

بررسی راندمان واقعی پکیج چگالشی در سیستم‌های گرمایشی متداول

علی شکرگزار عباسی*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، ایران

چکیده

گاهی به علت اهمیت بالای کاهش مصرف انرژی در دنیای امروز، اشتباهات بزرگ راهبردی رخ می‌دهد بنابراین باید کاهش مصرف انرژی را از ادعاهای دروغین تفکیک کرد. در این مقاله ادعای مهم راندمان بالای ۹۸٪ در دستگاه‌های ایجاد گرمای آپارتمانی میعانی موسوم به پکیج چگالشی بطور علمی با اشارات تجربی اندک موجود در این زمینه ارزیابی شده است. نتیجه بررسی نشان می‌دهد که دست کم در کشورهایی که در آنها برق توسط گاز طبیعی تولید می‌شود با احتساب شرایط عملی کار سیستم در تاسیسات گرمایشی، نه تنها پکیج چگالشی موجب افزایش بازده نمی‌شود بلکه استفاده از برق بیشتر برای دمنده خروجی محصولات احتراق در این پکیج‌ها، بازده را کاهش نیز می‌دهد. در حقیقت استفاده از فن و انرژی با ارزش برق برای بیرون راندن گازهای حاصل از احتراق موجب کاهش بازده می‌شود. مضافاً این‌که مشکلات پیش آمده ناشی از تقطیر بخار آب در مسیر خروجی گازهای حاصل از احتراق، باعث خرابی دیوار اطراف دودکش و افزایش آلودگی هوا از نوع ذرات ریز اسید مایع معلق در محیط زیست می‌شود. همچنین خاطر نشان شده است که حتی برای کار سیستم در شرایط خاصی مانند ذوب کردن یخ نیز راندمان حرارتی هیپچگاہ بیش از ۹۸٪ نیست.

واژه‌های کلیدی: پکیج چگالشی، میعان، دمای شعله آدیاباتیک، راندمان، دمای نقطه شبنم، سرمایه‌گذاری اولیه.

Investigation of Real Efficiency of Condensing Boiler in Conventional Heating Systems

A. Shokrgozar abbasi

Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Iran.

Abstract

Due to the importance of reducing energy consumption in today's world, the energy consumption should be separated from false claims. In this paper, higher than 98% efficiency claim in a "Condensation Package" is scientifically evaluated with few empirical indications in this field. The results show that, at least in countries where electricity is produced by natural gas, considering the actual operating conditions of the heating systems, not only the condensation package does not increase the efficiency, but the use of more electricity for the exhaust fan of combustion products in these packages also reduces efficiency. In fact, using electricity energy for exhausting the combustion product gases is the reason of efficiency decreasing. In addition, the problems arising from the distillation of water in the chimney flue perimeter wall of the building damage and environmental degradation as well and increase the air pollution. It is also noted that even for system operation under certain conditions, such as melting ice, thermal efficiency is never more than 98%.

Keywords: Condensing Boiler, Condensation, Adiabatic Flame Temperature, Efficiency, Dew Point Temperature, Initial Investment.

۱- مقدمه

استفاده صحیح از بویلرهای گرمایشی را بیان کنند که امروزه بطور خاص در کشورمان تحت عنوان "پکیج چگالشی" کاربرد دارد. جونز [1] در مقاله‌ای تحت عنوان "اصول طراحی دستگاه بویلر میعانی" در بررسی این بویلرها چنین بیان می‌کند: اولین قاعده کلی، دمای آب ورودی به بویلر است که برای تحقق دستیابی به راندمان تبلیغاتی بویلرهای چگالشی (بر اساس داده‌های عملکردی^۱ AFUE) ضروری است. استاندارد ANSI^۲ (Z21.13) آزمایش عملکردی دمای آب ورودی به بویلر را 27°C (80°F) و افزایش دمای آب در بویلر را 37°C (100°F) مشخص می‌کند تا حصول به راندمان تبلیغاتی^۳ امکان پذیر باشد. یک بویلر میعانی مانند یک لامپ فلورسنت نیست،

اعمال فن‌آوری‌های جدید بهینه سازی مصرف در دنیای امروز متعدد، پیچیده و دارای کاربردهای خاص خود می‌باشند که چنانچه در مکان صحیح و مورد نظر خود بکار گرفته نشوند نه تنها موجب بهینه‌سازی نخواهند شد چه بسا سبب افزایش مصرف انرژی نیز بشوند. به عنوان مثالی ساده کولرهای گازی اسپلیت دارای کمپرسور تراکمی با انواع مدل‌های رفت و برگشتی، اسکرال و اسکرو هستند که هر کدام از این مدل‌ها برای هد متفاوتی طراحی شده‌اند. بسته به طول مسیر و اختلاف ارتفاع بین محل نصب چگالنده و بخارکن، هد مورد نیاز تعیین می‌شود که با انتخاب صحیح مدل دستگاه، راندمان تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما گاهی متأسفانه حتی در کاربرد انواع این کمپرسورها دقت لازم به عمل نمی‌آید بطوری‌که با انتخاب ناصحیح مدل کمپرسور، برای بسیاری از موارد نه تنها راندمان افزایش نیافته که کاهش نیز می‌یابد و این کاهش راندمان موجب عدم جواب‌گویی سرمایش مورد نیاز نیز شده و حاصل چیزی جز اتلاف انرژی با ارزش نمی‌باشد.

در مورد دستگاه پکیج چگالشی نیز مشکل مشابهی وجود دارد. در ابتدا به نکاتی چند از مقالات موجود را که بصورت غیر محاسباتی ارقامی را ذکر می‌کنند اشاره می‌شود. این مقالات سعی دارند شرایط

¹ Annual Fuel Utilization Efficiency

نوعی استاندارد است که بر حسب نوع سوخت و کوره، گستره‌ی حداکثر راندمان را برای میزان بهره‌وری موثر کوره فهرست می‌نماید.

² American National Standards Institute

^۳ برخلاف ادعاهای مطرح در ایران که راندمان را تا ۱۱۰٪ نیز اعلام می‌کنند، سازندگان واقعی این بویلرها (یا پکیج‌ها) هیپچگاہ راندمان بالاتر از ۹۸٪ ادعا نکرده‌اند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: shokrgozar.ali@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۴

نمی‌توان آن‌را به سادگی برای یک سیستم متعارف استفاده کرد و انتظار صرفه‌جویی در انرژی را داشت. تجربه در طی سال‌ها بررسی بویلرهای چگالشی نصب شده در ساخت و سازهای برون‌سپاری نشان می‌دهد که در ۹۰٪ موارد این بویلرهای چگالشی در محدوده‌ای که میعان ایجاد شود، کار نمی‌کنند. در عمل نیز طراحی تجارتي برای بویلرهای متعارف (غیر چگالشی) ایجاب می‌کند که دمای آب برگشتی به بویلر همواره از 60°C (140°F) پایین‌تر نیاید تا نه در بویلر و نه در دودکش آن میعانی صورت نپذیرد چرا که در این مدل‌ها، میعان باعث خوردگی می‌شود و برعکس طراحی سامانه بویلرهای چگالشی بر دمای آب برگشتی 27°C (80°F) متمرکز می‌شود تا به راندمان حداکثر نزدیک شود. اما نصب بویلرهای چگالشی به تنهایی نمی‌تواند دستیابی به صرفه‌جویی در انرژی مورد انتظار را تضمین نماید. دمای آب ورودی 55°C (131°F) برای شروع میعان داخل دودکش ضروری است اما حداکثر راندمان همانطور که گفته شد در 27°C (80°F) اتفاق می‌افتد که البته این عدد بسیار جزئی به ارتفاع از سطح دریا وابسته است.

