

۱-۱- مقدمه

بدلیل محدودیت‌ها برای حفظ محیط زیست و استانداردهای خودروها که هر روز به سمت حفاظت بیشتر از محیط زیست می‌رود و برای جلوگیری از آلودگی هوا می‌توان از سوخت گاز طبیعی که بالا بودن نسبت هیدروژن به کربن (H/C) در آن موجب کاهش دی‌اکسید کربن حاصل از احتراق می‌گردد، و در چند سال اخیر نسبت به بقیه سوخت‌های فسیلی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است استفاده کرد.

اما بدلیل ماهیت گاز طبیعی استفاده به تنهایی از این سوخت برای موتورهای مضرتر دارد. بازده حرارتی کم، کاهش راندمان حجمی، تغییرات سیکنی زیاد موتورهای گازسوز در شرایط کاری موتور موجب افت توان خروجی می‌شود [2009, Hu et al]. این موضوع باعث شد تا استفاده از یک سوخت ترکیبی بعنوان کاهنده احتمالی استهلاک و افزایش توان موتور نسبت به حالت گازسوز در این پایان‌نامه مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به شرایط کاری موتور و رژیم جریانی آشفته حاکم بر آن و همچنین فرآیندهای همزمان اختلاط، تراکم و انبساط، احتراق و انتقال گرما که بر پیچیدگی تحلیل موتور می‌افزاید، لزوم استفاده از کدهای رایانه‌ای و شبیه‌سازها ضروری است. بطوری که بدون استفاده از کدها، زمان و هزینه و دشواری استخراج نتایج تجربی توجیه اقتصادی نخواهد داشت. بر همین اساس در کار حاضر هم نتایج اولیه آزمایشگاهی بعنوان اطلاعات ورودی به کد ترمودینامیکی سرعت سوختن داده شده است تا مورد پردازش قرار گیرد.

۱-۲- ضرورت تحقیق

برای تحلیل فرآیند احتراق در موتورهای اشتعال جرقه‌ای که میدان جریان حاکم بر مخلوط سوخت و هوا، ماهیت متلاطم و در فاز گازی دارد، لازم است که ارتباط تلاطم با آهنگ احتراق مخلوط یا همان سرعت سوختن متلاطم مشخص شود.

سرعت سوختن متلاطم^۱ (u_T)، تابعی از نوع سوخت^۲ (FT)، نسبت اکی والانس (Φ)، فشار (P)، دما (T)، سرعت تلاطم (u') و مشخصه‌های طولی تلاطم (l)، است.

$$u_T = f_t(FT, \Phi, T, P, u', l) \quad (1-1)$$

از طرفی سرعت سوختن ورقه‌ای^۳ (u_L)، تابعی از نوع سوخت، نسبت اکی والانس، فشار و دما می‌باشد.

$$u_L = f_L(FT, \Phi, T, P) \quad (2-1)$$

از این رو می‌توان سرعت سوختن متلاطم را تابعی از سرعت سوختن ورقه‌ای و مشخصه‌های تلاطم در نظر گرفت:

$$u_t = f_t(u_L, u', l) \quad (3-1)$$

به همین روش، روابط زیادی برای بیان سرعت سوختن متلاطم وجود دارد که در فصل‌های آینده، به چند نمونه اشاره شده است.

با تغییر نوع سوخت در محفظه احتراق معین موتور، سرعت سوختن ورقه‌ای تغییر می‌کند و سبب تغییر سرعت سوختن متلاطم می‌شود. این تغییرات پارامترهای طراحی موتور که شامل مصرف سوخت ویژه، بازده حرارتی، حداکثر قدرت خروجی، حداکثر گشتاور ترمزی و گازهای منتشره را متاثر می‌سازد.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی از انجام این پژوهش تعیین سرعت سوختن ورقه‌ای حاصل از احتراق مخلوط دو سوخت بنزین و گاز طبیعی با هوا تحت فشار اولیه ۷/۵ بار است.

به دلیل اینکه هدف این پایان‌نامه تعیین سرعت سوختن ورقه‌ای در فشار بالا می‌باشد، روش بمب حرارتی کروی که قبلاً برای این منظور طراحی و ساخته شده است، مناسب تشخیص داده شده، که در

1- Turbulent burning velocity

2- Fuel type

3- Laminar burning velocity

فصل سوم بطور کامل به همراه تعلیقات مربوطه شرح داده شده است. داده‌های آزمایشگاهی فشار- زمان به کمک کد توسعه‌یافته ترمودینامیکی آنالیز و سرعت سوختن ورقه‌ای تعیین می‌شود.

۴-۱- چشم اندازی به فصل‌های آتی

در فصل دوم کلیات و تعاریف و همچنین روش‌های مختلف تعیین سرعت سوختن، به همراه کارهای انجام شده در مورد تعیین سرعت سوختن با استفاده از بمب حرارتی آورده شده است.

همچنین اطلاعاتی در مورد بمب حرارتی کروی به همراه سیستم‌های مختلف وابسته به آن از جمله سیستم ایجاد اختلاط مناسب دو سوخت، سیستم پیش‌گرم‌کن، سیستم خلاء‌ساز، سیستم جرقه و سیستم‌های اندازه‌گیری دما و فشار و همچنین ساخت مانومتر جیوه‌ای، تأثیر آن در افزایش دقت به همراه سیستم اخذ داده‌های تجربی و همچنین کد ترمودینامیکی تحلیل احتراق و مختصری از الگوریتم برنامه، شرح داده شده است.

