

تأثیر پیکربندی لوله بر انتشار شعله مخلوط‌های گازی هیدروژن و هیدروکربنی در یک حجم ثابت

سینا دوازده امامی*، محمد ولایت‌زاده، موسسه آموزش عالی کاسپین • مصطفی صادقیور، جلال شایان، شرکت ملی نفت ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۶/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۷/۰۸

واژگان کلیدی:

خم شدن، اتصال مسیر، انتشار شعله، نرخ افزایش فشار

چکیده

در تأسیسات صنعتی، لوله‌کشی کارآمد و موثر برای انتقال مواد امری ضروری است. در صنایع فرآیندی با توجه به تاریخچه حوادث انفجار گاز که سبب آسیب‌های جدی شده، نگرانی‌های ایمنی وجود دارد. هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر انتشار شعله و تنظیمات مربوط به لوله‌های مختلف می‌باشد. بدین منظور، انفجار لوله‌های مستقیم، ۹۰ درجه خم، محل اتصال جوش و موانع موجود در مسیر بررسی شدند. مخلوط گازهای هیدروژن، اتیلن، پروپان و گاز طبیعی در طیف وسیعی از غلظت‌ها (نسبت تعادل؛ $\Phi = 0.6 - 1.4$) استفاده گردید. نتایج نشان داد که در حالی که اختلاف معنی‌داری در حداکثر فشار و میزان افزایش فشار در هر دو نوع ترمینال مورد بررسی وجود ندارد، لوله خم همواره بدترین نتیجه را از لحاظ حداکثر فشار و شعله در انفجارهای گاز شامل واکنش‌پذیرترین مخلوط‌ها به وجود می‌آورد. علاوه بر این، گزارش دقیق اثرات فشار و امواج انفجار نشان می‌دهد که مدت شتاب شعله، جهت شعله و نقطه احتراق اولیه، به قرار گرفتن طول اتصال لوله در امتداد طول لوله بستگی دارد و سبب بر هم خوردن مکانیسم شتاب شعله می‌شود.

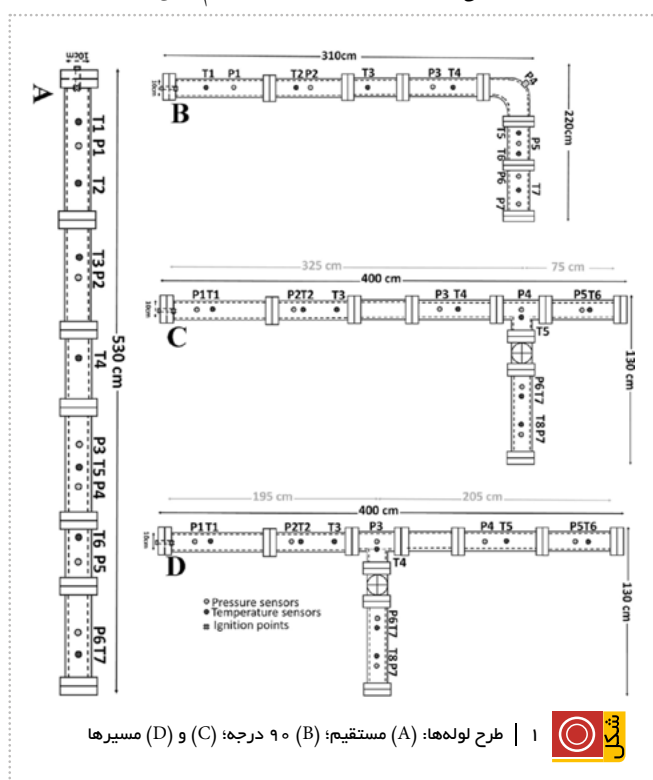
مقدمه

شعله، که یکی از مهمترین پارامترهای ارزیابی ریسک در خطرات فرآیند و طراحی ایمن تجهیزات فرآیندی هستند، مورد نیاز است. تحقیقات گسترده و مطالعات متعددی در زمینه انتشار شعله و مکانیسم انفجار در لوله‌ها گزارش شده است (Thomas et al., 2010)، اما بیشتر این موارد بر روی پیکربندی و برنامه‌های آزمایشی خاص (به‌عنوان مثال، با استفاده از لوله یا لوله‌های خمش یا مستقیم) تمرکز می‌کنند. به‌همین دلیل مطالعات جامع باید بر روی انتشار شعله در تنظیمات مختلف لوله، با توجه به مشکلات پیچیده در تعامل بین دینامیک سیالات، انتقال حرارت و احتراق انجام شود. به‌عنوان مثال، Zhu و همکاران (2010) از یک لوله خم U شکل و یک لوله Z به‌صورت آزمایشی استفاده کردند تا اثر جریان مستقیم را بر روی انفجار متان - هوا بررسی کنند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد چرخش‌ها، قدرت انفجار به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. علاوه بر این، مقادیر سرعت شعله و حداکثر فشار بالا با افزایش غلظت متان در مخلوط در یک لوله افقی افزایش نشان داد (Zhu et al., 2010). مطالعه دیگری در مورد یک لوله مستقیم با نسبت ۶۰ (طول به قطر) نشان داد که امواج فشار با افزایش سرعت واکنش متان - هوا افزایش یافته است. بررسی توزیع منطقه شعله و اثرات خطر در یک لوله و انفجار گاز تونل نیز نشان داد که منطقه شعله تنها با در نظر گرفتن غلظت اولیه مخلوط همیشه بیشتر از منطقه گاز

انفجار در صنایع شیمیایی، گاز و نفت همچنان یک مشکل مهم است که منجر به صدمات، مرگ، تخریب تجهیزات و ویرانی می‌شود. در صنایع شیمیایی، هیدروکربنی و فرآیندهای صنعتی کارخانجات، می‌توان انواع مختلفی از سناریوها را پیاده‌سازی کرد که در آن انفجارهای گاز به صورت محدود یا غیرقابل کنترل رخ می‌دهد. چنین انفجارهایی می‌توانند ناشی از نشت کنترل نشده، یا به سادگی با تداخل با هوا یا نقص‌های غیرقابل پیش‌بینی باشند. برای معادن زغال‌سنگ زیرزمینی، انفجار گرد و غبار زغال‌سنگ ناشی از انفجار گاز اغلب باعث فاجعه ثانویه می‌شود و این حادثه می‌تواند بلایای شدیدتری را نسبت به انفجار گاز تک‌فاز ایجاد نماید. حرکت با سرعت صوت موج فشار ناشی از انفجار گاز، گرد و غبار زغال‌سنگ را در هوا را بالا می‌برد و موجب انفجار گرد و غبار می‌شود که شدیدتر از انفجار اول است. بنابراین نیاز به حفاظت از خط لوله در برابر انتشار پدیده احتراق ناخواسته، مانند انتقال از طریق انفجار (DDT) (از جمله شعله‌های تجزیه) که در روند فرآیند رخ می‌دهد، وجود دارد. به‌منظور اطمینان از اینکه اقدامات احتیاطی کامل در ارتباط با حامل‌های گاز خط لوله صورت می‌گیرد، ضروری است که مکانیسم‌های انفجاری به‌طور کامل مشخص و تعیین شوند. به‌طور خاص، دانش در مورد حداکثر فشار، حداکثر میزان افزایش فشار (به‌عنوان مثال شاخص پیش‌بینی شده) و سرعت