به طور خلاصه‌تر اما با همان اعداد و ارقام در مرجع [2] بر نکاتی چند تأکید دارد: دمای نقطه شبنم محصولات احتراق گاز طبیعی حدود 54.4°C (130°F) است. اگر دما بیش از این مقدار باشد حتی اگر شعله‌ی بویلر مازوله^۱ نیز باشد، بنا بر قوانین ترمودینامیکی هیچگاه چگالش نخواهیم داشت. مضافاً این‌که، بالاترین راندمان قابل حصول در بویلرهای غیر چگالشی (متعارف) حدود ۸۷٪ است که با این راندمان در بیشتر از ۹۰٪ موارد، در قسمت داخلی دودکش چگالش اتفاق می‌افتد. فقط ترکیب هم‌زمان دمای آب برگشتی خیلی سرد به بویلر به همراه قابلیت مازوله بودن شعله آن باعث تقطیر داخل محفظه‌ی احتراق می‌شود. در بهترین شرایط، راندمان بویلر میعانی حداکثر به ۹۵٪ می‌رسد. بنابراین انتخاب اینکه بویلر میعانی می‌تواند موجب صرفه‌جویی انرژی شود یا نه، بسیار مهم به نظر می‌رسد. در هنگام تنظیم دمای آب برگشتی گرمایشی از توزیع‌کننده‌های گرما به بویلر به میزان 60°C (140°F) شاید بعلت راندمان بالاتر بویلر چگالشی، راندمان اندکی بالاتر باشد اما برای برگشت سرمایه اولیه خرید بویلر چگالشی سال‌های زیادی نیاز است. در هنگام تنظیم دمای آب برگشتی به بویلر به میزان 49°C (120°F) اگر روزهای با دمای معتدل هر فصل در نظر گرفته شود شاید بتوان با یک سیستم ترکیبی از بویلرهای چگالشی و متعارف سرمایه‌ی هزینه شده را به تدریج بازگرداند. برای سیستم دماهای پایین 37°C (100°F) یا حتی پایین‌تر 27°C (80°F) که مثلاً برای ذوب یخ یا برای گرمایش حلقه‌ی پمپ‌های گرمایشی بکار می‌رود، فرصت استفاده‌ی پی‌درپی از چگالش فراهم می‌گردد و در این حالت بویلر چگالشی مفید خواهد بود.

صباح و همکاران [3] بررسی آزمایشگاهی پکیج‌های چگالشی را در سال ۱۳۹۰ منتشر کردند. در این مقاله نتایجی شبیه به نتایج منحنی "شکل ۲" گزارش شده و نتایج با مرجع [4] مقایسه شده است. کوف [5] در سال ۲۰۱۳ با انتشار مقاله‌ای جنس فلزات بکار

رفته در کوره پکیج چگالشی جهت جلوگیری از زنگ‌زدگی را بررسی کرد در حالی‌که در این بررسی به راندمان حداکثری پکیج توجه داشت. در اینجا ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که کلمه چگالش بیشتر به معنی "تبدیل گاز به جامد" مورد استفاده قرار می‌گیرد مثلاً بعنوان مخالف کلمه تصعید. در عین حال در "واژه‌های مصوب فرهنگستان" چگالش به معنی "تبدیل گاز به مایع یا جامد" بکار رفته است. پس در اینجا منظور از چگالش در پکیج چگالشی تبدیل بخار آب به مایع است. همچنین برای سهولت، از این پس گاهی گازهای ناشی از احتراق "دود" نامیده می‌شوند که با کلمه دودکش نیز سازگاری خاصی دارد.

به علاوه این‌که استفاده از کلمه بویلر برای دیگ موجود در دستگاه پکیج چگالشی در تأسیسات ایران نامأنوس است و برعکس ذهن شنونده دست اندر کار تأسیسات با کلمه پکیج به خوبی مأنوس می‌باشد بنابراین در مقاله حاضر گاهی از کلمه پکیج به جای بویلر استفاده می‌شود. همچنین برای پکیج‌های "غیر چگالشی" که فاقد فن برای خروج دود هستند، از کلمه "متعارف" استفاده خواهد شد.

در این مقاله سعی شده است تحلیلی دقیق و علمی از کاهش راندمان ناشی از نیروی برق مورد نیاز برای ایجاد نیروی رانش توسط فن از یک‌سو و افزایش راندمان گرمایی حاصل از مسیر پراشت‌تر گازهای حاصل از احتراق در این پکیج‌ها از سوی دیگر بعمل آمده و با مقایسه بین این دو میزان تغییر واقعی راندمان مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تخریب زیست محیطی ناشی از این تکنولوژی و اهمیت آن نیز در این مقاله بررسی خواهد شد.

ذکر این نکته ضروری است که در محاسبات این مقاله هر گاه چند گزینه برای محاسبات پیش رو باشد، محاسباتی ادامه خواهد یافت که تا حد ممکن شرایط بهتر را به نفع اثبات صحت ادعای تبلیغاتی راندمان بالای پکیج چگالشی مهیا نماید مگر آنکه امکان انتخاب منطقی، سایر گزینه‌ها را رد کند و یا چند گزینه محتمل هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد.

۲- بررسی نحوه عمل و راندمان پکیج چگالشی

گاه در محاسبه مقدار کمینه‌ی تولید انترپوی یا کمینه‌ی نابودی انرژی در سامانه‌های مهندسی اشتباهات فاحشی رخ می‌دهد. این اشتباهات گاهی آن‌چنان موزیانه وارد محاسبات می‌شوند که اصلاً به آن اهمیت داده نمی‌شود. در مقوله‌ی محاسبه‌ی راندمان پکیج چگالشی، محاسبه توان مصرف شده توسط فن الکتریکی نادیده انگاشته می‌شود در صورتی که وجود فن بعلت تبدیل همرفت طبیعی به همرفت اجباری (به علت کاهش دمای محصولات احتراق) ضروری می‌باشد. به بیان دیگر در انرژی با انرژی پایین محصولات احتراق که سبب همرفت طبیعی می‌شود به زحمت صرفه‌جویی می‌شود و حال آنکه در عوض انرژی با انرژی بالای الکتریکی را از بین می‌بریم. این استفاده‌ی نابخردانه موجب اتلاف منابع با ارزش سوخت‌های دارای انرژی بالا می‌شود. باید توجه داشت که در پکیج متعارف مسیر عبور دود، مسیری

^۱ شعله مازوله یعنی تغییرات تدریجی هوشمند شعله به میزان مورد نیاز مصرف.

مورد نیاز ملکول‌های سوخت باشند، میزان هوای مورد نیاز را هوای استوکیومتری می‌نامند. پس هوای استوکیومتری فقط در حالت سوختن ایده‌آل قابل تصور است و چنانچه این مقدار هوا را برای سوختن انتخاب کنیم محصولات احتراق شامل هیدروکربن‌های نسوخته خواهد بود. محاسبات برای هردو درصد هوای اضافی ادامه می‌یابند اما فقط برای ۱۲۵٪ هوای استوکیومتری نمایش داده می‌شوند. معادلات (۵) الی (۸) وزن ملکولی هر جزء شرکت کننده در احتراق را محاسبه می‌نمایند:

$$\text{Methan:} \\ M_{\text{Total}} = 1 \times 44_{CO_2} + 2 \times 18_{H_2O} + 0.5 \times 32_{O_2} + 7.52 \times 1.25 \times 28_{N_2} = 359.2 \quad (5)$$

$$\text{Ethane:} \\ M_{\text{Total}} = 2 \times 44_{CO_2} + 3 \times 18_{H_2O} + 0.875 \times 32_{O_2} + 13.16 \times 1.25 \times 28_{N_2} = 630.06 \quad (6)$$

$$\text{Propane:} \\ M_{\text{Total}} = 3 \times 44_{CO_2} + 4 \times 18_{H_2O} + 1.25 \times 32_{O_2} + 18.80 \times 1.25 \times 28_{N_2} = 902.00 \quad (7)$$

$$\text{Butane:} \\ M_{\text{Total}} = 4 \times 44_{CO_2} + 5 \times 18_{H_2O} + 1.625 \times 32_{O_2} + 24.44 \times 1.25 \times 28_{N_2} = 1173.40 \quad (8)$$

همچنین وزن و وزن ملکولی احتراق گاز شهری با توجه به درصد شرکت هر جزء به ترتیب توسط معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