در فصل سوم نتایج تجربی حاصله و تحلیل آنها آورده شده است و در نهایت

در فصل چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای مطالعات آینده جمع‌بندی شده است.

فصل دوم

تعاریف و روش‌های تعیین سرعت

سوختن و مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱- مقدمه

در این فصل تاریخچه تحقیق به همراه تعاریف و روش‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت سوختن، مزیت روش بمب حرارتی به همراه کارهای انجام گرفته به روش بمب حرارتی و همچنین تئوری تعیین سرعت سوختن ورقه‌ای شرح داده شده و تاثیر طول مارکستین روی آن بررسی می‌شود.

۲-۲- تعریف احتراق

احتراق واکنشی شیمیایی است بین دو ماده شیمیایی که یکی نقش اکسیدکنندگی و دیگری نقش اکسیدشونده را دارند، می‌باشد. در احتراق میدان جریان حاکم بر مخلوط نسوخته نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. قوانین حاکم بر پدیده احتراق از تعریف سه خاصیت مهم سیال یعنی گرانروی، رسانش گرمایی و نفوذ جرم تبعیت می‌کند که عبارتست از:

۱- قانون گرانروی نیوتن برای انتقال اندازه حرکت

۲- قانون رسانش فوریه برای انتقال گرما

۳- قانون پخش فیک برای انتقال گونه‌ها یا جرم

احتراق کامل هنگامی اتفاق می‌افتد که تمام عناصر موجود در سوخت به بالاترین حد ترکیب با اکسیژن برسد، در غیر اینصورت احتراق ناقص است.

۲-۳- مشخصه‌های شعله

شعله انتشار خود تحمیلی^۱ یک منطقه احتراق محلی در سرعت‌های زیر صوت در مدت زمان کوتاه می‌باشد [2004, Yin]. حرکت نسبی شعله به طرف گازهای نسوخته از مشخصه مهم شعله می‌باشد. وجود حرکت نسبی شعله، اشاره بر این دارد که واکنش به منطقه‌ای محدود می‌شود که ضخامت آن در مقایسه با ابعاد محفظه احتراق کوچک است. معمولاً منطقه واکنش مذکور جبهه شعله نامیده می‌شود. مشخصه

1- Self-sustaining

انتشار فضایی شعله از تلفیق قوی ما بین پدیده‌هایی مثل واکنش شیمیایی، فرآیند انتقال جرم، هدایت گرمایی و گرانش سیال ناشی می‌شود.

۲-۴- طبقه‌بندی شعله

شعله نتیجه یک واکنش شیمیایی خود تحمیل کننده است که به واسطه آن در ناحیه‌ای از فضا مخلوط نسوخته گرم شده می‌سوزد و به محصولات تبدیل می‌شود که در زیر به انواع آن اشاره می‌شود.

۲-۴-۱- شعله پیش‌آمیخته^۱

اگر سوخت و اکسید کننده که در منطقه واکنش وجود دارد بطور یکنواخت و در خارج محفظه احتراق با هم مخلوط شوند و سپس مشتعل شوند، شعله پیش‌آمیخته تشکیل می‌شود.

۲-۴-۲- شعله‌ی نفوذی^۲

اگر عمل اختلاط سوخت و اکسید کننده پیش‌آمیخته نباشد و در محلی که واکنش قرار است اتفاق بیافتد با هم مخلوط شوند به شعله حاصل از چنین مخلوطی، شعله نفوذی می‌گویند.

۲-۴-۳- شعله‌ی ورقه‌ای

از اصول مهم در تقسیم بندی شعله، حالت جریان گاز در منطقه واکنش است، که بستگی به آرام یا درهم بودن آن دارد. در جریان ورقه‌ای عمل اختلاط در اعداد رینولدز پایین اتفاق می‌افتد و انتقال توسط فرآیند مولکولی انجام می‌گیرد. عدد رینولدز، نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوزی است.

۲-۵- تعریف سرعت سوختن

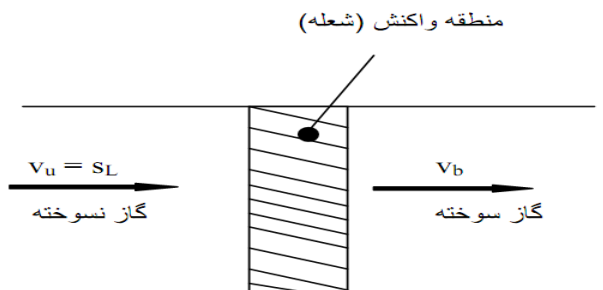
سرعت سوختن یکی از خواص مهم مخلوط قابل اشتعال سوخت و هوا است که به صورت حرکت جبهه شعله در جهت عمود به سطحش در میان گازهای نسوخته تعریف می‌شود.

1- premixed flame

2- Diffusion flame

همچنین می‌توان سرعت سوختن را آهنگ انتشار موج احتراق در میان مخلوط اشتعال‌پذیر گازی تعریف کرد [2000, GU et al].

سرعت سوختن به دو صورت ورقه‌ای و متلاطم مطرح است. سرعت سوختن ورقه‌ای، سرعت پیشروی جبهه شعله عمود بر خود و نسبت به جبهه شعله است که در شرایط جریان آرام، گازها به محصولات تبدیل می‌شوند (شکل ۱-۲). در این تعریف، شعله ساکن می‌باشد و گازهای سوخته از شعله دور می‌شوند و گازهای نسوخته به طرف ناحیه واکنش وارد می‌شوند. چگالی گازهای سوخته از چگالی گازهای نسوخته کمتر است، در نتیجه گازهای سوخته دارای سرعت بیشتری نسبت به گازهای نسوخته می‌باشند.