مخلوط‌های هوا-هیدروژن فازهای مختلف شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهند، که ویژگی‌های مشخصی را نسبت به سایر گازها نشان می‌دهد. همچنین تحقیقات در برآورد امواج شوک در مخلوط هیدروژن-اکسیژن در یک حجم قطر ۱۲ میلی‌متر نشان داده است که تشدید موج از یک مقدار اولیه انرژی می‌تواند مراکز انفجاری احتراق ثانویه ایجاد کند و پارامترهای آن از مقادیر پیش‌بینی شده در حالت Chapman-Jouguet متفاوت است (Petukhov et al, ۲۰۰۹). این مسئله بر خلاف تصور عادی است که انفجار به وسیله اثر قدرت قابل توجه تحریک می‌شود. با این حال، محققان گزارش‌های متعدد آزمایشگاهی ارائه کردند که در هنگام انفجار با استفاده از سوخت‌های هیدروژنی، انتقال از طریق انفجار بالقوه می‌تواند در مقایسه با سوخت‌های هیدروکربنی با شدت بیشتری به دست آید (Thomas et al, ۲۰۱۰).

شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انتشار شعله در یک مجرای با بخش خمیده ۹۰ درجه نیز به‌طور مداوم با پدیده‌های فیزیکی پایه‌ای مانند شعله، افتادگی شعله، روند تکامل فشار، روند انتشار شعله و توسعه انتشار در خم شدن بررسی شده است. توسعه جریان مخلوط پنهان شده در خم با یک گذر ثانویه جابه‌جایی تعبیه شده، در دو یا بیشتر از جریان‌های پیچیده نشان داده شده است. Hu و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان دادند که با افزایش نسبت متعادل، سرعت سوختن لایه‌ای برای احتراق مخلوط سوخت و کاهش در مورد سوختن مخلوط سوخت، افزایش می‌یابد. سرعت سوختن لایه‌ای نیز افزایش دمای اولیه و فشار را افزایش می‌دهد که مطالعات مشابه با استفاده از وسایل مختلف نیز به‌طور مداوم این مسئله را تأیید



۱ | طرح لوله‌ها: (A) مستقیم؛ (B) ۹۰ درجه؛ (C) و (D) مسیریها

اصلی است (Ma et al, ۲۰۱۵). از سوی دیگر، Razus و همکاران (۲۰۰۶) فشار انفجار مخلوط هیدروکربن-هوا در انبارهای بسته را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که فشار اولیه، غلظت سوخت و تلفات گرمایی تأثیر قابل توجهی بر حداکثر فشار در طی پخش شعله دارد. Gu و همکاران (۲۰۰۰) عدم پایداری شعله و نسبت سرعت سوختگی لایه‌ای هوا و مخلوط گاز طبیعی-هوا را با نسبت‌های مختلف همسان بررسی کردند. عدم پایداری شعله در نسبت معادل ۱/۲ و بالاتر مشاهده شد که نشان می‌دهد این بی‌ثباتی شعله به علت عدم پایداری حرارتی و بی‌ثباتی هیدرودینامیکی است. مخلوط‌های غنی دیگر شناسایی شده است که بیشتر در معرض ناپایداری‌های سطحی هستند و می‌توانند منجر به افزایش نرخ سوختن شوند. بنابراین در چنین شرایطی سرعت شعله افزایش می‌یابد. این به نوبه خود می‌تواند منجر به انفجار شدیدتر از آنچه انتظار می‌رود، گردد.

در تعیین شدت انفجار اتیلن، تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی و محاسباتی بر روی اتیلن قابل اشتعال انجام شده است. در اکسیداسیون هیدروکربن‌های بالاتر از اتیلن، انگیزه محققان برای اعمال روش‌های محاسباتی جهت مدل‌سازی بیشتر است تا مکانیسم مناسب برای اکسیداسیون اتیلن را در طیف گسترده‌ای از دما، فشار و نسبت تعادلی بررسی کنند. با این حال، برای فرآیند انتقال سوخت، تنها تعداد محدودی از مطالعات انجام شده است. تحقیق انجام شده توسط Thomas و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که انتقال به انفجار در اتیلن خالص می‌تواند منجر به واکنش تجزیه در فشاری بالاتر از فشار اتمسفر شود. آنها همچنین گزارش دادند که فشار اولیه نقش مهمی در افزایش فشار کل ندارد. با این حال، دمای دیواره اولیه لوله و احتمالاً رطوبت مخزن، می‌تواند بر مکانیسم انتشار کلی شعله تأثیر بگذارد؛ همان‌طور که توسط Ma و همکاران (۲۰۱۵) نیز مشاهده شده است. آنها نشان دادند که این گاز خاص، افزایش امواج شوک‌دهنده ناشی از انفجار ندارد، زیرا انفجارهای بالای آن به اندازه کافی قوی نیستند تا سرعت آن را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند. آنها نتیجه گرفتند که پس از انتقال از طریق انفجار، سرعت شعله در طول روند انتقال در هر دو لوله مستقیم و خم با قطر ۱۵۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد. با این وجود، حداکثر سرعت شعله در حدود ۸۰ درصد از طول لوله مستقیم مشاهده شد و حدود ۷۰ درصد از آن اگر موانع در این دو نوع لوله وجود داشته باشد. این پدیده نشان می‌دهد که موج‌های منع شده فشار از لوله بسته شده تأثیر قابل توجهی در کاهش سرعت شعله در طی انتشار شعله دارند.

