

اثر بخشی گازهای بازدارنده بر توسعه‌ی حریق هیدروژن در خطوط لوله‌ی انشعاب‌دار

سینا دوازده امامی^{۱*}، مدیریت HSE شرکت ملی نفت ایران ■ محمد ولایت زاده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

چکیده

هیدروژن سوختی امیدوارکننده برای آینده است که در سال‌های اخیر به‌خوبی در صنایع پالایشگاه‌های صنعتی و پتروشیمی‌ها استفاده شده است. در مطالعات اثر بخشی مهارکننده‌ها در رفتار انفجار هیدروژن در سیستم‌های مختلف بررسی شده، اما با این وجود، اطلاعات هنوز هم بسیار اندک است. بنابراین تحقیق حاضر به‌منظور بررسی اثرات آرگون، نیتروژن و دی‌اکسیدکربن بر انفجار هیدروژن-هوا در یک پیکربندی شاخه‌ای انجام شده است. در این مطالعه مخلوط سوخت-هوا در سه موقعیت مختلف احتراق A، B و D گذاشته شد. نتایج نشان داد ناحیه‌ای در اطراف تیتانکا، هنگامی که در دورترین فاصله‌ی موقعیت A قرار می‌گیرد تأثیر بحرانی‌ترین انفجار را نشان می‌دهد، اما در سایر موقعیت‌های مورد مطالعه، اشتعال مشاهده نشده است. علاوه بر این، مخلوط ترکیبات شامل ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد آرگون-هوا با توجه به خصوصیاتشان به‌ترتیب خطرات بیشتری را نشان دادند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل ترکیبات مخلوط با دی‌اکسیدکربن شدت انفجار کمتری نسبت به سایر ترکیبات دارد. زیرا میانگین حداکثر سرعت شعله‌ی ثبت شده برای این مخلوط خاص در تمام نقاط احتراق پایین‌تر است که نشان‌دهنده‌ی اینست که اثر مهارکننده‌ها باید به‌ترتیب دی‌اکسیدکربن < نیتروژن < آرگون باشند.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۴/۰۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۵/۲۳

واژگان کلیدی:

انفجار، شعله، هیدروژن، آرگون، لوله‌ی Tee

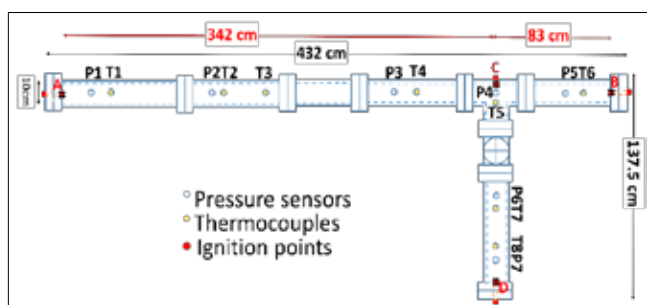
مقدمه

انفجار هیدروژن در سیستم‌های مختلف بررسی شده، اما با این وجود اطلاعات اندکی در دسترس است. مطالعات تجربی و محاسباتی توسط ون و فاتح [۷] بر روی اثرات بازدارنده‌ها (نیتروژن، آرگون و هلیوم) بر روی سرعت سوختگی خطی گازهای هیدروکربنی نشان داده که این شعله‌ها بسیار حساس به شرایط احتراق اولیه بوده و نسبت سرعت‌های اشتعال شونده بدون کشش در محدوده‌ی ۰/۶-۳ با عدد مربوط به مارکتاشین در محدوده‌ی ۷-۳± است. آنها همچنین نشان دادند که بازدارنده‌ها یعنی نیتروژن، آرگون و هلیوم تأثیر قابل توجهی بر تعاملات ترجیحی انتشار به‌علت پدیده‌ی جنبشی و دینامیک دارند. مثلاً در میان همه‌ی بازدارنده‌ها، آرگون و هلیوم، نسبت به نیتروژن، بر اساس دمای زیاد و میزان حمل

هیدروژن سوختی امیدوارکننده برای آینده است که به‌گسترده‌ی در صنایع مختلف به‌خصوص در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها استفاده می‌شود. با این حال، ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن توسط خطوط لوله، فرآیند پیچیده و مهمی است که به ملاحظات ایمنی و پیروی از روش‌های ایمنی برای جلوگیری از حوادث ناشی از این گاز نیاز دارد [۱ و ۲]. هیدروژن به‌علت خواص ذاتی از قبیل دمای احتراق کم، انرژی احتراق کم و سرعت احتراق زیاد، خطرناک است [۳ و ۴]. هیدروژن مثل هر گاز قابل‌اشتعال دیگر، در یک فضای محدود، خطرناک است. در یک فضای باز، احتمال انفجار هیدروژن کمتر از فضای بسته است. زیرا سرعت جنبشی آن زیاد است.

هنگامی که هیدروژن محترق می‌شود بخار آب را با جذب گرما از هوا تولید می‌کند. با این حال هیدروژن طی احتراق هیچ نوع کربنی تولید نمی‌کند. بنابراین درجه حرارت از انفجار هیدروژن به‌میزان قابل توجهی کم است [۳]. با توجه به این نقاط ضعف و مسائل مربوط به ایمنی مربوط به خطوط لوله‌ی گاز، مشخص کردن و اندازه‌گیری میزان رفتار انفجار گاز و حفاظت در برابر انتشار پدیده‌های احتراق ناخواسته مانند اشتعال و انفجار در صنایع فرآیندی به‌ویژه با حضور گازهای مهارکننده مهم و ضروری است [۴-۶].

