

## تحقیق تجربی بر روی احتراق در یک مشعل محیط متخلخل

محمد شفیع دهج<sup>۱</sup>، میثم فرزانه کلورزی<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۳</sup>، مهرزاد شمس<sup>۴</sup>

تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، خیابان پردیس، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
meisamfarzaneh@gmail.com

### خلاصه

در این تحقیق یک مشعل محیط متخلخل با مبدل حرارتی و تجهیزات آزمایشگاهی مرتبط طراحی و ساخته شد. تغییرات دما در محفظه احتراق محیط متخلخل ثبت شده، افت فشار در مشعل، راندمان حرارتی مشعل و غلظت گازهای آلاینده ( $NO_x$ ) اندازه گیری گردیده است. نتایج نشان می دهد که دمای حداکثر در ابتدای ناحیه احتراق و انتهای منطقه پیش گرمایش قرار دارد، ولی با افزایش توان و نسبت هوای اضافی جبهه شعله به سمت جلو حرکت می کند. با افزایش نسبت هوای اضافی در یک توان ثابت دمای حداکثر شعله نیز کاهش می یابد، زیرا به علت افزایش دبی هوا با یک مقدار سوخت ثابت مقدار پیش گرمایش جریان کم می شود شعله به سمت جلو می رود و دمای بیشینه شعله کم می شود. در یک توان ثابت با افزایش نسبت هوای اضافی دبی کل جریان افزایش می یابد و به دنبال آن افت فشار افزایش پیدا می کند. نتایج بازده حرارتی نشان می دهد که بیشترین بازده در محدوده نسبت هوای اضافی  $1/2$  اتفاق می افتد. این بدان دلیل است که در این نسبت بیشترین دمای محصولات احتراقی اتفاق می افتد. میزان هوای اضافی تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی میزان  $NO_x$  دارد، میزان  $NO_x$  با افزایش هوای اضافی کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: مشعل محیط متخلخل - احتراق - تحقیق تجربی

### 1- مقدمه

در سالهای اخیر تکنولوژی احتراق در محیط های متخلخل به دلیل سازگار بودن با مسائل محیط زیست بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مشعلهای با محفظه احتراق متخلخل نوع پیشرفته ای از مشعلها هستند که مخلوط سوخت و هوا را در داخل یک جسم متخلخل می سوزانند. عمل احتراق در این مشعلها بر خلاف مشعلهای معمولی پیش مخلوط، با شعله های آزاد انجام نمی شود بلکه به شکل سه بعدی، بدون شعله و در داخل منافذ جسم متخلخل صورت می گیرد. تکنولوژی مشعلهای با محفظه احتراق متخلخل، یکی از روشهای کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید آلودگی است. تولید  $NO_x$  کمتر نسبت به شعله آزاد و بزرگ بودن چگالی توان را می توان از مهمترین مزایای این سامانه ها بر شمرد. گسترش محدوده شعله وری، گسترش محدوده دینامیکی توان، کاهش حجم

- 1- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
- 2- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
- 3- استادیار دانشکده مهندسی هوا فضا
- 4- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک

مشعل، توزیع یکنواخت حرارت در محفظه احتراق، سرعت گرم شدن بالا از جمله برتری های این نوع مشعلها نسبت به مشعلهای معمولی به شمار می رود.

دسوت [1] از اولین کسانی است که در زمینه احتراق در محیط متخلخل فعالیت نموده است. وی به طور آزمایشگاهی پایداری و انتشار شعله را در یک محیط شنی با اندازه های متفاوت بررسی نمود و مدلی نیمه تجربی برای محاسبه سرعت شعله و تاثیر پیش گرمایش به وسیله هدایت حرارتی جامد ارائه نمود.

تاکنو و ساتو [2] یک قطعه متخلخل جامد با ضریب هدایت بالا را در یک محفظه احتراق برای پیش گرمایش هوای ورودی استفاده کردند. آنها با تغییر ضریب انتقال حرارت بین گاز و جامد و تخلخل جسم جامد، پیش گرمایش را کنترل کردند. این محققین در 1981 از یک بلوک آهنی با سوراخهای ریز مستقیم به عنوان جسم متخلخل استفاده کردند. آنها دریافتند در احتراق متان پایداری سوختن می تواند به پایین تر از حد معمول احتراق ضعیف برسد.

در تعدادی از مقالات آزمایشگاهی (هاشیموتو و همکاران [3]، کوتانی و تاکنو [4]، کوتانی و همکاران [5] از دسته ای از لوله های سرامیکی به عنوان محیط متخلخل استفاده کردند. آزمایشات آنها نشان داد که اولاً شعله می تواند در سه ناحیه پایدار شود: 1- بین لوله ها 2- در پایین دست جریان و خروجی 3- در بالادست جریان و ورودی لوله ها، ثانیا انتشار  $NO_x$  و CO زمانی که شعله در قسمت متخلخل پایدار می شود به صورت قابل ملاحظه ای کم می شود. بابکین و همکاران [6] دریافتند که وقتی اندازه سوراخها کاهش پیدا کند سرعت شعله کم می شود این امر با آزمایشات دسوت [1] مطابقت داشت.

فاکس [7]، هاردستی [8] و وینبرگ [9] نیز به طور جداگانه تاثیر پیش گرم شدن مخلوط ورودی به محیط متخلخل را روی افزایش سرعت شعله مورد بررسی قرار دادند. کورزاین و همکارانش [10] آزمایش هایی برای تعیین سرعت شعله در سال 1983 انجام دادند، و مشاهده نمودند که سرعت شعله می تواند 1 تا 30 برابر سرعت شعله آزاد باشد. آنها این افزایش سرعت شعله در محیط متخلخل را ناشی از آشفستگی جریان تحلیل نمودند. لکن هیچ توجهی به مکانیزم برگشت گرما نکردند. چفین و همکارانش [11] از اولین کسانی هستند که آزمایش هایی را جهت تعیین میزان آلاینده ها انجام داده اند. آنها نشان دادند که انتشار  $NO_x$  در محدوده نسبت تعادلی 0/6 تا 0/95 در مشعل سرامیکی متخلخل به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

هاول [12] برای افزایش راندمان احتراق از فوم سرامیکی با ساختار دوازده وجهی استفاده نمود. این نوع مواد متخلخل مزایای فراوانی دارند، اولاً افت فشار در این مواد بسیار کم است. ثانیا نسبت به بلوکهای سرامیکی که سوراخهای مستقیم دارند، دارای سطح ویژه بزرگتری می باشند. بنابراین انتقال حرارت جابجایی بین گاز و جامد افزایش می یابد.

دورست و همکارانش [13] یک مشعل متصل به مبدل حرارتی را آزمایش نمودند. این مشعل از سه قسمت اصلی تشکیل شده است؛ ناحیه پیش گرمایش (A)، ناحیه احتراق (C) و مبدل حرارتی (D). سطح مقطع مشعل در انتهای ناحیه A افزایش داده شده بود. این عمل برای افزایش محدوده توان انجام یافته بود. دورست و همکارانش آزمایش های متعددی را روی این مدل انجام دادند و در نهایت با اصلاحاتی، مدل فوق را برای استفاده در کاربردهای خانگی پیشنهاد نمودند.

