

## ارزیابی اقتصادی تبدیل رژیم احتراق معمولی به احتراق بدون شعله در یک بویلر خانگی

قاسم خبازیان

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک  
دانشگاه شهید بهشتی  
gh\_khabbazian@sbu.ac.ir

رامین حقیقی خوشخو

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی  
دانشگاه شهید بهشتی  
r\_haghighi@sbu.ac.ir

جواد امینیان\*

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی  
دانشگاه شهید بهشتی، \*مسئول مکاتبات  
j\_aminian@sbu.ac.ir

### چکیده

سیستم احتراق بدون شعله یکی از فن‌آوری‌های نوین و پیشرو در زمینه بهبود عملکرد سیستم احتراق از جمله افزایش بازدهی، کاهش آلاینده‌ها و افزایش عمر سیستم می‌باشد. در این مقاله تبدیل یک سیستم احتراقی از حالت معمولی به حالت بدون شعله از نظر اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های مورد نیاز از آزمایشات صورت گرفته روی یک بویلر آزمایشگاهی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات جمع‌آوری شده‌اند. برای بررسی بیشتر، استفاده از سیستم پیش‌گرمایش صرف نیز با سیستم بدون شعله مقایسه گردید. روشهای ارزیابی ارزش خالص فعلی، نسبت سود-هزینه و دوره برگشت سرمایه برای این مقایسه اقتصادی بکار گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهند که برای وضعیت فعلی، یعنی نرخ بهره متوسط ۱۵٪، نرخ افزایش تعرفه سوخت ۲۰٪ و افزایش بازدهی ۱۶٪ که ناشی از تبدیل بویلر از حالت احتراق معمولی به احتراق بدون شعله است سرمایه‌گذاری از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌باشد. همچنین، با آنالیز حساسیت اثر تغییرات نرخ بهره بانکی و نرخ افزایش تعرفه سوخت بر معیارهای اقتصادی بررسی شدند که می‌توان قابلیت بالای سودآوری سیستم احتراق بدون شعله در شرایط مختلف را نتیجه گرفت.

**کلمات کلیدی:** احتراق بدون شعله، ارزیابی اقتصادی، بازدهی بویلر، بهینه‌سازی مصرف سوخت

### مقدمه

بر اساس آمار شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت [۱] بخش قابل توجهی از منبع انرژی فسیلی در ایران مربوط به گاز طبیعی می‌باشد، که حدود ۷۰ درصد از آن صرف گرمایش ساختمان‌ها می‌شود. بدیهی است در صورت ابداع روشی برای کاهش مصرف گاز طبیعی در سیستمهای گرمایش ساختمان گام مؤثری نه تنها در جهت کاهش مصرف انرژی کل کشور برداشته می‌شود بلکه عامل مهمی نیز در بهبود میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن خواهد بود. تلاشهایی که در سالهای اخیر توسط سازمانهایی مانند شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت و سازمان استاندارد در خصوص تدوین استانداردهای برچسب انرژی در ساختمانها صورت گرفته است نشان-دهنده اهمیت روز افزون استفاده از روشهای کاهش مصرف سوخت در کشور است.

پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا از چند دهه پیش بعنوان روشی برای بهبود بازدهی یک سیستم احتراقی مورد استفاده بوده است [۲]. بهترین روش پیش‌گرمایش استفاده از حرارت اتلافی گازهای داغ خروجی از دودکش این سیستمها است که علاوه بر بهبود فرآیند احتراق باعث کاهش اتلافات سیستم و افزایش بازدهی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش دمای آدیاباتیک شعله مهمترین عامل تولید اکسیدهای نیتروژن شناخته می‌شود. استراتژیهای مختلفی برای کاهش تولید  $NO_x$  معرفی و بکار گرفته شده‌اند [۳]. استفاده از بازگردش گازهای حاصل از احتراق به درون محفظه احتراق یکی از روشهای مذکور بدین منظور است. بازگردش محصولات احتراق به محفظه واکنش باعث کاهش غلظت اکسیژن در منطقه واکنش و کاهش دمای شعله می‌شود. اولی با کاهش مولکولهای اکسیژن و احتمال برخورد آنها با نیتروژن و دومی با کاهش دمای لازم برای واکنش بین اکسیژن و نیتروژن در کل باعث کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن می‌شوند. استفاده همزمان از پیش‌گرمایش تا دماهای بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت و رقیق‌سازی هوای احتراق توسط بازگردش محصولات احتراق تا مقادیر بسیار پایین اکسیژن (کمتر از ۱۰٪ حجمی) منجر به کشف رژیم جدیدی از احتراق گردید که دارای خصوصیات منحصر به فردی بود [۴]. این ویژگیها عبارتند از: ۱. افزایش بازدهی و همزمان کاهش آلاینده‌های  $NO_x$  و  $CO$  تا مقادیر بسیار کم، ۲. توزیع یکنواخت دما در محفظه احتراق که باعث انتقال حرارت بهتر و حذف تمرکز دمایی و در نتیجه کاهش خسارات متالورژیکی به محفظه احتراق می‌شود ۳. کاهش آلودگی صوتی بدلیل حذف نواسانات لبه شعله [۵]. گزارشهای زیادی از کاربرد رژیم احتراق بدون شعله، با تکنولوژیهای دستیابی مختلف، در سیستم‌های احتراقی از قبیل کوره‌های صنعتی، بویلرهای بخار و توربین‌ها ارائه شده‌اند. افزایش بازدهی حتی تا مقادیر بالای ۲۵ درصد نیز گزارش شده است [۶]. سیستم‌های احتراق خانگی مانند سیستم تولید آبگرم، کوره‌های هوای گرم و نظایر آن، با توجه به آنچه در فوق به آن اشاره شد، می‌توانند حوزه جدیدی برای استفاده از این روش مدنظر قرار گرفته شوند. بنابراین، ارزیابی اقتصادی استفاده از این سیستم در بخش خانگی بایستی از منظر سرمایه‌گذاری بمنظور بهینه‌سازی مصرف سوخت مورد مطالعه قرار گیرد. در تحقیق حاضر هزینه‌ها و سود ناشی از بهینه‌سازی مصرف سوخت مربوط به تبدیل یک بویلر تولید آبگرم با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات از حالت احتراق معمولی به سیستم بدون شعله مورد بررسی قرار گرفته است. بخشهای بعدی مقاله حاضر به ترتیب زیر می‌باشند: ابتدا رژیم احتراق بدون شعله بطور خلاصه مرور خواهد شد. در بخش بعدی بویلر مورد مطالعه معرفی

شده و اقدامات صورت گرفته جهت تبدیل آن به سیستم بدون شعله ارائه می‌شود. در ادامه روش‌های ارزیابی اقتصادی استفاده شده توضیح داده شده‌اند. نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی متعاقباً مورد بحث قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری‌های صورت گرفته آورده شده‌اند.

### احتراق بدون شعله

بر اساس شرایط ورودی به محفظه احتراق، هنگامی که دمای هوای ورودی به محفظه احتراق بیشتر یا مساوی دمای خوداشتعالی مخلوط سوخت و هوا باشد و همزمان اختلاف دمای محفظه احتراق نسبت به دمای پیش‌گرمایش از دمای خوداشتعالی سوخت کمتر باشد رژیم احتراق بدون شعله حاصل می‌شود [۱۵]. از منظر شرایط داخل محفظه احتراق نیز تعاریف دیگری ارائه شده‌اند. بطور مثال، بر اساس مرجع [۴] احتراق بدون شعله دارای دو پیش شرط می‌باشد: ۱. دمای واکنشگرها بالای دمای خود-اشتعالی، ۲. میزان کافی نفوذ گازهای بی اثر به داخل محفظه احتراق. بهرحال، می‌توان سه شرط کلی: ۱. ننگ داشتن دمای محفظه احتراق بالای نقطه اشتعال خودبخودی سوخت، ۲. اختلاط مناسب واکنش‌گرها با هم و ۳. رقیق‌سازی مخلوط سوخت-هوا توسط گازهای بی اثر را اصول اولیه احتراق بدون شعله دانست. در صورت تحقق سه شرط مذکور طول شعله در محفظه احتراق گسترش یافته بطوری که منطقه واکنش کل محفظه احتراق را در بر می‌گیرد. با ادامه این روند و کاهش دمای آدیاباتیک شعله جبهه شعله تشکیل نشده و شعله نامرئی خواهد بود در حالیکه فرآیند احتراق همچنان ادامه می‌یابد. کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن، افزایش زمان ماند که منجر به کاهش مونواکسید کربن شده و افزایش راندمان سیستم از جمله خصوصیات بارز این رژیم نوظهور می‌باشند.

### الف: رقیق‌سازی

اختلاط هوا یا سوخت با ترکیب سوخت و هوا با گازهای بی اثر مانند  $N_2$  و  $CO_2$  قبل از فرآیند احتراق به منظور کاهش غلظت اکسیژن تا مقادیر کم رقیق‌سازی نامیده می‌شود. این عملیات می‌تواند با استفاده از تزریق جداگانه این گازها به مخلوط سوخت انجام شود یا بطور مستقیم از گازهای حاصل از احتراق موجود در دودکش به این منظور استفاده گردد. رقیق‌سازی باعث کاهش غلظت اکسیژن و افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط سوخت در محفظه احتراق می‌شود که در نتیجه آن بیشینه دمای شعله کاهش یافته و زمان لازم برای واکنش و تولید گونه‌های شیمیایی در محفظه احتراق افزایش خواهد یافت. کاهش اکسیژن احتمال واکنش با نیتروژن را نیز کمتر می‌کند. باید خاطرنشان ساخت که کاهش اکسیژن، همانند احتراق معمولی، می‌تواند شعله را ناپایدار و حتی خاموش سازد که این مشکل با پیش‌گرمایش برطرف می‌شود.

