

## مطالعه تجربی اثر ماریپیچ در ناحیه گذار شعله به تراک

مسعود عیدی عطارزاده\*، محمد فرشچی\*\* و کاوه قربانیان\*\*\*

قطب علمی سامانه‌های هوافضایی، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۲۰)

هدف از مقاله پیش رو، بررسی تجربی اثر ابعاد هندسی ماریپیچ بر ناحیه گذار از شعله به تراک و کیفیت تراک تولیدی است. لذا آزمایش‌های گسترده‌ای برای بررسی اثر ابعاد هندسی ماریپیچ بر طول ناحیه گذار و کیفیت تراک انجام شد. پدیده گذار از شعله به تراک در این آزمایش‌ها به دلیل کمتر بودن انرژی اعمالی به مخلوط از اندازه انرژی بحرانی آن رخ می‌دهد. در این آزمایش‌ها از مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک هیدروژن-اکسیژن استفاده شده و ماریپیچ‌ها در ابتدای لوله‌ای با قطر ۲/۵ و طول ۷۰ سانتی‌متر قرار گرفتند. با معرفی معیارهای تراک مطلوب و بررسی نتایج آزمایش‌ها و نزدیکی جواب‌ها از صحت کار اطمینان حاصل شده است. برای انتخاب ماریپیچ برتر، معیارهایی بر اساس پدیده تراک همراه با ضرایب وزنی تعریف شد و ماریپیچ‌ها امتیازبندی شدند و در نهایت سه ماریپیچ حائز بیشترین امتیاز، انتخاب شدند.

واژگان کلیدی: تراک، موتور تراک ضربه‌ای، ناحیه گذار به تراک، ماریپیچ

### مقدمه

به طور کلی دو نوع احتراق در موتورهای راکتی وجود دارد. نوع اول احتراق دفلاگريشن (Deflagration) است که در آن شعله ناشی از احتراق مخلوط سوخت و اکسیدکننده با سرعت چند متر بر ثانیه درون محفظه حرکت می‌کند. نوع دوم احتراق حجم ثابت یا تراک (Detonation) است که با سرعت چند هزار متر بر ثانیه حرکت می‌کند. موج شوک حاصل، سیال جلوی خود را فشرده کرده و باعث بالا رفتن فشار و در نتیجه دما می‌شود که این افزایش دما سبب شروع فعالیت‌های شیمیایی می‌شود. موج تراک چپمن-جوگوت (Chapman-Jouguet) شامل یک موج شوک است که یک ناحیه اشتعال نازک پشت آن چسبیده است و آن را تقویت می‌کند و در انتهای ناحیه احتراق، سرعت حرکت گازهای سوخته برابر سرعت صوت می‌شود.

فشار بالای ایجاد شده توسط تراک بدون نیاز به هیچ کمپرسوری، باعث استفاده از آن در موتورهای جدید شده است [۱]. یکی از کاربردهای تراک، استفاده از آن در موتورهای تراک ضربه‌ای (PDE-Pulse Detonation Engine) است. این موتور در نوع ساده شده آن، متشکل از یک لوله با نسبت طول به قطر داخلی بالا با یک انتهای باز، سامانه تغذیه و سامانه اشتعال است. در این لوله از تکرار سریع فرایند تراک برای تولید نیروی پیشران استفاده می‌شود. PDE ها به دلیل استفاده از فرایند تراک و چرخه هامفری (Humphrey)، دارای مصرف سوخت کم و بازده ترمودینامیکی بالا هستند. در صورتی که موتور بتواند ۵۰ تا ۲۰۰ مرتبه این چرخه را در یک ثانیه تکرار کند، نیروی پیشران قابل توجهی را تولید می‌کند [۲]. سادگی، راحتی تغییر اندازه، مصرف سوخت کم و توانایی تولید رانش (Thrust) در سرعت صفر تا ماخ ۵ سبب شده تا به عنوان پیشرانی جدید، تحقیقات بسیاری در سرتاسر جهان روی PDE ها انجام شود [۳].

در حالت آزمایشگاهی برای تولید تراک به صورت مستقیم از شیوه اعمال انرژی اولیه زیاد به مخلوط استفاده می‌کنند. انرژی بحرانی ( $E_c$ ) حداقل انرژی است که برای آن آغازش مستقیم امکان‌پذیر است. تعریف دقیق انرژی بحرانی توسط پلستر و

\* کارشناسی ارشد (eidiattar@ae.sharif.edu)

\*\* استاد- نویسنده مخاطب (farshchi@sharif.edu)

\*\*\* استاد (ghorbanian@sharif.edu)

همکارانش [۴] ارائه شده است. مطابق جدول شماره (۳) مرجع مذکور، انرژی بحرانی برای مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک هیدروژن-اکسیژن در شرایط عادی ۱/۶ ژول است که برای کاربرد در موتور هوایی بسیار زیاد است. با دادن انرژی کمتر و در صورت فراهم بودن شرایط، فرایند گذار از شعله پیش مخلوط به تراک (DDT- Deflagration to Detonation Transition) اتفاق می‌افتد. این فرایند زمان‌بر است و لازم است تا زمان و طول آن کوتاه شود. به طور کلی استفاده از وسایلی برای کوتاه کردن زمان پدیده DDT باعث بهبود بازده PDE می‌شود هر چند که اثر آن برای سوخت هیدروژن کم است اما برای سوخت‌های سنگین‌تر این امر مشهودتر است [۵]. هر چه طول پدیده DDT کوتاه‌تر باشد، درصد بیشتری از فرایند احتراق به صورت تراک خواهد بود و در نتیجه بازده ترمودینامیکی موتور بالا می‌رود.

پدیده DDT دارای پیچیدگی‌های زیادی است. اساس کار وسایلی که برای بهبود این ناحیه استفاده می‌شود، بر افزایش میزان اغتشاش است. این افزایش اغتشاش سبب افزایش نرخ سوزش می‌شود زیرا اغتشاش باعث افزایش سطح شعله و جابه‌جایی محلی جرم و انرژی می‌شود [۶]. ناحیه DDT، با انفجارهای موضعی پراکنده شروع می‌شود که بسیار به ساختار هندسی محیط وابسته هستند. در تحقیقات بسیار زیادی که در این مورد انجام شده، رخداد انفجار در انفجار به صورت معمول دیده شده است [۷].