هسیو و همکارانش [14] احتراق پیش مخلوط متان را در یک محیط متخلخل دو قسمتی با طول و قطر برابر بررسی کردند، و تعدادی آزمایش را برای تعیین حد پایین احتراق با تغییر اندازه سوراخها در پایین دست جریان انجام دادند و اندازه سوراخها را در بالا دست ثابت نگه داشتند، آنها سرعت شعله را بیشتر از شعله های آرام و آدیاباتیک آزاد بدست آوردند و حد پایین احتراق را در داخل محیط متخلخل کمتر از شعله های آزاد یافتند. تاثیر قطر سوراخها بر روی عملکرد مشعل بررسی شد و خصوصیات پایداری شعله در سطح مقطع بین دو قسمت و صفحه خروجی بصورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج عددی و آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی همخوانی داشتند.

خانا و همکاران [15] تحقیقات آزمایشگاهی را بر روی احتراق متان و هوا در یک محیط متخلخل دو قسمتی برای نسبت‌های تعادلی و نرخ جریان مختلف انجام دادند. انتشار آلودگی و تشعشع اندازه گیری شد، نتایج نشان داد که انتشار  $\text{CO}$  و  $\text{NO}_x$  با افزایش سرعت شعله افزایش می یابد. برای یک نسبت تعادلی ثابت هرچند انتشار  $\text{NO}_x$  برای محدوده ای از سرعتها ممکن است ثابت بماند. تشعشع خروجی با افزایش سرعت افزایش و راندمان حرارتی کاهش می یابد. دستگاه آزمایشی، شامل مشعل متخلخل عایق شده، سامانه اندازه گیر جریان و سامانه کنترل، قسمت مخلوط کن، سامانه دریافت اطلاعات و تجهیزات اندازه گیری تشعشع و انتشار آلودگی است. مقادیر مشخص متان و هوا در داخل محفظه مخلوط کن با هم مخلوط می شوند و سپس به داخل مشعل جایی که احتراق اتفاق می افتد، جریان می یابند. مشعل شامل دو قسمت استوانه ای سرامیکی متخلخل است. سرامیک متخلخل یک ماتریس دوازده وجهی از جنس  $\text{PSZ}^1$  است. سیلندرها با عایقی از جنس  $\text{PSZ}$  غیر متخلخل که ضخامتش  $1/6$  میلیمتر است پوشیده شده است. در قسمت بالادست جریان، جایی که سوخت پیش گرمایش می شود، سرامیک دارای  $2/56\text{pores/mm}^2$  ( $65\text{ppi}^2$ ) است. این قسمت به عنوان مانع بازتابش نیز عمل می کند. شعله در قسمت پایین دست پایدار می شود، که این قسمت دارای  $0/39\text{pores/mm}$  ( $10\text{ppi}$ ) است. ضریب تخلخل برای  $10\text{ppi}$  و  $65\text{ppi}$  بترتیب  $87\%$  و  $84\%$  است. طول کلی مشعل  $60/5$  میلیمتر است. قسمت عایق یک سیلندر تو خالی از جنس آلومین فیبری ( $0\%$  porosity) است، که هدایت حرارتی عایق  $\text{W/mK}$   $0/16$  است.

ماتیو و همکارانش [16] نتایج آزمایشگاهی و عددی برای یک مشعل دو قسمتی با مخلوط هوا/پروپان را بررسی کردند. البته از مخلوط هوا/متان هم برای مقایسه استفاده کردند. مشعل مورد مطالعه (شامل دو قسمت سیلندری شکل از جنس فوم سرامیکی  $\text{YZA}^2$  (قطر هر کدام  $10/16$  سانتیمتر و ارتفاع آنها  $5/08$  سانتیمتر است) با ضریب تخلخل متفاوت بود. قسمت بالادست دارای  $23/6\text{ppc}$  و قسمت پایین دست دارای  $3/9\text{ppc}$  بود. این قسمتها درنیمه پایینی که با اکسید آلومینیوم عایق شده بود قرار گرفته بودند و نیمه بالایی خالی بود.

دلایچ و همکارانش [17] یک مشعل متخلخل دو قسمتی با توان  $10\text{kW}$  و متصل به یک مبدل حرارتی را تحلیل و آزمایش کردند. محفظه احتراق متخلخل (PM) طوری قرار گرفته بود که جریان گاز از بالا به پایین بود، تا بخار آب چگالش یافته (که گرمای نهان خودش را به مبدل حرارتی بدهد) به سمت بیرون هدایت شود. به منظور افزایش انتقال حرارت بین گاز و مبدل، فضای اطراف بین محفظه احتراق و مبدل از ریگهای سرامیکی پر شده بود.

## 2- دستگاه آزمایشی

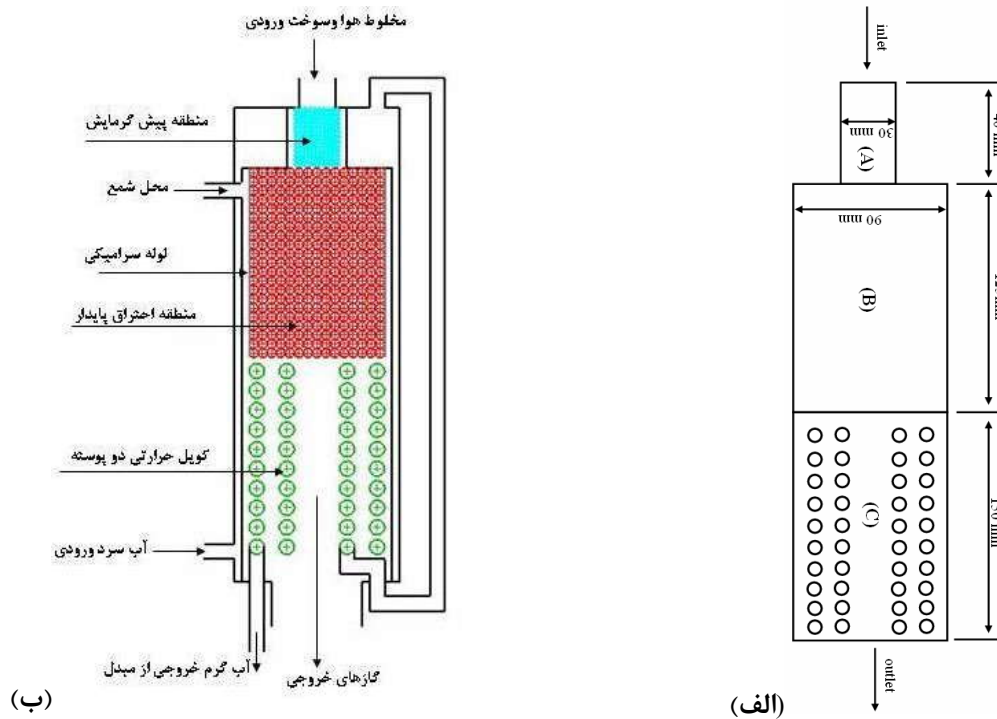
### 1-2- هندسه مشعل

مشعل ساخته شده در این تحقیق به صورت دو استوانه مجزا از هم است که به وسیله پیچ به هم متصل شده اند. یکی از استوانه ها به عنوان پوسته داخلی مشعل استفاده می شود و دومی به عنوان پوسته بیرونی استفاده می شود. این مشعل دارای سه قسمت است که قسمت اول منطقه پیش گرمایش (A)، قسمت دوم منطقه احتراق پایدار (B) و قسمت سوم مبدل حرارتی (C) نام دارد (شکل 1 الف). همانطور که گفته شد مشعل دارای دو پوسته است که در فاصله دو پوسته آب جریان دارد. آب بین دو پوسته خنک کاری دیواره داخلی مشعل را انجام داده و پس از گرمایش اولیه، وارد مبدل (کوئل) حرارتی انتهای مشعل شده و تا دمای مورد نیاز برای مصرف نهایی گرم می گردد.