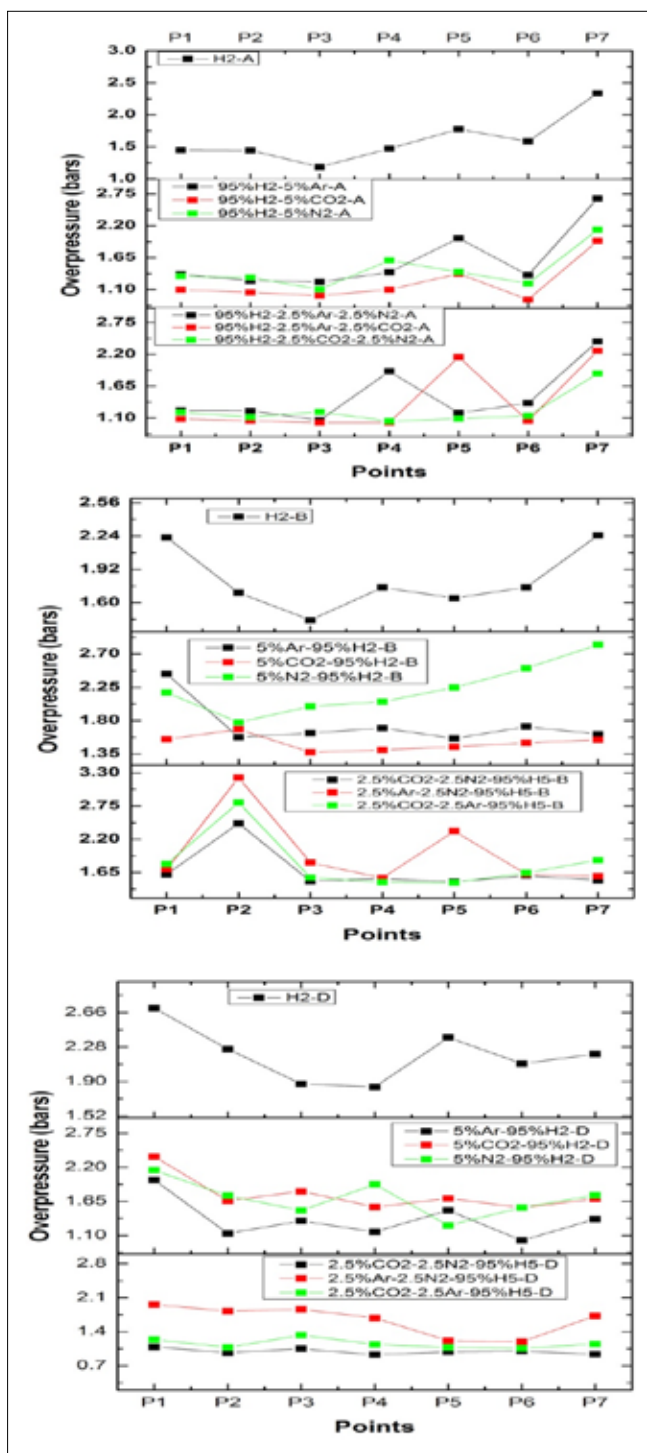
بر این اساس، تحقیقات و مطالعات اثر بخشی مهارکننده‌ها در رفتار



شماتیک لوله‌ی Tee | ۱

* نویسنده‌ی عهد در مکاتبات (hse12de@gmail.com)

با توجه به مرور ادبیات مطالعات و تحقیقات، مشخص می‌شود که کار آزمایشی و تجربی بر اثرات گازهای مهارکننده‌ی شعله هیدروژن-هوا در خط لوله انجام نشده است. بنابراین تحقیق به‌منظور بررسی



شکل ۲ | حداکثر مقدار بیش از حد در برابر نقاط ثبت‌شده در یک خط لوله در موقعیت‌های مختلف احتراق

و نقل، نسبت‌های سرعت اشتعال خطی بیشتر را نشان می‌دهند. با این وجود، مطالعه در مورد انتشار شعله‌ی هلیوم-نیتروژن-اکسیژن در رآکتور تجاری حرارتی بین‌المللی نشان داد که هر دو فشارافزایی بعد از احتراق و سرعت شعله‌ی خطی با افزایش فشار و دمای اولیه افزایش می‌یابد و این شرایط بیشتر از غلظت نیتروژن بالاتراست [۸]. دی بندتو و همکاران [۹] نتیجه گرفتند که اثر بخشی دی‌اکسیدکربن بر سرعت احتراق ترکیب دی‌اکسیدکربن-نیتروژن-اکسیژن-هیدروژن عمدتاً بر اساس مکانیسم سینتیکی به‌دلیل واکنش سریع، H ، CO ، HCO ، OH ، H_2O_2 است. با این حال، رفتار انفجار یک مخلوط اتمسفر دی‌اکسیدکربن-هیدروژن-نیتروژن-اکسیژن در دمای طبیعی و فشار نرمال، شرایط پایداری قابل توجهی در شعله و ظاهراً بدون احتیاج با حضور دی‌اکسیدکربن بیشتر از ۴۰ درصد نشان داد که به‌وضوح نشان می‌دهد انفجار عمدتاً توسط غلظت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۹]. بر اساس تجزیه و تحلیل عددی می‌توان دریافت که رقیق‌سازی دی‌اکسیدکربن بر ساختار شعله‌ی اکسیژن-هیدروژن تحت تأثیر واکنش شیمیایی قرار می‌گیرد [۱۰]. از سوی دیگر اثربخشی همه‌ی این گازهای مهارکننده بر عدد مارکشتاین به‌علت خواص دینامیکی مشابه آنها ناچیز بود [۱۱ و ۱۲]. آزمایش‌ها روی اکسیداسیون هیدروژن در مخلوط گاز نیتروژن-اکسیژن-هیدروژن، افزایش سرعت تبدیل هیدروژن را با افزایش ولتاژ اعمال شده و میزان تکرار تخلیه‌ی انرژی را نیز نشان داده‌اند [۱۲].

موقعیت هر مبدل فشار و ترموکوپل از نقاط احتراق

D	B	A		
44.5	39.9	2.6	P1	مبدل فشار (Pressure transducers)
35.3	30.7	11.8	P2	
21.8	17.2	25.3	P3	
12.9	8.3	34.2	P4	
17.7	3.5	39	P5	
6.8	14.4	40.3	P6	
1.9	19.3	45.2	P7	
42.5	38.4	4.5	T1	ترموکوپل (Thermocouples)
34.4	30.3	12.6	T2	
30.5	26.4	16.5	T3	
19.5	15.4	27.5	T4	
12.3	8.7	34.2	T5	
18.5	2.6	39.9	T6	
5.6	15.4	41.2	T7	
3	18	43.8	T8	