از سوی دیگر، Xiao و همکاران (۲۰۱۱) یک مطالعه آزمایشگاهی در کانال‌های افقی نیمه‌باز و بسته را انجام داده و دریافتند که

می‌کنند (Dahoe, ۲۰۰۵). با این حال، آنچه که بدیهی است، مطالعه جامعی از پارامترهای حاکم بر انتشار شعله در تنظیمات لوله‌های مختلف با توجه به فیزیک و دینامیک شعله و توسعه فشار هیدروکربن‌ها و انفجار هیدروژن - هوا در طیف گسترده‌ای از نسبت متعادل است. به همین دلیل، فیزیک و پویایی توسعه انفجار در تنظیمات لوله‌های مختلف، خطوط مستقیم، ۹۰ درجه و لوله‌های بسته شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. رفتار انتشار شعله و ویژگی‌های انفجار مخلوط سوخت و هوا برای ایجاد یک طراحی مناسب و طراحی لوله‌کشی برای برنامه‌های کاربردی ایمن بررسی می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این مطالعه با توجه به فشار بیش از حد، سرعت افزایش فشار، سرعت شعله انفجار مخلوط گاز - هوا و اثر موقعیت احتراق ارائه شده است.

۲- نتایج و بحث

۲-۱- تأثیر حداکثر فشار بر پیکربندی لوله

شکل ۲- حداکثر فشار بیش از حد ثبت شده برای تمام سوخت‌ها را نشان می‌دهد. ردیابی فشار با توجه به زمان ارائه شده است. برای انفجار هیدروکربن، نمونه‌های انفجاری معمولی نشان داده شده است. از نتایج فشار هیدروژن هوا، دریافت شد که حداکثر فشار بیش از حد از انفجار هیدروژن بالاتر از سوخت‌های هیدروکربنی است: دو برابر در تمامی پیکربندی لوله‌ها.

به‌طور شگفت‌انگیز، حداکثر فشار مخلوط هیدروژن هوا بالاترین مقدار (تقریباً ۷/۲ بار) در منطقه خمیده خط لوله ۹۰ درجه در مقایسه

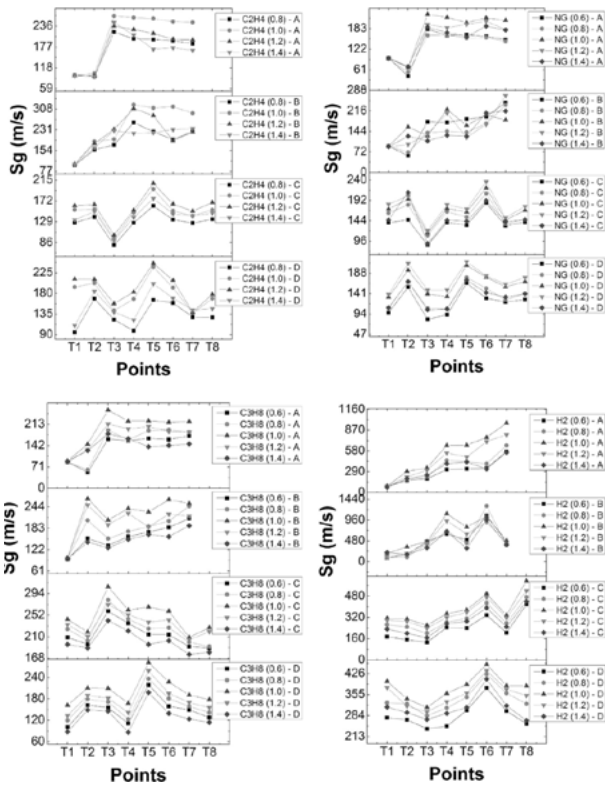
۱- روش کار

در این مطالعه، لوله‌های مستقیم، ۹۰ درجه و مسیر خمیده با حجم ثابت (۰/۴۲ متر مکعب) با قطر ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۱). هر دو انتهای لوله بسته می‌شوند. لوله‌ها از تعدادی از قطعات ساخته شده از ۰/۵ تا ۱ متر طول ساخته شده و با واشر بین اتصالات و فلنج‌های کور در هر دو طرف متصل می‌شوند. مخلوط‌های قابل اشتعال به وسیله یک جرقه الکتریکی به وجود می‌آیند که ۱۶ ژول انرژی را برای آزمایش انفجار گاز فراهم می‌کند. برای این مطالعه، چهار تنظیمات لوله به عنوان A-D در نظر گرفته شد، همان‌طور که در شکل ۱- نشان داده شده C و D اتصالات مسیر خمیده با مکان‌های مختلف مانع هستند.

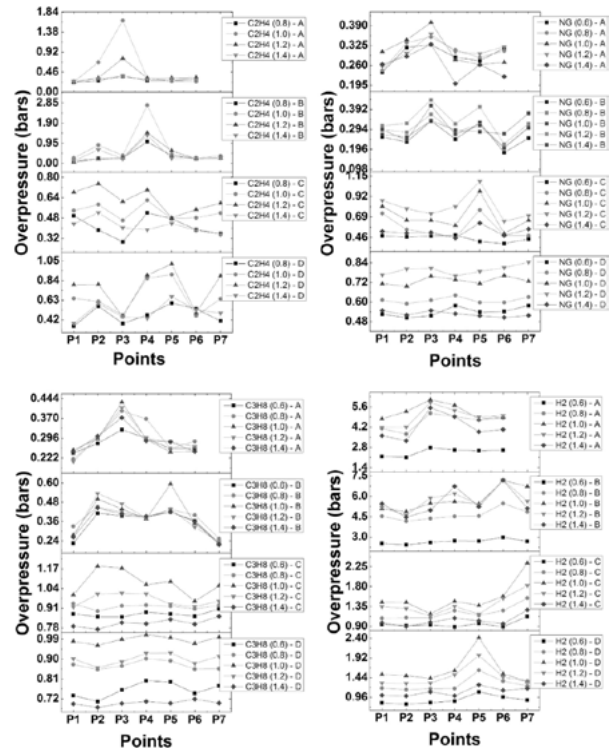
اندازه‌گیری‌های سرعت شعله با استفاده از مواد منفجره، معدنی، ترموکوپل‌های K-type که در امتداد خط مرکز لوله قرار گرفته بودند، ثبت شد. داده‌های سرعت شعله تولید شده از زمان ورود به شعله (مشخص شده به‌عنوان یک تغییر ناگهانی در خروجی ترموکوپل) تعیین شد. زمان ورود آتش شعله در لوله، اولین نقطه‌ای بود که ثبت آن آغاز شد. با توجه به ترموکوپل در لوله، این موج توسط یک پیش‌فشرده‌سازی پیش از شعله و سرعت جریان بالا مرتبط با آن در اطراف ترموکوپل) مانع گردید که موجب ایجاد دو شیب متمایز در ردیابی ترموکوپل شد. در این مورد نقطه‌ای که شیب دوم (شیب‌دار) آشکار شد، به‌عنوان زمان ورود شعله در نظر گرفته شد. فشار داخل لوله با استفاده از مجموعه‌ای از مبدل‌های فشار پیزورسیست در امتداد دیوار بیرونی، به‌عنوان P در شکل ۱- نشان داده شده است. داده‌ها با استفاده از ثبت گذرا ۳۴ کانال به وسیله NI CompactDAQ جمع‌آوری شدند. موقعیت‌های احتراق و محل هریک از مبدل‌ها و حس‌گرها در جدول ۱- ارائه شده است. در این مطالعه برای مخلوط سوخت و هوا، هوا - گاز طبیعی، هوا - اتیلن، مخلوط C3H8- هوا و هیدروژن - هوا با نسبت معادل (Φ)