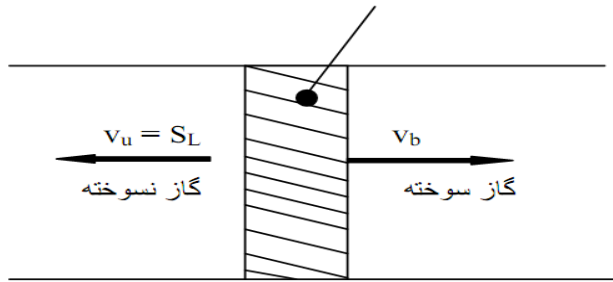


شکل (۱-۲) گازهای که با سرعت $S_L = v_u$ به ناحیه واکنش وارد می‌شوند و پس از سوختن با سرعت

$v_b > v_u$ خارج می‌شوند [2000, GU et al].

اما در بدم حرارتی وضعیتی که بیشتر به آن شبیه است، وضعیتی است که در آن گاز نسوخته ابتدا در یک فضای مشخص محدود می‌باشند و ناحیه واکنش در میان آن پیشروی می‌کند، در این حالت سرعت سوختن ورقه‌ای، سرعتی می‌باشد که جبهه شعله با آن سرعت به سمت گاز نسوخته مجاور خود حرکت می‌کند (شکل ۲-۲). علت این که گازهای نسوخته از جبهه شعله دور می‌شوند این است که انبساط گازهای سوخته سبب تراکم گازهای نسوخته می‌شود. به طور تجربی ثابت می‌شود که اگر متغیرهای مخلوط ثابت فرض شوند، برای هر نوع سوخت، سرعت سوختن ورقه‌ای دارای مقدار ثابتی خواهد بود [1996, Lefebvre].

منطقه واکنش متحرک (شعله متحرک)



شکل (۲-۲) پیشروی شعله ورقه‌ای به سمت گاز نسوخته با سرعت آرام شعله S_L [1996, Lefebvre].

در موتورهای واقعی احتراق متلاطم است. این تلاطم باعث می‌شود که شعله به حالت باریک و پر پیچ و خم که مخلوط نسوخته در آن به دام افتاده است، تبدیل شود. همچنین حرکات مغشوش گاز به پیشروی شعله کمک می‌کند و از آنجا که سرعت‌های منطقه‌ای گاز ناشی از تلاطم، گاهی از سرعت سوختن ورقه‌ای شعله بزرگتر است، در نتیجه حضور تلاطم سرعت واقعی منطقه پیشرفت واکنش را افزایش می‌دهد، که به آن سرعت سوختن متلاطم می‌گویند.

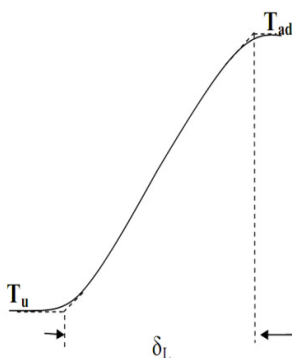
۲-۶- معادلات مربوطه ضخامت شعله، نرخ کشیدگی شعله، سرعت سوختن و طول مارکستین

در پروفیل دمای شعله که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود که دمای گاز نسوخته با یک روند صعودی به حداکثر دمای خود که همان دمای آدیاباتیک شعله می‌باشد، رسیده است. با فرض δ_1 به عنوان ضخامت شعله، رابطه آن با سرعت سوختن بصورت زیر پیشنهاد شده است [2008, Mishra]:

[Mishra]

$$\delta_1 = \frac{4}{3(\alpha/u_1)} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق α ، ضریب پخش گرمایی است. مشخصات ترمودینامیکی در این رابطه نسبت به گاز نسوخته تعریف می‌شود.



شکل (۳-۲) پروفیل دمایی در شعله پیش آمیخته یک بعدی [2008, Mishra]

سرعت کشیدگی شعله S_n ، در محفظه‌ی بسته به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$S_n = u_n + u_g \quad (۲-۲)$$

که در آن u_n ، سرعت نسبی ورود گاز نسوخته به جبهه شعله و u_g ، سرعت انبساط گاز سوخته است. سرعت کشیدگی شعله S_n ، از اندازه‌گیری شعاع جبهه شعله نسبت به زمان به وسیله‌ی عکسبرداری رشد شعله تعیین می‌گردد.

$$S_n = dr_n / dt \quad (۳-۲)$$

r_n شعاع شعله است.

نرخ کشیدگی کلی برای شعله کروی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{1}{A} \left(\frac{dA}{dt} \right) \quad (۴-۲)$$

که A سطح شعله است.

برای شعله با انبساط کروی α به صورت زیر در می‌آید:

$$\alpha = (1/4\pi r_u^2) (8\pi r_u dr_u / dt) = (2/r_u) (dr_u / dt) = (2/r_u) S_n \alpha \quad (۵-۲)$$

بین سرعت شعله و نرخ کشیدگی رابطه خطی زیر وجود دارد که توسط طول مارکستین گاز سوخته

L_b تعیین می‌شود:

$$S_1 - S_n = L_b \alpha \quad (6-2)$$

S_n سرعت شعله کشیده نشده است و از مقدار S_n در $\alpha=0$ از روی نمودار S_n بر حسب α بدست می آید. طول مارکستین، شیب خط $S_n - \alpha$ که می توان از نتایج تجربی بدست آورد. طول مارکستین بیانگر کاهش در سرعت سوختن بواسطه کشیدگی شعله است.