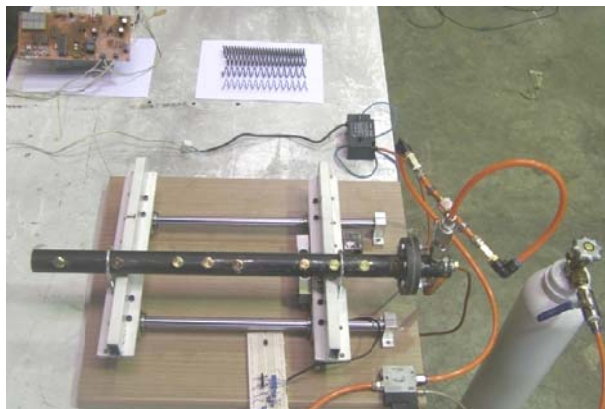
برای شناسایی پدیده ناحیه گذار از دفلاگیشن به تراک تحقیقات بسیاری در سرتاسر دنیا انجام شده است که توضیح مبسوط آن از حوصله این مقاله خارج است ولی به طور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. کوپر و همکارانش در سال ۲۰۰۰ برای سوخت اتیلن انواع ابزارهای DDT را بررسی کردند و دریافتند که این ابزارها باعث کاهش طول ناحیه DDT می‌شوند ولی دارای پسا هستند [۸]. تلاش‌های فاریناک و همکارانش در کانادا با لوله تراک دارای قطر ۷/۹ سانتی‌متر و مخلوط پروپان، اکسیژن و نیتروژن به این نتیجه رسید که افزایش اغتشاش باعث کاهش طول ناحیه DDT می‌شود [۹]. شی‌فرد و همکارانش تحقیقات گسترده‌ای در مورد انواع سوخت‌ها و نسبت هم‌ارزی و درصد رقیق‌کننده انجام داده‌اند. دستگاه ایشان از یک لوله به قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۱/۵ متر تشکیل شده که درون آن از مارپیچ شلخین (Shchelkhin Spiral) با گام ۱۱، قطر مفتول ۴ و طول ۳۰۵ میلی‌متر استفاده شده است. ایشان دریافتند که کمترین زمان DDT مربوط به مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک است و با رقیق‌تر کردن مخلوط، زمان DDT افزایش می‌یابد [۱۰]. تحقیق دیگر در این زمینه مربوط به لی و همکارانش است. ایشان ابزار ویژه‌ای را برای بررسی در ناحیه DDT مخلوط هوا و اتیلن انتخاب کردند و دریافتند که ابزارهای با نسبت انسداد بین ۰/۳ و ۰/۶ باعث بهبود DDT و در عین حال پسای کم می‌شوند [۶]. ژانگ و همکارانش مارپیچ‌ها با گام‌ها، قطرهای خارجی و طول‌های متفاوت را در لوله‌ای به طول ۲/۲ متر و با قطر داخلی ۷۵ میلی‌متر که از مخلوط هیدروژن و هوا با نسبت ۱/۴۳ پر می‌شد، بررسی کردند و دریافتند که با افزایش نسبت انسداد و طول و ضخامت فنرها، سرعت موج خروجی از انتهای لوله بیشتر می‌شود، همچنین بیشترین ضربه محاسبه شده برابر با ۶ ms است [۱۱]. می‌یر و همکارانش بر روی پدیده DDT با استفاده از دوربین‌های فوق سریع تحقیق کردند و نتیجه گرفتند که احتراق در ناحیه فنر به صورت پیچشی است که اندرکنش (Coupling) بین جبهه شوک و احتراق را بهتر می‌کند و پس از طی یک قطر لوله از انتهای فنر، احتراق به صورت صفحه‌ای در می‌آید [۷].

وسایل زیاد با شکل‌های بسیار متفاوت را می‌توان برای DDT به کار برد، و از میان همه آن‌ها در این تحقیق از مارپیچ شلخین استفاده شده است. مارپیچ باعث چرخش سیال، ایجاد احتراق پیچشی (Spinning Detonation) و در نتیجه افزایش اغتشاش ناحیه ابتدای لوله می‌شود که در کل سبب کاهش طول ناحیه DDT می‌شود. به دلیل پیچیدگی حاکم بر پدیده، نمی‌توان وسیله‌ای را بر وسیله‌ای دیگر رجحان داد و دلیل انتخاب این وسیله برای این تحقیق، سادگی هندسه، سادگی ساخت و امکان تغییر دادن متغیرهای هندسی آن است.

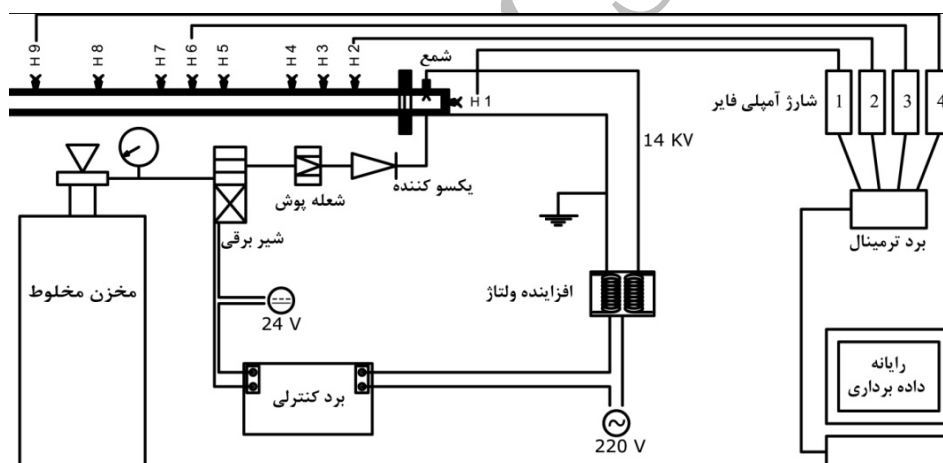
هدف از تحقیق پیش‌رو، بررسی تجربی اثر ابعاد هندسی مارپیچ مورد استفاده در ناحیه DDT، بر کیفیت تراک تولیدی است تا بدین وسیله بهترین مارپیچ‌ها که تراک با کیفیت بهتر در آن‌ها در کوتاه‌ترین فاصله از ابتدای بسته لوله تشکیل می‌شود انتخاب شوند. از مارپیچ‌های به دست آمده در تحقیقات آتی در مورد بررسی تجربی عملکرد PDE استفاده خواهد شد.

## سامانه‌ها و دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش از یک لوله تراک و سامانه‌های تغذیه، اشتعال و داده برداری تشکیل شده است که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم. شکل (۱) نمایی از دستگاه آزمایش و شکل (۲) طرحواره همه سامانه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از دستگاه آزمایش همراه با ماریچ‌های استفاده شده



شکل ۲- چیدمان سامانه‌های مختلف دستگاه آزمایش (H1 تا H9 محل نصب حسگرهای فشار هستند)

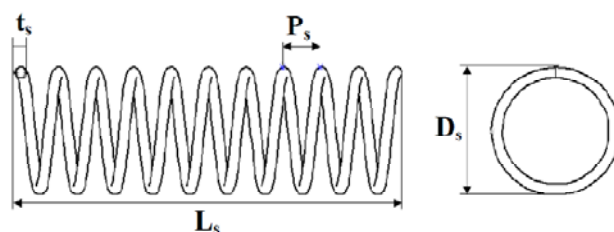
آزمایش‌ها در لوله‌ای به طول ۷۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۲/۵ سانتی‌متر و ضخامت جداره ۰/۷۵ سانتی‌متر انجام شده‌اند. این لوله از یک طرف کاملاً باز بوده و در سوی دیگر بسته است که به ترتیب انتهای باز و ابتدای بسته نامیده می‌شود. مخلوط مورد نظر از ابتدای بسته وارد می‌شود و توسط شمعی که در همان ناحیه قرار دارد، مشتعل شده و محصولات احتراق از انتهای باز خارج می‌شوند. ماریچ‌های مورد آزمایش در ابتدای بسته قرار می‌گیرند. برای سهولت قرار دادن آن‌ها، لوله به فاصله ۶ سانتی‌متر از ابتدا به دو تکه تبدیل شده و توسط فلنج به هم متصل شده‌اند.