۱ | موقعیت هر مبدل فشار و ترموکوپل از نقاط احتراق

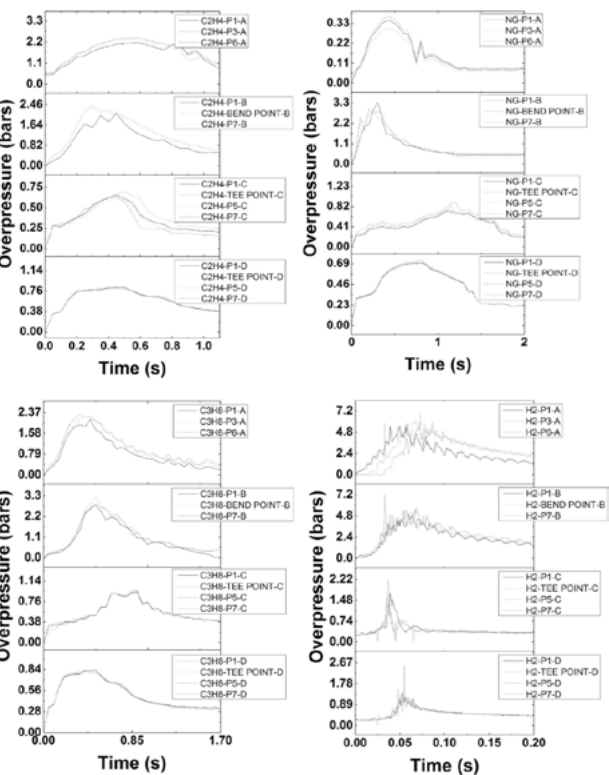
موقعیت احتراق (متر)				
G	C	B	A	
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۲	P _۱
۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۳۵	۱/۳۵	P _۲
۲/۱۶	۲/۵۳	۲/۰۲	۲/۰۲	P _۳
۳/۰۸	۳/۴۲	۲/۵۸	۲/۵۸	P _۴
۴/۰۷	۳/۹	۳/۳۳	۳/۳۳	P _۵
۲/۷۷	۴/۰۳	۴/۱۶	۴/۱۶	P _۶
۳/۲۶	۴/۵۲	۴/۴۴	-	P _۷
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۲۶	T _۱
۱/۲۶	۱/۲۶	۰/۷۵	۰/۷۰۵	T _۲
۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۶۱	۱/۰۶۵	T _۳
۲/۰۶	۲/۷۵	۲/۱۷	۱/۴۸۵	T _۴
۳/۱۳	۳/۴۲	۲/۶۲	۲/۱۴	T _۵
۳/۹	۳/۹۹	۳/۴۸	۳/۲	T _۶
۲/۷۳	۴/۱۲	۴/۲۶	۴/۳۴۵	T _۷
۲/۹۹	۴/۳۸	-	-	T _۸



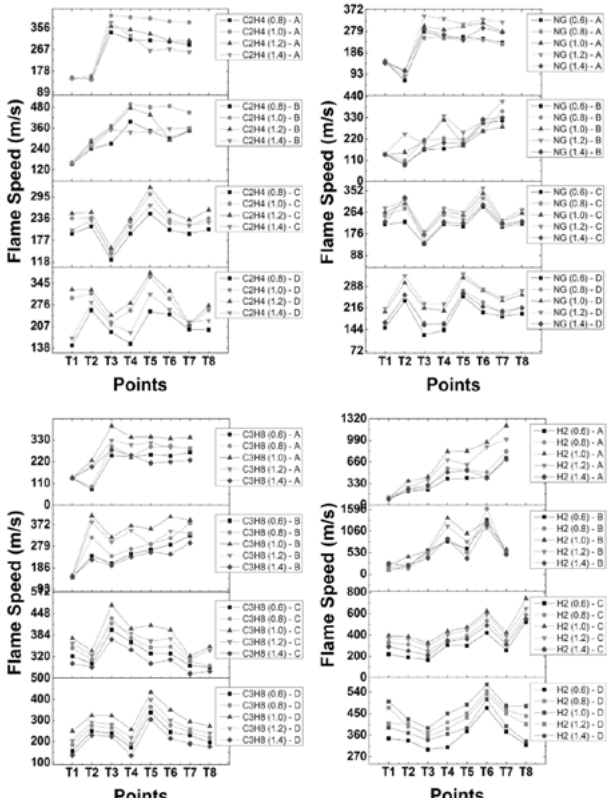
شکل ۴ | سرعت شعله آتش در مقابل نقاط ثبت شده



شکل ۵ | حداکثر فشار در مقابل نقاط ثبت شده



شکل ۶ | موج انفجار



شکل ۷ | حداکثر سرعت شعله در مقابل نقاط ثبت شده



۳ خاموش می‌شود.