از روی مقدار S_1 ، سرعت سوختن ورقه ای کشیده نشده u_L ، بدست می آید:

$$u_L = S_1 (\rho_b / \rho_u) \quad (7-2)$$

با تقسیم طول مارکستین بر ضخامت شعله، عدد بی بعد مارکستین بدست می آید:

$$Ma = L_b / \delta_1 \quad (8-2)$$

۷-۲- روش های مختلف برای تعیین سرعت سوختن

به دلیل نبود داده های کافی، مدت ها به موضوع اندازه گیری سرعت سوخت توجه نمی شد. از زمانی که بحث احتراق مخلوط های فقیر در موتورهای اشتعال جرقه ای جدی شد، توجه به سرعت های شعله در حالت های فقیر بیشتر شد و تکنیک های مختلف اندازه گیری مطرح شد. امروزه به طور گسترده از روش های مختلف برای اندازه گیری سرعت سوختن استفاده می شود. محاسبه سرعت سوختن با توجه به ساختمان محفظه احتراق و فنون اندازه گیری رژیم جریان حاکم تعیین می شود. روش های مختلف تعیین سرعت سوختن را می توان به دو صورت کلی، مشاهده ای و آزمایشگاهی طبقه بندی کرد.

۷-۲-۱- روش های مشاهده ای تعیین سرعت سوختن

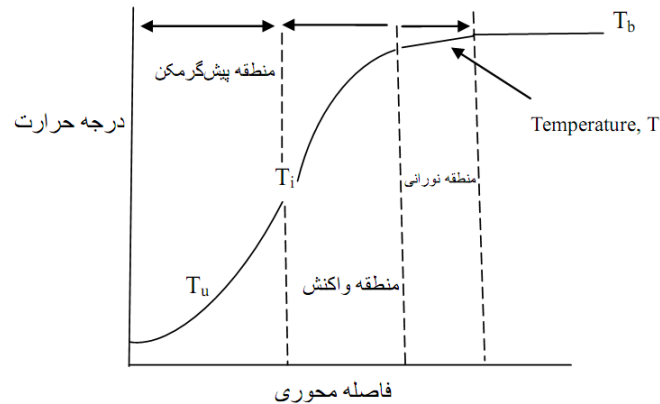
از روش های مشاهده ای جهت تعیین سرعت سوختن می توان به عکس برداری مستقیم، عکس برداری شلیرین^۱، عکس شادوگراف^۲ و روش تداخل سنجی^۳ اشاره کرد.

1- Schlieren photography

2- Shadowgraph picture

3- Interferometry

شکل (۲-۴) میدان دمایی در یک شعله ورقه‌ای را نشان می‌دهد. در روش عکس برداری مستقیم از قسمت نورانی شعله که در آخرین قسمت شعله و در سمت گاز نسوخته قرار گرفته است، مشاهداتی جهت اندازه‌گیری سرعت سوختن به دست می‌آید. این روش معمولاً روش مطلوبی نمی‌باشد.



شکل (۲-۴) میدان‌های دمایی در یک شعله ورقه‌ای [Heywood, 1988]

عکس برداری شلیرین بر پایه اندازه‌گیری مقدار گرادیان جرم مخصوص است. سطح مورد استفاده در این روش، در اوایل شعله از سمت مخلوط نسوخته قرار دارد و توسط بسیاری از محققین توصیه شده است. شیوه عکس برداری و فیلم برداری شلیرین در محاسبه سرعت سوختن بسیار پرکاربرد است. به عنوان مثال یکی از راه‌های محاسبه سرعت سوختن ورقه‌ای، روش شعله‌های غیرساکن است که در آن سرعت رشد شعله (S_{fl}) می‌باشد و از رابطه (۲-۳) حاصل می‌شود:

$$S_{fl} = dr_n/dt$$

r_n شعاع شعله است که از عکس برداری شلیرین بدست می‌آید و t بیان‌کننده زمان از لحظه جرقه زنی می‌باشد. مندلیاس و همکاران^۱ از این روش در سال ۲۰۰۷ در تحقیقات خود استفاده کردند. در روش شادوگراف اولین مقطع جبهه شعله مطابق شکل (۲-۲) که در حالت تغییر است، اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از آن، مشتق گرادیان جرم مخصوص اندازه‌گیری می‌شود. در سال ۲۰۰۱ تاهتو و همکاران^۲ از این تکنیک برای مشخص کردن منطقه واکنش استفاده کردند.

1- Mandilas et al.

2-Tahtouh et al.

در روش تداخل سنجی بطور مستقیم وزن مخصوص یا درجه حرارت را اندازه گیری می کنند. گولدمر و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۱ از این روش برای تحقیقات خود استفاده کردند.

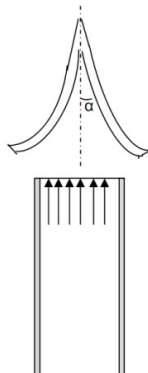
لازم به ذکر است که از این روش ها به دلیل کمبود امکانات عکس برداری فوق سریع در کار حاضر استفاده نشده است.