<sup>1</sup> Partially Stabilized Zirconia

<sup>2</sup> Pores Per Inch

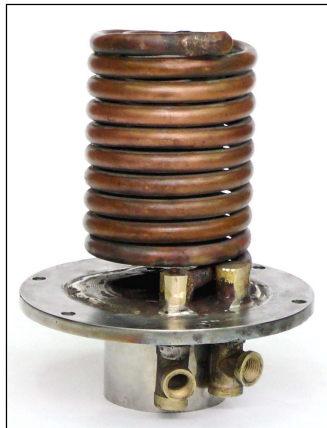
<sup>3</sup> Yttria-Stabilized Zirconia



شکل (1) نمای مشعل، (الف) ابعاد کلی، (ب) قسمتهای مختلف

منطقه پیش گرمایش جهت پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا که تاثیر مهمی در روند احتراق و کارایی مشعل دارد استفاده می شود، عمل پیش گرمایش علاوه بر کاهش تنشهای حرارتی در پوسته مشعل و قالب متخلخل شده و موجب افزایش سرعت شعله و در نتیجه پایداری بیشتر شعله می شود، ناحیه پیش گرمایش (ناحیه A در شکل 1 الف). به صورت استوانه و با قطر داخلی 3 سانتیمتر و به طول 4 سانتی متر ساخته می شود که به طور مستقیم به محفظه احتراق وصل می شود. برای پر کردن داخل این قسمت از گلوله های سرامیکی با قطر تقریبی 5 میلیمتری و از جنس آلومینایی استفاده می شود. در منطقه احتراق پایدار، احتراق توسط یک شمع صورت می پذیرد. شمع در فاصله ی 1 سانتیمتری از بالای این منطقه نصب می شود. ناحیه احتراق پایدار به صورت استوانه ای شکل است، ارتفاع آن 12/5 سانتیمتر و قطر داخلی آن 10 سانتیمتر است (ناحیه B در شکل 1 الف). در این قسمت از یک لوله استیل با قطر داخلی 1/2 میلیمتر و ضخامت 3 میلیمتری استفاده شد در داخل این ناحیه یک لوله سرامیکی از جنس آلومینا که قطر خارجی آن 10 سانتیمتر و ضخامت آن 0/5 سانتیمتر است قرار داده می شود، ارتفاع این قسمت نیز 12/5 سانتیمتر است. در داخل لوله سرامیکی که در محفظه احتراق قرار دارد، می توان از فیلترهای سرامیکی از جنس آلومینا، زیرکونیا و یا سیلیکون کاربرد با چگالی تخلخل 10 ppi تا 30 ppi استفاده نمود. در اینجا از فیلترهای سرامیکی آلومینایی با چگالی تخلخل 20 ppi استفاده شد (شکل 2).

آب خروجی از بالای مشعل در انتهای مشعل وارد مبدل حرارتی می شود (شکل 1 ب). مبدل حرارتی یک کویل دو راهه است که جنس لوله های آن از مس و قطر لوله مورد استفاده برای ساخت آن  $\frac{3}{8}$  in است. البته می توان از لوله های استیل نیز در این مورد استفاده نمود. ارتفاع مبدل حرارتی 14 سانتیمتر است که قطر داخلی کویل کوچکتر 4 سانتیمتر و قطر داخلی کویل بزرگتر 7 سانتیمتر است. این کویل دارای 10 حلقه و گام هر حلقه 13 سانتیمتر است (شکل 3)، در مجموع طول لوله به کار رفته در ساخت مبدل 4 متر است. آب خروجی از فضای بین دو پوسته وارد کویل داخلی می شود و از کویل خارجی به بیرون می رود.

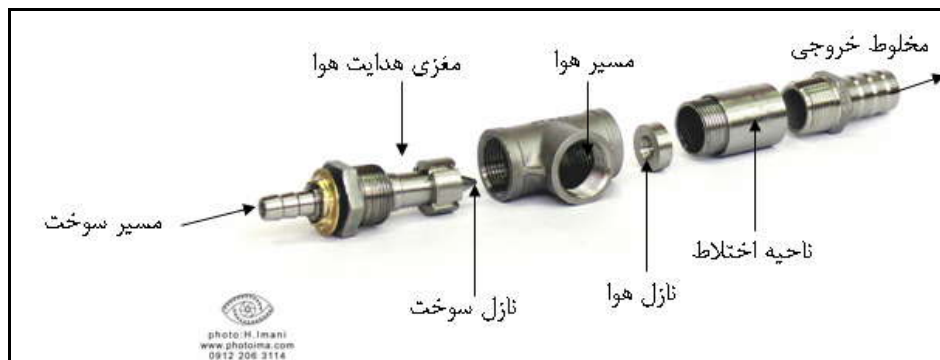


شکل (3) مبدل حرارتی



شکل (2) فوم ها و لوله سرامیکی

از آنجا که مشعلهای محیط متخلخل از نوع پیش مخلوط هستند، بنابراین طراحی وسیله ای جهت مخلوط کردن سوخت و هوا به طور کامل قبل از ورود به مشعل و انجام احتراق، ضروری است. بدین منظور مخلوط کنی به نام مخلوط کن اژکتوری ساخته شد. کار این مخلوط کن به این صورت است که سوخت از سوراخی به قطر 2/5 میلیمتر از وسط و هوا از طریق 4 شیار ایجاد شده بر روی مغزی هدایت هوا، سه راهی اژکتور را طی کرده و از طریق نازل وارد محفظه اختلاط می شود. این کار باعث می شود سرعت ورود هوا به ناحیه اختلاط اژکتور زیاد و فشار آن کاهش پیدا کند. چون نازل سوخت به صورتی تنظیم گشته که در این ناحیه کم فشار قرار گیرد، این امر منجر به مکش سوخت به داخل ناحیه اختلاط اژکتور می شود. قطر سوراخ سوخت با توجه به قطر خاموشی متان که حدود 2/6 میلیمتر است انتخاب شده است که این خود باعث جلوگیری از برگشت شعله به داخل مسیر سوخت می شود (شکل 4).



شکل (4) مخلوط کن اژکتوری

## 2-2- سامانه های اندازه گیری

برای کنترل و اندازه گیری نرخ جریان هوا و متان (گاز شهری)، از شیرهای سوزنی و دبی سنج از نوع روتامتر ساخت شرکت Fischer & Porter استفاده می شود.