با این حال، شتاب دوم در فاصله ۴/۱۶ متر از موقعیت اشتعال مشاهده شد (P۵). به علت اثر دیوار انتهایی نسبت به تعامل موج برگشتی (Reflective Wave) برای مخلوط‌های هوای NG، فشار در P۳ تقریباً ۰/۴۱ barg بود (شکل-۲). رفتار حریق در خط لوله نشان داده شده است. فشارافزایی دوم در P۵ (پس از موقعیت خمشی) به علت تعامل موج شعله که قابل مقایسه با سوخت‌های دیگر است، می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که اثر فشردگی شعله در انفجار NG-air بیشتر است. همانطور که انتظار می‌رود، مخلوط متان-هوا، به دلیل رفتار واکنش‌پذیری پایین آن، کمترین رشد در طول لوله را نشان می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که در لوله مستقیم (شکل-۱)، روند برای همه سوخت‌ها سازگار است. حداکثر فشار بیش از حد در فاصله ۲/۰۲ متری (P۳) از موقعیت اشتعال رخ می‌دهد. حداکثر فشار بالا مرتبط با بالاترین نرخ سوزی به دلیل سلولیت^۱ / چروکیده شدن^۲ شعله، یعنی فشردگی سطح شعله، افزایش سطح شعله و در نتیجه افزایش سرعت سوختن است. در این حالت، شعله به دلیل ایجاد گرداب به شکل لاله‌ای^۳ در می‌آید که موجب تشدید آشفته‌گی می‌شود. موج بازتابی باعث ایجاد تعامل قوی بین شعله سریع و آشفته‌گی شده و نهایتاً افزایش سرعت شعله و افزایش فشار را به دنبال دارد. م و همکاران (۲۰۱۵) مشاهدات مشابهی را در شتاب شعله متان / هوا در یک لوله گزارش داده‌اند. با این حال، در $x > 2/0.2$ متر (به ترتیب P۴)، روند نامعین برای سوخت‌ها واکنشی بود. به عنوان مثال، هیدروژن هوا باعث توسعه تدریجی فشار شد، اما مشاهدات مشابهی برای انفجار اتیلن-هوا، پروپان هوا و یا هوا در هوا وجود نداشت به طوری که افت فشار ناگهانی آن به حدود دو تا پنج برابر کاهش یافته از حد در $x = 2/0.2$ متر می‌رسید. این روند ناسازگار می‌تواند به ماهیت واکنش سوخت مربوط باشد. این موضوع در بخش بعدی بحث خواهد شد. در محدوده مورد آزمایش غلظت هیدروکربن‌ها-هوا و هیدروژن هوا، مقدار حداکثر فشار بیش از حد برای هر دو تنظیمات لوله انتقال^۴ C و D تقریباً یکسان بود و تنها در مکان‌های مختلف به دست آمد. همانطور که در شکل-۲ نشان داده شده است، بالاترین فشار بیش از حد برای مخلوط هیدروژن هوا در منطقه اتصالات لوله (P۷) برای پیکربندی C مشاهده شد، در حالی که P۵ حداکثر فشار پیک برای لوله انتقال D بود. همانطور که مشاهده شد، شعله‌های پخش شده در لوله‌های انتقالی C و D بعد از منطقه دایره، میزان شتاب بالاتر را تجربه می‌کنند، که منجر به فشار بیشتر در انتهای لوله می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، شعله‌های آتش‌سوزی برای مخلوط‌های مختلف به علت اثرات بی‌ثباتی فیزیکی، به خوردگی شعله، به ویژه برای سوخت‌های واکنشی بیشتری حساس بودند. در نتیجه، این شعله چروکیده

با هر دو پیکربندی خط لوله تی می‌باشد.

تحقیقات قبلی نشان داده است که وقتی شعله از ناحیه خمیده ۹۰ درجه عبور می‌کند، شدت آتش‌سوزی افزایش یافته است (ژو و همکاران، ۲۰۰۶) و در نتیجه، سرعت شعله نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در مقایسه با آزمایش‌های مشابه انجام شده در یک لوله مستقیم و اتصال لوله، فشار بیش از حد افزایش می‌یابد. شکل-2d توسعه حد فشار در طول لوله در موقعیت‌های مختلف برای مخلوط هیدروژن/هوا را نشان می‌دهد. نتایج به وضوح نشان‌دهنده دو حد فشار در دو موقعیت متفاوت است: اول، در موقعیت خمشی و دوم، در نزدیکی دیواره انتهایی خط لوله (۰/۹ میلی‌متر از دیوار انتهایی لوله) - برای انفجار لوله ۹۰ درجه. شکی نیست که اولین فشارافزایی ناشی از نفوذ یک مانع است: در این صورت حضور ناحیه خمیده ۹۰ درجه در لوله بسته می‌باشد. امواج صوتی و موج‌های قوی و برگشتی در منطقه واکنش وارد می‌شود که موجب افزایش سرعت سوختن و افزایش سرعت شعله می‌گردد. با این وجود در یک لوله/لوله بسته، دیواره انتهایی نیز به عنوان یک مانع با تمایل به ایجاد اختلال شعله عمل می‌کند و از این رو بر رفتار انفجاری تاثیر می‌گذارد (۲۰۱۰؛ Thomas et al, Zhu et al؛ ۲۰۱۰) که موجب فشارافزایی تا ۷/۲ بار ($\varphi=1$) گردیده و در نتیجه سرعت شعله و فشارافزایی در واحد زمان در مقایسه با لوله مستقیم را افزایش می‌دهد.

شکل-3a- توسعه فشار تحت تاثیر فاصله از موقعیت اشتعال، برای مخلوط اتیلن/هوا را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که فشار پس از موقعیت خم شدن پراکنده است که با دیگر پروفیل‌های انفجاری سوخت سازگار نیست.

برای انفجارهای پروپان و گاز طبیعی (NG)، فشار پس از خم شدن/مانع، در لوله‌های ۹۰ درجه یا لوله مستقیم افزایش یافته است. متناوباً، میزان فشردگی شعله در دیواره به علت مکانیزم نفوذپذیری در دیواره‌ها افزایش می‌یابد. به گفته آونگ و همکاران (۲۰۰۲)، انتشار شعله‌ای آشفته به تدریج با افزایش منطقه ترجیحی انتشار می‌یابد (برادلی و همکاران، ۲۰۰۸).

یافته‌ها نشان می‌دهد که حداکثر فشار بیش از حد برای اکثر سوخت‌ها (به جز پروپان و NG همانطور که در شکل-3a, b, c و d نشان داده شده است در موقعیت خم شدن می‌باشد. این روند ناسازگار را می‌توان بر اساس خود واکنش سوخت توضیح داد. نفوذپذیری پروپان به طور قابل توجهی کوچک‌تر از هدایت حرارتی آن است، به طوری که سوخت سریع‌تر در منطقه پیش گرمی می‌رسد. برای پروپان، حداکثر فشار حداکثر در ۲/۰۲ متر (P۳) قبل از موقعیت خمشی ۹۰ درجه نشان داده شده در شکل-3c مشاهده شد. در عین حال، موج آکوستیک / شوک، که به دلیل اثر خمش پراکنده شده و منعکس شده بود، به سمت شعله‌های داغ حرکت می‌کرد تا سرعت سوختن را تقویت کند. به علت کاهش سرعت سوختن و تلفات گرما به دیوار، شعله پس از نقطه

هفت برابر بیشتر از سرعت شعله آدیاباتیک می‌باشد. افزایش قابل توجه در سرعت شعله ممکن است به علت شتاب دادن خود به شعله ناشی از ناپایداری حرارتی از مکانیزم جلو شعله باشد. اولین پیک به سرعت ۱۷۲٫۴ متر بر ثانیه رسیده است، که تقریباً برابر با سرعت اولیه ۱۳ برابر می‌شود و نشان‌دهنده آشفستگی بسیار زیاد در لوله است. این جریان موجب ایجاد آشفستگی در برابر شعله شده و موجب می‌شود که شعله سریع‌تر در لوله باشد. همراه با شکل‌گیری چروکیده شدن شعله، تولید شعله و انعطاف‌پذیری، انتشار شعله سریع باعث گسترش شعله در جهت انتهای لوله می‌شود.