مخلوط اکسیژن و هیدروژن درون کپسولی با حجم ۱۰/۲ لیتر آماده می‌شود. برای تعیین نسبت هم‌ارزی نیز از شیوه فشارهای جزئی در حین پر کردن کپسول استفاده می‌شود. مخلوط فوق از طریق لوله‌ای از کپسول به ابتدای لوله وارد می‌شود. میزان مخلوط وارد شده به لوله تراک توسط یک شیر برقی سریع که از برد الکترونیکی فرمان می‌گیرد، تنظیم می‌شود. بدین صورت که در ابتدا شیر برقی برای مخلوط مورد نظر کالیبره شده است و مشخص است که به ازای زمان مشخص باز بودن شیر برقی، چه مقدار حجمی، مخلوط وارد لوله تراک می‌شود. برای افزایش ایمنی، شیر یکسوکننده همراه با شعله‌پوش برای جلوگیری از برگشت جریان و شعله در مسیر خط لوله تغذیه قرار دارند.

سامانه اشتعال از یک افزایش ولتاژ و یک شمع موتور خودرو و سیم‌های رابط تشکیل شده است. افزایش ولتاژ، با ورودی برق ۲۲۰ ولت شهری، ولتاژ خروجی ۱۴ کیلووات تولید می‌کند که ولتاژ مورد نیاز برای ایجاد جرقه درون شمع است. در این سامانه، برد کنترلی، با وصل کردن جریان برق ورودی (۲۲۰ ولت) مدار را فعال می‌کند و باعث ایجاد جرقه در شمع و اشتعال مخلوط درون لوله می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار در طول لوله تراک از چهار حسگر فشار پیزوالکتریک استفاده شده است. حسگرها از نوع ۶۰۳B و ۶۰۱A از شرکت کیستلر (Kistler) بوده که از طریق شارژ آمپلی‌فایرهای مربوطه به رایانه داده برداری متصل هستند که قادر است هم‌زمان از هر حسگر تا ۲۵۰ هزار بار در ثانیه داده فشار را به ترتیب با دقت ۲ و ۰/۵ اتمسفر اندازه‌گیری کند.

برای نصب حسگرها، نه سوراخ در طول لوله ایجاد شده است. مکان سوراخ‌ها به گونه‌ای تعبیه شده است که در هر آزمایش، یک حسگر روی ابتدای بسته لوله، دومین حسگر به اندازه یک قطر لوله پس از انتهای ماریپیج، چهارمین حسگر به اندازه ۲ قطر لوله مانده به انتهای باز لوله و سومین حسگر حد وسط حسگرهای دوم و چهارم باشد. دلیل فاصله گرفتن حسگر دوم از انتهای ماریپیج آن است که در ناحیه ماریپیج، تراک به صورت چرخان حرکت می‌کند و بعد از طی فاصله‌ای حدود یک قطر لوله از انتهای ماریپیج به موج تراک صفحه‌ای تبدیل می‌شود [۱۷]. بنابراین برای اندازه‌گیری پدیده تراک صفحه‌ای لازم است تا حسگر از انتهای ماریپیج قدری فاصله داشته باشد.

هر ماریپیج دارای چهار طول مشخصه است که موجب تمایز آن می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، این مشخصه‌ها عبارت‌اند از: طول ماریپیج ( $L_s$ )، گام ماریپیج ( $P_s$ )، قطر خارجی ماریپیج ( $D_s$ ) و ضخامت مفتول ( $T_s$ ). به جز قطر خارجی ماریپیج که برای همه ماریپیج‌ها برابر است، بقیه اندازه‌های ذکر شده تغییر می‌کنند.



شکل ۳- شکل ماریپیج و ابعاد مشخص کننده آن

برای این‌که پدیده گذار به خوبی انجام شود، لازم است تا ماریپیج حداقل از هر طرف به اندازه یک سلول تراک مخلوط مورد استفاده از دیواره داخلی لوله تراک فاصله داشته و ماریپیج هم‌محور با لوله باشد [۱۲]. از آنجا که اندازه سلول تراک مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک هیدروژن-اکسیژن در شرایط اتمسفریک و دمای ۳۰۰ کلوین برابر با ۱/۵ میلی‌متر بوده [۴] و قطر داخلی لوله تراک ۲۵ میلی‌متر است، پس بیشترین قطر خارجی ماریپیج برابر با ۲۲ میلی‌متر می‌شود. لذا همه ماریپیج‌ها دارای قطر خارجی ۲۲ میلی‌مترند. هر کدام از ابعاد دیگر ماریپیج، سه مقدار متفاوت که در جدول (۱) نشان داده شده است را به خود می‌گیرند. توجه شود که طول ماریپیج‌ها معادل ۴D، ۶D و ۸D هستند. بنابراین با توجه به این تغییرات در مجموع ۲۶ ماریپیج با ابعاد مختلف ساخته شده است.

جدول ۱- ابعاد ماریپیج‌های مختلف آزمایش

متغیر	اندازه به میلی‌متر
طول ماریپیج	۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰
گام	۱۴، ۱۰، ۸
ضخامت مفتول ماریپیج	۳/۵، ۳، ۲

اگر نسبت انسداد به صورت نسبت مساحت سطح مقطع اشغال شده توسط مارپیچ به مساحت سطح مقطع داخلی لوله تعریف شود، مارپیچ‌های فوق دارای نسبت‌های انسداد ۰/۲۵۶، ۰/۳۶۵ و ۰/۴۱۴ هستند. هر مارپیچ بنا بر مشخصات هندسی آن نام‌گذاری شده است که در ادامه مقاله بدان نام خوانده می‌شود. قاعده کلی به صورت  $L\#P\#T\#$  است که اعداد بعد از L نشان دهنده طول مارپیچ به سانتی‌متر، اعداد بعد از P نشان دهنده گام مارپیچ به میلی‌متر و عدد بعد از T نشان دهنده ضخامت مفتول به میلی‌متر است. (برای مفتول‌ها با ضخامت ۳/۵ به اختصار عدد ۴ استفاده شده است)

در تمام آزمایش‌ها یک سری از متغیرها ثابت‌اند که این متغیرها در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. برای اطمینان از صحت داده و نیز تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر آزمایش برای یک مارپیچ مشخص، چهار بار تکرار شده است. برخی از آزمایش‌ها که در آن‌ها به طور واضح عملکرد نامناسب سامانه‌ها دیده می‌شد، نیز تکرار شد تا حداقل برای هر مارپیچ ۴ آزمایش در شرایط مناسب همراه با صحت عملکرد دستگاه‌ها انجام شود. در مجموع ۱۲۵ آزمایش انجام شد.