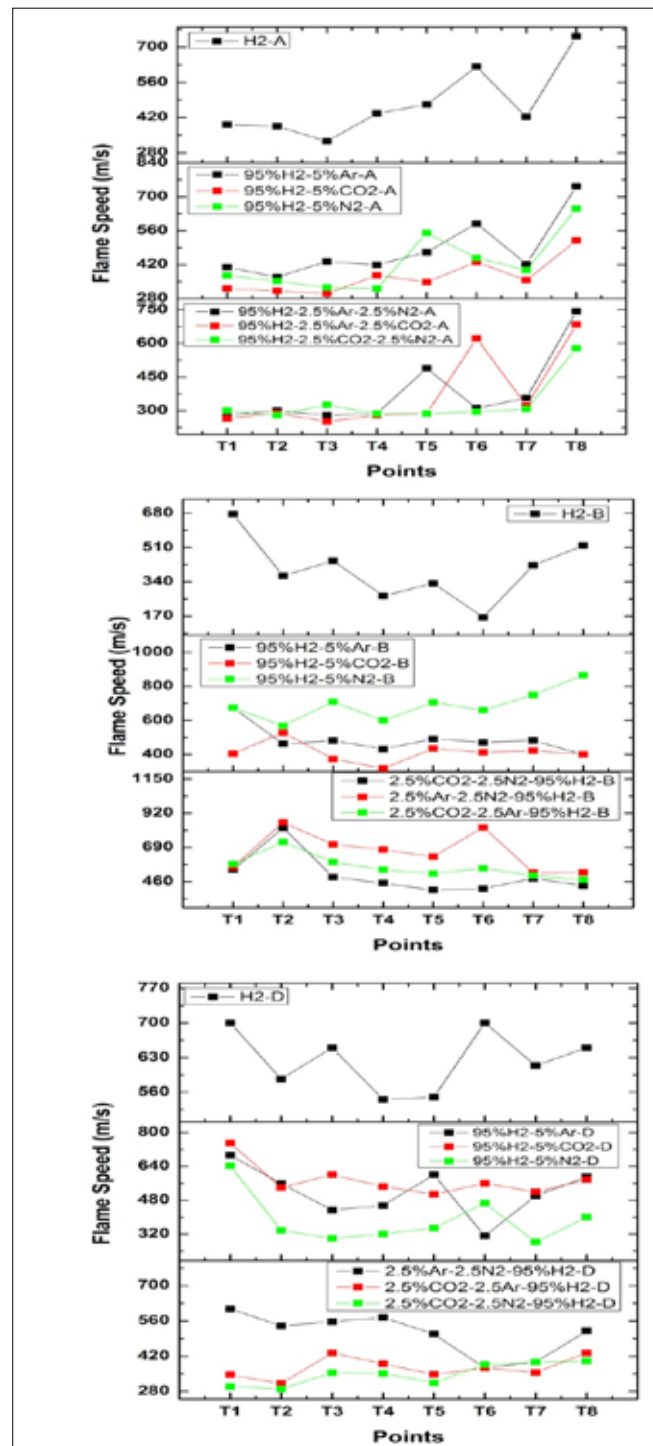
اثرات آرگون، نیتروژن و دی‌اکسیدکربن بر شتاب شعله‌ی هیدروژن - هوا انجام شده است. در پیکربندی لوله‌ی Tee تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با توجه به موقعیت احتراق و غلظت

۱- مواد و روش کار

در این مطالعه از پیکربندی لوله‌ی Tee به طول ۴/۳۲ متر در افقی با فاصله‌ی ۱/۳۷۵ متر در طول اتصال و قطر ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است (شکل-۱). این لوله از بخش‌های ۱-۵/۰ متری ساخته شده و با یک مهره و واشر در میان اتصالات و فلنج‌های کور در هر دو طرف متصل می‌شود. مخلوط قابل‌اشتعال توسط یک جرقه‌ی الکتریکی آغاز شده که ۱۶ ژول انرژی برای آزمایش انفجار گاز می‌دهد. برای این مطالعه سه موقعیت اشتعال به‌عنوان نشانگر A، B و D مشخص شدند. لازم به‌ذکر است که موقعیت احتراق در بخش C برای این تحقیق در نظر گرفته نشده و در مقاله‌ی بعدی بحث و بررسی می‌شود.

اندازه‌گیری سرعت شعله با استفاده از سرعت‌سنج که در محل اتصال مواد معدنی عایق، ترموکوپل نوع-K، در امتداد خط مرکزی لوله ثبت شد. داده‌های سرعت شعله‌ی تولید شده از زمان ورود به شعله‌ی ترموکوپل (به‌عنوان یک تغییر ناگهانی در خروجی ترموکوپل) مشخص شد. زمان ورود به شعله‌ی ترموکوپل در لوله، اولین نقطه‌ای بود که خواندن آغاز گردید. برای ترموکوپل‌ها در لوله، این موج از یک موج پیش فشرده‌سازی جلوتر از شعله و سرعت جریان بالای مرتبط با آن در اطراف ترموکوپل جلوگیری شده و موجب ایجاد دو شیب متمایز در ردیابی ترموکوپل می‌گردد. در این حالت نقطه‌ی زمانی که شیب دوم (شیب‌دار) آشکار شد به‌عنوان زمان ورود شعله در نظر گرفته شد. فشار درون لوله با استفاده از مجموعه‌ای از مبدل‌های فشار پیزورسیستیکی در نقاط اطراف دیوار بیرونی در هر بخش تحت نظارت P قرار می‌گیرد. داده‌های تولید شده با استفاده از ثبت‌کننده‌ی داده‌ی ۳۴ گذر کانال توسط NI Compact DAQ جمع‌آوری شده است. موقعیت‌های احتراق و هر مکان سنسورها در جدول-۱ ارائه شده است.

علاوه بر این، H_2-Ar ، H_2-CO_2 ، H_2-N_2 ، $H_2-Ar-CO_2$ ، H_2-Ar-N_2 ، $H_2-N_2-CO_2$ / هوا مخلوط با نسبت ثابت (۹۵ : ۵ : H_2 : مهارکننده‌ها) با استفاده از هیدروژن به‌عنوان گاز اولیه در نسبت صاف بودن استئوکیومتری ($\phi = 1$) اعمال شد. در این کار، روش فشاربخشی برای تهیه‌ی مخلوط استفاده شد. گازهای تزریقی به‌مدت ۱۰ دقیقه در هر اجرا باقی ماند تا یک ترکیب همگن ایجاد شود. علاوه بر این، هر انفجار حداقل ۳ بار برای دقت و صحت نتایج مطالعه تکرار شد.



شکل ۳ | حداکثر سرعت شعله در مقابل نقاط بازده در یک خط لوله در موقعیت‌های مختلف احتراق