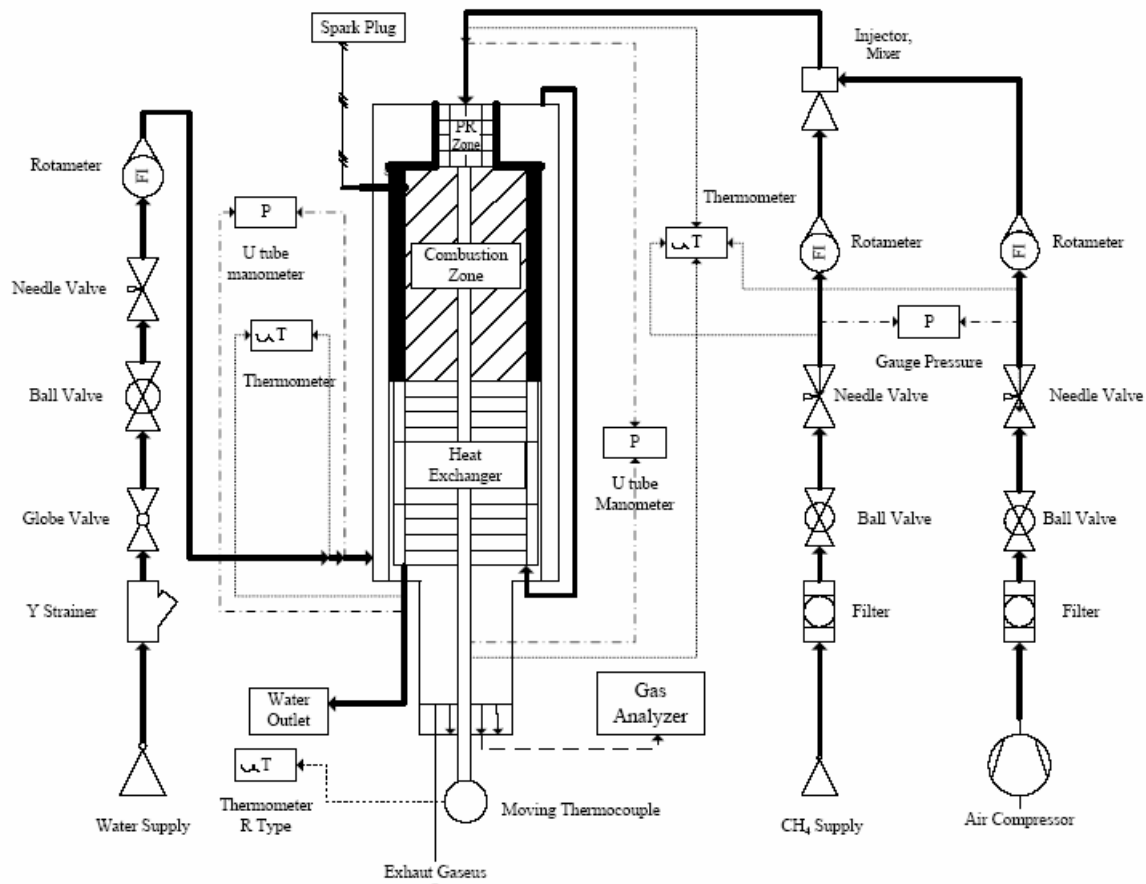
سامانه اندازه گیری دما برای نشان دادن موقعیت محوری شعله و جابجایی جبهه شعله به کار می رود. سامانه اندازه گیری دما شامل 5 عدد ترموکوپل نوع K و یک عدد ترموکوپل نوع R است. ترموکوپلهای نوع K جهت اندازه گیری دمای آب ورودی به مشعل، آب ورودی به مبدل حرارتی، آب خروجی از مبدل حرارتی (خروجی از مشعل)، مخلوط سوخت و هوای ورودی و گازهای احتراقی حاصل به کار برده می شوند. به دلیل بالا بودن دمای محفظه احتراق (بالای 1500 درجه سانتی گراد) از ترموکوپل نوع R (Pt & Ra 13%) جهت اندازه گیری دما در طول محفظه احتراق استفاده می شود. به این صورت که سوراخی به قطر 1 سانتی متر در مرکز فیلترهای سرامیکی توسط مته الماسه ایجاد می شود، سپس سیمهای ترموکوپل در یک لوله سرامیکی از جنس آلسینت، قرار داده می شود. این لوله از انتهای مشعل وارد محفظه احتراق می شود و در طول زمان کارکرد مشعل دمای محفظه را نشان می دهد. لازم به ذکر است که این ترموکوپل بر روی یک جک سوار شده است و به وسیله این جک در طول محفظه احتراق بالا و پایین می شود و بدین ترتیب دمای سرتاسر طول در مرکز آن قابل اندازه گیری است.

گازهای خروجی از مشعل توسط دود کش به بیرون هدایت می شوند. از یک سامانه اندازه گیر آلودگی (TESTO 350L) به منظور اندازه گیری مقادیر  $NO_x$  و  $CO$  و  $CO_2$  و  $O_2$  و  $HC$  تولیدی مشعل استفاده می شود که در انتهای مشعل و در مسیر گازهای خروجی نصب می شود.

سامانه اندازه گیری فشار شامل 2 عدد مانومتر (U tube). یکی از مانومترها جهت اندازه گیری اختلاف فشار آب ورودی و خروجی به مشعل به کار برده می شود مایع مورد استفاده در این مانومتر جیوه است. از دومین مانومتر جهت اندازه گیری اختلاف فشار مخلوط سوخت و هوای ورودی و گازهای احتراقی خروجی از مشعل (به عبارت دیگر افت فشار در طول مشعل شامل منطقه پیش گرمایش، محفظه احتراق پایدار و مبدل حرارتی) استفاده می شود مایع مورد استفاده در این مانومتر روغن قرمز مریام (SG=0.784) است. شکل 5 شماتیک کلی دستگاه آزمایشی را نشان می دهد/

## 2-3- کالیبراسیون

به منظور به دست آوردن نتایج دقیق، لازم است که وسایل اندازه گیری کالیبره شوند. برای اطمینان از کالیبره بودن روتامتر آب، در چند مورد دبی آب عبوری با بشر اندازه گیری شد. روتامترهای هوا و سوخت برای هوا در شرایط استاندارد کالیبره شده بودند. باتوجه به اینکه یکی از این روتامترها برای اندازه گیری دبی سوخت (گاز شهری) مورد استفاده قرار می گرفت، با استفاده جداولی که شرکت سازنده ارائه کرده بود آنرا برای گاز شهری کالیبره کردیم. برای کالیبره کردن ترموکوپل های نوع K و R آنها را در آب در حال جوش قرار داده و در طی خنک شدن آب، دمای نشان داده شده توسط ترموکوپل با دمای یک دماسنج جیوه ای مقایسه کردیم که به این طریق تا دقت یک درجه ترموکوپلها کالیبره گردیدند (نسبت به دماسنج جیوه ای). یکی از نقاط دیگری که برای کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت نقطه تعادل آب و یخ بود، که آنرا توسط ترموکوپل و دماسنج جیوه ای سنجش گردید.