علاوه بر این، موج بازتابنده از انتهای لوله موجب کاهش سرعت سوزاندن جرم در حداکثر می‌شود و موجب افزایش پیک دوم در حدود ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در TV از موقعیت اشتعال می‌شود. می‌توان پیش‌بینی کرد که سرعت رشد شعله بین نقطه‌ی جرقه و فاصله‌ی $2/14X$ متر (T5) دیده می‌شود که ناشی از جریان ناپایدار ناشی از پدیده شعله‌ی لاله، اثر چروکیده شدن و تعامل موج در شعله لوله‌های بسته می‌باشد.

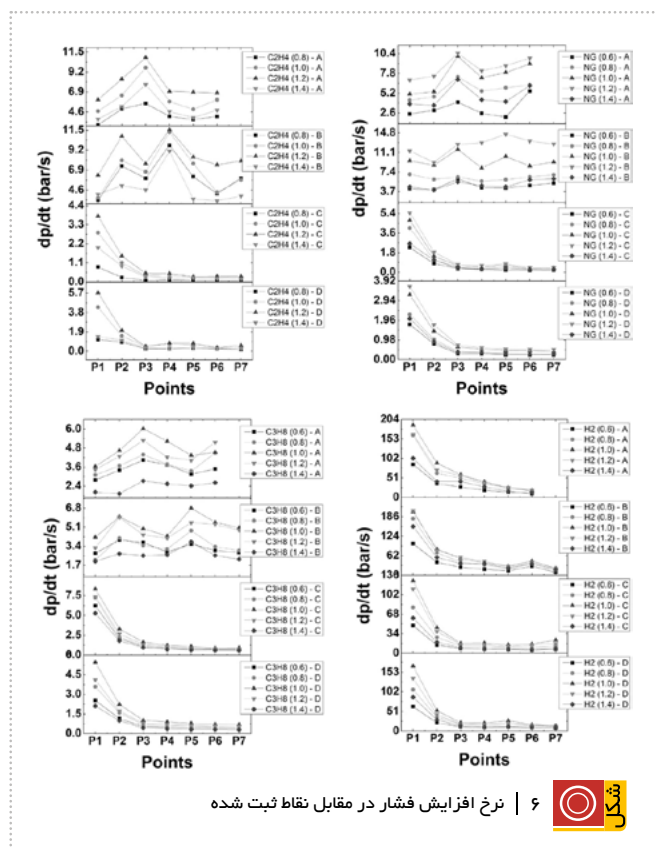
سرعت شعله بالاتر برای هیدروژن/ هوا به علت شتاب‌دهی شعله، حاصل از تعامل بین موج شوک، شعله سریع و شعله در زمان شروع گرداب است. مطابق با اثر باروکلایمین چنین گرداب‌هایی کشش سطح شعله را منجر شده، باعث می‌گردند که شعله متراکم شده و شدت شعله آشفته افزایش یابد. در

باعث افزایش سرعت سوزاندن می‌شود. به این ترتیب سرعت شعله بالاتر و شدت بیش از حد افزایش می‌یابد. از شکل ۳d- می‌توان دید که مدت‌زمان کوتاهی برای شعله‌های هیدروژن برای رسیدن به حداکثر فشار بالا، به سمت لوله انتهایی است و در نتیجه افزایش فشار بالا و سرعت شعله بالاتر زمانی که انفجار در داخل لوله صورت گرفته در پیکربندی C مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، هنگامی که مخلوط‌ها در داخل پیکربندی D لوله منفجر شدند، انتشار شعله این مخلوط خاص با سایر سوخت‌ها تفاوت زیادی نشان نداد. ظهور بیش از حد پیک‌های متعدد نشان می‌دهد که در فاصله کوتاه‌تر از نقطه‌ی احتراق و موانع، شعله اثر متقابل قوی‌ای با امواج فشارهای عرضی از اثر اتصال لوله‌ای ایجاد می‌کند که موجب آشفستگی بیشتری می‌شود و در نتیجه باعث تسریع در سوختن مخلوط‌های غیرواکنشی که در امتداد منطقه اتصال لوله جا داده شده‌اند، می‌گردد. این دوباره میزان احتراق را افزایش می‌دهد و بنابراین سرعت شعله و فشار بیش از حد افزایش می‌یابد. یافته‌های این مطالعه با مطالعات قبلی هماهنگی خوبی دارد. به نظر می‌رسد که شعله‌های هیدروکربن‌ها- هوا حداقل نوسانات در طول لوله‌های انتقال را دارند؛ هم از لحاظ بیش از حد فشار و هم سرعت شعله (شکل‌های ۲- و ۳).

با این حال، رابطه بین حداکثر فشار کلی و شدت انفجار آن در هر پیکربندی لوله T می‌تواند با سرعت گاز نسوخته^۵ پروفیل sg ، همانطور که در شکل ۴- نشان داده شده است، برای هر دو پیکربندی لوله انتقال در حد متوسط باشد $1.8/2.08$ m/s. این امر نشان می‌دهد که برای این گازهای خاص، امواج شوک^۶ وجود ندارد، زیرا انفجارهای بیش از حد آنها به اندازه کافی قوی نیستند. این مورد همچنین با تحقیقات قبلی در مورد شتاب شعله‌ای از سوخت‌های هیدروکربنی موافق است (کوما و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۲- سرعت حرکتی شعله در داخل لوله‌ها