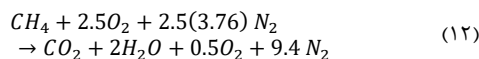
$$m_{\text{Total}}: 359.2 \times 0.85 + 630.06 \times 0.1 + 902.0 \times 0.03 + 1173.4 \times 0.02 = 418.9 \text{ kg} \quad (9)$$

$$M_{\text{Total}}: 16_{CH_4} \times 0.85 + 30_{C_2H_6} \times 0.1 + 44_{C_3H_8} \times 0.03 + 58_{C_4H_{10}} \times 0.02 = 19.08 \text{ kg} \quad (10)$$

یعنی حاصل احتراق هر ۱۹.۰۸ Kg گاز طبیعی، ۴۱۸.۹ Kg محصولات احتراق خواهد بود که اگر این مقدار بر حسب متر مکعب گاز طبیعی بیان شود خواهد شد (۱۱):

$$\rho_{N.G.} = 0.592 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \gamma_{N.G.} = 0.7684 \\ 1 \text{ m}^3 (N.G.): 0.7684 \text{ kg} \times \frac{418.91}{19.08} = 21.955 \text{ kg} \quad (11)$$

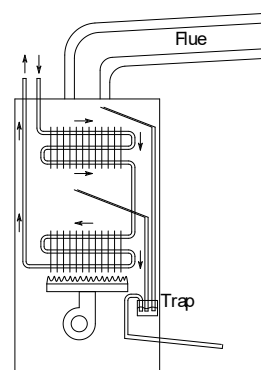
پس بطور خلاصه، به ازای سوختن هر متر مکعب گاز طبیعی، وزن محصولات احتراق ۲۱.۹۵۵ kg خواهد شد. با توجه به تاثیر اندک سایر گازها و جهت ساده شدن معادلات، برای محاسبه دمای شعله آدیاباتیک گاز متان که ۸۵٪ از گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد با معادلات (۱۲) الی (۱۶) در نظر گرفته و طبق روش کلاسیک خواهیم داشت:



$$H_R = -74873 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \quad (13)$$

$$H_P = (-393522 + \Delta h)_{CO_2} + 2 \times (-241827 + \Delta h)_{H_2O} + 0.5 \times \Delta h_{O_2} \quad (14)$$

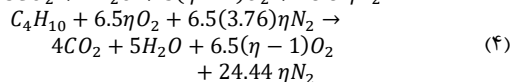
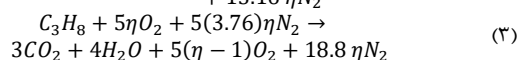
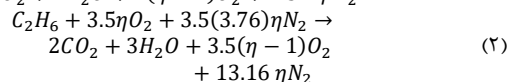
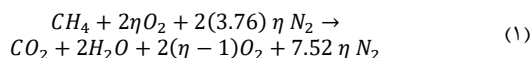
کم‌افت^۱ و تا حد ممکن کوتاه انتخاب می‌شود تا این گازها به سهولت و بدون نیاز به نیروی اجباری فن بتوانند با استفاده از نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و بوسيله همرفت طبیعی مسیر دودکش را نیز طی کرده و به هوای آزاد راه یابند. اما پکیج چگالشی، با گذر دادن دود از مسیرهای طولانی‌تر مبادله‌کن دولوله سعی در افزایش بازده گرمایی دارد که البته این امر سبب افزایش افت فشار مسیر گازهای حاصل از احتراق شده و نیاز به نیروی رانش اجباری در این پکیج‌ها را الزامی می‌نماید (شکل ۱). علاوه بر این کاهش دمای دود، مکش طبیعی دودکش را کاسته و برای خروج گاز از دودکش نیز به نیروی رانش اجباری نیاز می‌باشد چرا که دمای پایین گازها موجب کاهش نیروی شناوری طبیعی برای انتقال آن‌ها به خارج می‌شود. از طرف دیگر گازهای خروجی آنقدر سرد شده‌اند که تولید اسید کرده و هوا را دچار آلودگی اسیدی نمایند.



شکل ۱- طرح‌واره مسیر محصولات احتراق در پکیج چگالشی

۳- روابط حاکم و محاسبات بازده گرمایی

گاز طبیعی ترکیبی است از گازهای متان (۸۵٪)، اتان (۱۰٪)، پروپان (۳٪) و بوتان (۲٪) که طبق روابط (۱) الی (۴) می‌توان احتراق آن را فرموله کرد:

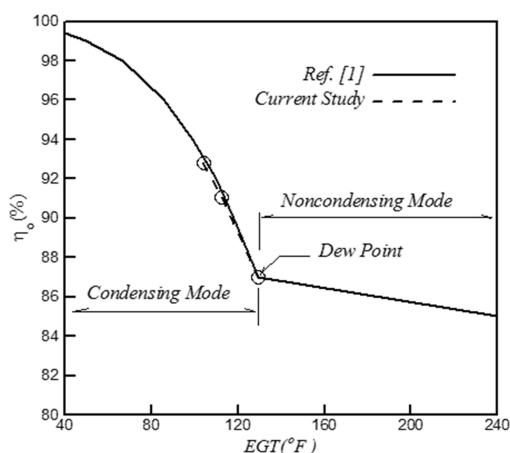


که در آن η ، برای هوای استوکیومتری برابر ۱ و مثلاً برای ۱۲۵٪ و ۱۱۰٪ هوای استوکیومتری به ترتیب برابر ۱/۲۵ و ۱/۱ است. در حقیقت وقتی درست تعداد مولکول‌های اکسیژن دقیقاً همان مقدار

^۱ کم‌افت به این دلیل که سایز قطر دودکش تا حد امکان که به سرعت خروج دود لطمه‌ای وارد نکند، افزایش می‌یابد.

^۲ Adiabatic Flame Temperature

تنهایی می‌تواند باعث پایین بودن راندمان گرمایی و به تبع آن بالا بدون دمای دود باشد مگر این‌که افت فشار درون محفظه بالا باشد چرا که افزایش سطح مبدل در فضایی کوچک باعث افزایش افت فشار می‌شود و این یعنی مصرف بیشتر انرژی برق که یک انرژی بسیار گران‌تری نسبت به گاز طبیعی است.



شکل ۲- منحنی راندمان بویلرهای چگالشی برای گاز طبیعی

معادلات (۲۴) الی (۲۸) تعداد مول‌های موجود در محصولات احتراق را مشخص می‌نمایند تا فشار جزئی بخار آب بدست آید:

$$\text{Methane: } n_{\text{Total}} = 1_{\text{CO}_2} + 2_{\text{H}_2\text{O}} + 0.5_{\text{O}_2} + 9.4_{\text{N}_2} = 12.9 \quad (24)$$

$$\text{Ethane: } n_{\text{Total}} = 2_{\text{CO}_2} + 3_{\text{H}_2\text{O}} + 0.875_{\text{O}_2} + 16.45_{\text{N}_2} = 22.93 \quad (25)$$

$$\text{Propane: } n_{\text{Total}} = 3_{\text{CO}_2} + 4_{\text{H}_2\text{O}} + 1.25_{\text{O}_2} + 23.5_{\text{N}_2} = 31.75 \quad (26)$$

$$\text{Butane: } n_{\text{Total}} = 4_{\text{CO}_2} + 5_{\text{H}_2\text{O}} + 1.625_{\text{O}_2} + 30.55_{\text{N}_2} = 41.18 \quad (27)$$

$$n_{\text{Total}} = 12.9 \times 0.85 + 22.93 \times 0.1 + 31.75 \times 0.03 + 41.18 \times 0.02 = 14.97 \quad (28)$$

که در آن n_{Total} تعداد کل ملکول‌ها می‌باشد. اگر دمای محصولات احتراق 40°C فرض شود ($P_g = 7.384 \text{ Kpa}$)، که در این حالت باید دمای آب خروجی قطعاً زیر 40°C باشد، معادلات (۲۹) الی (۳۲):

$$\frac{P_g}{P_{\text{Total}}} = \frac{n_{g(\text{H}_2\text{O})}}{n_{\text{Total}}} \rightarrow \frac{7.384}{100} = \frac{n_{g(\text{H}_2\text{O})}}{14.97 - 0.97} \quad (29)$$

$$P_{g(\text{H}_2\text{O})} = 1.034 \rightarrow \text{سعی و خطا} \quad (30)$$

$$n_{l(\text{H}_2\text{O})} = (2 - 1.034) = 0.966 \quad (31)$$

$$\frac{M_{l(\text{H}_2\text{O})}}{M_{\text{Total}}} = \frac{0.966 \times 18_{\text{H}_2\text{O}}}{418.91 - 0.966} = 0.0416 \quad (32)$$