### ب: پیش‌گرمایش

گرم کردن مخلوط هوا و سوخت قبل از واکنش احتراق نه تنها باعث افزایش بازدهی حرارتی سیستم می‌شود بلکه همانطور که در قسمت قبلی اشاره شد در احتراق بدون شعله ناپایداری شعله را که بدلیل کمبود اکسیژن ایجاد می‌شود را از بین می‌برد. بازیاب‌ها و رکوپراتورها با استفاده از حرارت محصولات احتراق مخلوط سوخت را گرم می‌کنند که علاوه بر وظیفه پایدارسازی شعله باعث افزایش راندمان حرارتی سیستم نیز می‌شوند.

### ج: اختلاط

علاوه بر پیش‌گرمایش مخلوط احتراقی و رقیق‌سازی آن اختلاط مناسب سوخت، هوا و محصولات احتراق یکی از نکات کلیدی جهت دستیابی به رژیم احتراق بدون شعله می‌باشد. استفاده از بازگردش محصولات احتراق به داخل محفظه واکنش، دبی هوا و سوخت ورودی به داخل محفظه احتراق از متغیرهای اصلی جهت کنترل اختلاط مناسب واکنش‌گرها برای دستیابی به احتراق بدون شعله می‌باشند. ترکیب محصولات احتراق با واکنش‌گرها می‌تواند با استفاده از دو روش بازگردش خارجی و داخلی دود بطور جداگانه یا باهم صورت گیرد. در روش اول دود از طریق یک کانال مستقل از دودکش جدا شده و وارد محفظه احتراق می‌شود. در حالیکه در دومی محصولات احتراق قبل از خروج از محفظه احتراق با واکنش‌گرها مخلوط می‌شوند. این روش می‌تواند با استفاده از یک دمپر یا تغییر مسیر حرکت محصولات احتراق صورت گیرد.

### بویلر مورد مطالعه

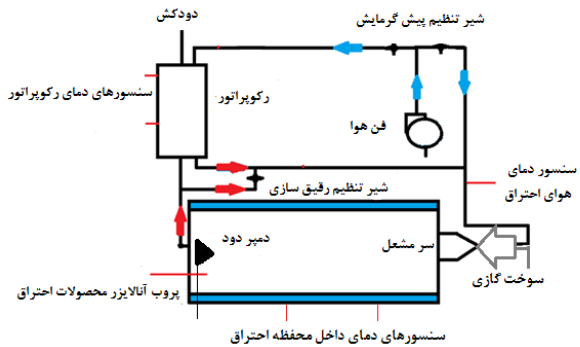
بخش آزمایشگاهی این پژوهش از یک بویلر ۱۰۰ کیلوواتی تشکیل شده است. طول و قطر این بویلر به ترتیب برابر ۱ متر و ۰٫۵ متر می‌باشد. تجهیزات نصب شده روی این بویلر عبارتند از:

- رکوپراتور برای بازیافت حرارت از محصولات احتراق و انتقال آن به هوای احتراق
- فن هوای احتراق
- شیرهای کنترل دبی هوا و سوخت
- دمپر دود برای تنظیم بازگردش محصولات احتراق به داخل محفظه احتراق
- سیستم اندازه‌گیری دمای محفظه احتراق
- سیستم اندازه‌گیری غلظت محصولات احتراق

در این سیستم محصولات خروجی از بویلر در رکوپراتور با هوای احتراق تبادل حرارت انجام می‌دهند و دمای احتراق را تا میزان مناسب برای تشکیل رژیم بدون شعله پیش‌گرم می‌کنند. سپس هوای پیش‌گرم شده با استفاده از شیر تعبیه شده روی خروجی دودکش با دود حاصل از احتراق رقیق شده و بمقدار مورد نیاز وارد مشعل شده و با ترکیب با سوخت مورد نظر وارد محفظه احتراق خواهد شد. بازگردش محصولات احتراق به محفظه احتراق با استفاده از دمپر نصب شده روی خروجی بویلر تنظیم می‌شود. با این دمپر می‌توان اثر بازگردش محصولات احتراق روی پایدارسازی شعله و همچنین اختلاط بهتر مخلوط سوخت و گازهای احتراقی را بررسی نمود. میزان غلظت محصولات احتراق و توزیع گونه‌های واکنش در طول محفظه احتراق با استفاده از سنسور آنالایزر دود اندازه‌گرفته می‌شود. توزیع دمای محفظه احتراق، محصولات احتراق و هوای احتراق نیز با ترموکوپل‌های تعبیه شده در طول بویلر و رکوپراتور و قبل و بعد از آن اندازه‌گیری خواهند شد. در شکل ۱ شماتیک سیستم آزمایشگاهی مورد نظر نشان داده شده است.