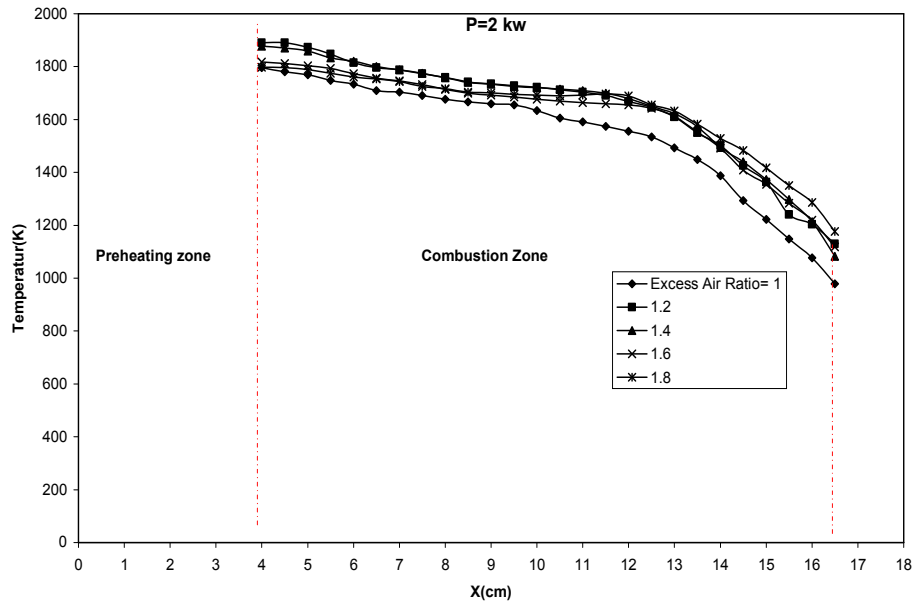


شکل (5) شماتیک دستگاه آزمایشی

### 3- نتایج

#### 3-1- توزیع دما

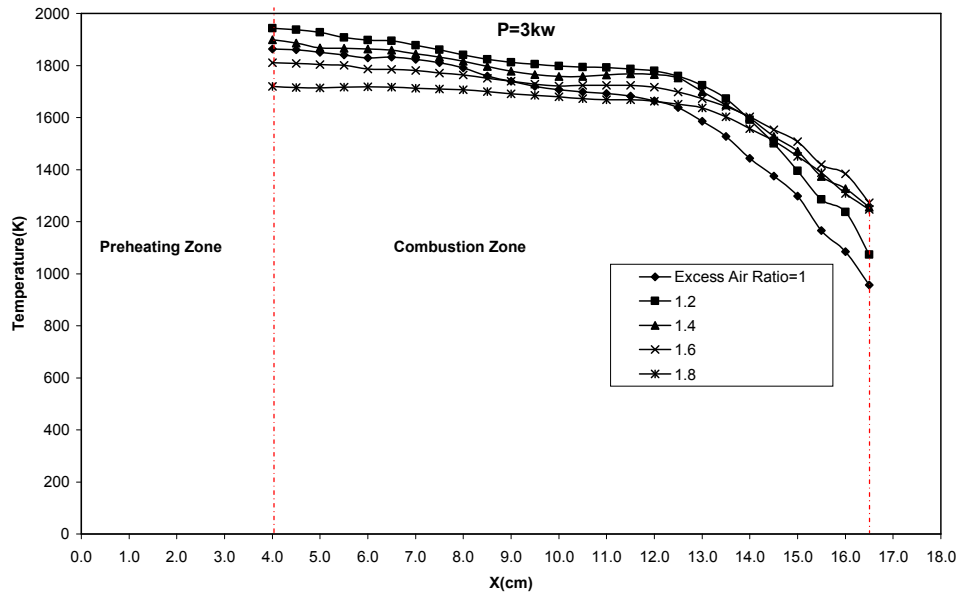
شکل‌های 6 تا 9 پروفیل‌های دما را بر روی محور مرکزی مشعل برای توان 2، 3، 4 و 5 kW و نسبت‌های هوای اضافی نشان می‌دهد. خطوط منقطع عمودی جدا کننده نواحی پیش گرمایش، احتراق و مبدل می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید دمای حداکثر در ابتدای ناحیه احتراق و انتهای منطقه پیش گرمایش قرار دارد، ولی با افزایش توان و نسبت‌های هوای اضافی جبهه شعله به سمت جلو حرکت می‌کند (شکل 8).



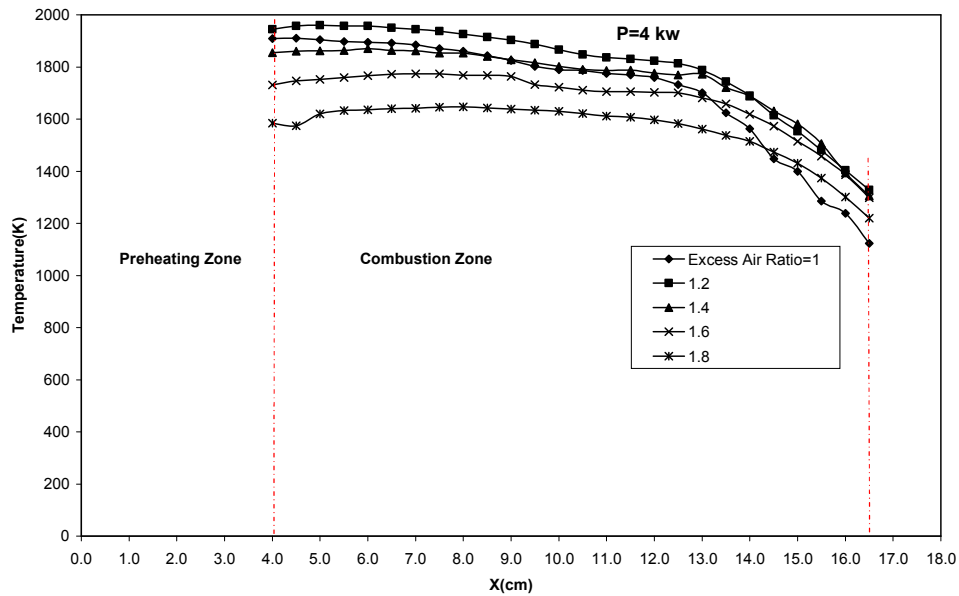
شکل (6) تغییرات دما در محفظه احتراق متخلخل برای فوم سرامیکی  $Al_2O_3$  و توان 2kW

در شکل‌های 6 تا 8 حداکثر دما در نسبت هوای اضافی  $1/2$  رخ می‌دهد که نشان می‌دهد در این حالت احتراق کامل بوده ولی با افزایش نسبت هوای اضافی دمای حداکثر شعله نیز کاهش می‌یابد. زیرا به علت افزایش دبی هوا با یک مقدار سوخت ثابت مقدار پیش گرمایش جریان کم می‌شود شعله به سمت جلو می‌رود و دمای بیشینه شعله کم می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود هر چه به مبدل حرارتی نزدیک می‌شویم دمای محفظه احتراق کاهش یافته که این نکته در توانهای پایین به خوبی مشهود است و شیب خطوط توزیع دما در نزدیکی مبدل حرارتی زیاد است.