۲-۷-۲- روش های آزمایشگاهی اندازه گیری سرعت سوختن

از جمله روش های مختلف تعیین سرعت سوختن به روش آزمایشگاهی می توان به روش مشعل بنسون، روش شعله مسطح، روش حباب صابون، روش جریان مخالف و روش بمب حرارتی اشاره کرد که به تشریح آن ها می پردازیم.

۲-۷-۲-۱- روش مشعل بنسون^۲

در روش مشعل بنسون گازهای پیش آمیخته در یک لوله استوانه ای به سمت بالا جریان پیدا می کنند. طول لوله را زیاد در نظر می گیرند تا در دهانه آن جریان ورقه ای حاکم گردد. گاز در دهانه لوله می سوزد و به شکل مخروط بنسون در می آید و با استفاده از تجهیزات لازم و روش های مختلف، ثبت و اندازه گیری می شود. نمونه ای از مشعل بنسون در شکل (۲-۵) آورده شده است.



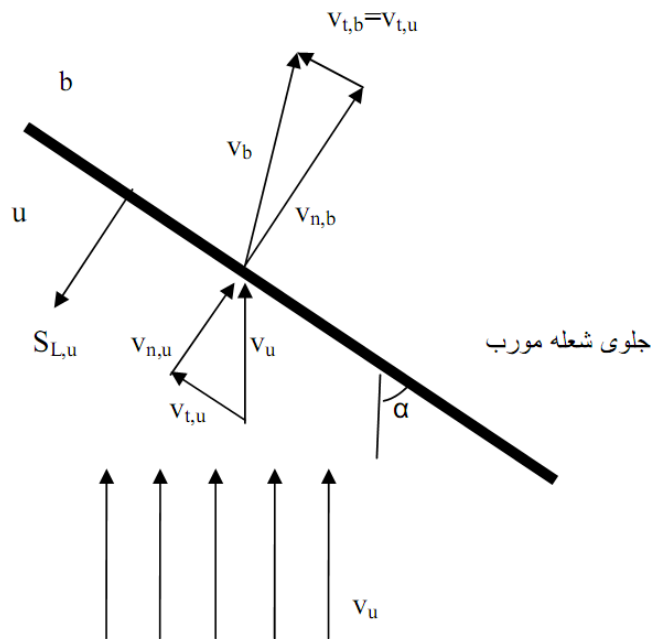
شکل (۲-۵) نمایی از مشعل بنسون با مخروط بنسون در انتهای مشعل [Peters, 2000]

1- Goldmer et al.

2- Bunsen burner

در این روش سوخت گازی وارد محفظه اختلاط می‌شود و به دلیل این که دارای سرعت می‌باشد از منفذهای مجاور هوا را به درون مشعل می‌کشد. برای بهینه کردن مخلوط سوخت و هوا در ناحیه ورودی پیچ تنظیمی تعبیه شده است. باید به این نکته توجه داشت که اگر سرعت مخلوط به اندازه کافی زیاد باشد، جریان داخل لوله بنسون متلاطم می‌شود. یکی از راه‌های گرفتن تلاطم، گذاشتن صفحه مشبک در قسمت بالایی محفظه تلاطم است. اگر سرعت جریان خروجی از لوله از سرعت سوختن ورقه ای (S_L)، یا متلاطم (S_T)، بزرگتر باشد، شعله مخروطی ایجاد می‌شود [ساعی و ایرانی زاد و همکاران (۱۳۸۱)].

زاویه مخروط، سنجشی برای سرعت سوختن ورقه‌ای یا متلاطم است. تعادل سینماتیکی بین سرعت جریان و سرعت سوختن شعله مورب پایا، در شکل (۶-۲) آورده شده است:



شکل (۶-۲) تعادل سینماتیکی برای شعله مورب پایا [Peters, 2000]

می‌توان v_u ، بردار سرعت جریان درون محفظه نسوخته را به مولفه‌های عمودی $v_{n,u}$ ، و مولفه مماسی $v_{t,u}$ تجزیه کرد. با توجه به این که در سمت گاز سوخته انبساط ناگهانی ایجاد می‌شود، پس مولفه قائم سرعت در مخلوط سوخته $v_{n,b}$ ، از مولفه قائم سرعت در قسمت نسوخته بزرگتر است. قانون پیوستگی جریان باید در جهت عمودی برای قسمت سوخته و نسوخته برابر باشد:

$$(\dot{m}_n)_u = (\dot{m}_n)_b \longrightarrow (\rho v_n)_u = (\rho v_n)_b \longrightarrow v_{n,b} = (\rho_u / \rho_b) \times v_{n,u} \quad (9-2)$$

از طرفی در اثر انبساط گاز مولفه مماسی سرعت v_t تغییری نمی کند لذا داریم:

$$v_{t,u} = v_{t,b} \quad (10-2)$$

در این روش فرض می شود جریان پایا و موقیت و شکل جبهه شعله ثابت است.