$F$ : ارزش خالص جریان مالی سال  $n$   
 $C_0$ : هزینه سرمایه گذاری اولیه  
 $d$ : نرخ تنزیل  
 $N$ : عمر طرح  
 می باشند.

روش نسبت سود-هزینه: یکی دیگر از روشهایی که بطور ملموس می تواند از نظر اقتصادی توجیه پذیری یک طرح بهینه سازی انرژی را نشان دهد روش نسبت سود-هزینه یا شاخص سودآوری<sup>۵</sup> است. در این روش نسبت ارزش فعلی تنزیل شده حاصل از بهینه سازی انرژی به هزینه های تنزیل شده انجام طرح تقسیم می شود و در صورتی که این نسبت بزرگتر از یک باشد به معنی توجیه پذیری اقتصادی طرح می باشد. این نسبت بصورت زیر تعریف می شود.



شکل ۱ شماتیک سیستم احتراقی بدون شعله مورد مطالعه

**روشهای ارزیابی اقتصادی**

برای ارزیابی اقتصادی تبدیل یک سیستم احتراقی از حالت معمولی به حالت بدون شعله هزینه های لازم برای تغییراتی که روی آن سیستم نهاده می شود باید با ایستای مشخص شوند. این هزینه ها شامل تهیه و نصب سیستم پیش-گرمایش، سیستم رقیق سازی، تجهیزات اندازه گیری و کنترل می شود. از طرف دیگر، این هزینه ها با افزایش بازدهی و در نتیجه کاهش مصرف سوخت، کاهش تولید آلاینده ها، افزایش عمر کل سیستم جبران می شوند. باید در نظر داشت که برای یک سرمایه گذار خصوصی برای یک سیستم خانگی هزینه های صرفه جویی شده توسط کاهش مصرف سوخت از اهمیت عمده نسبت به سایر هزینه ها نظیر فواید حاصل از کاهش  $NO_x$  و  $CO$  برخوردار است. بنابراین، در ارزیابی حاضر نیز تنها این هزینه ها مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. در اینجا سه حالت از سیستم مورد مقایسه قرار می گیرند:

(۳) طرح الف- بویلر بدون پیش گرمایش و رقیق سازی (به عنوان طرح مبنا):  
 طرح ب- بویلر با پیش گرمایش و بدون رقیق سازی و طرح ج- بویلر با پیش گرمایش و رقیق سازی (سیستم بدون شعله).

روشهای ارزیابی اقتصادی شامل ارزش خالص کنونی<sup>۱</sup>، نسب سود-هزینه<sup>۲</sup> و دوره بازگشت سرمایه<sup>۳</sup> جهت مقایسه سیستم های مذکور مورد استفاده قرار گرفته اند. در نهایت نیز بمنظور بررسی اثر پارامترهای مختلف روی معیارهای اقتصادی آنالیز حساسیت روی نتایج بدست آمده صورت می گیرد. روش ارزش خالص کنونی: این روش معتبرترین روش برای ارزیابی و مقایسه اقتصادی فرآیندهای بهینه سازی انرژی محسوب می شود [۷]. در این روش ارزش کنونی تنزیل شده<sup>۴</sup> هزینه ها به همراه ارزش کنونی صرفه جویی انرژی با هم جمع می شوند. در صورتی که ارزش خالص فعلی طرحی مثبت باشد نشان دهنده اقتصادی بودن طرح است. در بین چند طرح، طرحی اقتصادی تر است که این عدد بزرگتر باشد. ارزش فعلی خالص یک جریان مالی بصورت زیر بیان می شود:

که در آن

$NPV$ : ارزش فعلی خالص جریان مالی

روش دوره بازگشت سرمایه: در این روش ارزیابی دوره زمانی لازم (در اینجا سال) برای برگشت هزینه های سرمایه گذاری شده اولیه محاسبه می شود. هر چند تصمیم گیری بر اساس این روش بستگی به دیدگاه سرمایه گذار دارد، اما در حالت کلی می توان گفت هر چه این دوره کوتاهتر باشد نشان دهنده جذابیت سرمایه گذاری است. برای یک طرح بهینه سازی انرژی دوره بازگشت سرمایه به میزان کمتر از سه سال معمولاً مطلوبیت بیشتری دارد. این مقدار در با نظر گرفتن نرخ تنزیل با برابر قراردادن هزینه اولیه و سود حاصل از صرفه جویی انرژی محاسبه می شود (معادله ۳).

که در آن  $PP$  دوره بازگشت سرمایه می باشد.