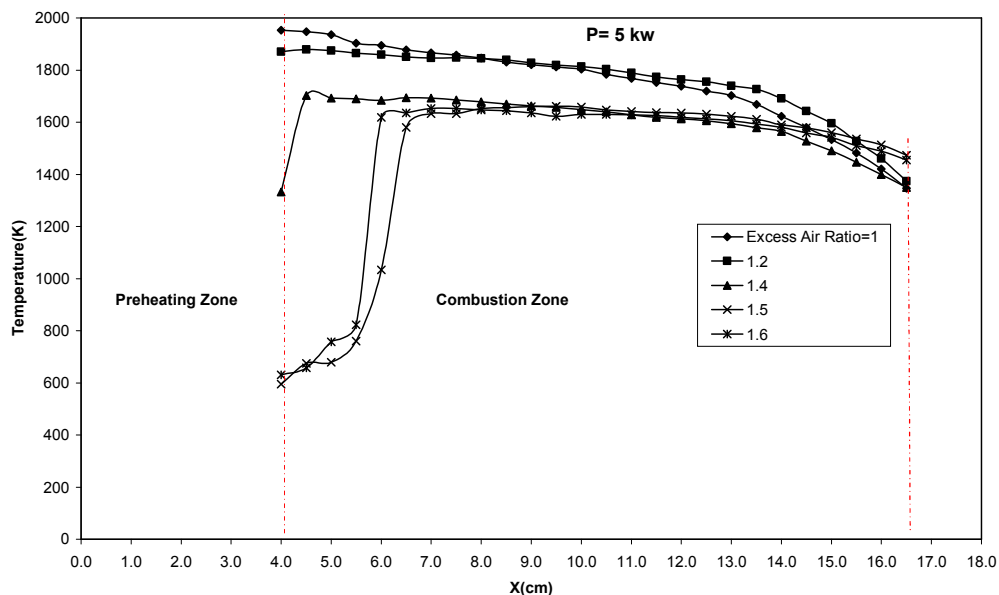




شکل (7) تغییرات دما در محفظه احتراق متخلخل برای فوم سرامیکی  $Al_2O_3$  و توان 3kW



شکل (8) تغییرات دما در محفظه احتراق متخلخل برای فوم سرامیکی  $Al_2O_3$  و توان 4kW

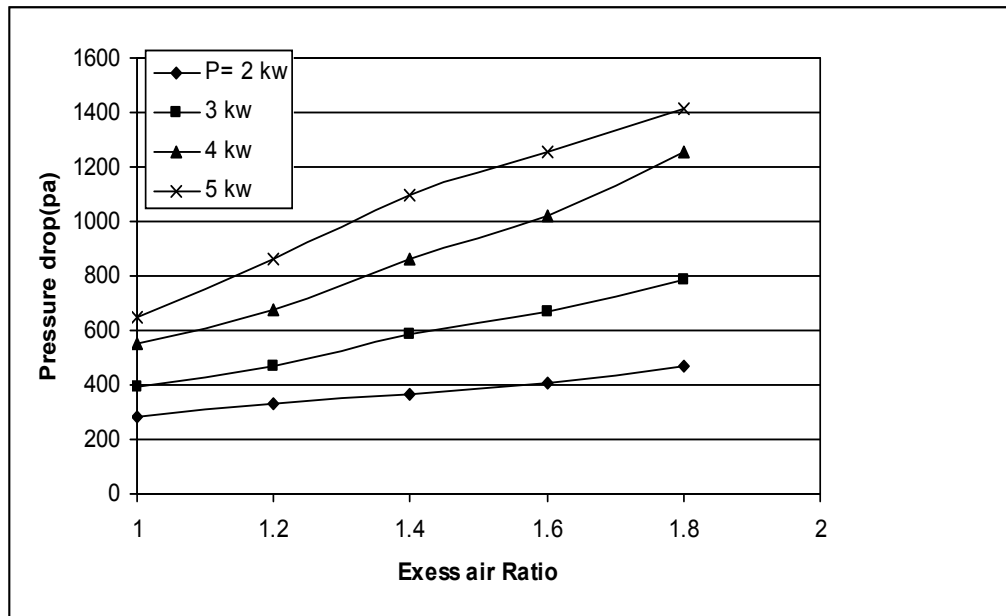


شکل (9) تغییرات دما در محفظه احتراق متخلخل برای فوم سرامیکی  $Al_2O_3$  و توان 5kW

در شکل 9 مشاهده می شود که حداکثر دما برای حالت استوکیومتری اتفاق می افتد که به علت دبی پایین قابل پیش بینی است. همچنین مشاهده می شود که شیب خطوط دما در این حالت نسبت به سه توان قبلی کمتر است و با افزایش نسبت هوای اضافی جبهه شعله به سمت جلو هدایت می شود. همانطور که مشاهده می شود برای مقادیر جریان کم، جریان در داخل ناحیه پیش گرمایش مشتعل شده و جبهه شعله در این ناحیه تشکیل می شود، ولی با افزایش دبی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می کند و برای دبی های بالا در قسمت احتراق پایدار می شود. همچنین با افزایش هوای اضافی در یک توان ثابت با پیشروی شعله دمای بیشینه آن نیز کم می شود. در جریانهای احتراقی سرعت جریان نمی تواند از یک حد معین بیشتر باشد چون اگر سرعت در ناحیه احتراق بیشتر از سرعت شعله باشد، امکان انتشار شعله وجود نخواهد داشت و جریان خفه می شود، به همین دلیل است که در توان 5 kW برای نسبت هوای اضافی بالای 1/8 مشعل دچار خفگی می شود.

### 3-2- افت فشار در مشعل

افت فشار در مشعل در شکل 10 آورده شده است که برای توانهای 2 تا 5 kW کمترین و بیشترین مقدار افت فشار بین 282 تا 1411 pa است. به نظر می رسد که بیشترین افت فشار در منطقه پیش گرمایش و مبدل حرارتی رخ دهد. در یک توان ثابت با افزایش نسبت هوای اضافی دبی کل جریان افزایش می یابد و به دنبال آن افت فشار افزایش پیدا می کند که قابل انتظار است. با افزایش توان، دبی و به دنبال آن افت فشار زیاد می شود.



شکل (10) افت فشار در مشعل

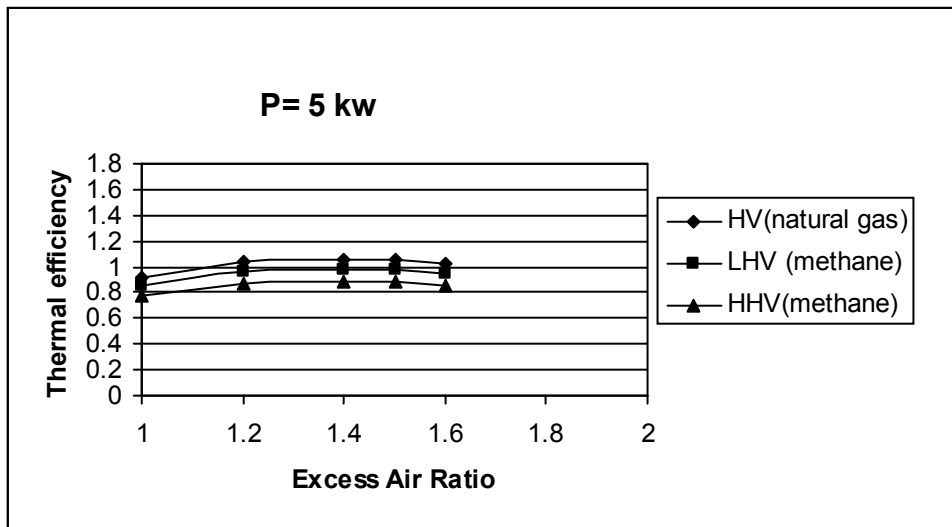
### 3-3- بازده حرارتی

هنگامی که از مشعل محیط متخلخل با مبدل حرارتی جهت تولید آب گرم استفاده می شود، قسمت زیادی از گرمای آزاد شده واکنش شیمیایی به آب داخل مبدل حرارتی می رسد و قسمتی هم به صورت غیر قابل استرداد به محیط داده می شود. بازده حرارتی به صورت انرژی داده شده به آب سرد ( $\dot{Q}_w$ ) نسبت به ارزش حرارتی سوخت تزریق شده اولیه ( $\dot{Q}_g$ ) تعریف می شود:

$$\eta = \dot{Q}_w / \dot{Q}_g$$

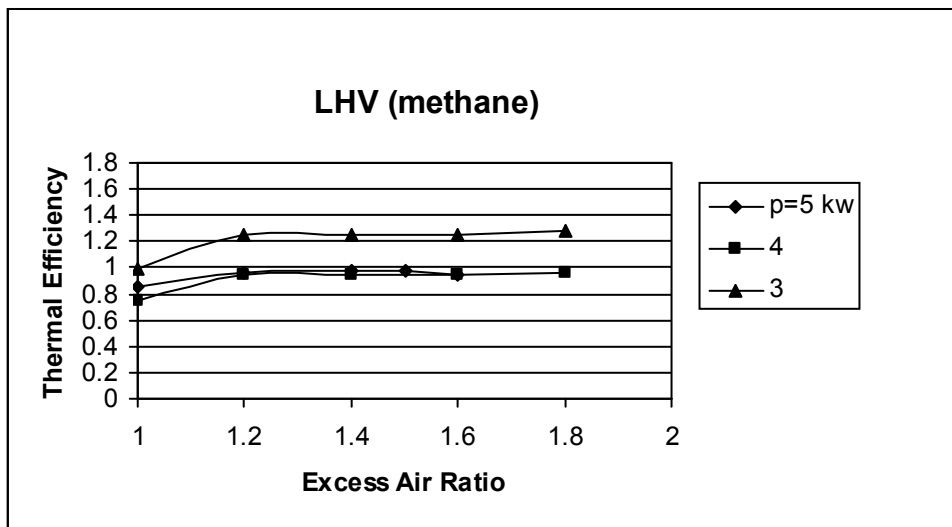
اگر آب موجود در محصولات احتراق چگالیده شده و دمای آن به کمتر از 50 درجه سانتیگراد برسد، راندمان حرارتی نزدیک به 100٪ می شود.

به دلیل دمای پایین لوله های مبدل، بخار آب در خروجی مبدل چگالیده شده و گرمای نهان به آب سرد داخل لوله ها منتقل می شود. دمای خروجی در آزمایشهای انجام شده بین 34 تا 50 درجه سانتیگراد است.

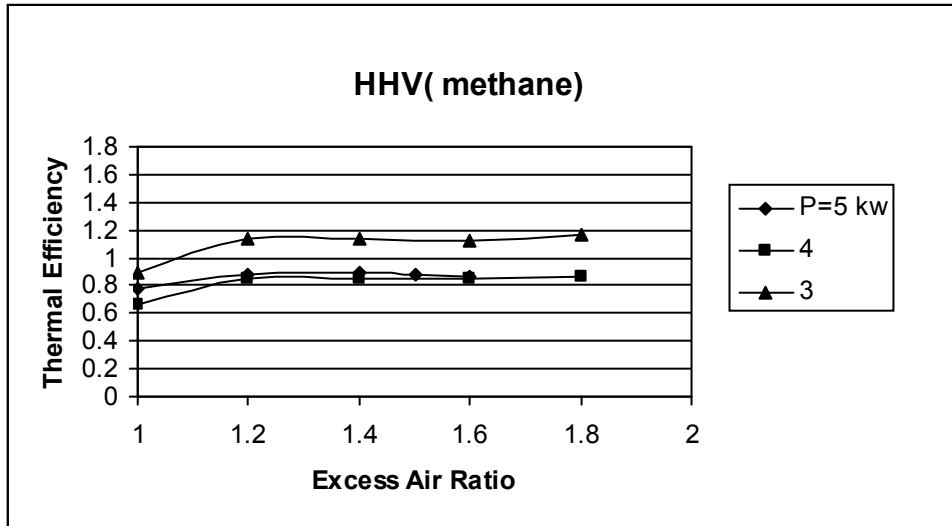


شکل (11) راندمان حرارتی مشعل برای توان 5kW با مقادیر ارزش حرارتی گاز شهری، ارزش حرارتی پایین متان و ارزش حرارتی بالای متان

نتایج بازده حرارتی در شکل 11 برای توان 5 kW نشان داده شده است. ملاحظه می شود که بیشترین بازده در محدوده نسبت هوای اضافی 1/2 اتفاق می افتد. این بدان دلیل است که در این نسبت بیشترین دمای محصولات احتراقی اتفاق می افتد. به دلیل چگالش آب محصولات خروجی، گرمای به دست آمده نزدیک به ارزش حرارتی بالای سوخت است. اما در هر صورت راندمان بر حسب ارزش حرارتی نمی تواند بالاتر از 1 شود، لکن در شکل 11 ملاحظه می شود که وقتی از ارزش حرارتی گاز طبیعی که در بعضی از مراجع داخل کشور گزارش شده استفاده گردد، بازده حرارتی به بیش از 100٪ می رسد که این خود ناشی از عدم معلوم بودن ارزش حرارتی دقیق گاز طبیعی است. البته به دلیل چگالش آب محصولات احتراقی و دمای پایین این محصولات (حدود 30-50 درجه سانتیگراد) می توان انتظار داشت که بازده نزدیک 100٪ باشد



شکل (12) راندمان حرارتی مشعل برای توان های 2 تا 5 kW وابسته به ارزش حرارتی پایین متان

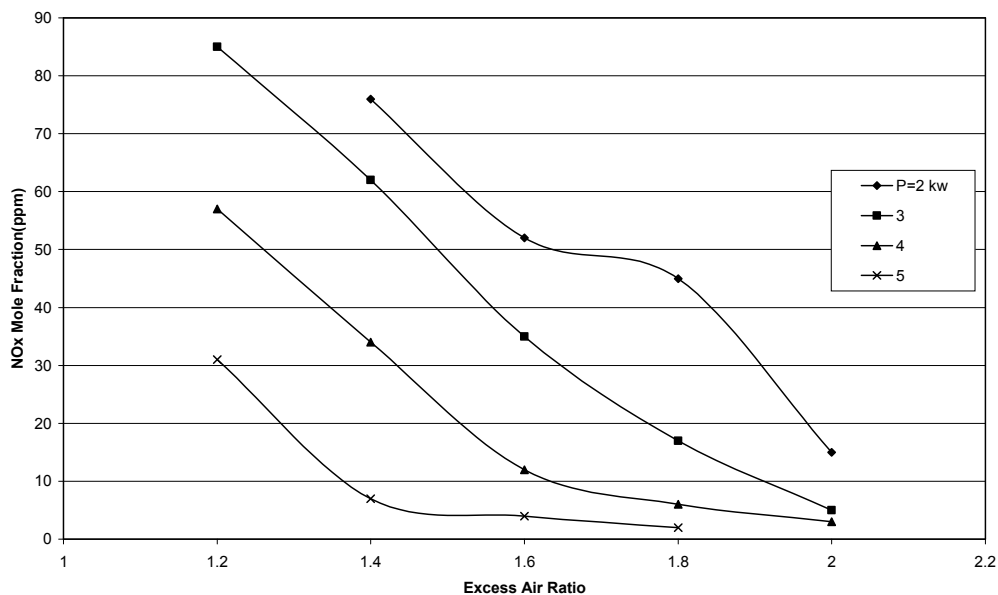


شکل (13) راندمان حرارتی مشعل برای توان های 2 تا 5 kW وابسته به ارزش حرارتی بالای متان