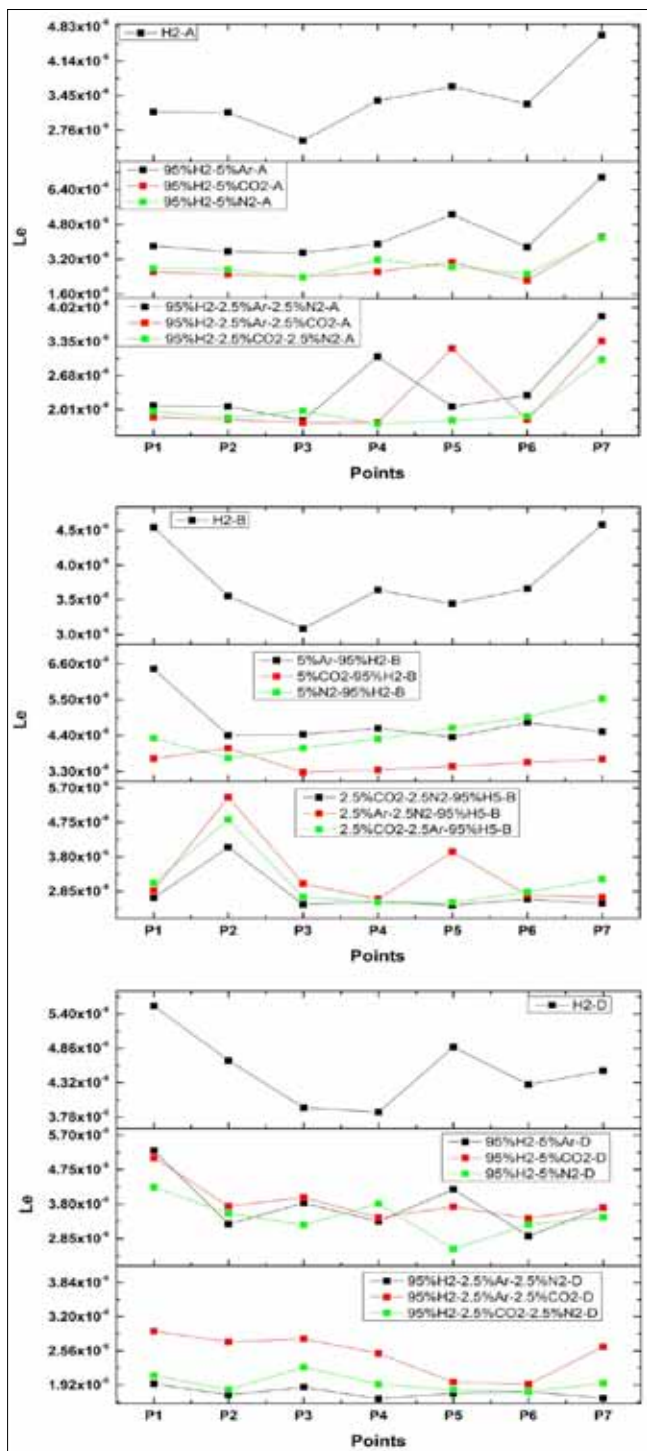
۲- نتایج و بحث

از سوی دیگر با توجه به شکل ۳-می توان گفت که در تمام موقعیت های اشتعال به علت واکنش پذیری سوخت، نرخ سرعت شعله به صورت قابل توجهی در طول خط مرزی لوله و نقاط انتهایی، حداکثری است [۱۹]. بیشترین سرعت شعله در ۷۳۶، ۷۱۹،

مطالعات قبلی نشان می دهد که تنظیمات لوله و شرایط اولیه تأثیر قابل توجهی بر واکنش شعله و شتاب سوخت هیدروژن دارد [۱۷-۱۳]. با این حال، هنوز اثربخشی مهارکننده ها بر واکنش پذیری شعله های سوخت هیدروژن در لوله بررسی نشده است. بنابراین در مقاله حاضر، بحث روی مکانیسم انتشار فشار و شعله ای از انفجار مخلوط هیدروژن مهارکننده/هوا مخلوط در یک خط لوله با اثر موقعیت های مختلف احتراق تمرکز خواهد کرد.

۲-۱- تأثیر مهارکننده ها به سرعت فشار و شعله در توسعه انفجار

در شکل ۲-مجموعه ای از حداکثر فشار افزایشی ثبت شده در طول لوله ی Tee در سه موقعیت مختلف احتراق A، B و D نشان داده شده است. برای مخلوط های هیدروژن-هوا که با مقدار مختلف دی اکسید کربن، آرگون و نیتروژن سرعت شعاع مربوطه و سرعت افزایش فشار (dp/dt) به عنوان تابعی از نقاط ثبت شده در شکل های ۳ و ۵ ترسیم گردید است. با توجه به اینکه هیدروژن-هوا به عنوان یک سوخت اولیه هستند، افت فشار و خطی شعله در حضور دی اکسید کربن با مخلوط های ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد دی اکسید کربن، ۲/۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد دی اکسید کربن، ۲/۵ درصد آرگون-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد دی اکسید کربن، ۲/۵ درصد آرگون-هوا نشان داده شده است. دی بندتو و همکاران [۹] گزارش کردند که وجود رادیکال های آزاد شامل O، H، CO، HCO، OH، HO₂ و CO₂ باعث افزایش فشار بیش از حد، سرعت شعله و میزان فشار می شود که به طور قابل توجهی کاهش می یابد که در شکل ۴- نشان داده شده است. در میان مهارکننده ها، آرگون در مخلوط های هیدروژن-هوا باعث افزایش بیش از حد فشار نسبت به دیگران می شود. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط موویلینو و همکاران [۱۸] حضور مواد افزودنی خواص ترموفیزیکی مخلوط شامل هدایت حرارتی و ظرفیت گرما را تغییر می دهد و این به طور مستقیم بر سرعت واکنش کلی در منطقه ی واکنش (در شعله) تأثیرگذار است. همچنین تحقیقات ون و نفاتح نشان داد که با وجود اینکه نیتروژن و آرگون خصوصیات حمل و نقل تقریباً مشابهی دارند اما افزودن آرگون به هیدروژن می تواند باعث افزایش سرعت اشتعال لایه ی خطی به دلیل دمای شعله ی بیشتر شود [۷]. این مکانیسم نشان می دهد که اثر مهارکننده ها باید به ترتیب بر اساس دی اکسید کربن < نیتروژن < آرگون باشد.