**نتایج و بحث روی نتایج**

**الف: هزینه های سرمایه گذاری**

سیستم مبنا، یعنی بویلر بدون پیش گرمایش و رقیق سازی (طرح الف)، بویلر با پیش گرمایش و بدون رقیق سازی (طرح ب) و در نهایت سیستم بدون شعله یعنی بویلر با پیش گرمایش و رقیق سازی (طرح ج) با استفاده از سه روش فوق الذکر مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نرخ تنزیل انتخاب شده بر اساس نرخ متوسط بهره بانکی برای سرمایه گذاری سالانه ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین، عمر سیستم بر پایه عمر یک ساختمان مسکونی و متوسط عمر یک بویلر خانگی برابر ۲۰ سال انتخاب شده است. برای برآورد هزینه های سرمایه گذاری طرح از فهرس بهای منتشر شده توسط سازمان برنامه و بودجه [۸] استفاده شده است. هزینه های مربوط به تهیه و نصب رکوپراتور بر اساس سطح تبادل حرارتی<sup>۵</sup> می آید.  $NPV$  ذکر است رکوپراتور بصورت یک مبدل حرارتی چندلوله در نظر گرفته شده است. سایر هزینه های تبدیل یک بویلر از حالت معمولی به حالت بدون شعله از قبیل هزینه های مسیرهای جریان هوای پیش گرم و رقیق سازی، شیرآلات و لوازم اندازه گیری مانند سنسورهای دما و جریان را نیز می توان از فهرست بهای مکانیک یا قیمت های بازار بدست آورد.

<sup>1</sup> Net present value (NPV)  
<sup>2</sup> Benefit-cost ratio  
<sup>3</sup> Payback period  
<sup>4</sup> Discounted cost

<sup>5</sup> Profitability index (PI)

### ج: نمونه نتایج آزمایش های صورت گرفته روی بویلر

نمونه ای از نتایج آزمایشات صورت گرفته روی بویلر برای دبی سوخت متفاوت در سه طرح الف، ب و ج در جدول ۳ آورده شده است. نتایج این جدول برای محاسبات اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳ نمونه ای از نتایج آزمایشات صورت گرفته روی بویلر

دبی سوخت	دبی دمای ورودی	دمای دمای خروجی	توان منتقل شده به آب	توان ورودی بویلر	راندمان
gr/s	l/s	°C	°C	(kW)	(%)
۰.۶	۷۹۰	۱۸	۳۴	۱۴.۶۸	۵۱.۲
۰.۶	۷۹۰	۱۸	۳۵	۱۵.۶۰	۵۴.۴
۰.۶	۷۹۵	۱۸	۳۶.۵	۱۷.۰۸	۵۹.۶

همانطور که مشاهده می شود برای یک دبی جرمی معین سوخت که نشان دهنده ثابت بودن حرارت ورودی به بویلر می باشد میزان بازدهی سیستم در طرح پایه الف برابر با ۵۱.۲ درصد بوده که با اضافه نمودن سیستم پیش-گرمایش و با پیش گرم کردن هوای احتراق این بازدهی بیش از ۶ درصد افزایش یافته و بمیزان ۵۴.۴ درصد رسیده است. اضافه نمودن سیستم رقیق سازی و تبدیل سیستم به حالت بدون شعله بازدهی طرح ب را تا ۹.۵ درصد افزایش داده است و در کل نیز با افزایش بازدهی به میزان بیش از ۱۶ درصد بازدهی سیستم را از حالت پایه ۵۱.۲ درصد به ۵۹.۶ درصد رسانده است.

### د: نتایج ارزیابی اقتصادی

میزان هزینه صرفه جویی شده در اثر افزایش راندمان یک بویلر را می توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$A_s = \dot{m}_{fuel,1} \times \left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_2}\right) \times C_{fuel} \quad (5)$$

که در آن متغیرها عبارتند از:

$A_s$ : هزینه صرفه جویی سالانه (ریال)

$\dot{m}_{F,1}$ : میزان مصرف سوخت سالانه برای حالت پایه (مترمکعب)

$$\eta = \frac{Q_{water}}{Q_{fuel}} = \frac{\dot{m}_{water} C_p \Delta T}{\dot{m}_{fuel} LHV}$$

$C_{fuel}$ : هزینه واحد سوخت (ریال بر مترمکعب)

نتایج حاصل از محاسبات صورت گرفته با استفاده از سه روش ارزش خالص فعلی، نسبت سود-هزینه و دوره برگشت سرمایه برای طرح ب و ج و با در نظر گرفتن صرفه جویی های صورت گرفته نسبت به طرح مبنا (طرح الف) در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ نتایج محاسبات اقتصادی برای دو طرح ب و ج (واحد پولی ریال می باشد)

ارزش خالص فعلی	طرح ب	طرح ج
۴۴۰۳۱۷۸۵	۱۱۷۲۵۰۶۵۲	

رکوپراتور انتخاب شده برای بویلر مورد مطالعه یک مبدل چند لوله ای با سطح جانبی لوله ها برابر ۵، متر مربع است که با فومهای سرامیکی جهت افزایش نرخ انتقال حرارت پر شده است. هزینه مربوط به مبدل به همراه فومهای سرامیکی در حدود ۱۰ میلیون ریال محاسبه شده است که شامل ۸ میلیون ریال جهت ساخت مبدل و ۲ میلیون ریال هزینه خرید فومهای سرامیکی متخلخل می باشد. خلاصه هزینه های بویلر، اصلاحات و اقدامات انجام شده روی آن در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲ نیز خلاصه اطلاعات مربوط به هزینه های سوخت آورده شده است.