جدول ۲- متغیرهای ثابت در آزمایش‌ها همراه با اندازه آن‌ها

اندازه	متغیر
۷۰ cm	طول لوله تراک
۲۵ mm	قطر داخلی لوله تراک
هیدروژن	سوخت
اکسیژن	اکسیدکننده
۱	نسبت هم‌ارزی سوخت و اکسیدکننده ( $\phi$ )
۱	نسبت حجم مخلوط ورودی به حجم لوله تراک
۲۰ msec	فاصله زمانی بین فرمان قطع شیر برقی و شروع جرقه
۱۰ msec	بازه زمانی تولید جرقه
۲۲ درجه سانتی‌گراد	دمای محیط

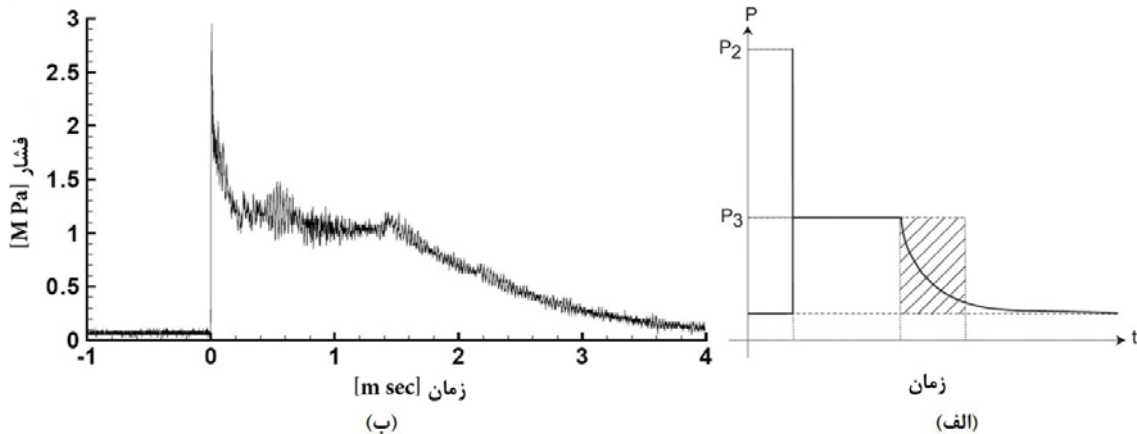
همان‌طور که اشاره شد، اولین حسگر بر روی دیواره ابتدای لوله و دومین حسگر به اندازه یک قطر لوله پس از انتهای مارپیچ نصب می‌شود. بدین ترتیب برای مارپیچ‌های با طول ۱۰ سانتی‌متر، حسگر دوم در سوراخ ۲ و برای مارپیچ‌های با طول ۱۵ سانتی‌متر در سوراخ ۳ و برای مارپیچ‌های با طول ۲۰ سانتی‌متر در سوراخ ۴ نصب شده‌اند. در حالت مارپیچ با طول ۲۰ سانتی‌متر لازم است تا حسگر سوم از سوراخ ۶ به سوراخ ۷ منتقل شود. حسگر چهارم نیز در تمامی آزمایش‌ها در سوراخ ۹ نصب می‌شود. برای جلوگیری از هرگونه خطای پیش‌بینی نشده و نیز قابلیت مقایسه آزمایش‌ها با هم، سعی شده است تا ترتیب نصب حسگرها، شارژ آمپلی فایرها و کانال‌های کارت A/D عوض نشود.

## نتایج تجربی

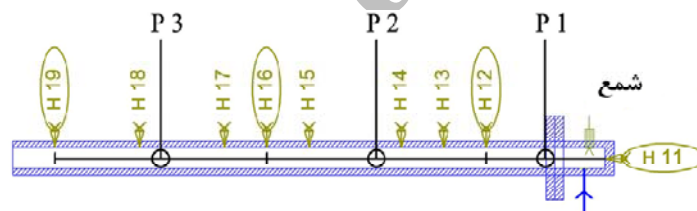
حسگرهای پیزوالکتریک با نرخ بالای داده برداری قادر به سنجش فشار موج شوک با سرعت بالا هستند. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، نمودار فشار زمان موج تراک دارای افزایش فشار ناگهانی بوده که پس از آن به تدریج فشار کاهش می‌یابد. این افزایش فشار ناگهانی مربوط به موج شوکی است که در جلو جبهه احتراق حرکت می‌کند. با استفاده از این افزایش فشار ناگهانی به عنوان معیار، می‌توان زمان رسیدن موج تراک به حسگرها را از داده‌های آزمایش استخراج نمود. با دانستن فاصله میان حسگرها و زمان رسیدن موج تراک، سرعت میانگین موج درون لوله محاسبه می‌شود.

برای انتخاب نقطه رسیدن شوک در نمودار فشار زمان باید دقت فراوانی شود و چون در برخی موارد تشخیص درست این نقطه سخت می‌شود، لازم است تا محدوده خطا مشخص شود. با توجه به این‌که نرخ داده برداری ۲۰۰ کیلوهرتز است، انتخاب

جابه‌جای یک نقطه منجر به تفاوت سرعت  $200 \text{ m/s}$  و دو نقطه  $350 \text{ m/s}$  می‌شود. با فرض اینکه سرعت موج تراک CJ برای مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک،  $2840 \text{ m/s}$  است و با توجه به دقت محاسبه سرعت موج که ذکر شد، و کم و زیاد کردن آن از سرعت تراک CJ، بازه سرعت قابل قبول برای موج تراک CJ از  $2600$  تا  $3100 \text{ m/s}$  است که دارای خطایی حدود ۹ درصد است. از آنجا که در کل چهار حسگر فشار وجود دارد، لذا در سه نقطه سرعت موج به دست می‌آید که ترتیب نام‌گذاری آن‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



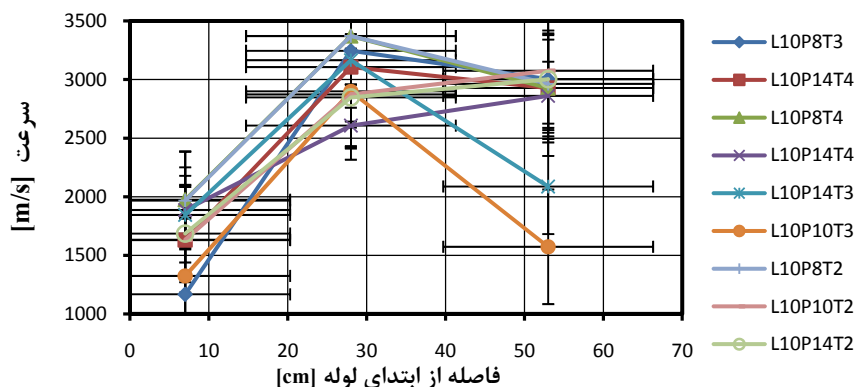
شکل ۴- (الف) نمودار فشار زمان ایدئال برای موج تراک عبوری از روی حسگر فشار، (ب) نمودار واقعی فشار زمان برای موج تراک برای مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک اتیلن-اکسیژن در دمای  $300$  کلوین و فشار ۱ اتمسفر [۱۳]



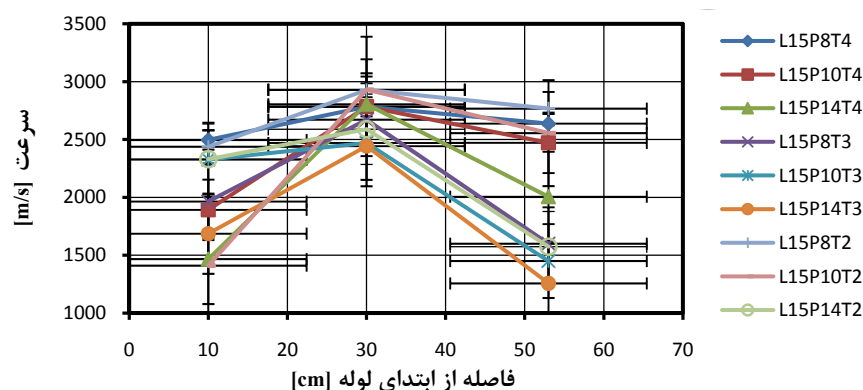
شکل ۵- نقاط P1 تا P3 نشان دهنده نقاط استفاده شده برای محاسبه سرعت موج عبوری درون لوله هستند