برای یک جریان آرام، سرعت سوختن ورقه ای از تعادل سینماتیکی بدست می آید:

$$S_{L,u} = v_{n,u} \quad (11-2)$$

همچنین برای یک جریان درهم، سرعت سوختن $S_{T,u}$ ، یک کمیت میانگین در نظر گرفته می شود و برابر میانگین مولفه قائم سرعت می باشد:

$$S_{T,u} = \bar{v}_{n,u} \quad (12-2)$$

برای محاسبه مولفه قائم سرعت در شعله بنسون، ابتدا زاویه مخروط α ، تعیین می شود و سپس از رابطه زیر مولفه قائم سرعت بدست می آید:

$$v_{n,u} = |v_n| \sin \alpha \quad (13-2)$$

با توجه به روابط (۲-۵) و (۲-۶) سرعت های سوختن ورقه ای و متلاطم نسبت به گاز نسوخته از رابطه های زیر تعیین می شود:

$$S_{L,u} = |v_n| \sin \alpha \quad (14-2)$$

$$S_{T,u} = |\bar{v}_n| \sin \alpha \quad (15-2)$$

می توان به صورت آزمایشگاهی و با اندازه گیری زاویه مخروط α ، و سرعت جریان v_u و با استفاده از روابط بالا سرعت سوختن را بدست آورد.

باید توجه داشت که این روش دارای معایب زیر می باشد:

۱- نمی توان بطور کامل اثرات جداره را از بین برد.

۲- نیاز به یک منبع دائمی تهیه گاز می باشد.

۲-۲-۷-۲- روش لوله استوانه‌ای

مخلوطی از گاز در یک لوله‌ی افقی که یک انتهای آن باز است مشتعل می‌گردد. در این حالت سرعت شعله، میزان پیشروی شعله به داخل گاز نسوخته می‌باشد [1954, Linnett].

در این روش سرعت سوختن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_b = S_n \pi r^2 / A \quad (۱۶-۲)$$

که S_n سرعت شعله، A مساحت شعله و r شعاع لوله است.

۲-۲-۷-۳- روش بمب حرارتی

از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری سرعت سوختن، روش بمب حرارتی است. در این روش یک مخلوط قابل اشتعال پیش‌آمیخته در مرکز یک مخزن حجم ثابت کروی با جداره‌ی ضخیم مشتعل می‌شود. اثرات فشار و دما روی سرعت سوختن در یک محدوده گسترده و در یک آزمایش قابل دست‌یابی است. فرض‌های به کار رفته در تئوری این روش به شرح زیر است:

۱- جبهه‌ی شعله کروی و هموار است.

۲- فشار در هر لحظه داخل مخزن یکنواخت است یعنی گرادیان‌های فشار یا اثرات تأخیر زمانی در اندازه‌گیری فشار وجود ندارد.

۳- هر دو ناحیه‌ی مربوط به گاز سوخته یا نسوخته آدیاباتیک است، یعنی اتلاف حرارتی یا اکتساب حرارت از این نواحی وجود ندارد.

۴- اثرات ضخامت شعله و انحناء ناچیز است [2009, Miao et al].

با فرض رشد کروی شعله و فرآیند آیزنتروپیک داریم:

$$PV_u^k = C \longrightarrow \ln v_u = \frac{1}{k} \ln(C/P) \quad (17-2)$$

که v_u حجم گاز نسوخته و P فشار در زمان t است. با مشتق‌گیری از طرفین رابطه‌ی فوق نسبت به زمان داریم:

$$(dv_u/dt)/v_u = \left(\frac{1}{kP}\right)(dp/dt) \quad (18-2)$$

و v_u می‌شود:

$$v_u = \frac{4}{3}\pi(R^3 - r^3) \quad (19-2)$$

که R شعاع بمب و r شعاع شعله است.

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۹-۲) نسبت به زمان داریم:

$$S_f dv_u/dt = 4\pi r^2 \quad (20-2)$$

که S_f سرعت گاز نسوخته است. و با جایگذاری در رابطه (۱۸-۲) داریم:

$$S_f = [(R^3 - r^3)/3\pi k r^3] dp/dt \quad (21-2)$$

از مزیت‌های این روش می‌توان به استفاده‌ی زیاد این روش در مقالات، قابلیت ایجاد جریان گردابه‌ای و مطالعه‌ی آن بر رشد شعله در حالت متلاطم و نیز عدم نیاز به دوربین فیلم برداری فوق سریع اشاره کرد. از معایب آن می‌توان به عدم امکان تعیین سرعت سوختن و سرعت شعله در مراحل اولیه‌ی رشد شعله اشاره کرد زیرا تغییرات فشار در این مرحله ناچیز است و با توجه به دقت ترانسدیوسر فشار، سنجش تغییرات خیلی کوچک امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲-۸- مروری بر کارهای انجام شده

در تحقیق حاضر، برای تعیین سرعت سوختن ورقه‌ای از روش بمب حرارتی که ذکر شد، استفاده شده است. در همین راستا، کارهای قبلی که در این زمینه انجام شده‌اند به همراه شیوه مطالعه و اجرا مرور می‌شوند.

هانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۶ به اندازه‌گیری سرعت سوختن آرام مخلوط هیدروژن - گاز طبیعی با هوا در بمب حرارتی حجم ثابت به ابعاد $135 \times 108 \times 108$ میلی‌متر پرداختند. این مطالعات را در نسبت‌های اکسی‌والانس مختلف و نسبت‌های هیدروژن به گاز طبیعی مختلف (کسر حجمی از ۰ تا ۱۰۰٪) انجام دادند و تاثیر سرعت کشیده شدن شعله را بررسی کردند و به این نتایج رسیدند که افزایش میزان هیدروژن در مخلوط سوختی کشیدگی شعله را کاهش و بی‌ثباتی شعله را افزایش می‌دهد. آنها نتایج را به یک فرم تابعی مدل‌ریزی کردند و از آن برای محاسبه سرعت سوختن آرام مخلوط گاز طبیعی - هیدروژن و هوا استفاده کردند.