در شکل های 12 و 13 به ترتیب بازده حرارتی مشعل برای توانهای مختلف در نسبت هوای اضافی مختلف بر مبنای ارزش حرارتی پایین و بالای متان ترسیم شده است. علت استفاده از ارزش حرارتی متان در این شکل ها آن است که ارزش دقیق حرارتی گاز طبیعی اولاً در دسترس نبود و ثانياً در تمامی آزمایشها مقدار آن ثابت و مشخص نبود. همچنین در این شکلها مشاهده می شود که با کاهش توان (توان 3 kW) راندمان حرارتی به بیش از 100٪ می رسد. چون در توانهای کمتر مقدار سوخت و هوای کمتری مصرف می شود، میزان خطای اندازه گیری دبی افزایش پیدا می کند. در واقع به طور مثال حد اکثر دبی عبوری از روتامتر هوا 24000 لیتر در دقیقه می باشد. دقت این روتامتر 1 درصد حد اکثر دبی است، لذا در دبی های پایین مقدار خطا در مقایسه با دبی اندازه گیری شده قابل مقایسه شده و این امر خطای اندازه گیری را افزایش می دهد. بنابر این خطای موجود در میزان بازده حرارتی مشعل در توان 3 kW ناشی از همین امر می باشد.

### 3-4- آنالیز گازهای خروجی

اندازه گیری مقادیر  $NO_x$  در گازهای خروجی مشعل انجام شد و نتایج غلظت  $NO_x$  و CO در شکل 14 آورده شده است. میزان هوای اضافی تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی میزان NO دارد. میزان NO با افزایش هوای اضافی کاهش می یابد (شکل 14). با افزایش هوای اضافی دمای بیشینه شعله کاهش می یابد. بنابراین میزان NO برای هوای اضافی کمتر، بالاتر می باشد. نتایج به دست آمده غلظت  $NO_x$  (بین 2 تا 85 ppm) وابسته به توان حرارتی و نسبت هوای اضافی دارد. این نکته قابل ذکر است که با افزایش نسبت هوای اضافی مقادیر  $NO_x$  کاهش می یابد.



شکل (13) غلظت NO<sub>x</sub> برای توان 2 تا 5kW و نسبت‌های هوای اضافی

#### 4- جمع بندی

در این تحقیق یک مشعل محیط متخلخل با مبدل حرارتی و تجهیزات آزمایشگاهی مرتبط طراحی و ساخته شد. تغییرات دما در محفظه احتراق محیط متخلخل ثبت شده و راندمان حرارتی مشعل و غلظت گازهای آلاینده اندازه گیری گردید. با توجه به اینکه در ابتدا دلیل استفاده از مشعل های محیط متخلخل کارآیی بیشتر، توان دینامیکی که منجر به کوچک شدن مشعل می شود و تولید آلودگی کمتر بیان شده بود، نتایج به دست آمده تایید کننده این اهداف بود.

آنچه از این تحقیق بر می آید آن است که در توان های 2 تا 4 kW دمای بیشینه شعله در نسبت هوای اضافی کم رخ می دهد. با افزایش نسبت هوای اضافی دمای بیشینه شعله کاهش پیدا می کند. تولید NO<sub>x</sub> در یک توان خاص با افزایش نسبت هوای اضافی کاهش پیدا می کند. افت فشار با افزایش توان و نسبت هوای اضافی زیاد می شود.

آنچه مسلم است به منظور رسیدن به تمامی اهداف و استفاده از این نوع مشعل ها در منازل جهت آب گرمکن مستلزم تحقیقات بیشتر و تامین بودجه لازم جهت انجام کارهای تجربی است که این با توسعه روابط دانشگاه و صنعت دور از انتظار نیست.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت ملی گاز ایران که حمایت مالی این تحقیق را بر عهده داشت، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## مراجع

- [1] Soete G. De. "Stability and Propagation of Combustion Wave in Porous Media" On combustion, pp 959-966,1966.
- [2] Takeno T., Sato K. and Hase K. "Effects of Solid Length and Heat Loss on an Excess Enthalpy Flame" Combust.Sci. and Tech, 31,pp 207,1983.
- [3] Hashimoto T., Yamakaki S. and Takeno T. "An Excess Enthalpy Flame Stabilized in Ceramic Tubes", Progress in Astro and Aero,88, pp57-77,1983.
- [4] Kotani Y. and Takeno T. "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame" The Nineteenth symposium on combustion, PP 277-287,1989.
- [5] Kotani, H. Behbehani F., and Takeno. "An Excess Enthalpy Flame Combustor for Extended Flow Ranges" The Twentieth Sym on combustion, pp 2025-2033, The Combustion Institute, 1984.
- [6] Babkin V.S., Korzhavin A.A. and Bunev V.A. "Propagation of Premixed Gaseous Explosion flame in porous media" Combustion and Flame, V 87, pp 182-190,1991.
- [7] Fox J.S. "Burners producing large excess enthalpies". Combust.Sci. and Tech, 12,pp 147-151,1976.
- [8] Hardesty D.R. and Weinberg F.J. "Converter Efficiency in Burner Systems Producing Large Excess Enthalpies". Combust.Sci. and Tech, 12,pp 153-157,1987.
- [9] Weinberg F.J. "Combustion temperatures: the future Nature",233, 239.
- [10] Korzhavin A.A., Bunev V.A., Abdullin R.Kh. and Babkin V.S. "Flame Zone in Gas Combustion in an Inert Porous Media" Combustion Explosion and Shock Waves USSR,V 18, PP 628-631, 1982.
- [11] Chafin C., koenig M., Koeroghlian M,Matthews R.D., Hall M.J, Nichol S.P. and Lim I.G. "Experimental Investigation of Premixed Combustion Within Highly Porous Media" Proceeding ASME/JSME Thermal Engineering joint conf. ,4, pp 219-224,1991.
- [12] Howell J.R., Hall H.J. and Ellzey J.L. "Combustion of Hydrocarbon Fuels Within Porous Inert Media" Energy Combust. Sci, V 22,PP 121-145,1996
- [13] Durst F. and Trimis D. "Combustion in Porous Medium-Advances and Applications. Combust.Sci. and Tech", V 121,pp 153-168,1996.
- [14] Hsu P.F., Evans D., Howell J.R. "Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion within Nonhomogenous Porous Ceramics" Combust.Sci. and Tech, 90,pp 149-172,1993.
- [15] Khanna V., Goel R. and Ellzey J.L.. "Measurments of Emissions and Radiation for Methane Combustion with in a Porous Medium Burner" Combust.Sci. and Tech,V99,pp133-142,1994.
- [16] Matthew T. Smucker and Ellzey J.L. "Computational and Experimental Study of A two-Section Porous Burner" Combust.Sci. and Tech, 176,1171-1189,2004.
- [17] Delalic N., Mulahasanovic Dz., Ganic E.N. "Porous Media Compact Heat Exchanger unit-Experiment and Analysis", Experimental Thermal and Fluid Science, V 28,pp185-192,2004.