در لوله تراک انتظار می‌رود تا سرعت موج از ابتدای لوله زیاد شود و با طی مسافت کوتاهی، سرعت موج، به سرعت CJ برسد و سپس بقیه مسیر را به همین سرعت به پایان لوله برساند. روند کلی افزایش سرعت در ابتدای لوله در نمودارهای شکل (۶) دیده می‌شود. به جز در سه مارپیچ در بقیه مارپیچ‌ها، سرعت موج تراک در ناحیه‌ای حدود  $30$  سانتی‌متر از ابتدای لوله، به بیشترین سرعت خود که در بازه ذکر شده برای سرعت تراک است، می‌رسد. در ادامه حرکت، سرعت موج تراک به طور محسوسی کاهش می‌یابد. البته این روند برای مارپیچ‌های L10P10T2، L10P14T4 و L10P14T2 دارای افزایش سرعت است. کاهش سرعت در ادامه مسیر را می‌توان به کیفیت پایین و یا رقیق بودن مخلوط در نزدیکی انتهای لوله مربوط دانست. کیفیت پایین مخلوط در این ناحیه ناشی از اختلاط مخلوط تازه با محصولات واکنش باقی‌مانده از آزمایش پیشین است که این اتفاق در حین مرحله تغذیه پیش می‌آید. دلیل دیگر را نیز می‌توان ناشی از وارد شدن هوای پیرامون لوله به درون آن در فاصله بین مرحله تغذیه و اشتعال دانست. مرجع [۱۴] نیز به همین پدیده اشاره کرده است.

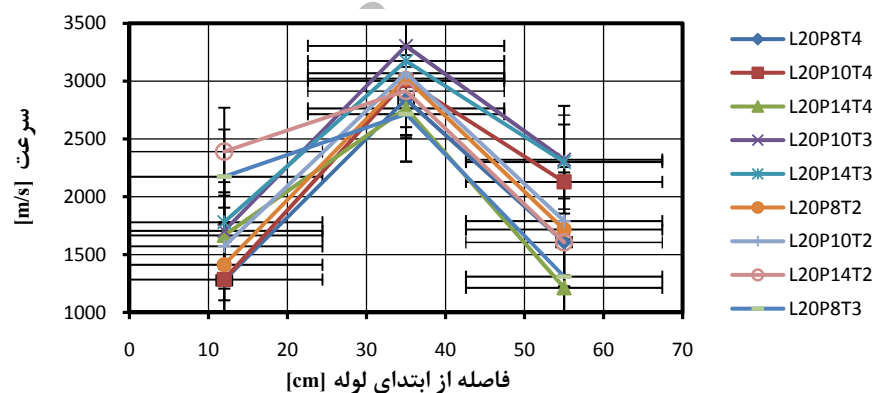
کاهش سرعت موج در انتهای لوله در مورد مارپیچ‌های  $20$  سانتی‌متر از سایرین بیشتر بوده و در مارپیچ‌های با طول  $10$  سانتی‌متر کمتر از سایرین است. با بررسی بیشتر روی داده مشخص شد که هر چه فشار مخزن مربوط به آزمایش‌های مارپیچ بیشتر باشد، کاهش سرعت در انتهای لوله کمتر است، بنابراین کاهش کیفیت مخلوط در انتهای لوله بر کیفیت آن تأثیرگذار است، در عوض هر چه فشار مخزن کمتر باشد، افت سرعت در انتهای لوله بیشتر است.



الف



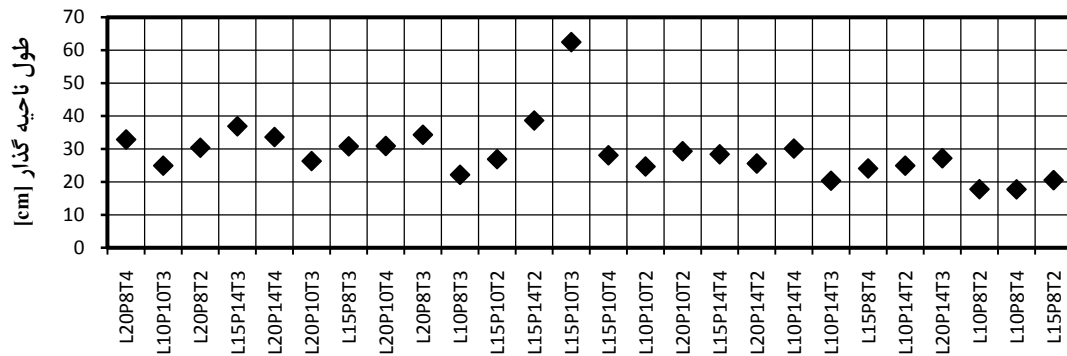
ب



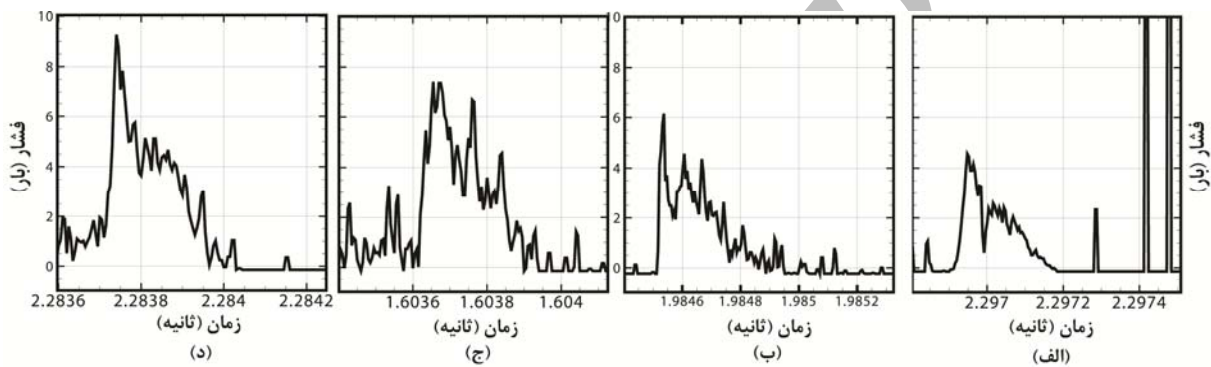
ج

شکل ۶- نمودارهای سرعت- مکان موج عبوری درون لوله تراک؛ (الف) مارپیچ‌های با طول ۱۰ سانتی‌متر، (ب) مارپیچ‌های با طول ۱۵ سانتی‌متر، (ج) مارپیچ‌های با طول ۲۰ سانتی‌متر

با استفاده از سرعت‌های به دست آمده می‌توان محل شروع تراک را پیدا کرد. این مکان که در حقیقت پایان ناحیه DDT است، بر اساس درون‌یابی سرعت برای مکانی که سرعت موج به  $2700 \text{ m/s}$  می‌رسد، پیدا می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، کمترین طول ناحیه DDT برابر با ۱۸ سانتی‌متر است که برای دو فنر L10P8T2 و L10P8T4 است. علاوه بر سرعت می‌توان از داده‌های فشار حسگرها نیز استفاده کرد. در مورد اولین حسگر هر چه مساحت زیر نمودار بیشتر باشد، نشان دهنده نیروی پیشران بیشتر برای موتور است. شکل (۸) نشان دهنده نمودار فشار- زمان برای حسگر نصب شده بر روی ابتدای بسته لوله برای چهار مارپیچ مختلف بوده که زمان شروع اشتعال با دایره مشخص شده است. با توجه به این نکته درمی‌یابیم که نمودار (ب) بیشترین زمان را داراست در حالی که نمودار (د) بیشترین بیشینه فشار را دارد.