نشان می‌دهند که حتی اگر دمای غیر ممکن 40°C برای محصولات احتراق در نظر گرفته شود آنگاه نسبت جرم آب تقطیر شده به کل جرم

^۱ این دما برای گرمایش در سیستم‌های گرمایش متعارف در کشورمان غیرممکن است یا برقراری این شرط بسیار غیر محتمل است.

$$+9.4 \times \Delta h_{\text{N}_2} = -74873 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

For $T_p = 1800^\circ\text{C}$:

$$H_p = (-393522 + 79442)_{\text{CO}_2} + 2 \times (-241827 + 62609)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.5 \times (51689)_{\text{O}_2} + 9.4 \times (48982)_{\text{N}_2} = -186241 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \quad (15)$$

For $T_p = 2000^\circ\text{C}$:

$$H_p = (-393522 + 91450)_{\text{CO}_2} + 2 \times (-241827 + 72689)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.5 \times (59199)_{\text{O}_2} + 9.4 \times (56141)_{\text{N}_2} = -83023 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \quad (16)$$

و در نتیجه توسط برون‌یابی بدست می‌آید (۱۷):

$$T_p = 2010 \text{ K} \rightarrow T_p = 1737^\circ\text{C} \quad (17)$$

اگر فرض شود که محصولات احتراق به شکل کامل بسوزند (این فرض باعث افزایش مقدار آب در محصولات احتراق می‌گردد و نه کاهش آن)، معادلات (۱۸) الی (۲۱) دمای نقطه شبنم محصولات احتراق را برای هوای اضافی $\eta = 1.25$ یعنی 125% بدست می‌دهد:

$$\text{Methane: } \frac{n_g}{n_{\text{Total}}} = \frac{2}{1 + 9.52 \eta} = \frac{2}{1 + 9.52 \times 1.25} = 0.1550 \quad (18)$$

$$\text{Ethane: } \frac{n_g}{n_{\text{Total}}} = \frac{3}{1.5 + 16.63 \eta} = \frac{3}{1.5 + 16.63 \times 1.25} = 0.1346 \quad (19)$$

$$\text{Propane: } \frac{n_g}{n_{\text{Total}}} = \frac{4}{2 + 23.8 \eta} = \frac{4}{2 + 23.8 \times 1.25} = 0.1260 \quad (20)$$

$$\text{Butane: } \frac{n_g}{n_{\text{Total}}} = \frac{5}{2.5 + 30.94 \eta} = \frac{5}{2.5 + 30.94 \times 1.25} = 0.1214 \quad (21)$$

برای یافتن فشار جزئی توسط رابطه (۲۲) کافی است که نسبت مولی فاز گازی به کل بدست آید:

$$\frac{n_g}{n_{\text{Total}}} = \frac{(0.1550 \times 0.85) + (0.1346 \times 0.1) + (0.1260 \times 0.03) + (0.1214 \times 0.02)}{0.1514} \quad (22)$$

با این نسبت مولی و جدول اشباع بخار آب نتیجه میدهد: $P_g = 15.14 \text{ Kpa}$.

با فشار جزئی بدست آمده از محصولات احتراق، همچنین دمای نقطه شبنم از جدول اشباع بخار آب به دست می‌آید (۲۳):

$$P_g = 15.14 \text{ Kpa} \rightarrow T_g = 54.1^\circ\text{C} \quad (23)$$

یعنی دمای محصولات احتراق باید به $T_g = 54.1^\circ\text{C}$ برسد تا تقطیر آغاز گردد و این مهم باید در محفظه احتراق در فضایی به حجم تقریبی $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$ انجام پذیرد (شکل ۲). ارائه ابعاد محفظه‌ی احتراق به این منظور است که محدودیت فضای موجود به

کننده طول دودکش و در نتیجه افت داخل دودکش است و بنابراین بسته به کشور محل نصب (یعنی تعداد متعارف طبقات ساختمان‌ها در آن کشور) تغییر می‌کند، از ذکر آن خودداری شده است. برای مثال در ابتدای ورود پکیج چگالشی به بازار ایران حداکثر طول مجاز دودکش ۳ متر تعیین شده بود ولی پس از مدتی توسط برخی از برندهای اروپایی وارداتی، دودکش تا طول بیش از ۱۰ متر مجاز اعلام شد که این افزایش قابل توجه طول مجاز دودکش مستلزم تغییر هد فن و در نتیجه قدرت آن برای غلبه بر افت فشار بیشتر بوده است که این تغییرات برای سازگاری با قوانین برنامه و بودجه اعمالی توسط سازمان نظام مهندسی ایران در جهت امکان استفاده پکیج در ایران انجام شده است. همچنین روابط محاسباتی موجود در مرجع [10] توان فن را به- دست خواهد داد اما تعیین مقدار پارامترهای موجود در فرمول فوق خصوصاً بارده کل فن در پکیج چگالشی بسیار چالش برانگیز بوده و بحث مبسوطی را می‌طلبد که از آن اجتناب می‌گردد. راه مستقیمی نیز برای محاسبه توان فن وجود دارد و آن اندازه‌گیری مقاومت سیم پیچ است اما نمی‌توان به آن استناد کرد. همچنین اگر الکتروموتور فن دارای پلاک مشخصات فنی باشد، می‌توان قدرت فن را روی پلاک موتور مشاهده کرد که مناسبانه برای پکیج چگالشی این توان روی الکتروموتور ثبت نشده است. بر اساس تمامی ملاحظات فوق، توان فن اگزاست محصولات احتراق برای پکیج چگالشی حدود ۱۰۰ وات در نظر گرفته می‌شود. چنانچه اندکی تغییر در قدرت فن بوجود آید باز در اساس محاسبات این مقاله خدشهای وارد نشده و فقط اندکی راندمان محاسبه شده نهایی تغییر خواهد کرد. به‌علاوه این‌که اساس استدلال بر عدم چگالش در کاربرد پکیج چگالشی برای گرمایش ساختمان دلالت دارد و محاسبات انجام شده برای دقایقی خاص از شروع کار پکیج است که هنوز دما پایا نشده و اندکی چگالش بوجود می‌آید. در اینجا ۱۰۰ وات برای پکیجی به ظرفیت تقریبی $\frac{Kcal}{hr}$ 22000 درنظر گرفته شده است و این ظرفیت معادل با $2.5 m^3$ گاز طبیعی است پس برق مصرفی برای یک متر مکعب گاز طبیعی طبق (36) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} 100 \text{ Watt} \times \frac{3414.5}{1000} &= 341.45 \frac{\text{Btu}}{2.5 \text{ m}^3 \text{ N.G.}} \\ &\times \frac{1}{2.5} = 136.6 \frac{\text{Btu}}{1 \text{ m}^3} (\text{N.G.}) \\ &\times \frac{1}{4} = 34.1 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3} (\text{N.G.}) \end{aligned} \quad (36)$$

چنانچه نسبت ارزش انرژی برق به انرژی گاز نادیده فرض شود، اشتباهی بزرگ رخ داده است. شواهد و محاسبات نشان می‌دهند که این نسبت رو به افزایش است (دلایلی چند از این تفاوت در ضمیمه ۱ بررسی شده است). بهای انرژی برق نسبت به انرژی معادل گاز در سال ۱۳۹۰، حدود ۷/۵ برابر بوده است که این رقم در سال ۱۳۹۴ طبق محاسبات ضمیمه ۲ و داده‌های "جدول ۱" به عدد میانگین ۸/۵ برابر رسیده است.