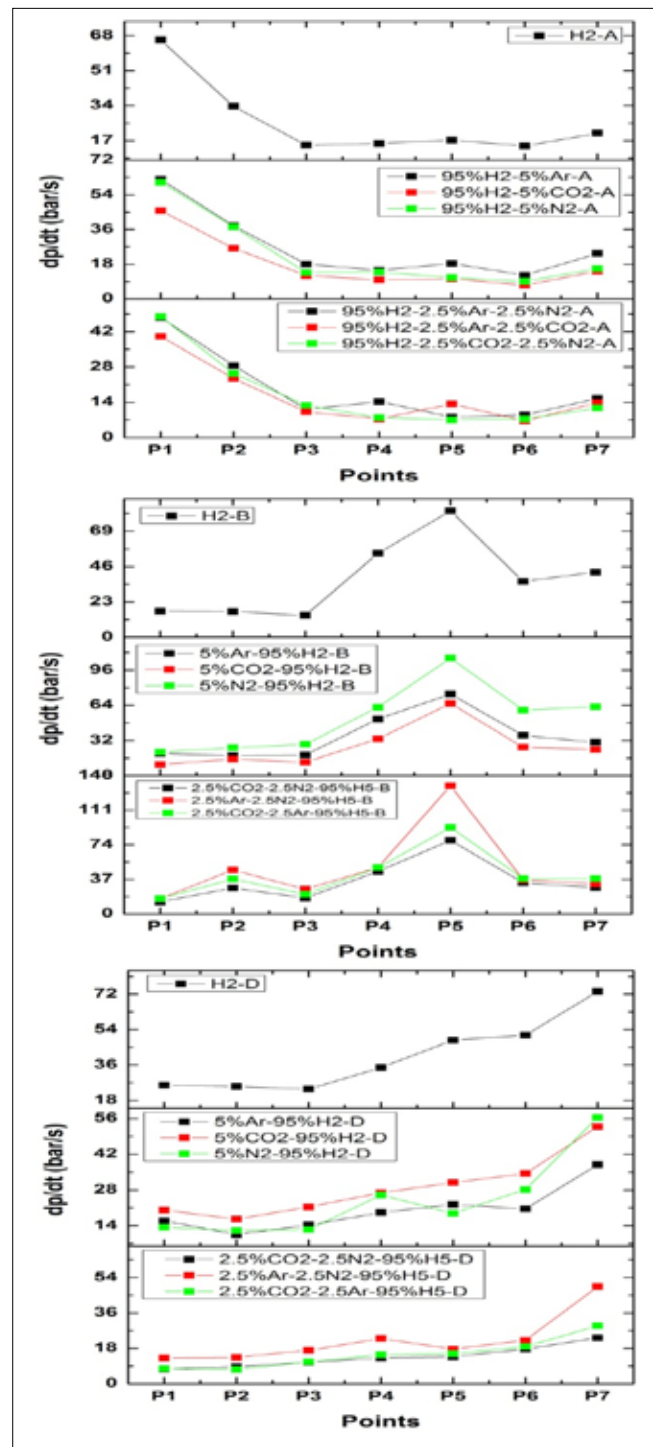


شکل ۴ | عدد لوئیس در مقابل امتیاز ثبت در یک خط لوله در نقاط مختلف احتراق

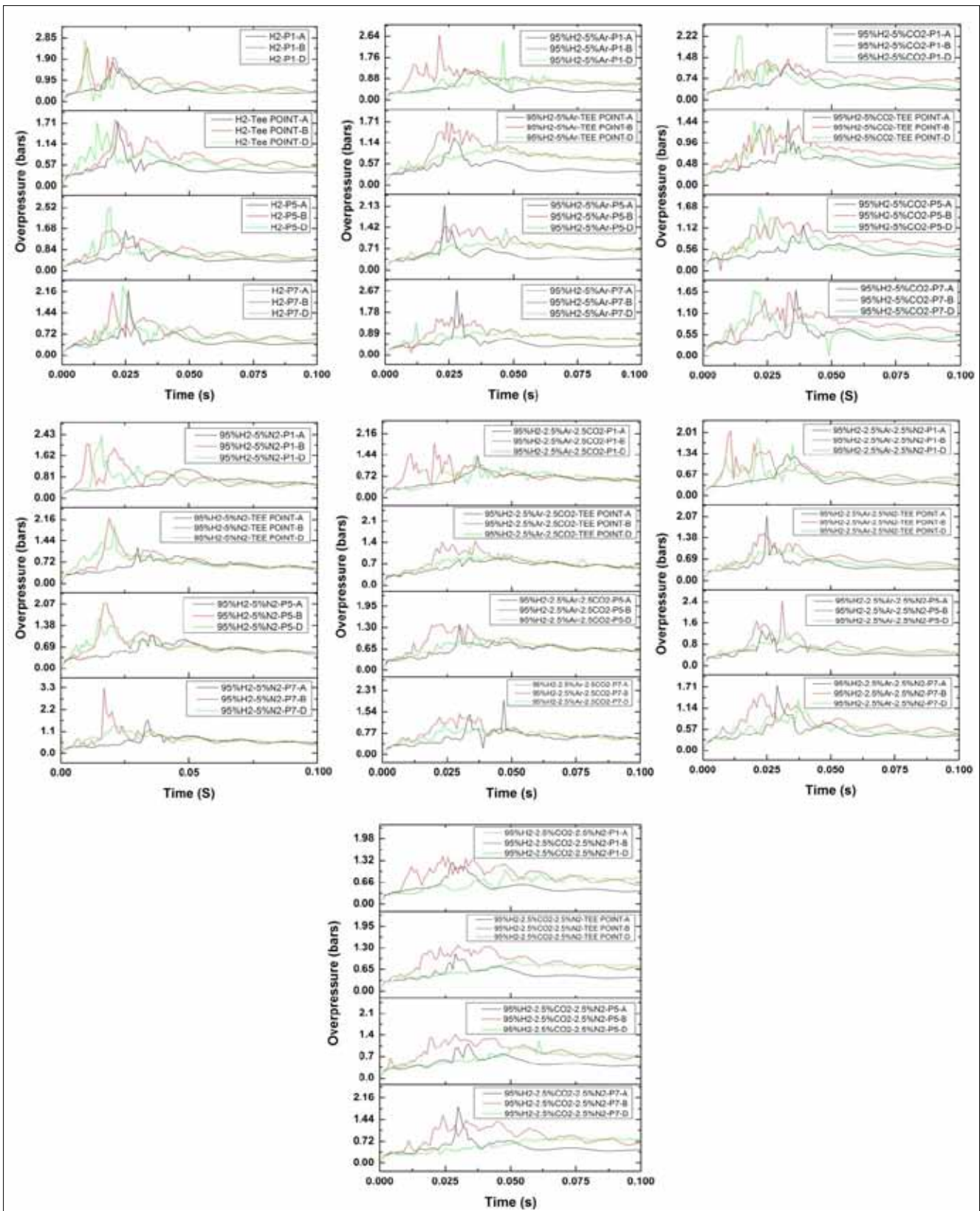
هیدروژن، ۵ درصد آرگون-هواست. این نتایج در مطالعات قبلی نیز تأیید شده است [۷ و ۱۱]. افزون بر این، با مقایسه‌ی سرعت شعله‌ی این مخلوط‌ها با ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد دی‌اکسیدکربن-هوا در شرایط مشابه، خطی بودن این مخلوط بیشتر از سایر ترکیبات است؛ میانگین حداکثر سرعت شعله‌ی ثبت‌شده برای این مخلوط خاص در تمامی نقاط احتراق کمتر است (میانگین ۵۹۹ متر بر ثانیه). این نشان می‌دهد که افزودن دی‌اکسیدکربن به مخلوط‌های هیدروژن موجب کاهش سرعت انتشار حرارت می‌شود و در نتیجه مقدار میانگین سرعت شعله برای این مخلوط کمتر خواهد بود که این با مشاهدات نیز مطابقت دارد [۹].