شکل ۳a، b، c، d، سرعت شعله را به صورت تابعی از مقادیر ورود شعله نشان می‌دهد که توسط موقعیت ترموکوپل نشان داده شده است (نشان داده شده توسط T_1 - T_8 در شکل ۱-). برای لوله مستقیم، گاز طبیعی، پروپان و اتیلن دارای پروفیل سرعت شعله: به عنوان مثال، حداکثر سرعت شعله در $x = 0.1$ متر از موقعیت احتراق (T_3) رخ داده است. با این وجود، دو قله در شکل‌های سرعت شعله هیدروژن دیده می‌شود که در موقعیت $x = 1/48$ متر (T4) و $3/20$ متر (TV) از موقعیت احتراق رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که سرعت سوختن خطی^۷ هیدروژن در غلظت استوکیومتری ($\Phi = 1$) تقریباً $3/15$ متر بر ثانیه است و سرعت شعله کریستالی آدیاباتیک ۲۸ متر بر ثانیه (Alekseev و همکاران، ۲۰۱۴). سرعت شعله اندازه‌گیری بسیار بالاتر از SL بوده و حداقل



۶ | نرخ افزایش فشار در مقابل نقاط ثبت شده





لوله تقریباً همان فاصله را شتاب می‌دهند. در این مثال، تعامل بین امواج انعکاسی و شعله‌های سریع از نقاط انتهایی ناچیز است؛ این پدیده در مطالعات قبلی تاحدی مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۳- حداکثر نرخ فشارافزایی در واحد زمان

حداکثر نرخ فشارافزایی در واحد زمان در تمام مقادیر نسبت هم‌ارزی و امواج انفجاری در غلظت استوکیومتری برای تمام سوخت‌ها در شکل‌های ۵- و ۶ ارائه شده است. همانطور که نشان داده شد، حداکثر افزایش فشار همراه با افزایش نقطه‌ی احتراق در انتهای دوم سه قسمت از لوله مستقیم (P۳) و در نقطه خمشی لوله ۹۰ درجه (P۴) گردیده است.

با این حال، نتایج متفاوتی در نقاط مختلف خط لوله با توجه به تخصیص اتصال لوله دیده می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، سلولیت شعله باعث شکل‌گیری موج در سطح شعله می‌شود و این به یک منطقه بزرگ‌تر می‌انجامد و به این ترتیب نسبت سرعت سوختگی افزایش می‌یابد. در نتیجه، تشکیل لاله باعث ایجاد آشفته‌نگی ناشی از ایجاد گرداب می‌شود. موج بازتابنده منجر به تعامل قوی میان شعله سریع و آشفته‌نگی، و همچنین افزایش نرخ فشارافزایی در واحد زمان می‌شود (۲۰۱۴؛ مرلین و همکاران، ۲۰۱۲). این وضعیت را می‌توان با شکل ۵- ثابت کرد. نرخ نوسان در هر نقطه مبدل فشار نشان می‌دهد که شعله به‌صورت مداوم در حال کشیده شدن به‌ویژه در مناطق خمش و نقاط اتصالی می‌باشد و میزان رشد در فضاهای بزرگ بیشتر است. در نتیجه نرخ سوختن توده آتش افزایش می‌یابد.

میزان داده‌های نرخ فشارافزایی در واحد زمان بیشتر از نتایج حداکثر فشار بالا تکرار می‌شود. همچنین سوخت هیدروژن انفجار شدیدتری را برای تمام تنظیمات آزمایش شده ایجاد می‌کند. این مهمترین عامل موثر بر سرعت سوختن و میزان انتشار گرما در طی انتشار شعله است. در نتیجه، با چین و چروک شعله مرتبط است. این شعله چروکیده باعث افزایش سرعت سوختن جرم می‌شود. به این ترتیب سرعت شعله بالاتر و شدت آن بیش از حد افزایش می‌یابد. این باعث شد که بیشترین و کمترین میزان افزایش فشار در انفجارهای هیدروژن هوا و انفجار هوای پروپان افزایش یابد و نشانگر آن است که در لوله خمشی ۹۰ درجه‌ای بیشتر دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج انجام شده، خلاصه یافته‌های این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

۱. فشار هیدروژن - هوا و سرعت شعله، انفجار هیدروژن به حداکثر فشار بیش از حد و سرعت شعله نسبت به سوخت‌های هیدروکربنی

مقابل، برای اتیلن هوا، مخلوط پروپان هوا و هوا و متان هوا، سرعت شعله کمی در برابر $x = 1/5$ متر (T۵)، قبل از انتشار در سرعت ثابت نسبت به لوله پایان، کاهش یافته است. در این حالت شعله شروع به خنک شدن می‌کند و موجب توربولسیون شعله‌ای ضعیف‌تر می‌شود.

سرعت شعله ثبت شده در لوله ۹۰ درجه نشان داد که حضور خمش موجب گسترش شعله در اطراف آن می‌شود. همچنین باعث تشدید گرداب آشفته‌نگی و در نتیجه افزایش سطح شعله از طریق مخلوط شدید گاز سوزانده شده و نشستی آن می‌گردد. همانطور که شکل ۳d- نشان می‌دهد، سرعت شعله‌ی آشفته‌نگی هیدروژن حدود ۱۳۸۴ متر بر ثانیه است؛ افزایش قابل توجه تا ۴/۸ برابر قبل از ورود به خم شدن. در عین حال، برای اتیلن هوا، پروپان هوا و هوا متان حداکثر سرعت شعله تا ۴۹۶ متر بر ثانیه، ۴۰۷ متر بر ثانیه و ۳۳۹ متر بر ثانیه، قبل از موقعیت خمش، به ثبت رسید. علاوه بر این، نتایج همچنین نشان می‌دهد که شتاب دوم در ۳/۴۹ متر (T۶) از نقطه اشتعال رخ داده است و افزایش سرعت شعله به ۱۳۱۱ متر بر ثانیه، ۴۸۷ متر بر ثانیه، ۴۰۷ متر بر ثانیه و ۳۱۰ متر بر ثانیه برای هیدروژن هوا، اتیلن هوا، پروپان هوا و متان هوا به ترتیب قبل از رسیدن به دیوار انتهایی می‌باشد. سرعت شعله در این موقعیت تقریباً دو برابر سرعت شعله در فاصله ۲/۶۲ متر (T۵) بوده است. این امر احتمالاً ناشی از تعامل پیچیده بین شتاب شعله، اثر خشک شدن و شکل شعله است که بر نرخ سوختن جرم تأثیر می‌گذارد. شایان ذکر است که تعامل شعله داغ با امواج فشار که از دیواره انتهایی منعکس می‌شود، نقش مهمی در مشارکت در شتاب دوم دارد. برای لوله انتقال، سرعت شعله پایین‌تر از لوله‌های راست و ۹۰ درجه به دلیل مسیرهای آزاد پس از منطقه گودال بود. تحقیق در مورد لوله‌های موازی همچنین نظری مشابه را نشان داد. با این حال، هیچ‌گونه شک و تردیدی در میزان انفجار ناشی از پیکربندی لوله انتقال وجود ندارد.