جدول ۱ هزینه های سیستم مورد مطالعه\*

طرح ج	طرح ب	طرح الف	
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	هزینه اولیه بویلر
۱۰	۰	۰	هزینه رکوپراتور
۱	۱	۰	هزینه مسیر پیش گرمایش
۱	۱	۱	هزینه لوازم اندازه گیری و کنترل
۵	۰	۰	هزینه مسیر رقیق سازی
۱۱۷	۱۱۲	۱۰۰	سرمایه کل اولیه
۱۷	۱۲	۰	سرمایه تغییر سیستم

\* هزینه ها بر حسب میلیون ریال می باشند.

جدول ۲ اطلاعات مربوط به مصرف و هزینه سوخت در بویلر مورد مطالعه

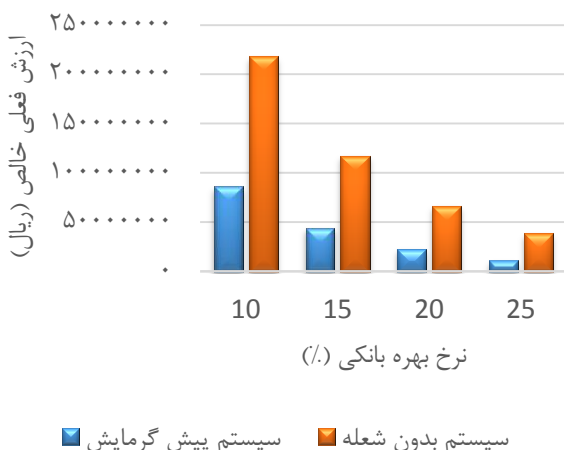
مصرف سوخت (گرم بر ثانیه)	۰.۶
مصرف سوخت (متر مکعب در ساعت)	۲.۷
مصرف سوخت (متر مکعب در سال)	۲۳۶۵۲
تعرفه متوسط گاز طبیعی (ریال بر مترمکعب)	۱۵۰۰
هزینه سالانه (ریال)	۳۵۴۷۸۰۰۰

### ب: بازدهی و کاهش مصرف سوخت

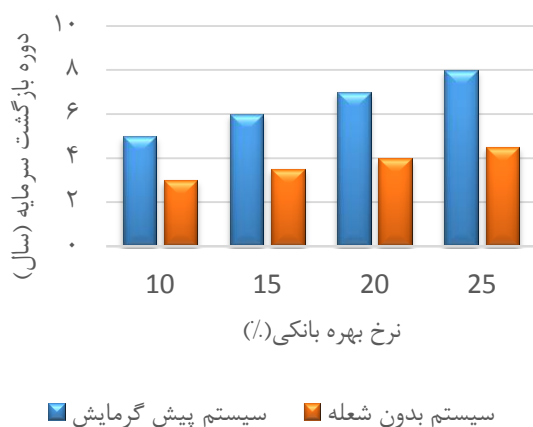
بازدهی بویلر بصورت زیر محاسبه می شود.

که در آن  $\eta$  بازدهی بویلر،  $Q_{water}$  مقدار حرارت مفید منتقل شده به آب،  $Q_{fuel}$  مقدار حرارت ورودی به بویلر بوسیله سوخت،  $\dot{m}_{water}$  دبی جرمی آب ورودی بویلر،  $C_p$  ظرفیت گرمایی آب،  $\dot{m}_{fuel}$  دبی جرمی سوخت و  $LHV$  ارزش حرارتی سوخت است. ظرفیت حرارتی ویژه آب در  $20^\circ C$  (دمای آب ورودی) برابر  $4,182 \text{ J/(g-K)}$  است، ذکر این نکته ضروری است که محاسبه دقیق راندمان حرارتی بسیار وابسته به تعیین مقدار دقیق ارزش حرارتی سوخت ورودی می باشد که به این منظور مقدار ارزش حرارتی گاز طبیعی برابر  $47,6 \text{ MJ/kg}$  در نظر گرفته شده است.

