تولید انرژی در کشور باشند. ولی باید برای رسیدن به راندمان مناسب، در انتخاب

الکتریکی را به مقدار زیادی کاهش و بازده را افزایش می‌دهد. استفاده از تولید همزمان در ساختمان‌های تجاری و شهرکهای صنعتی نیز علاوه بر کاهش مصرف سوخت و بهینه سازی انرژی، در زمانهای پیک مصرف نیز بسیار مفید است. بنابراین در صورت تصمیم گیری درست از میان انتخاب‌های موجود به کارگیری سیستم تولید همزمان بسیار مقرون به صرفه می‌باشد.

با این وجود باید توجه داشت که در کلان شهرها استفاده از CHPها با وجود افزایش راندمان، باعث تشدید آلودگی هوا خواهد شد. لذا در این موارد بهتر است انرژی در فاصله دورتری از شهر تولید شود تا باعث ایجاد آلودگی در شهر نگردد. این امر کاربردهای CHP را کاهش داده و آن را محدود به مکان‌های دور از شهر می‌نماید. تصور اضافه شدن دود تولیدی CHPها (دود تولیدی به‌ازای برق مصرفی) در شهرهایی چون تهران به آلودگی هوای موجود در این شهرها بسیار نگران کننده است. به همین دلیل باید به فکر سیستمی نوین برای تولید انرژی گرمایی در مکان‌هایی که CHP قابلیت استفاده را ندارد، بود. این سیستم می‌تواند یک بویلر چگالشی با خصوصیتی که ذکر شد باشد. از عمر بویلرهای چگالشی زمان زیادی نمی‌گذرد ولی با این وجود در کشورهای غربی از این بویلرها بسیار استفاده می‌شود. این در حالی است که در ایران هیچ شرکتی اقدام به تولید این گونه بویلرها ننموده است و تنها چند شرکت محدود اخیراً واردات این محصول را شروع کرده اند.

استفاده از بویلرهای چگالشی در منازل مسکونی و در ادارات تا حد زیادی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در کشور کمک نماید. قیمت زیاد این محصول رغبت خریداران را کم می‌نماید ولی در صورت توجیه اقتصادی مناسب در مورد بازگشت سرمایه در دراز مدت، می‌توان خریداران را به استفاده از این نوع بویلرها ترغیب نمود. می‌توان بر روی این بویلرها مشعل شعله آبی گازوئیل سوز را نیز نصب نمود. تصویر این مشعل در زیر آورده شده است.

<sup>1</sup> Building Combined Heat and Power System

<sup>2</sup> Federal Office Building, Sioux City

آنها بسیار دقت شود.

## مراجع

- [۱۱] رضا هاشمی، سید محمد تقی بطحائی، "تعیین ظرفیت بهینه اجزا نیروگاه های کوچک پراکنده CHCP با مدل برنامه ریزی خطی TOSCS در ساختمان های مسکونی، تجاری، اداری."
- [12] Catalog, 2009. Baxi wall-mounted condensing boilers. On the WWW, at <http://www.Baxi.com>, LUNA HT\_GB.pdf.
- [13] Catalog, 2002. Weishaupt WG30 and WG40 gas burners LN (LowNOx) version. On the WWW, at <http://www.weishaupt-corp.com>.
- [14] Thermal Performance Test Code for Industrial Boilers, GB/T10186-2003, China.
- [15] W. A. Zhao, S. E. Hui. (2000) "Boilers Burning Gas and Oil", published by Xian Jiaotong University Press.
- [16] Catalog, 2006. Wolf ComfortLine Gas fired condensing boilers. On the WWW, at <http://www.wolf-heiztechnik.de>, June, GasBrennwertgeraete\_GB\_4800437\_1008.pdf.
- [17] Catalog, 2008. Ferroli Econcept A 35-250kW premix gas-fired condensing boilers. On the WWW, at <http://www.ferroli.co.uk>, November, Econcept\_Brochure.pdf.
- [18] Catalog, 2007. Installation and Service Instructions Logatop BE 1.3 GB and 2.3 GB. On the WWW, at <http://www.buderus.us>.
- [1] X.H. Chen (2001) "Application and Performance of Condensing Boiler", Heating Ventilation and Air Conditioning, Vol. 28, 38-40.
- [2] Cooke, J., 2005. Condensing Boiler Technology. On the WWW, at <http://www.pugetsoundashrae.org>, November AshraeCondensingtechnology.pdf.
- [3] Booklet, A., 2001. A Market Assessment for Condensing Boilers in Commercial Heating Applications. On the WWW, at <http://www.cce1.org>, October, Boiler\_assess.pdf.
- [4] A. Butcher, Th., 2004. Hydronic Baseboard Thermal Distribution System with Outdoor Reset Control to Enable the Use of a Condensing Boiler. On the WWW, at <http://www.bnl.gov>, October, Condensing Boiler and Baseboard.pdf.
- [5] Makaïre, D., Ngendakumana, Ph., 2010. "Thermal performances of condensing boilers". 32nd TLM - IEA ENERGY CONSERVATION AND EMISSIONS REDUCTION IN COMBUSTION, 1(5), July, pp. 1-9.
- [۶] کاوسی نژاد، امیدرضا، محمدی اردهالی، مرتضی، ۱۳۸۸. "مدیریت مصرف انرژی و به کارگیری سیستم تولید همزمان در بیمارستان ها و اثرات زیست محیطی آن"، ستبران، ۵۳، ۵۴.
- [۷] محبوبه زمانی نژاد، زهره سلیمانیان، وهاب مکاریزاده، امید شاکری، ۱۳۸۹. "امکان سنجی بکارگیری تولید همزمان برق و حرارت در صنایع کانی غیر فلزی"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق،
- [۸] دفتر بهبود بهره وری و اقتصاد برق و انرژی، وزارت نیرو، "راهنمای جامع تولید همزمان برق و حرارت، ۱۳۸۸."
- [۹] چیت چیان، حمید، وزارت نیرو، "کاربرد سیستم های تولید ترکیبی برق و حرارت."
- [۱۰] اسماعیل رضانی آقداش، جواد مهدوی، شرکت مدیریت نیروگاه های گازی خراسان، ۱۳۸۸. "مطالعه و بررسی تولید همزمان در نیروگاه سیکل ترکیبی شریعتی مشهد"، هفتمین همایش ملی انرژی