داده‌های هر پیکربندی لوله انتقال (شکل ۱c و 1d) نشان می‌دهد که فاصله کوتاه‌تر اتصال لوله از موقعیت جرقه، بالاترین شدت را در مقایسه با فاصله طولانی‌تر قرار می‌دهد. با این حال، در یک فاصله زمانی طول تر مینال، پروفیل‌های مختلف شعله ثبت شد. سرعت شعله بالاتر در T^3 (~ 500 m/s) دیده شد که به دلیل اثر پویا از طریق انتشار شعله می‌باشد. از سوی دیگر، تداخل گرما، مخلوط سریع آشفته‌نگی، شعله سریع در پایین جریان، تعامل قوی بین امواج بازتابنده و شعله‌های سریع از نقاط انتهایی، می‌تواند موجب واکنش و انفجار شود، کیو و فاط (۲۰۰۵). هنگامی که اتصال خط لوله در فاصله مساوی در طول لوله قرار می‌گیرد (شکل 1d-)، شتاب شعله گازهای سوختی کمترین شدت سرعت شعله را می‌دهد، زیرا شعله‌ها در تقاطع

سرعت شعله می‌شود.

۴. روند برای همه سوخت‌ها در لوله مستقیم (پیکربندی A)، با حداکثر فشار بیش از حد در فاصله ۲/۰۲ متر (P۳) از موقعیت احتراق، سازگار است. حداکثر فشار بیش از حد و سرعت شعله ناشی از بالاترین نرخ سوختن به علت سلولیت شعله است، یعنی سطوح شعله بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه سرعت سوختن افزایش می‌یابد.

۵. در محدوده مورد آزمایش از غلظت هیدروکربن‌ها و هیدروژن - هوا، مقادیر حداکثر فشار بالا و حداکثر سرعت شعله برای هر دو پیکربندی لوله تقریباً یکسان بود. علاوه بر این، ظهور بیش از حد پیک‌های چندگانه نشان می‌دهد که در فاصله کوتاه‌تر از موانع، شعله اثر متقابل قوی با موج‌های عرضی ناشی از اثر اتصال مسیرها ایجاد کرده، موجب آشفستگی بیشتر و در نتیجه، تضعیف قابل توجه گازها در اطراف ناحیه تنگ می‌شود. این امر باعث افزایش سرعت شعله و در نتیجه، افزایش حداکثر فشار می‌شود.

تقریباً دو برابر برای تمام تنظیمات لوله مورد مطالعه می‌باشد. با این حال، داده‌های ثبت شده نیز نشان داد که حداکثر فشار بیش از حد و سرعت شعله اتیلن - هوا بالاتر از همه سوخت‌های هیدروکربنی - هوا، هوا - گاز طبیعی و پروپان - هوا بود. از آنجایی که انتشار پروپان به‌طور قابل توجهی کمتر از هدایت حرارتی آن است، در مقایسه با سایر سوخت‌های هیدروکربنی سریع‌تر گرم شود.

۲. جالب توجه است که حداکثر فشار مخلوط هیدروژن - هوا ($\sim 7/2 \text{ bar}$) در منطقه خمیده به‌دست آمد. بنابراین، خم شدن لوله‌ها با افزایش میزان فشار در مقایسه با موانع دیگر لوله، بالاترین شدت انفجار را نشان می‌دهد.

۳. در دو انفجار لوله خم در دو مخلوط مورد مطالعه، دو قاعده انفجار مجزا وجود دارد: اول، در موقعیت خم شدن و دوم، در نزدیکی دیوار پایان (۰/۹ میلی‌متر از دیواره انتهای لوله). وجود خم می‌تواند موجب کاهش کشش شعله و افزایش آشفستگی شود. این وضعیت موجب افزایش بیشتر اختلاط امواج آکوستیک و بازتاب، ورود به منطقه واکنش، افزایش نرخ سوختن و افزایش

پانویس‌ها

- | | | |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1 - Cellularity | 4- Transferring Pipe/tube | 7- Laminar Burning Velocity-SL |
| 2- Wrinkling | 5- Unburned Gas Velocity | |
| 3- Tulip Flame | 6- Shockwave | |

منابع

- [1] Alekseev, V.A., Christensen, M., Konnov, A.A., 2014. The effect of temperature on the adiabatic burning velocities of diluted hydrogen flames: a kinetic study using an updated mechanism. *Combust. Flame*.
- [2] Bradley, D., Lawes, M., Liu, K., 2008. Turbulent flame speeds in ducts and the deflagration/detonation transition. *Combust. Flame* 154 (1e2), 96-108.
- [3] Hu, E., Huang, Z., He, J., Miao, H., 2009. Experimental and numerical study on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures. *Int. J. Hydrogen Energy* 34 (20), 8741-8755.
- [4] Ma, Q., Zhang, Q., Li, D., Chen, J., Ren, S., Shen, S., 2015. Effects of premixed methane concentration on distribution of flame region and hazard effects in a tube and a tunnel gas explosion. *J. loss Prev. process ind.* 34, 30-38.
- [5] Merlin, C., Domingo, P., Vervisch, L., 2012. Large eddy Simulation of turbulent flames in a Trapped Vortex Combustor (TVC)eA flamelet presumed-pdf closure preserving laminar flame speed. *Comptes Rendus M_écanique* 340 (11), 917-932.
- [6] Razus, D., Movileanu, C., Brinzea, V., Oancea, D., 2006. Explosion pressures of hydrocarbon-air mixtures in closed vessels. *J. Hazard. Mater.* 135 (1), 58-65.
- [7] Thomas, G., Oakley, G., Bambrey, R., 2010. An experimental study of flame acceleration and deflagration to detonation transition in representative process piping. *Process Saf. Environ. Prot.* 88 (2), 75-90.
- [8] Xiao, H., Wang, Q., He, X., Sun, J., Shen, X., 2011. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagating in horizontal duct. *Int. J. Hydrogen Energy* 36 (10), 6325-6336.
- [9] Zhu, C., Lu, Z., Lin, B., Jiang, B., 2010. Effect of variation in gas distribution on explosion propagation characteristics in coal mines. *Min. Sci. Technol. (China)* 20 (4), 516-519.