جدول ۱- مقایسه‌ی بهای گاز و برق در ایران (۱۳۹۴)

نسبت بهای برق به گاز	بهای برق مصرفی Kwh	بهای گاز مصرفی m ³	بهاء به ریال
۱۰/۴۲	۴۰۹	۴۱۴	اولین رده‌ی مصرف
۸/۷۹	۱۸۴۱	۲۲۰۸	رده‌ی مصرف میانی
۶/۴۱	۲۹۳۳	۴۸۳۰	آخرین رده‌ی مصرف

محصولات احتراق 0/0416 مول به ازای هر مول گاز طبیعی است. این مقدار، طبق روابط (۳۳) و (۳۴) :

$$\frac{0.9133 \times 2390.0(h_{fg})}{4.2} = 519.7 \text{ Kcal/m}^3 \text{ N.G.} \quad (3f)$$

معادل تقطیر 0.9133 Kg آب و یا 519.7 Kcal انرژی مؤثر در افزایش راندمان گرمایی به ازای هر متر مکعب گاز است و در آن h_{fg} در دمای 40°C منظور شده است. توجه نمایید که این مقدار آب به ازای یک متر مکعب گاز بدست آمده است در صورتی که پکیج چگاشی تا بیش از $2/5$ متر مکعب گاز در هر ساعت می‌سوزاند. یعنی باید حداقل حدود $2/28$ لیتر آب در ساعت تولید نماید و در 24 ساعت با فرض کار تمام بار تولید آب به $54/8$ لیتر می‌رسد. به نظر می‌رسد با همین استدلال ادعای چگاشی بودن در تاسیسات گرمایشی ساختمان برای تمامی کسانی که پکیج چگاشی را تجربه کرده‌اند رد شده است چرا که معمولاً خروجی آب تقطیر شده به داخل یک بطری $1/5$ لیتری هدایت می‌شود که هیچ‌گاه پر نخواهد شد.

به دلیل اختلاف ارزش گرمایی گاز طبیعی در نقاط مختلف کشور ایران ازارزش گرمایی 9000 Kcal/m^3 استفاده می‌شود. بدین ترتیب افزایش راندمان گرمایی توسط رابطه (۳۵) می‌شود:

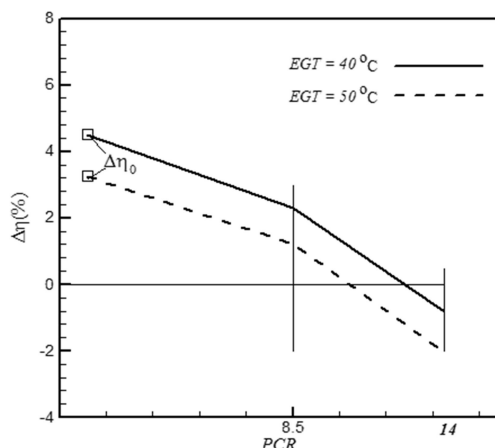
$$\frac{519.7}{9000} = 0.0577 = \%5.77 \quad (35)$$

پس حتی در حالتی که فرض شود، درجه حرارت گازهای خروجی $T_{out} = 40^{\circ}\text{C}$ باشد (که بسیار دور از دسترس خواهد بود) راندمان بدون محاسبه برق مصرفی فن (که با شرایط جدید مجبور به استفاده از فن برای هدایت محصولات احتراق به بیرون هستیم $5/77\%$ نسبت به حالت متعارف (غیر چگالشی) تفاوت خواهد داشت. در "شکل ۲" به طور تقریبی، این میزان افزایش راندمان نمایش داده شده است.

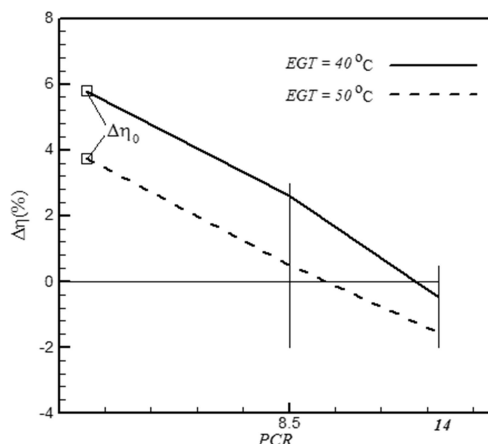
۴- محاسبه بازده با احتساب توان برق مصرفی فن

بازده گرمایی بدست آمده واقعی نیست زیرا باید انرژی الکتریکی فن اضافه شده برای خروج اجباری محصولات احتراق را به آن افزود که در سایر پکیج‌های متعارف وجود ندارد. متأسفانه میزان توان الکتریکی مصرفی فن در بروشورهای فنی یا تبلیغاتی تولیدکنندگان پکیج چگالشی ذکر نشده است.^۱ در بروشور برخی از پکیج‌های متعارف با فن برای گازهای خروجی (اجباری) که برای موارد خاصی استفاده می‌شوند، توان این فن ۶۵ وات اعلام شده است. این در حالی است که در پکیج چگالشی به علت افت زیاد داخل محفظه احتراق باید توان فن افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به ۶۵ وات داشته باشد. شاید از آنجا که تعداد طبقات فوقانی محل نصب پکیج چگالشی در ساختمان تعیین

^۱ توان مصرفی در بروشور برخی از این پکیج‌ها حداکثر ۱۱۶ وات اعلام شده است که با توجه به مصرف پمپ (۹۰ وات)، کیت الکترونیکی و متعلقات آن (حدود ۴ وات) و شیر برقی گاز، جرقه زن و شیر برقی آب (حداقل حدود ۱۰ وات) توان باقیمانده فقط حدود ۱۲ وات است. بنابراین امکان ندارد که توان فن در این ۱۱۶ وات به حساب آورده شده باشد.



شکل ۳- تغییرات بازده با و بدون احتساب انرژی الکتریکی فن (۱۰٪ هوای اضافی)



شکل ۴- تغییرات بازده با و بدون احتساب انرژی الکتریکی فن (۲۵٪ هوای اضافی)

۵- اعتبار سنجی

متأسفانه مقالات ارائه شده در این زمینه محدود و اکثراً فاقد محاسبات تحلیلی هستند بنابراین در این مقاله محاسبات به شکلی ارائه شده است که امکان بررسی جزء به جزء آن فراهم باشد و هیچ نقطه ابهامی در روند تحلیل مشاهده نشود. در حقیقت بررسی این معادلات خود مبین صحت نتایج بدست آمده می باشد اما جهت اطمینان بیشتر نتایج با مقاله ای معتبر در این زمینه مقایسه می شود. با توجه به اعداد بدست آمده برای نقطه شبنم محصولات احتراق و مقایسه آن با مرجع [1] به وضوح صحت نقاطی کلیدی از نتایج را می توان بررسی کرد. در مرجع [1] نقطه شبنم محصولات احتراق 54.4°C ارائه شده است که در این مقاله 54.1°C بدست آمده است. همچنین برای نقاط $EGT = 40^{\circ}\text{C}$ و $EGT = 45^{\circ}\text{C}$ که در "شکل ۲" نمایش داده شده اند تفاوت ناچیزی بین نتایج مرجع [1] و مقاله حاضر به چشم می خورد. این تفاوت اندک شاید ناشی از محاسبه دمای شعله آدیاباتیک فقط با استفاده از گاز متان باشد که برای سهولت در این مقاله انجام گرفته است (چون ۸۵٪ گاز شهری را متان تشکیل می دهد).