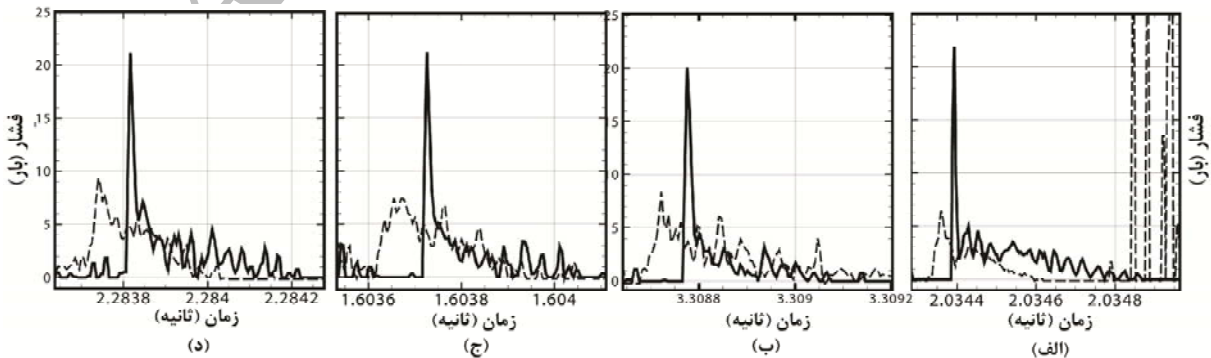


شکل ۷- طول ناحیه DDT برای فنرهای مختلف به دست آمده از سرعت موج



شکل ۸- نمودارهای فشار-زمان حسگر نصب شده روی دیواره ابتدا برای ماریج با طول: (الف): ۱۰ سانتی‌متر، (ب) ۱۵ سانتی‌متر، (ج) ۲۰ سانتی‌متر و گام ۱۴ میلی‌متر، (د) ۲۰ سانتی‌متر و گام ۸ سانتی‌متر

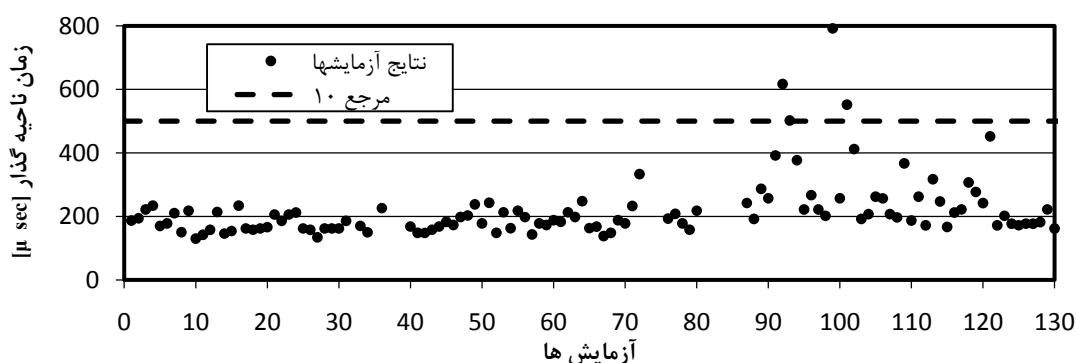
یکی از راه‌های تشخیص موج تراک نگاه کردن به نمودار فشار زمان بعد از ماریج است که از اندازه بیشینه فشار و افزایش ناگهانی و کاهش تدریجی فشار می‌توان رخداد تراک را بررسی کرد. بر اساس مدل CI، بیشینه فشار موج تراک برای مخلوط مورد استفاده، برابر با ۱۸/۵ اتمسفر است. در شکل (۹) چند نمونه از داده‌های حسگرهای بعد از ماریج‌های مختلف رسم شده است. با توجه به معیارهای گفته شده و نمودارها درمی‌یابیم که در تمامی این موارد، تراک پس از ماریج‌ها تشکیل شده است. نکته‌ای دیگر آنکه، پس از افزایش ناگهانی فشار از صفر به بیشینه، فشار به طور ناگهانی تا ۵ اتمسفر کاهش ناگهانی دارد و پس از آن فشار به آرامی کاهش می‌یابد که تقریباً مشابه با رفتار نمودار (ب) شکل (۴) است.



شکل ۹- نمودارهای فشار زمان برای ماریج با طول: (الف) ۱۰ سانتی‌متر، (ب) ۱۵ سانتی‌متر، (ج) ۲۰ سانتی‌متر و گام ۱۴ میلی‌متر، (د) ۲۰ سانتی‌متر و گام ۸ سانتی‌متر. خط چین مربوط به حسگر روی دیواره ابتدا و خط توپر مربوط به اولین حسگر بعد از ماریج



شی فرد و همکارانش [۱۰] در تحقیقات خود با لوله‌ای به قطر ۳۸ سانتی‌متر و طول ۱/۵ متر و ماریج با گام ۱۱، قطر مفتول ۴ و طول ۳۰۵ میلی‌متر، معیاری به نام زمان DDT تعریف کرده‌اند که عبارت است از فاصله زمانی بین جرقه زدن تا رسیدن موج تراک به حسگری که ۴۱/۵ سانتی‌متر جلوتر از ابتدای لوله قرار دارد (به اندازه ۳ قطر لوله از انتهای ماریج). عددی که برای مخلوط با نسبت هم‌ارزی یک هیدروژن-اکسیژن به دست می‌آید برابر با ۵۰۰ میکروثانیه است. بر همین اساس زمان DDT برای همه آزمایش‌ها محاسبه شد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به جز در چهار مورد در باقی موارد، زمان DDT در آزمایش‌ها کمتر از مقدار ایشان بوده و در حد ۲۰۰ میکروثانیه است که نشان دهنده هم مقیاس بودن نتایج ما و ایشان است. کمتر بودن زمان را می‌توان ناشی از سه دلیل دانست: کمتر بودن انرژی داده شده به شمع در آزمایش‌های ایشان، کارکرد بهتر ماریج‌ها در این سری از آزمایش‌ها و یا کمتر بودن قطر درون لوله.