اثر مهارکننده‌ها در توسعه‌ی انفجار بر مخلوط هیدروژن-هوا استوکیومتری می‌تواند با استفاده از عدد لوئیس (شکل ۴) بهتر توضیح داده شود. عدد لوئیس با میزان انتشار پراکنش گونه‌ها به گازهای غیرقابل احتراق ارتباط دارد که مربوط به نرخ سوزاندن جرم است و مهم‌ترین عامل مؤثر در سرعت سوختن و میزان انتشار حرارت طی انتشار شعله است [۱۸]. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود عدد لوئیس برای همه‌ی مخلوط‌ها کمتر از یک است و نشان می‌دهد که تمام مخلوط‌ها تحت تأثیر انتشار پدیده‌ی حرارتی قرار دارند. با این وجود پدیده‌ی مذکور برای آن مخلوط‌ها از آرگون مهم‌تر است. چراکه ضریب نفوذ در حالت عادی آرگون $(2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ بیشتر از نیتروژن $(1.88 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ و دی‌اکسیدکربن $(1.92 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ است که نسبت زیاد دمای شعله و ضریب انتشار به دست می‌آید [۲۰]. بنابراین با افزودن آرگون، هیدروژن تمایل بیشتری دارد که در مخلوط‌ها منتشر گردد. مشاهدات کلی نشان می‌دهد که فشارافزایی در مخلوط ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد نیتروژن-هوا برای تمامی موقعیت‌های اشتعال در نظر گرفته شده، حداکثر فشار زیاد، سرعت شعله و میزان افزایش فشار در طول لوله در نقاط مختلف را نشان می‌دهد. حرکت NNH این به‌طور مستقیم بر میزان افزایش فشار و نسبت شعله سرعت تأثیر می‌گذارد. زیرا سهم مسیر میانگین N_2O در واکنش بسیار سریع‌تر از مسیرهای دیگر افزایش می‌یابد [۲۱]. علاوه بر این لازم به ذکر است که مسیر مختلف شعله بسیار به محل احتراق وابسته است که باعث می‌شود مکانیسم پخش شعله از هر موقعیت اشتعال تغییر کند. یکی دیگر از مشاهدات جالب توجه واکنش‌پذیری شعله‌ی مخلوط ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد نیتروژن-هوا در مقادیر بیشتر در فشار کلی، سرعت شعله و میزان افزایش فشار تقریباً

۷۰۳ و ۷۰۶ متر بر ثانیه به ترتیب برای تمامی مخلوط‌های اشتعال یافته در ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد نیتروژن-هوا و ۹۵ درصد



شکل ۵ | نرخ افزایش فشار در برابر نقاط ضبط شده در یک خط لوله در موقعیت‌های مختلف احتراق



شکل ۶ | موج انفجار در P1، نقطه‌ی لوله، P5 و P7

۲/۵ درصد نیتروژن در P5، P1 و P7 نسبت به مخلوط‌های دیگر است. این مطلب نشان‌دهنده‌ی آنست که مخلوط‌های هیدروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن و ۵ درصد آرگون، ۹۵ درصد هیدروژن و ۵ درصد نیتروژن و ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد آرگون - ۲/۵ درصد نیتروژن نتیجه‌ی خالص را به افزایش فشار و سرعت شعله می‌دهد. از سوی دیگر هنگامی که مخلوط‌ها در موقعیت B قرار گرفتند انتشار شعله‌ی مخلوط، به‌ویژه برای ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد نیتروژن و ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد آرگون - ۲/۵ درصد نیتروژن در طول لوله با نتایج سایر تحقیقات هم‌خوانی داشت [۲۲]. ظهور بیش از حد فشارهای چندگانه نشان می‌دهد که در مواجهه‌ی کوتاه‌تر موانع، شعله‌ی قوی‌تر از امواج فشار عرضی از اتصال لوله، باعث آشفته‌گی بیشتر و در نتیجه تسریع در سوختن مخلوط واکنش‌پذیر به‌دام افتاده در طول اتصال لوله، افزایش میزان احتراق و از این‌رو افزایش سرعت شعله می‌شود.

برای تسهیل توضیح در مورد یافته‌ها، سرعت گاز ناخالص (Sg) برای تمامی ترکیبات مخلوط که در شکل ۷ ارائه شده محاسبه گردیده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد واکنش‌پذیری شعله‌ی ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد آرگون، ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد نیتروژن و ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد آرگون و ۲/۵ درصد نیتروژن به‌طور عمده به اثر پویا یعنی گرماسنجی و مخلوط شدن سریع آشفته‌گی القایی و شعله‌ی سریع در پایین جریان متأثر می‌شود. از آنجا که مقدار حداکثر القاء سرعت گاز ناخالص بیش از ۳۴۰ متر بر ثانیه محاسبه می‌گردد شعله با سرعت بیشتری حرکت می‌کند و اثر فشرده‌سازی عظیمی در انتهای لوله به‌وجود می‌آورد و از این طریق باعث ایجاد تعاملی قوی بین سرعت شعله و موج بازتابی (برگشتی) می‌شود. این پدیده به‌عنوان واکنش شناخته می‌شود و اگر احتراق در موقعیت‌های A و D

دو برابر بیشتر از مخلوط ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد دی‌اکسید کربن-هواست (شکل ۵). همان‌طور که قبلاً در مورد اثر نیتروژن بر ترکیب مخلوط مهارکننده‌ی سوخت اشاره شد خواص پویا و منحصر به‌فرد (انتشار پراکندگی شعله، هدایت حرارتی) آرگون نیز نقش مهمی در تشدید احتراق مخلوط دارد.

۲-۲- تأثیر موقعیت‌های شروع اشتعال بر توسعه‌ی انفجار کلی

در محدوده‌ی آزمایش شده از غلظت مهارکننده، مقدار حداکثر فشار بیش از حد در همه‌ی موقعیت‌های احتراق تنها در محل فشار حداکثر ثبت شده تقریباً یکسان بود. مثلاً بیشترین فشار برای مخلوط هیدروژن-هوا، خالص در اتصالات لوله (P7) برای موقعیت‌های احتراق A و B مشاهده شد؛ در حالی که P1 حداکثر فشار برای موقعیت احتراق از نقطه‌ی D را نشان می‌دهد. در شکل ۶- برای روشن شدن بیشتر این وضعیت، نمودارهای موج انفجار تمام مخلوط در P1، نقطه‌های P5، P4 و P7 ارائه شده است. به‌وضوح نشان داده شده که نرخ نوسان هر یک از نقاط، بسته به مخلوط و موقعیت اشتعال، تغییرات فشار در مدت زمان خاصی بیشتر یا کمتر چروکیده می‌شوند. این نه‌تنها تحت تأثیر واکنش‌های جنبشی هر مخلوط است؛ بلکه بی‌ثباتی فیزیکی-دینامیکی نیز تأثیر قابل توجهی بر این پدیده دارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد شعله‌های مخلوطی که عدد لوئیس کمتر از یک داشتند به‌علت بی‌ثباتی حرارتی، دیافراگمی حساس به چروک شدن شعله دارند. این شعله‌ی چروکیده باعث افزایش سرعت اشتعال جرم، افزایش سرعت کلی و سرعت زیاد بیش از حد می‌شود [۲۲]. مثلاً کوتاه‌ترین زمان برای رسیدن به حداکثر فشارافزایی برای هیدروژن-هوا به‌ترتیب مربوط به ترکیبات ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد آرگون، ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد نیتروژن و ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد آرگون -