بنابراین بهای تمام شده ی انرژی برق نسبت به گاز با دو فرض دنبال می شود. فرض اول این که ارزش انرژی برق ۸/۵ برابر گاز است، فرض دوم، بهای انرژی برق ۱۴ برابر گاز باشد که به نظر می رسد بزودی به این نسبت خواهد رسید. وقتی بازده برای دمای گازهای خروجی برابر با 40°C محاسبه شود، معادلات (۳۷) و (۳۸) بازده واقعی که در آن برق مصرفی فن نیز با توجه به ضریب بهای برق نسبت به گاز محاسبه شده است را می دهند:

$$\begin{aligned} \frac{519.7 - 34.1 \times 8.5}{9000} &= \%2.6 & PCR &= 8.5 & (37) \\ \frac{519.7 - 34.1 \times 14}{9000} &= -\%0.46 & PCR &= 14 & (38) \end{aligned}$$

اگر دمای گازهای خروجی 45°C باشد (که حتی این حالت نیز در موارد بسیار خاص پیش می آید) و محاسبات تکرار شود نتایج (۳۹) و (۴۰) به دست می آیند:

$$\begin{aligned} \frac{337.54 - 34.1 \times 8.5}{9000} &= \%0.5 & PCR &= 8.5 & (39) \\ \frac{337.54 - 34.1 \times 14}{9000} &= -\%1.55 & PCR &= 14 & (40) \end{aligned}$$

ذکر این نکته ضروری است که، چنانچه برای اطمینان بیشتر، قدرت فن ۶۵ وات منظور شود تفاوت نتایج بازده بین ۱٪ تا ۱/۵٪ خواهد بود ولی مجدداً خاطر نشان می شود در حال حاضر در کشور ما با توجه به طول زیاد دودکش استفاده از فن با توان متعارفی که سازنده تولید می کند، امکان ندارد لذا توان مصرفی مورد نیاز فن به میزان حداقل ۱۰۰ وات فنی بوده و دور از انتظار نمی باشد. خلاصه محاسبات در جداول ۲، "شکل ۳" و "شکل ۴" مشاهده می شود:

جدول ۲ الف - خلاصه محاسبات تغییرات بازده با توجه به دمای

گازهای خروجی، ۱۰٪ هوای تئوریک ($T_{\text{نقطه شبنم}} = 56.5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{نقطه شبنم}} = 1800^{\circ}\text{C}$)			
$\Delta\eta$	$\Delta\eta$	$\Delta\eta_0$	
$PCR = 14$	$PCR = 8.5$		
-%0.81	%2.3	%4.5	$EGT = 40^{\circ}\text{C}$
-%2.04	%1.2	%3.26	$EGT = 45^{\circ}\text{C}$

جدول ۲ ب - خلاصه محاسبات تغییرات بازده با توجه به دمای گازهای

خروجی، ۱۲۵٪ هوای تئوریک ($T_{\text{نقطه شبنم}} = 54.1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{نقطه شبنم}} = 1737^{\circ}\text{C}$)			
$\Delta\eta$	$\Delta\eta$	$\Delta\eta_0$	
$PCR = 14$	$PCR = 8.5$		
-%0.46	%2.6	%5.77	$EGT = 40^{\circ}\text{C}$
-%1.55	%0.5	%3.75	$EGT = 45^{\circ}\text{C}$

بدنبال دارد. این افزودن هوای اضافی، خود یک راه کنترل درجه حرارت گازهای خروجی در توربین نیروگاه‌ها است.

۷- میزان آلودگی محیط زیست

همچنین باید تخریب زیست محیطی ناشی از این تکنولوژی نیز مورد بررسی قرار گیرد که این مهم در طراحی مهندسی کلیه صنایع تولیدی تاثیر بسزایی دارد بطوری که راندمان را به شدت تحت الشعاع خود قرار می‌دهد. به عنوان مثال حذف آگزوز گازهای حاصل از احتراق در اتومبیل باعث افزایش راندمان می‌گردد اما این عمل به دلیل آلودگی هوا و آلودگی صوتی در هیچ خودرویی عملی نبوده و نیست.

نرخ روند واکنش‌های شیمیایی به سه عامل تمرکز واکنش‌کننده‌ها، دما و کاتالیزور بستگی دارد. در این میان تمرکز واکنش‌کننده‌ها از اختیار خارج است بنابراین تاثیر دو عامل دیگر مورد نظر است. ابتدا تاثیر عامل دما بررسی می‌شود. "در سوخت‌های جامد از دمای 500°C تا 200°C هر چه دما کاهش یابد میزان تولید اسید H_2SO_4 کاهش می‌یابد که البته معمولاً وجود گوگرد در سوخت‌های گازی نیز به میزان بسیار کم وجود داشته و موجب واکنشی مشابه می‌شود" (مرجع [11]) و چون دمای خروجی پکیج در هر دو حالت چگالشی و متعارف زیر 100°C است لذا دما در این محدوده تاثیری بر میزان آلاینده‌ی فوق نخواهد داشت. اما آلاینده‌ی NO در سوخت‌های گازی به سه طریق تولید می‌شود که میزان وابستگی این آلودگی به دما بر اساس اصول احتراق با استفاده از مراجع [12,13]، بررسی شده است:

۱- تولید NO و N از واکنش‌کننده‌های N_2 و O در دماهای بین 2000K و 5000K رخ می‌دهد و واکنش معکوس آن در دماهای بین 300 تا 5000K صورت می‌پذیرد. از آنجا که در این مقاله دمای شعله آدیاباتیک کمتر از 2010K بدست آمده است دمای شعله در شرایط کارکرد واقعی قطعاً به 2000K نخواهد رسید و بنابراین انجام این واکنش منتفی است.

۲- تشکیل NO و N از واکنش‌کننده‌های N و O_2 در دماهای بین 300 تا 3000K و واکنش معکوس آن در دماهای بین 1000K و 3000K انجام می‌شود. از آنجا که دمای خروجی زیر 100°C است تغییر در آن باعث تغییر در معادله شیمیایی در جهت معکوس نمی‌شود.

۳- و بالاخره فرآیند تولید NO و H از واکنش‌کننده‌های N و OH ربطی به دما ندارد و در جهت معکوس نیز دمای بالای 2200K تاثیر گذار است. پس در محدوده‌ی دمایی مورد بحث، دمای گازهای خروجی در تولید یا پیشروی واکنش در جهت معکوس اثری ندارد.

پس تا اینجا دما تاثیری در تولید بیشتر یا کاهش آلاینده NO ندارد. همچنین کاهش هر سه آلاینده‌ی NO، CO و HC به کاتالیزور O_2 نیاز دارد که این به معنای تغییر در درصد هوای اضافی است که به آن کاتالیزور سه راهه^۱ می‌گویند. با افزایش درصد هوای اضافی، دما وقتی

۶- بررسی امکان میعان در سامانه‌های متداول پرکاربرد مصرف

حال امکان وجود دمای پایین گازهای خروجی برای سه سامانه‌ی متفاوت مصرف گرمای بسیار پرکاربرد مورد بررسی قرار می‌گیرد تا امکان وجود میعان و به تبع آن امکان افزایش راندمان به بیش از حداکثر ۸۷٪ را مطالعه نماییم.

۱-۶ سیستم توزیع گرما توسط رادیاتور

در سیستم‌های توزیع توسط رادیاتور دمای رفت یا خروجی سیستم 75°C است که گاهی در روزهای گرم‌تر برای حداکثر صرفه‌جویی در عدد 60°C تنظیم می‌شود. در این حالت به زحمت دمای برگشت آب شوفاژ به 54°C می‌رسد که این نشان می‌دهد که تقریباً هیچ‌گاه به نقطه اشباع نمی‌رسیم. باید توجه داشت که در این شرایط دمایی تمامی تولیدکننده‌های گرما اعم از پکیج‌های متعارف و یا دیگ‌های حرارتی و... راندمان بسیار بالایی دارند.

۲-۶ توزیع گرما توسط گرمایش از کف

در این حالت دمای خروجی برای یک طراحی خوب معمولاً بین 45 تا 50 درجه سانتیگراد باشد و دمای آب برگشت حداکثر 7 درجه از آن کمتر است. پس در بهترین شرایط که بتوان از چگالش استفاده کرد درجه حرارت آب برگشت 38 درجه در نظر گرفته می‌شود که منطقی است حداقل برای ایده‌آل‌ترین حالت تصور نمود که درجه حرارت محصولات احتراق به 45 درجه برسد. حتی در این حالت راندمان بدون احتساب برق مصرفی فن حدود $1/2\%$ افزایش می‌یابد که با احتساب انرژی برق مصرفی واقعی در ایران، در حقیقت $2/4\%$ کاهش در راندمان به دست خواهد آمد.