مهربد در سال ۱۳۸۹ و در دانشگاه محقق اردبیلی، سرعت سوختن ورقه‌ای مخلوط گاز طبیعی - بنزین با هوا را تحت فشار اولیه ۵ بار و دمای اولیه 333K در بمب حرارتی کروی تعیین کرد. کریمی در سال ۱۳۸۹ و در دانشگاه محقق اردبیلی، سرعت سوختن ورقه‌ای مخلوط دو سوخت (گاز طبیعی - ایزواکتان) با هوا برای حالت استوکیومتریک در فشار اولیه ۵ بار در بمب حرارتی استوانه‌ای تعیین کرد.

پارچا و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۰ مطالعات عددی و تجربی را بر روی سرعت سوختن ورقه‌ای در مخلوط هیدروژن - هوا در فشار استاندارد و دمای اتاق با تغییر نسبت اکسی‌والانس از $0/8$ تا 3 انجام دادند. شعله از طریق مشعل با نازلی با سوراخی به ابعاد 4×10 میلی‌متر ایجاد شد. آنها اندازه‌گیری‌های سرعت سوختن ورقه‌ای از طریق عکس‌برداری شلیرن و سرعت‌سنجی با ردیابی ذره انجام دادند. با استفاده از این تکنیک اطلاعات لحظه‌ای از سرعت سوختن محلی در تمام ناحیه‌ی جبهه‌ی شعله فراهم می‌شود. با استفاده از مقدار متوسط سرعت‌های سوختن محلی در ناحیه‌ی بدون کشیدگی، سرعت‌های سوختن ورقه‌ای تعیین شد. نتایج تجربی بدست آمده از روش سرعت‌سنجی با ردیابی ذره با نتایج عددی در هر نسبت اکسی‌والانس مطابقت دارد. سعید و استون^۳ در سال ۲۰۰۴ از بمب حرارتی کروی با قطر 160 میلی‌متر برای تعیین سرعت سوختن ورقه‌ای مخلوط متانول با هوا در دمای اولیه $293/15\text{K}$ و

1- et al.Huang

2- Pareja et al.

3- Saeed and Stone

۴۲۵ k و فشارهای ۰/۵، ۱ و ۳/۵ بار و نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۶ استفاده کردند. آن‌ها پس از آزمایشات، رابطه همبستگی زیر را برای سرعت سوختن ورقه‌ای بصورت تابعی از دما و فشار اولیه و نسبت هم‌ارزی را با هفت عدد ثابت به فرم زیر ارائه دادند:

$$(\Theta-1) + S_{u,2} = [S_{u,0} + S_{u,1}u_1(\Theta-1)^2 + S_{u,3}(\Theta-1)^3 + S_{u,4}(\Theta-1)^4] (T^{\alpha} P^{\beta}) \quad (22-2)$$

تانک و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸ سرعت سوختن ورقه‌ای مخلوط هیدروژن-پروپان- هوا با پیشرفت شعله کروی را در کسرهای هیدروژن مختلف و در نسبت‌های اکی‌والانس ۰/۸ تا ۱/۲ و در شرایط دما و فشار بالامورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت پیشرفت شعله بدون کشیدگی و سرعت سوختن ورقه‌ای بدون کشیدگی با افزایش کسر هیدروژن و دمای اولیه افزایش می‌یابد.

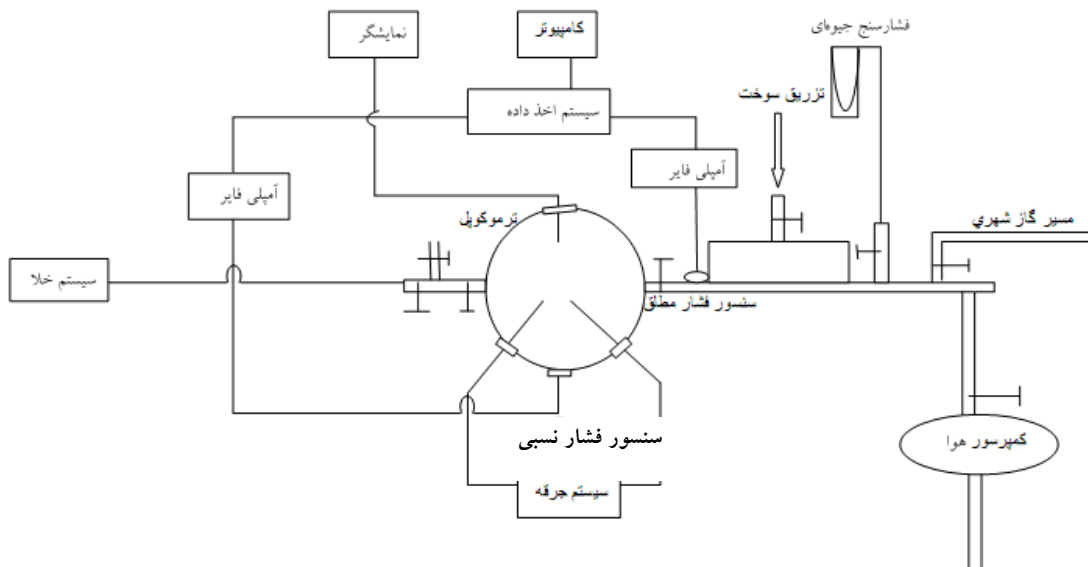
براستیل و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۱ سرعت سوختن ورقه‌ای مخلوط ایزواکتان-اتانول-بوتانول را مورد بررسی قرار دادند. میزان پتانسیل بوتانول که به ایزواکتان اضافه می‌شود و بعنوان سوخت بنزینی بکار می‌رود، با توجه به احتراق لایه‌ای مشخص شد و با اتانول مقایسه شد. با استفاده از روش انبساط کروی شعله، تنظیم جدیدی از داده‌های سرعت سوختن ورقه‌ای در یک مخزن حجم ثابت صورت گرفت. نتایج بدست آمده در نسبت‌های اکی‌والانس ۰/۸ تا ۱/۴ و در شرایط دمای اولیه ۴۰۰k و فشار اولیه ۱۰۰kPa نشان می‌دهد که سرعت سوختن ورقه‌ای بوتانول بین سرعت سوختن ورقه‌ای اتانول و ایزواکتان است و حداکثر سرعت سوختن ورقه‌ای در نسبت اکی‌والانس ۱/۱ بدست می‌آید.