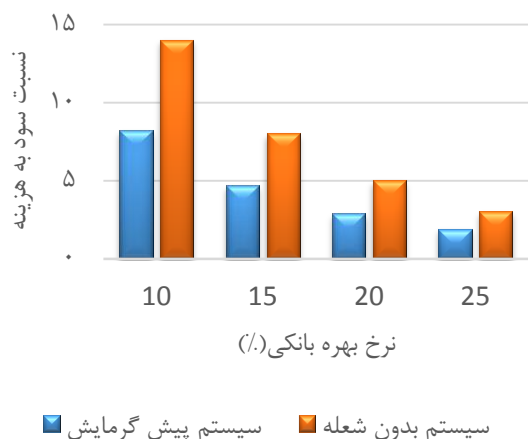
نسبت سود- هزینه	۴,۷:۱	۸:۱
دوره بازگشت سرمایه (سال)	۶	۳



شکل ۲ ارزش خالص فعلی در نرخ های بهره متفاوت برای دو طرح



شکل ۳ دوره بازگشت سرمایه در نرخ های بهره متفاوت برای دو طرح



شکل ۴ نسبت سود به هزینه در نرخ های بهره متفاوت برای دو طرح

از نتایج حاصل از روشهای ارزش خالص فعلی و نسبت سود- هزینه واضح است که در عمر ۲۰ ساله، نرخ بهره ۱۵ درصد و نرخ افزایش تعرفه گاز بر اساس آمار شرکت ملی گاز ایران در چهار سال گذشته [۹] به میزان ۲۰ درصد هر دو طرح ب و ج برای بهینه سازی مصرف سوخت از نظر اقتصادی به صرفه می باشند. همانطور که قابل مشاهده است ارزش خالص فعلی طرح ج بزرگتر از طرح ب بوده و بنابراین توجیه پذیری اقتصادی آن نیز بیشتر خواهد بود. همچنین، با مقایسه دوره بازگشت سرمایه برای دو طرح می توان نتیجه گرفت که هر چند هزینه های سرمایه گذاری اولیه برای طرح ج نزدیک دو برابر طرح ب است ولی طرح ج حدود ۳ سال زودتر از طرح ب هزینه سرمایه گذاری را جبران خواهد کرد و لذا می تواند از نظر سرمایه گذاری جذاب تر باشد.

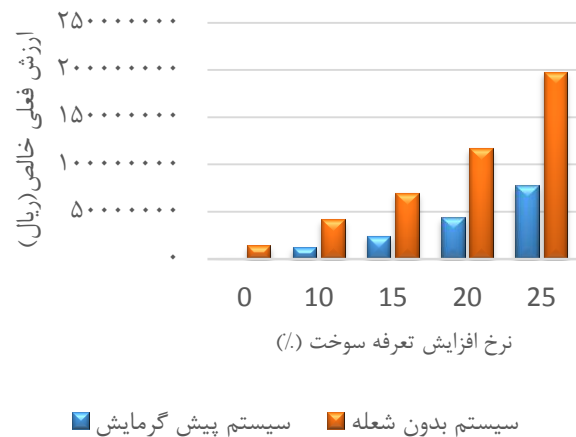
### ج: آنالیز حساسیت

روشهای ارزیابی اقتصادی فوق نسبت به پارامترهایی مانند نرخ بهره، نرخ افزایش تعرفه سوخت متغیر بوده و حساس می باشند. شکل ۲ تغییرات NPV را برای طرح های ب و ج نسبت به تغییر نرخ بهره بانکی نشان می دهد (نرخ افزایش تعرفه سوخت ۲۰٪ ثابت فرض شده است). نرخ های بهره نشان دهنده این واقعیت است که سرمایه گذار می تواند بجای سرمایه گذاری روی یک طرح بهینه سازی انرژی که می تواند توأم با ریسک باشد سرمایه خود را با اطمینان بالاتری در یک بانک سرمایه گذاری کند. در نتیجه هر چه این بهره پایین تر باشد تمایل سرمایه گذاری در طرح بهینه سازی مصرف انرژی نیز افزایش خواهد یافت. این رفتار را می توان در شکل ۲ بوضوح مشاهده کرد.

علاوه بر تغییرات ارزش خالص فعلی، تغییرات دوره بازگشت سرمایه و نسبت سود-هزینه بر حسب نرخ های متفاوت بهره بانکی به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ نشان داده شده اند. دوره بازگشت سرمایه برای تبدیل سیستم به سیستم بدون شعله در نرخ بهره ۱۰ و ۱۵ درصد در حدود ۳ سال هستند که مقادیر بسیار مناسبی برای سرمایه گذاری محسوب می شوند. از طرفی، در نرخ های بالاتر نیز این معیار زیر ۵ سال بوده و تا حدودی قابل قبول است. در حالیکه، طرح پیش گرمایش در نرخ بهره ۱۰ نیز دوره بازگشتی در حدود ۵ سال دارد و این با دوره بازگشت طرح بدون شعله در بالاترین نرخ بهره برابری می کند، که می توان نتیجه گرفت طرح بدون شعله بسیار مناسبتر از طرح پیش گرمایش می باشد. شکل ۴ نیز روند مشابهی برای تغییرات نسبت سود-هزینه در دو طرح مذکور به نمایش گذاشته است.