۳-۶ تولید آب گرم مصرفی با آب گرم کننده

در پکیج‌ها چاره‌ای جز استفاده از مبدل‌های صفحه‌ای فشرده برای تولید آب گرم مصرفی وجود ندارد که باید حداقل دمای آب گرم کننده به بیش از 55 درجه برسد تا بتواند آب گرم مصرفی را تولید نماید (نمودار مبدل‌های آب گرم مصرفی مثل آلفالوال سوئد که در این پکیج‌ها به کار می‌روند این عدد را نمایش می‌دهند). در این جا باید خاطر نشان کرد که تنها در این مورد خاص دما برای لحظاتی چند به مقدار کافی پایین خواهد بود تا میعان اتفاق افتد ولی زمان آن بسیار کوتاه است.

و بالاخره شاید تحمل قراردادن دست در گازهای خروجی به عنوان دلیل راندمان بالا ذکر شود. اما باید دانست که بدلیل خاموش و روشن شدن پیوسته، دستگاه عملاً به ندرت به حالت پایا می‌رسد و چون ضریب انتقال گرمای گازها کم است فرصت کافی برای لمس دمای واقعی گازهای خروجی وجود ندارد. پس تحمل دمای گازهای خروجی توسط دست نمی‌تواند معیاری برای تشخیص دما باشد و مضافاً اینکه صرفاً دمای پایین گازهای خروجی بیانگر راندمان بالا نیست چراکه هوای احتراق اضافی بیشتر دمای گازهای خروجی کمتر را

¹ Three-way catalyst

به مرز 700°C برسد بر کاهش آلاینده‌ی CO و وقتی به 600°C برسد بر کاهش آلاینده‌ی HC اثر خواهد گذاشت. برای کاهش آلاینده‌ی NO نیز به کاهش نسبت ترکیب هوا به سوخت استوکیومتریک نیاز است که عملاً امکان ندارد. اصولاً انحراف حدود ۱۰ درصدی از ترکیب هوا-به سوخت از نسبت استوکیومتریک باعث کاهش آلودگی و نزدیک شدن به این محدوده باعث افزایش آلودگی می‌شود. بنابراین بطور خلاصه بر اساس اصول احتراق، تغییر دما (کاهش یا افزایش آن) در محدوده‌ی دمایی گازهای خروجی مورد بررسی بین پکیج چگالشی و متعارف یعنی در دماهای خروجی زیر 100°C تأثیری بر آلاینده‌ی محیط زیست نخواهد داشت.

اما در خروجی دودکش پکیج چگالشی تولید اسیدهای مایع ضعیف به دلیل ترکیب گازها با آب حاصل از میعان، موجب تخریب زیست محیطی می‌شود که هم در سطح داخلی دودکش و هم پس از آزادسازی در فضای اطراف، آلودگی بیشتر را به همراه دارد. به هر حال گازها در حضور آب مایع به اسید تبدیل می‌شوند. این در حالی است که اگر گازها به اسید تبدیل نشوند به دلیل انتشار در بخش وسیعی از فضای اطراف به شدت رقیق می‌شوند و از اثرات تخریب محیط زیست آن کاسته می‌شود. اتفاقی که در دودکش پکیج چگالشی و خروجی از آن رخ می‌دهد در حقیقت به نوعی همان باران اسیدی است که در اینجا بطور پیوسته در حال ایجاد شدن است. به عبارتی ذرات ریزی از مایعات اسیدی و سمی در سطح پایین جو در محیط زیست معلق می‌شوند در حالی که گازهای تشکیل دهنده این اسیدهای مایع می‌توانستند بدلیل چگالی پایین در سطوح بالاتر هوای محیط پخش و به دور دست منتقل شوند. البته بخشی از این گازها که هنوز با گردش جریان هوا فرصت پخش و انتقال به دور دست را نداشته‌اند، هنگام بارش باران، پدیده باران اسیدی را به وجود می‌آورند. از بین رفتن شدید و سریع آسفالت اطراف دودکش در نیروگاه‌های برق گازسوز، ناشی از اثر مخرب پخش این ذرات ریز مایع اسیدی می‌باشد. مجدداً یادآوری می‌شود که در اینجا اختلاف دمای گازهای خروجی دودکش پکیج چگالشی در مقایسه با پکیج متعارف بسیار اندک بوده و باعث تغییر در موازنه معادله شیمیایی احتراق آنگونه که در موتورهای احتراق داخلی اتفاق می‌افتد، نمی‌شود. "اصولاً محدوده ماکزیم راندمان در بین دو نوار دمای بالا و دمای خیلی پایین وجود دارد و خروج از این محدوده به سمت دمای بالا کاهش شدید راندمان و به سمت دمای خیلی پایین موجب ورود به منطقه آلودگی شدید خواهد شد" (مرجع [11]).

۸- نتیجه و جمع بندی

در این مقاله بررسی افزایش یا کاهش راندمان واقعی پکیج‌های چگالشی نسبت به غیر چگالشی (پکیج متعارف) مورد بررسی قرار گرفته است. برای محاسبات از معادلات احتراق گاز و همچنین قوانین ترمودینامیک و شیمیایی کمک گرفته شده است. تحقیق بصورت علمی و با اشاره به نکات تجربی تغییرات راندمان را ارزیابی می‌کند. این بررسی به منظور استفاده از پکیج چگالشی برای سیستم‌های گرمایشی متداول در ساختمان‌ها می‌باشد. محاسبات برای دو درصد متفاوت هوای اضافی متداول انجام گرفته تا تأثیر این پارامتر در محاسبات نیز

مشخص شود. پس از انجام محاسبات، برای مقایسه بهتر نتایج بطور خلاصه در جداول ۲، "شکل ۳" و "شکل ۴" نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با احتساب نسبت بهای انرژی برق به گاز و دمای گاز خروجی 40°C ، هیچگاه بازده بیش از ۲/۶٪ افزایش نیافته است و این در حالی است که در شرایط عملی سامانه‌های گرمایشی تحقق دمای گاز خروجی 40°C ممکن نیست و حتی دمای 54°C که شروع انجام چگالش است نیز در شرایط خاصی بوجود می‌آید. بنابراین دست کم برای کشورهایی مانند ایران که عمده انرژی برق آنها توسط گاز طبیعی تولید می‌شود، در عمل نه تنها بازده افزایش نمی‌یابد بلکه تا حدود ۱/۵۵٪ کاهش نیز می‌یابد. در حقیقت این کاهش بازده در اثر استفاده از انرژی با ارزش برق بجای انرژی کم انرژی گازهای ناشی از احتراق است. نتیجه آن که وقتی از انرژی کم انرژی می‌توان برای خروج گازهای حاصل از احتراق استفاده کرد، استفاده انرژی با ارزش برق اشتباهی بزرگ خواهد بود. این در حالی است که با کاهش دما در محفظه احتراق و به تبع آن در گازهای خروجی و تولید آب به شکل مایع، آلاینده‌ی محیط زیست نیز افزایش می‌یابد چرا که گازهای خروجی در حضور آب به شکل ذرات متراکم مایع اسیدی و سمی در آمده و به محیط وارد می‌شوند در صورتی که اگر به شکل گاز وارد محیط شوند به سرعت پخش شده و غلظت آنها در اقیانوس اتمسفر به شدت کاهش می‌یابد. و بالاخره این که تقطیر بخار آب در دودکش ساختمان دارای پکیج‌های چگالشی موجب خرابی نقاشی و گچ ساختمان و یا حتی ایجاد ترک در پرداخت نهایی دیوار خواهد شد و دیوار همیشه مرطوب می‌باشد.