۲-۹- نمای کلی بمب حرارتی کروی

محفظه احتراق بمب حرارتی بصورت کروی و شعاع آن ۴۶ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۳-۱) نمای کلی بمب حرارتی همراه با سایر اجزای بکار رفته در آن آورده شده است که جزئیات بیشتر از آن در پایان نامه مهرداد [مهرداد (۱۳۸۸)] آمده است.

1- Tank et al.

2- Broustail et al.



شکل (۲-۷) نمای کلی بمب حرارتی و اجزای بکار رفته در آن

۲-۱۰- ساخت فشارسنج جیوه‌ای

هدف از ساخت فشارسنج جیوه‌ای، کاهش خطا در انجام آزمایش بوده است. با توجه به این که مقدار خطا در سنسور فشار مطلق ۲۰ bar کمتر از ۰/۰۰۲ مقیاس کامل^۱ ترانس‌دیوسر آمده است، حداکثر خطای ممکن می‌شود:

$$0.002 \times 2000 = 4 \text{ (kpa)}$$

اما اگر حداکثر خطا در خواندن ستون جیوه در فشارسنج جیوه‌ای برای ۱ mm Hg فرض شود، داریم:

$$\Delta P = \rho gh = 13600 \times 9.81 \times 0.001 = 133.416 \text{ (pa)} = 0.133 \text{ (kpa)}$$

در نتیجه مشاهده می‌شود که دقت فشارسنج جیوه‌ای نسبت به سنسور بیشتر است.

برای کاهش خطا تصمیم به ساخت مانومتر جیوه‌ای گرفته شد. ابتدا لوله‌ی U شکلی از شیشه با ارتفاع مناسب ساخته شد و سپس داخل آن با جیوه به مقدار درخور ارتفاع مانومتر و حداکثر خلأ مورد نیاز پر شد و برچسب مدرجی روی آن نصب شد. یک سمت فشارسنج به جک خلأ وصل شد و طرف دیگر

آن با محیط در ارتباط بود. با کشیدن پیستون سیستم خلاءساز، ارتفاع ستون جیوه در فشارسنج تغییر می کرد. با خواندن ارتفاع در سمت چپ و راست ستون جیوه‌ای U شکل و پیدا کردن اختلاف بین آن دو، ارتفاع معادل فشار خلاء مشخص شد.

۲-۱۱- سیستم کنترل دما

از هیتر الکتریکی نوع LED800A که روی سطح جانبی بمب قرار گرفته، استفاده شد. مقاومت هیتر از نوع المنتی بوده و به دور محفظه‌ی احتراق پیچیده شده است. این هیتر دارای برد الکتریکی و مجهز به ترموکوپل متغیری بود که قابلیت تنظیم دما در گستره‌ی دمایی مختلف را داشت.

۲-۱۲- سیستم سوخت‌رسانی

یک قطعه فولادی برای بخش ورودی بمب حرارتی در نظر گرفته شد که با وصل کردن سه راهی‌ها به آن ورودی گازی، ورودی هوا، ورودی فشار سنج جیوه‌ای به آن وصل شد، همچنین تعبیه ترنس‌دیوسر فشار مطلق روی آن ممکن گردید. برای تزریق بنزین از سرنگ‌های آزمایشگاهی هامیلتون^۱ که در سه حجم ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ میکرولیتری در دسترس بود استفاده گردید. این سرنگ‌ها به ترتیب دارای مقیاس ۱، ۱، ۵ میکرولیتر می‌باشند.

۲-۱۳- سیستم تولید جرقه

ایجاد جرقه مناسب برای مخلوط سوخت و هوا، عاملی مهم در انجام آزمایشات می‌باشد. این جرقه باید بیشتر از مقدار حداقل انرژی اشتعال^۲ سوخت مورد نظر باشد. به عنوان مثال این مقدار برای متان، ۰/۲۸ میلی ژول و برای ایزواکتان، ۱/۳۵ میلی ژول در شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر پیشنهاد شده است [2004, Kaiser]. از ویژگی‌های دیگر جرقه، منفرد بودن آن بود تا بتوان به وسیله سلف تیروئیدی سیگنال جرقه را به رایانه منتقل کرد و از زمان وقوع آن در مرکز بمب به عنوان زمان

1- Hamilton Syringe

2-Minimum Ignition Energy