شکل ۱۰- نمودار مقایسه زمان DDT برای آزمایش‌های مختلف ماریج‌ها با زمان DDT مرجع [۱۰]

## انتخاب ماریج و معیارهای آن

معیارهایی که برای انتخاب مناسب‌ترین ماریج استفاده می‌شود مبتنی بر پدیده تراک است. معیارها عبارت‌اند از: ۱- حداقل طول DDT (بالا بودن سرعت نقطه اول)، ۲- تشکیل موج تراک در انتهای ماریج، ۳- بالا بودن فشار در حسگر بعد از ماریج، ۴- بالا بودن سرعت در نقطه دوم، ۵- درصد موفقیت در تولید تراک با معیار کیفی نمودار فشار زمان در هر حسگر. برای انتخاب لازم است تا معیارها برحسب اهمیت ضریب‌دهی شوند. سپس در هر معیار، ماریج‌ها از خوب به بد (مثلاً از فشار زیاد به فشار کم) مرتب شده و آنگاه از ۰ تا ۱۰۰ نمره‌دهی شوند. در انتها با جمع امتیازات ماریج‌های برتر انتخاب می‌شوند. در جدول (۳) معیارهای انتخاب همراه با ضرایب آن‌ها ذکر شده است. در انتخاب معیارها و به ویژه ضرایب آن‌ها دقت شده تا بیشتر اثر پدیده DDT مهم باشد. لذا ضرایب سرعت DDT و اندازه بیشینه فشار حسگر بعد از ماریج، بسیار زیادند. بر اساس معیارها و ضرایب آن‌ها، همه فنرها امتیازدهی شدند که نتیجه در جدول (۴) نشان داده شده است. در این جدول فنرها به ترتیب از کمترین به بیشترین امتیاز مرتب شده‌اند.

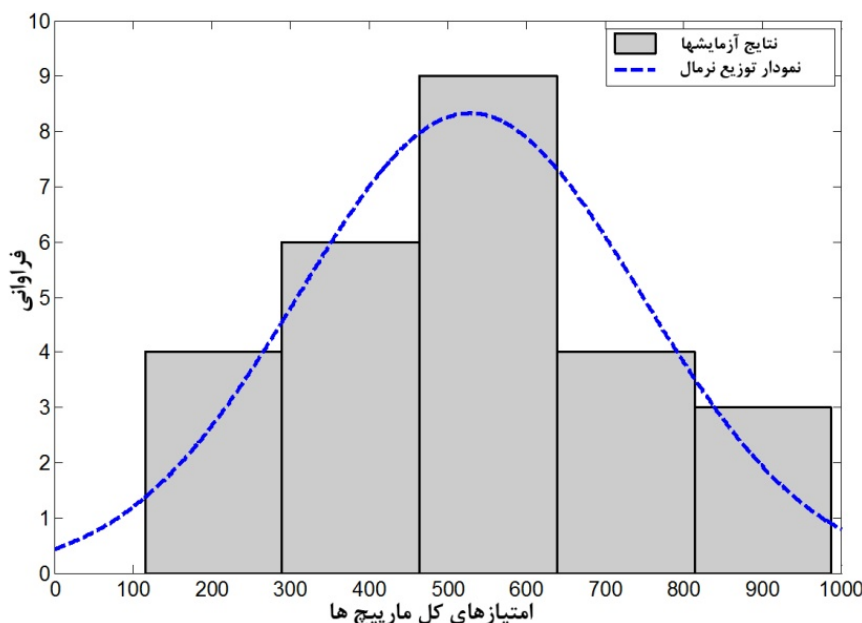
جدول ۳- معیارهای امتیازدهی به ماریج‌ها و ضریب هر کدام

ردیف	معیار	ضریب
۱	سرعت نقطه اول	۴
۲	سرعت نقطه دوم	۱
۳	فشار حسگر دوم	۵
۴	فشار حسگر سوم	۱
۵	مجموع درصد موفقیت کیفی تراک در سه حسگر آخر	۱

جدول ۴- امتیازات مارپیچ‌های مختلف بر اساس الگوی ارائه شده. در ستون‌های مربوط به سرعت، منظور از اول، دوم و سوم نقاط به دست آوردن سرعت و در ستون‌های فشار، منظور شماره حسگر از ابتدای لوله است.

امتیاز کل	بیشینه فشار [Bar]			سرعت [m/s]			نام مارپیچ
	چهار	سوم	دوم	سوم	دوم	اول	
۱۱۵	۹	۹	۹	۱۶۰۸	۲۸۴۳	۱۲۷۹	L20P8T4
۲۳۲	۶	۱۱	۹	۱۵۷۳	۲۸۹۹	۱۳۲۴	L10P10T3
۲۸۰	۱۲	۱۴	۱۳	۱۷۱۸	۳۰۲۳	۱۴۱۳	L20P8T2
۳۳۲	۱۰	۱۴	۱۲	۱۲۵۷	۲۴۴۳	۱۶۸۷	L15P14T3
۵۱۲	۷	۱۱	۱۸	۱۲۱۳	۲۷۶۵	۱۶۶۷	L20P14T4
۲۵۶	۱۳	۱۲	۱۱	۲۳۲۲	۳۳۰۵	۱۷۰۶	L20P10T3
۳۰۵	۱۲	۱۶	۵	۱۶۰۰	۲۶۷۲	۱۹۶۴	L15P8T3
۳۷۱	۱۴	۱۴	۱۶	۲۱۲۹	۳۰۰۵	۱۲۸۵	L20P10T4
۵۱۰	۹	۱۳	۱۴	۱۳۱۰	۲۷۱۵	۲۱۷۴	L20P8T3
۳۱۹	۱۴	۱۵	۱۵	۳۰۰۴	۳۲۴۵	۱۱۶۷	L10P8T3
۴۵۹	۹	۱۶	۱۵	۲۵۵۶	۲۹۳۲	۱۴۱۰	L15P10T2
۵۶۴	۱	۱۵	۱۴	۱۵۷۴	۲۵۹۰	۲۳۳۰	L15P14T2
۶۱۹	۱۱	۲۰	۱۵	۱۴۵۰	۲۴۷۰	۲۳۲۷	L15P10T3
۴۳۱	۱۸	۲۱	۱۳	۲۴۷۲	۲۷۸۴	۱۸۹۳	L15P10T4
۵۴۰	۱۴	۱۴	۱۷	۳۰۷۵	۲۸۷۳	۱۶۳۳	L10P10T2
۵۹۳	۱۳	۱۳	۲۰	۱۷۹۱	۳۰۷۰	۱۵۷۲	L20P10T2
۵۳۴	۱۵	۱۶	۱۷	۲۰۰۶	۲۸۰۵	۱۴۶۷	L15P14T4
۶۵۹	۱۳	۱۶	۱۵	۱۶۰۶	۲۹۱۵	۲۳۹۱	L20P14T2
۶۰۴	۱۶	۱۹	۱۷	۲۸۶۱	۲۶۰۷	۱۸۸۷	L10P14T4
۷۶۸	۱۳	۱۴	۲۰	۲۰۸۷	۳۱۶۵	۱۸۴۵	L10P14T3
۵۹۹	۱۷	۱۸	۱۳	۲۶۳۸	۲۷۸۴	۲۴۹۶	L15P8T4
۶۷۲	۱۴	۱۵	۱۸	۳۰۰۳	۲۸۴۸	۱۶۸۶	L10P14T2
۷۲۴	۱۶	۱۴	۲۰	۲۳۰۱	۳۱۷۵	۱۷۸۰	L20P14T3
۸۴۴	۱۴	۱۴	۲۰	۲۹۶۳	۳۳۷۲	۱۹۶۷	L10P8T2
۹۱۲	۱۴	۱۴	۲۴	۲۹۲۸	۳۳۷۲	۱۹۷۴	L10P8T4
۹۸۸	۱۶	۲۴	۲۰	۲۷۶۸	۲۹۲۹	۲۴۳۸	L15P8T2

شکل (۱۱) نمودار توزیع امتیازهای کل داده شده به مارپیچ‌ها را همراه با توزیع نرمال آن‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، توزیع امتیازها بسیار به توزیع نرمال نزدیک است که نشان دهنده درستی ضرایب اختصاص داده شده برای معیارهای انتخاب مارپیچ است.