۹- نمادها

EGT	دمای گازهای خروجی احتراق ($^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{C}$)
h	آنتالپی
PCR	نسبت بهای برق به گاز با انرژی معادل

علائم یونانی

γ	جرم مخصوص نسبت به هوا
$\Delta\eta$	تغییر راندمان، % یا %
η	راندمان، % یا %
ρ	جرم مخصوص، $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

زیر نویس‌ها

o	بدون احتساب انرژی برق مصرفی فن
fg	نهان تبخیر (یا تقطیر)
g	فاز گازی
l	فاز مایع
m	جرم
M	جرم ملکولی
$N.G.$	گاز طبیعی
P	محصولات احتراق
R	واکنش کننده‌های اولیه قبل از احتراق
S	نقطه شبنم

۱۰- مراجع

- [1] Jones D, P.E. Principals of Condensing Boiler System Design, Member ASHRAE.
 - [2] Condensing Boiler Operation and Appropriate Use, Technical Paper, Riverside HYDRONICS. (www.Reversidehydronics.com)
 - [۳] صباح س. پیش بین س.ای. و مقیمان م., تاثیر بکارگیری پکیج چگالشی بر بهینه سازی مصرف انرژی دومین همایش ملی اقلیم, ساختمان و بهینه سازی مصرف انرژی, اصفهان, ایران, انستیتوی بهینه سازی انرژی ایران
 - [4] Renato M., Performance Analysis of Heating Plants Equipped with Condensing Boilers. Heat Recovery Systems Vol. 6, No. 4, 1986.
 - [5] Kopf j., Comparison of aluminium and stainless steel for condensing boiler heat exchanger, Senior Product Manager, Weil-Mclain, 9-20-2013 (White Paper)
 - [6] ASHRAE Handbook Fundamentals, Part II: Practice Migration of Water Vapor, PP, F21.9-21.11, 1985
 - [7] Van Wylen G. J., Sonntag R. E., Fundamentals of Classical Thermodynamics, third Edition, John Wiley and Sons, 1985.
 - [8] Bejan A., Convection Heat Transfer, 4th Edition, John Wiley and Sons, New York, 2013.
 - [9] Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine, A. S., Introduction to Heat Transfer, 5th Eddition, John Wiley and Sons, New York, 2011.
 - [10] ASHRAE Handbook Equipment, Second Printing 1983.
 - [11]
 - [12] Commonly used formoulas, PP, E31.2, Table 3.
 - [13] Stuart D.D. , Acid Diewpoint Temperature Measurment And [14]
 - [15] Its Use In Estimating Sulfur Trioxide Concentration, AMTEK Process & Analytical Instruments, 150 Freeport RD, Pittsburgh PA 15238.
 - [16] MW Chase Jr (ed), NIST-JANAF Thermochemical Tables, 4th Edition, American Institute of Physics Phys Chem Ref Data Monograph 9. 1988.
- John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, International Edition, McGRAW-

داخلی، چه مقدار برق خریداری می‌شود. هر چقدر این عدد در کشورها بزرگتر باشد، قیمت برق در آنجا ارزان‌تر خواهد بود.

غلامرضا خوش خلق، معاون توانیر در روز پنجشنبه ۱۴ خرداد ۱۳۹۴ با بیان اینکه هم اکنون صنعت برق کشور با کمبود منابع مواجه است، از پائین بودن قیمت فروش برق به مردم و مشترکان خانگی انتقاد کرد و مقدار زیادی کمبود در ورودی و خروجی معادلات اقتصادی در صنعت برق را موجب عقب ماندگی این صنعت دانست.

به گزارش "پول نیوز"، کارشناسان خبرگزاری ریانووستروسیه، با بررسی قیمت‌های برق در کشورهای مختلف اروپا، در سال ۲۰۱۳ میلادی، گرانترین کشورهای مصرف کننده برق را فهرست بندی کرده‌اند. در حالی که بهای برق بیش از ۴۰ کشور دنیا در این فهرست بین ۱۵ تا ۵۰ سنت است در ایران متوسط آن فقط ۵ سنت است (1841/34500 = 0.53).

وزیر نیرو، چیت‌چیان، در همین سال (۱۳۹۴) قیمت هر کیلو وات ساعت برق در کشورهای مختلف جهان را ۱۱ تا ۱۷ سنت معادل ۳۸۰ تا ۵۸۶ تومان اعلام کرد.

و بالاخره محاسبات سرانگشتی زیر در یافتن یک حدس مناسب برای توقف افزایش نسبت بهای برق به گاز ما را یاری می‌رساند: برق در نیروگاه‌های گازی ایران با بازدهی بین ۲۵٪ تا ۴۰٪ تولید می‌شود. وقتی میانگین بازده نیروگاه را ۳۲٪ فرض کنیم و برای انتقال برق نیز بازدهی حدود ۹۰٪ اعمال نماییم حاصل ضریب ۳/۵ برابر است که فقط ناشی از راندمان تولید برق از گاز است:

$$\frac{1}{0.32 \times 0.90} \cong 3.5$$

حال اگر هزینه‌های گزاف سرمایه گذاری اولیه (۴ برابر گاز)، جاری، نگهداری و تعمیرات صنعت برق با پرسنل متخصص را به ضرایب فوق بیفزاییم ضریب نهایی عددی بزرگ خواهد شد که با مقایسه بهای جهانی این دو نوع انرژی ضریبی حدود ۴ بدست خواهد آمد که مجموعاً ضریب ۱۴ (14 = 3.5 × 4) منطقی به نظر می‌رسد.

۱۰-۲- ضمیمه ۲

برای محاسبه بهای گاز و برق مصرفی از قبوض شرکت گاز و برق طبق جدول شماره ۱ استفاده و به شکل زیر محاسبه شده است. یک متر مکعب گاز شهری ۴۱۴ تا ۴۸۳۰ ریال (با احتساب پله‌های تصاعدی) است که معادل ۸۱۵۰ کیلوکالری (در خراسان) تا ۹۲۰۰ کیلوکالری (در جنوب کشور) ارزش گرمایی دارد. عدد میانی ۹۰۰۰ کیلوکالری در ساعت را در نظر می‌گیریم. بهای یک کیلووات ساعت برق با پله‌های تصاعدی به ترتیب بین ۴۰۹ تا ۲۹۳۳ ریال است (با احتساب زمان مصرف کمباری و اوج مصرف این اعداد بالاتر می‌رود که ضریب را به ۱۴ نزدیک‌تر خواهد کرد) که معادل ۳۴۱۴ بی‌تی‌یو یا ۸۵۳ کیلوکالری بر ساعت ارزش گرمایی دارد:

$$\begin{aligned} \frac{9000}{853} \times \frac{409}{1840} &\cong 10.42 \\ \frac{9000}{853} \times \frac{2208}{2933} &\cong 8.79 \\ \frac{9000}{853} \times \frac{2641}{4830} &\cong 6.41 \\ \frac{10.42 + 8.79 + 6.41}{3} &= 8.54 \end{aligned}$$

۱۰-۱- ضمیمه ۱

بهای انرژی برق نسبت به معادل انرژی گاز آن طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ از ۷/۵ به ۸/۵ برابر افزایش یافته است که این نسبت باید تا اعداد بالاتری ادامه یابد تا سیاست حذف تدریجی یارانه برق عملی شود. به نظر نویسنده با توجه به بهای جهانی انرژی برق و گاز ادامه افزایش این رقم به تدریج تا حدود ۱۴ برابر محتمل است که مختصری از دلایل آن ارائه می‌شود. به ازای یک دلار سرمایه گذاری در صنعت نفت و گاز لازم است چهار دلار در صنعت برق سرمایه گذاری شود و این کمبود منابع برای صنعت برق حتی شامل کشورهای پیشرفته‌تر هم می‌شود. به منظور مقایسه دقیق قیمت برق در کشورهای مختلف، بانک جهانی دارای کمیته «بدون بعد» است به این معنا که نمی‌توان صرفاً بدون توجه به سایر شاخص‌های اقتصادی، قیمت برق کشورهای مختلف را مورد مقایسه قرار داد. یکی از شاخص‌هایی که در این خصوص، مورد استفاده قرار می‌گیرد به این صورت است که سرانه تولید ناخالص داخلی هر کشور بر قیمت برق آن کشور تقسیم می‌شود و عددی به دست می‌آید که می‌توان مقدار برق خریداری شده هر کشور را با سایر کشورها مورد مقایسه قرار داد. یعنی با توجه به تولید ناخالص

یعنی بهای برق نسبت به گاز (با توان مساوی) حدود ۸/۵ برابر گران‌تر است و این تفاوت رو به افزایش می‌باشد بنابراین در محاسبات فوق ضریب ۸/۵ تا ۱۴ برای بهای انرژی برق نسبت به گاز، استفاده شده است که با توجه به ضمیمه ۱ منطقی به نظر می‌رسد.