آلاینده‌های هوا می‌تواند جذابیت سرمایه‌گذاری را نیز بهبود بخشد و لذا دوره بازگشت سرمایه را بمیزان قابل توجهی کاهش دهد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در یک طرح سرمایه‌گذاری بهینه‌سازی انرژی نرخ افزایش تعرفه سوخت می باشد که هرچه این نرخ بالاتر باشد نشان دهنده امکان بالاتر برای توجیه‌پذیری سرمایه‌گذاری برای آن است. در شکل ۵ تأثیر افزایش تعرفه سالانه سوخت بر NPV دو طرح مذکور نشان داده شده است (نرخ بهره بانکی ۱۵٪ ثابت فرض شده است). با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که حتی با وجود ثابت فرض نمودن قیمت سوخت هر دو طرح از نظر اقتصادی سودآور می باشند. بدیهی است با افزایش نرخ تعرفه و کاهش نرخ بهره بانکی این سودآوری نیز بیشتر خواهد بود.



شکل ۵ ارزش خالص فعلی در نرخ‌های متفاوت تعرفه سوخت برای دو طرح

#### نتیجه‌گیری

این مقاله از نظر اقتصادی تبدیل یک سیستم احتراقی از حالت معمولی به بدون شعله را مورد مطالعه قرار می‌دهد. محاسبات مربوط به ارزیابی اقتصادی و بهینه‌سازی مصرف سوخت ناشی از تبدیل یک سیستم احتراقی آورده شده‌اند. داده‌های مورد نیاز از آزمایشات صورت گرفته روی یک بویلر آزمایشگاهی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات جمع آوری شده‌اند. برای بررسی بیشتر، استفاده از سیستم پیش‌گرمایش صرف نیز با سیستم بدون شعله مقایسه گردید.

با توجه به اینکه برای یک سرمایه‌گذار خصوصی تنها هزینه‌های صرفه‌جویی شده ناشی از بهینه‌سازی مصرف سوخت برای سرمایه‌گذاری اهمیت دارد در این مطالعه هزینه‌های مذکور مد نظر قرار گرفته‌اند. روشهای ارزیابی ارزش خالص فعلی، نسبت سود-هزینه و دوره برگشت سرمایه برای این مقایسه اقتصادی بکار گرفته شدند.

نتایج نشان می‌دهند که برای وضعیت فعلی، یعنی نرخ بهره ۱۵٪، نرخ افزایش تعرفه سوخت ۲۰٪ و افزایش بازدهی ۱۶٪ که ناشی از تبدیل بویلر از حالت احتراق معمولی به احتراق بدون شعله است سرمایه‌گذاری از نظر اقتصادی توجیه پذیر می‌باشد. همچنین، برای یک نرخ بهره بانکی و نرخ افزایش تعرفه سالانه سوخت همواره سرمایه‌گذاری برای سیستم بدون شعله نسبت به استفاده صرف از پیش‌گرمایش از نظر اقتصادی توجیه‌پذیرتر است. علاوه بر آن، با بکارگیری روش‌های کارآتر برای تبدیل یک سیستم احتراقی معمولی به سیستم بدون شعله و در نتیجه بهبود بیشتر روی بازدهی سیستم و همچنین لحاظ نمودن هزینه‌های اجتماعی ناشی از کاهش

#### فهرست علائم

A	فهرست علائم
B	هزینه سالانه
C	سود
d	هزینه
F	نرخ تنزیل
LHV	هزینه در سال آبی
m	ارزش حرارتی پایین
N	جرم
NPV	تعداد سال
PP	ارزش خالص فعلی
Q	دوره بازگشت سرمایه
T	انرژی حرارتی
Δ	دما
η	فهرست علائم یونانی
ο	اختلاف
n	بازدهی
fuel	زیرنویس‌ها
p	مقدار اولیه
s	شماره دوره
water	سوخت
.	مقدار فعلی
	صرفه جویی شده
	آب
	بالانویس‌ها
	مشق زمانی

#### مراجع

- 1- <http://www.ifco.ir>.
- 2- Weinberg F., 1996, "Heat-Recirculating Burners: principles and some recent developments", Combustion Science and Technology, 121, 3-22.
- 3- Baukal C., 2004, "Industrial combustion pollution and control", Marcel Dekker Inc.
- 4- Wunning J. A. and Wunning J. G., 1997, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation" Progress in Energy and Combustion Science, 23, 81-94.

7- Moncef Krarti, 2010, "Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach", CRC Press.

8- <http://www.mporg.ir>.

9- <http://www.nigc.ir>

5- Cavaliere A. and Joanon de M., 2004, "Mild combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 30, 329–366.

6- Tsuji H. et al., 2003, "High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction", CRC Press.