۲ | موقعیت هر مبدل فشار و ترموکوپل از نقاط احتراق

	D		B		A	
	$(dP/dt)_{max}$ bar.s ⁻¹	K_G bar.m.s ⁻¹	$(dP/dt)_{max}$ bar.s ⁻¹	K_G bar.m.s ⁻¹	$(dP/dt)_{max}$ bar.s ⁻¹	K_G bar.m.s ⁻¹
H2 ($\phi=1$)	65.91	23.07	82.16	28.7586	73.39	25.68
95%H25%-Ar	61.99	21.70	74.18	25.96	37.85	13.24
5%CO ₂ -95%H ₂	45.74	16.01	65.80	23.03	52.77	18.46
5%N ₂ -95%H ₂	60.55	21.18	106.97	37.43	56.42	19.74
2.5%Ar-2.5%N ₂ -95%H ₂	47.57	16.64	137.29	48.05	49.37	17.28
2.5%Ar-2.5%CO ₂ -95%H ₂	40.11	14.04	78.68	27.53	23.40	8.19
95%H ₂ 2.5%-CO ₂ 2.5%-N ₂	47.96	16.78	92.66	32.43	29.47	10.31

شعله بر پیکربندی لوله تأثیر می‌گذارد. مخلوط مهارکننده‌های مخلوط سوخت و هوا باعث نمی‌شود خطر انفجار موانعی را به حداقل برساند. با این وجود، با استفاده از روش‌های نفوذ، یکی از اقدامات حفاظت و کاهش توصیه شده برای خطر انفجار است. همان‌طور که در شکل ۲- نشان داده شده، حداکثر فشار بیش از حد برای ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد نیتروژن، ۲/۵ درصد دی‌اکسید کربن - هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد نیتروژن، ۲/۵ درصد آرگون - هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد دی‌اکسید کربن - هوا در P2 برای احتراق آغاز شده و در B مشاهده گردید. تحقیقات این نشان می‌دهد که داشتن تغییرات گسترده‌تر یعنی ترکیبات مخلوط، عدد لوئیس به‌طور مستقیم متناسب با تعداد گسترده‌تر مارکستین [۲۳] است. بر اساس این توجیه می‌توان گفت که شتاب شعله در موقعیت B به‌طور عمده تحت تأثیر انتشار حرارتی قرار دارد (شکل ۴-). این امر نشان می‌دهد که انتقال از تغییر شکل شعله به انفجار و تعامل قوی امواج بازتابنده و شعله‌های سریع از نقطه‌ی انتهایی می‌تواند علت ممکن برای حداکثر فشار بیش از حد در P2 باشد. علاوه بر این، در موقعیت B مخلوط‌ها شامل ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد نیتروژن - هوا و ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد نیتروژن - ۲/۵ درصد آرگون - هوا، می‌توانند با فشار زیاد در P7، P5، باشند. این پدیده همچنین توسط کیانو و همکاران [۱۱] بحث شده است.

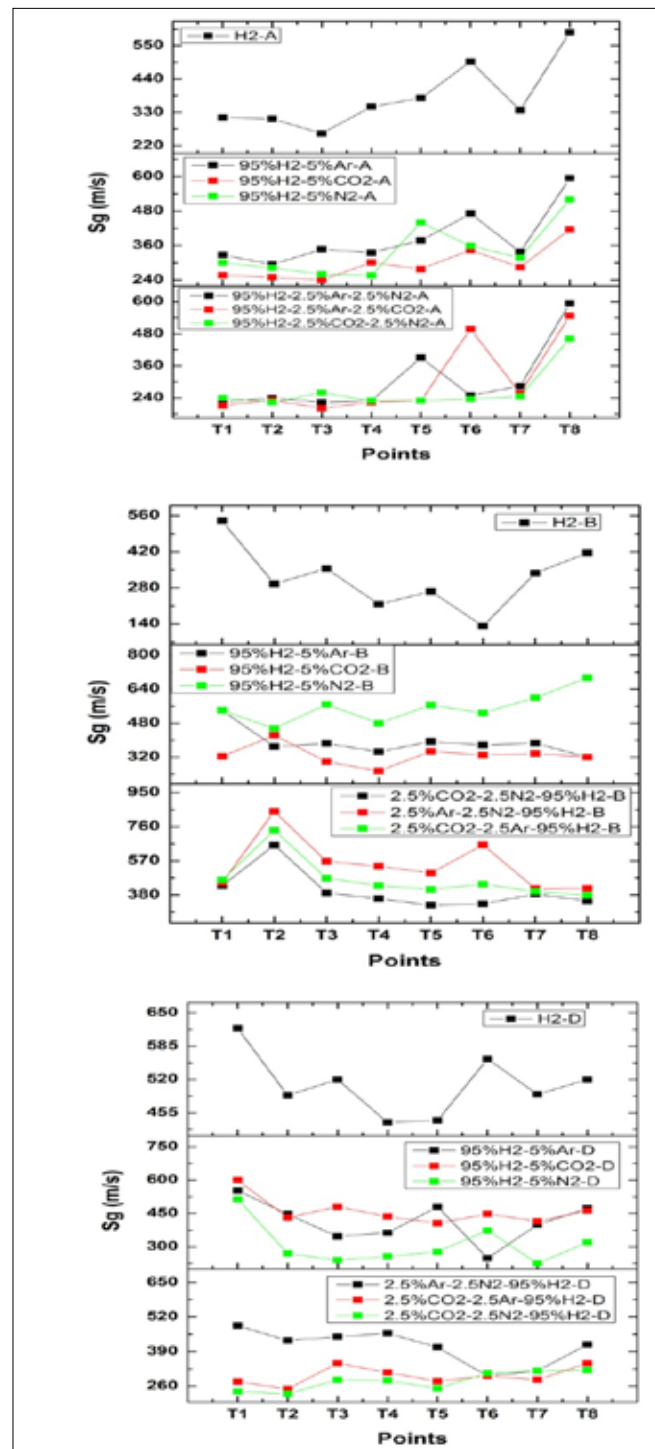
۲-۳- شدت انفجار

شدت انفجار بر اساس نرخ افزایش فشار در جدول ۲- نشان داده شده است. شاخص‌های پیش‌بینی شده برای شدت انفجار گاز $(KG = (dp/dt)_{max} V^{1/3})$ برای تمامی مخلوط‌ها در نقطه‌ی اشتعال بیشتر از نقطه‌ی B است. حداکثر مقدار KG در ۲۷/۲۳، ۲۶/۱۴ و ۲۵/۸۳ در هر نقطه احتراق به ترتیب ۹۵ درصد هیدروژن - ۲/۵ درصد نیتروژن - ۲/۵ درصد آرگون - هوا و ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد نیتروژن - هوا و ۹۵ درصد هیدروژن - ۵ درصد آرگون - هوا اندازه‌گیری می‌شود. با این حال، مخلوط همراه دی‌اکسید کربن شدت کمی دارد که نشان می‌دهد مقدار KG نه تنها به اندازه‌ی اتصال [۲۴]، شرایط اولیه و مخلوط [۱] بستگی دارد بلکه به موقعیت شروع اشتعال نیز وابسته است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت سوخت هیدروژنی برای حمل و نقل آینده، این تحقیق به منظور بررسی اثربخشی آرگون، نیتروژن و دی‌اکسید کربن