شکل ۱۱- نمودار توزیع امتیازهای کل ماریچها و نیز توزیع نرمال آن‌ها

## نتیجه‌گیری

ماریچ‌های مختلف با ابعاد هندسی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و اثر آن‌ها بر پدیده DDT نشان داده شد. از آنجا که انرژی داده شده مخلوط به اندازه انرژی بحرانی نیست، لذا پدیده DDT رخ می‌دهد. در این تحقیق برای کاهش طول و زمان DDT از ماریچ‌ها استفاده شد. در پدیده DDT بر اثر افزایش اغتشاش و نیز انفجارهای پراکنده، سرعت سوزش بالا می‌رود تا حدی که به سرعت تراک برسد. در همین حین بیشینه فشار نیز افزایش می‌یابد. با حرکت موج تراک به سمت پایین دست لوله، در بیشتر مواقع سرعت آن کاهش می‌یابد که دلیل آن رقیق شدن مخلوط است، اما کماکان با ماهیت موج تراک ولی در مخلوطی رقیق‌تر به حرکت خود ادامه می‌دهد.

در ادامه بر اساس معیارهای مهمی چون زیاد بودن سرعت DDT و بیشینه فشار بعد از ماریچ، ماریچ‌ها امتیازبندی شدند که در نتیجه ماریچ‌های برتر عبارت‌اند از L15P8T2، L10P8T4 و L10P8T2 که همگی دارای گام ماریچ ۸ میلی‌مترند. ماریچ‌های بعدی دارای گام ۱۴ میلی‌متر هستند. به نظر می‌آید که کم بودن گام ماریچ، باعث به وجود آمدن انفجارهای محلی بیشتر شده و نیز احتراق با سرعت بیشتر دور ماریچ می‌چرخد و لذا اندرکنش بین شوک و احتراق بیشتر می‌شود بنابراین طول ناحیه DDT کمتر می‌شود. البته همان‌طور که قبلاً گفته شد، پدیده‌های درون DDT بسیار پیچیده و غیرخطی‌اند و نمی‌توان به سادگی در مورد آن‌ها قضاوت کرد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، ضمن قدردانی از پژوهشکده شهید یزدانی و پژوهشکده مهندسی جهاد و کشاورزی، کمال تشکر را از آقایان مهندس یوسف باقری و مهندس اکبر ملکی دارند.

## مراجع

1. Hekiri, H., "Parametric Cycle Analysis for Pulse Detonation Engines," MS Thesis at Aerospace Engineering Department, The University of TEXAS at Arlington, USA, 2005.
2. Nori, V., Lerma, N., Gustavsson, J., and Segal, C., "Forced Oscillations in a Mixed-Compression Inlet at Mach 3.5 for Pulse Detonation Engine Systems," Journal of Fluids Engineering, 128, pp. 494-507, 2006.

- Roya, G. D., Frolovb, S. M., Borisovb, A. A., and Netzer, D.W., "Pulse Detonation Propulsion: Challenges, Current Status, and Future Perspective," *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, pp. 545-672, 2004.
- Plaster, M., McClenagan, R. D., Benz, F. J., Shepherd, J. E., and Lee, J. H. S., "Detonation of Cryogenic Gaseous Hydrogen-Oxygen Mixtures," *Prog. Astronaut Aeronaut*, 133, pp. 37-55, 1991.
- Hoke, J. L., Bradley, R. P., and Schauer, F. R., "Impact of DDT Mechanism, Combustion Wave Speed, Temperature, and Charge Quality on Pulsed-Detonation-Engine Performance," 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 2005.
- Lee, S. Y., Watts, J., Saretto, S., Pal, S., Conrad, C., Woodward, R., and Santoro, R., "Deflagration to Detonation Transition Processes by Turbulence-Generating Obstacles in Pulse Detonation Engines," *Journal of Propulsion and Power*, 20, pp. 1026-1036, 2004.
- Meyer, T. R., Hoke, J. L., Brown, M. S., Gord, J. R., and Schauer, F. R., "Experimental Study of Deflagration-to-Detonation Enhancement Techniques in a H<sub>2</sub>/Air Pulsed-Detonation Engine," 38<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, Indiana, 2002.
- Cooper, M., Jackson, S. and Shepherd, J. E., "Effect of Deflagration-to-Detonation Transition on Pulse Detonation Engine Impulse," GALCIT Report FM00-3, 2000.
- Farinaccio, R., Harris, P. G., and Stowe, R. A., "Turbulent Flow Effects on DDT Run-up Distance for a Pulse Detonation Engine," 40<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, 2004.
- Schultz, E., Wintenberger, E. and Shepherd, J. E., "Investigation of Deflagration to Detonation Transition for Application to Pulse Detonation Engine Ignition Systems," California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA.
- Zhang, F. Y., Fujiwara, T., Miyasaka, T., Nakayama, E., Hattori, T. and Hanson, R. K., "Detonation Studies of High-Frequency-Operation Pulse Detonation Engine with Air/Hydrogen," 41<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2003.
- صابری نژاد، ح؛ "طراحی و ساخت موتور پالس دتونیشن،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۱۳۸۷.
- Wintenberger, E., Austin, J. M., Cooper, M., Jackson, S., and Shepherd, J. E., "An Analytical Model for the Impulse of a Single-Cycle Pulse Detonation Tube," 37<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, UT, 2001.
- Lu, F. K., and Wilson, D. R., "Some Perspectives on Pulse Detonation Propulsion Systems," Available from: [http://arc.uta.edu/publications/cp\\_files/1051-ISSW24.pdf](http://arc.uta.edu/publications/cp_files/1051-ISSW24.pdf)

## English Abstract

### An Experimental Study of Spiral Effect on Deflagration to Detonation Transition

M. E. Attarzade, M. Farshchi and K. Ghorbanian

Center of Excellence in Aerospace Systems, Sharif University of Technology

*The objective of this paper is to experimentally investigate the effects of Shchelkin spiral geometry in the transition from deflagration to detonation on the quality of the produced detonation. Deflagration to detonation transition (DDT) is required in cases where ignition energy release is less than the critical ignition energy required for a direct detonation initiation. A stoichiometric mixture of hydrogen-oxygen has been used in a tube of 25 mm diameter and 700 mm length. Spiral coils have been mounted at the ignition-end of the tube to facilitate DDT. Keeping spiral coil diameter fixed at 22mm, the coil length, pitch and thickness were varied to produce desirable detonation waves. Spiral coil selection was based on several criteria including; the pressure and velocity jump across the wave at the beginning of the tube, and the percentage of successful tests in each batch. The results indicate that the spiral coil pitch has the greatest influence on minimizing the DDT length and obtaining a desirable detonation.*

**Keywords:** Detonation, Pulse detonation engine, Deflagration to Detonation Transition Zone, Spiral