آغاز شده باشد، به‌طور قابل توجهی پیش می‌آید. مطالعات پیشین [۱۵ و ۱۶] مشاهدات مشابهی را در مورد پدیده مطرح کردند. با این حال، موقعیت احتراق B اثر متضاد را روی هر دو فشار و



شکل ۷ | سرعت شعله‌ی آتش فشرده در مقابل نقاط ثبت‌شده در یک لوله خط در نقاط مختلف احتراق

می‌کند، تابش شعله در موقعیت احتراق A و D تحت تأثیر تعاملی قوی از موج بازتابنده و شعله‌ی سریع است.

■ از میان تمامی مخلوط‌های مورد مطالعه، ترکیبات شامل ۹۵ درصد هیدروژن، ۲/۵ درصد آرگون، ۲/۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد نیتروژن-هوا، ۹۵ درصد هیدروژن، ۵ درصد آرگون-هوا با توجه به خصوصیاتشان به ترتیب خطرات بیشتری را نشان دادند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل، ترکیبات مخلوط با دی‌اکسیدکربن نسبت به سایر ترکیبات، شدت انفجار کمتری دارد. زیرا میانگین حداکثر سرعت شعله ثبت شده برای این مخلوط خاص در تمامی نقاط احتراق کمتر است (میانگین ۵۹۹ متر بر ثانیه). ■

بر شتاب نسبی هیدروژن-هوا در یک لوله انجام شد. بر اساس یافته‌ها می‌توان به‌طور خلاصه عنوان کرد:

■ نفوذ قوی از موقعیت احتراق و ترکیب سوخت اولیه در فشار بیش از حد، سرعت شعله و میزان افزایش فشار مشاهده شد. مخلوط دو بازدارنده روی ترکیب هیدروژن و هوا در مقایسه با هر یک از بازدارنده‌ها (به صورت خالص) شدت تأثیر کمتری بر مهار شعله دارد. نتایج نشان داد اثر مهارکننده‌ها باید به ترتیب دی‌اکسیدکربن < نیتروژن < آرگون باشد.

■ شدت انفجار ثبت شده در موقعیت احتراق B بیشتر از A یا D است. شتاب شعله هنگام احتراق در موقعیت B، عمدتاً تحت تأثیر انتشار حرارت است و در نتیجه از شکل شعله به حالت انفجار تغییر

منابع

- [1] Emami, S.D., et al., Experimental study on premixed hydrogen/air and hydrogen-methane/air mixtures explosion in 90 degree bend pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. 38(32): p. 1411514120-.
- [2] de Goey, L.P.H., et al., Propagation, dynamics and control of laminar premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011. 33(1): p. 863886-.
- [3] Hutny, W. and G. Lee, Improved radiative heat transfer from hydrogen flames. *International journal of hydrogen energy*, 1991. 16(1): p. 4753-.
- [4] Xiao, H., et al., Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct. *Combustion and Flame*, 2012. 159(4): p. 15231538-.
- [5] Grossel, S.S., Deflagration and detonation flame arresters. 2002: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers.
- [6] Zhou, B., A. Sobiesiak, and P. Quan, Flame behavior and flame-induced flow in a closed rectangular duct with a 90° bend. *International Journal of Thermal Sciences*, 2006. 45(5): p. 457474-.
- [7] Kwon, O. and G. Faeth, Flame/stretch interactions of premixed hydrogen-fueled flames: measurements and predictions. *Combustion and Flame*, 2001. 124(4): p. 590610-.
- [8] Sabard, J., N. Chaumeix, and A. Bentaib, Hydrogen explosion in ITER: Effect of oxygen content on flame propagation of H₂/O₂/N₂ mixtures. *Fusion Engineering and Design*, 2013. 88(9-10): p. 2669-2673.
- [9] Di Benedetto, A., et al., Explosion behavior of CH₄/O₂/N₂/CO₂ and H₂/O₂/N₂/CO₂ mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. 34(16): p. 69706978-.
- [10] Shih, H.-Y., Computed extinction limits and flame structures of H₂/O₂ counterflow diffusion flames with CO₂ dilution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. 34(9): p. 40054013-.
- [11] Qiao, L., C. Kim, and G. Faeth, Suppression effects of diluents on laminar premixed hydrogen/oxygen/nitrogen flames. *Combustion and Flame*, 2005. 143(1): p. 7996-.
- [12] Kambara, S., et al., Hydrogen oxidation in H₂/O₂/N₂ gas mixture by pulsed DBD at atmospheric pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008. 33(22): p. 67926799-.
- [13] Kuo, K.K., Principles of combustion. 1986.
- [14] Dorofeev, S., et al., Effect of scale on the onset of detonations. *Shock Waves*, 2000. 10(2): p. 137149-.
- [15] Basco, A., et al., The effect of the hydrogen presence on combustion-induced rapid phase transition of CO/O₂/N₂ mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. 38(36): p. 16463-16470.
- [16] Cammarota, F., et al., Combined effects of initial pressure and turbulence on explosions of hydrogen-enriched methane/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009. 22(5): p. 607613-.
- [17] Salzano, E., et al., Explosion behavior of hydrogen-methane/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012. 25(3): p. 443447-.
- [18] Movileanu, C., D. Razus, and D. Oancea, Additive effects on the rate of pressure rise for ethylene-air deflagrations in closed vessels. *Fuel*, 2013. 111: p. 194200-.
- [19] Zhu, C., et al., Effect of variation in gas distribution on explosion propagation characteristics in coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 2010. 20(4): p. 516519-.
- [20] Cussler, E.L., Diffusion: mass transfer in fluid systems. 2009: Cambridge university press.
- [21] Guo, H., et al., The effect of hydrogen addition on flammability limit and NO_x emission in ultra-lean counterflow CH₄/air premixed flames. *Proceedings of the combustion institute*, 2005. 30: p. 303311-.
- [22] Kim, W.K., T. Mogi, and R. Dobashi, Effect of propagation behaviour of expanding spherical flames on the blast wave generated during unconfined gas explosions. *Fuel*, 2014. 128: p. 396403-.
- [23] Bell, J.B., et al., Numerical simulation of Lewis number effects on lean premixed turbulent flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007. 31(1): p. 13091317-.
- [24] Dupont, L. and A. Accorsi, Explosion characteristics of synthesised biogas at various temperatures. *Journal of hazardous materials*, 2006. 136(3): p. 520525-.