

## طراحی، ساخت و آزمایش موتور پالس دتونیشن

سید داود موسویان<sup>۱\*</sup>، امیر مهدوی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳)

### چکیده

مولد قدرت موج پالسی دتونیشن در تولید نیروی پیشران برای کاربردهای هوافضایی استفاده می‌گردد. این موتور بر اساس دتونیشن، کار می‌کند و اصولاً متشکل از یک لوله با نسبت طول به قطر داخلی بالا با انتهای باز، سامانه اشتعال، سیستم تغذیه سوخت و سیستم کنترل می‌باشد. در این پژوهش جهت بررسی پدیده پالسی دتونیشن، یک موتور پالس دتونیشن طراحی و ساخته شده است که از گاز طبیعی فشرده (CNG) با درجه خلوص ۸۸ درصد متان به عنوان سوخت و از گاز اکسیژن به عنوان اکسیدکننده استفاده می‌کند. در مولد پالس دتونیشن، سوخت و اکسیدکننده در دو مخزن جداگانه قرار گرفته‌اند و برای ترکیب مناسب آن‌ها، در مسیر ورود به لوله انفجاری سیستم اختلاط مناسبی قرار داده شده است. در بررسی‌های انجام گرفته عملکرد موتور مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی اثر غلظت متان روی خصوصیات احتراق دتونیشن در موتور، دما و فشار گازهای خروجی موتور اندازه‌گیری شده است. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که با افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و اکسیدکننده از ۰/۷ تا ۱/۶ فشار به طور تقریباً یکنواخت از ۱۷ تا ۲۱ بار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت هم‌ارزی تا نسبت هم‌ارزی استوکیومتری دمای خروجی موتور افزایش و سپس به تدریج شروع به کاهش می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** مولد قدرت پالس دتونیشن، احتراق، دتونیشن، لوله انفجاری

## Design, construction and testing of pulse detonation engine

Seyed Davood Moosavian, Amir Mahdavi

### Abstract

Detonation pulse engine is used in the production of propulsion power for aerospace applications. This engine works based on detonation and basically consists of a tube with a high ratio of length to internal diameter with an open end, ignition system, fuel supply system and control system. In this research, detonation pulse wave power generator has been designed and built. This generator uses compressed natural gas (CNG) with a purity of 88% methane as fuel and oxygen gas as oxidizer. In this pulse detonation generator, fuel and oxidizer are placed in two separate tanks, and for their proper combination, a suitable mixing system is placed on the way to enter the explosive tube. The performance of the engine was evaluated in the tests carried out. To investigate the effect of methane concentration on detonation combustion characteristics in the engine, the temperature and pressure of the exhaust gases of the engine have been measured. In the investigations, it was found that by increasing the equivalence ratio of fuel and oxidizer from 0.7 to 1.6, the pressure increases almost uniformly from 17 to 21 bar. Also, with the increase of the equivalence ratio to the stoichiometric equivalence ratio, the engine output temperature increases and then gradually decrease.

**Key words:** Detonation pulse engine, ignition, detonation, explosive tube

## ۱- مقدمه

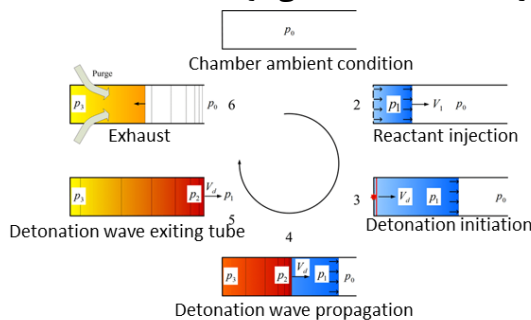
انفجار فرآیندی مناسب برای سوزاندن مخلوط سوخت و اکسیدکننده و آزاد کردن انرژی شیمیایی آن‌ها است. انفجار پالسی، تکنولوژی نیروی رانشی است که شامل انفجار سوخت به منظور ایجاد نیروی تراست موثرتر از سیستم‌های موتور فعلی می‌باشد. پس از کشف دتونیشن در سال ۱۷۸۰ میلادی، نخستین ایده استفاده پالسی یا متناوب از دتونیشن برای تولید تراست به سال‌های جنگ جهانی دوم که آلمان‌ها توسط هافمن در وسیله‌هایی موسوم به بمب پرصدای در عملی کردن آن داشتند بر می‌گردد. این وسیله شیر دیافراگم ماندی در جلوی خود داشت که از آنجا هوا با سوخت مورد نظر مخلوط می‌شد و پس از بسته شدن شیر، اشتعال صورت می‌گرفت و گازهای سوخته شده از انتهای آن خارج می‌شد. فشار بالای گازهای سوخته شده باعث تراست در انتهای بسته آن می‌شد. مطالعه بر روی موتورهای پالسی دتونیشن مشتمل بر چندین دهه است. تحقیقات آزمایشگاهی اولیه توسط نیکولاس و دیگران انجام شده است که منجر به ساخت تعدادی مولد قدرت موج پالسی دتونیشن (Pulse Detonation Engine) با هیدروژن - اکسیژن و استیلن - اکسیژن شد.

در ادامه تحقیقات بر روی دتونیشن در سال ۱۹۹۶ قربانیان و استرلینگ بر روی عملکرد سیکل PDE و توسعه کاربرد آن در پالس جت‌ها تحقیقات وسیعی را انجام دادند و موفق به دستیابی به فرکانس ۱۰۰ هرتز برای این موتورها شدند. در سال ۲۰۱۱ ولانسکی به بررسی موتورهای دتونیشن پرداخت و تحقیقات اساسی در ارتباط با موتورهای دتونیشن با محفظه‌های استوانه‌ای با پیشران هیدروژن - هوا انجام داد [۱]. در سال ۲۰۱۶ پاندی و همکاران به بررسی دقیق مطالعات تجربی مختلف و تجزیه و تحلیل محاسباتی در مورد حالت احتراق دتونیشن در موتورهای پالس دتونیشن پرداختند. آن‌ها همچنین تأثیر پارامترهای مختلف بر بهبود عملکرد پیشران موتور انفجار پالسی را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که طراحی مسیر جریان موج انفجار در لوله انفجار، قسمت خروجی لوله انفجار و پارامترهای عملیاتی مانند اعداد ماخ نقش مهمی در عملکرد پیشران PDE دارند [۲]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ موتورهای پالسی دتونیشن با فرکانس بالا را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات آن‌ها مشخص کرد که با استفاده از یک

سیستم شیر دوار برای کنترل سیستم تغذیه، حداکثر فرکانس ۱۶۰ هرتز به دست می‌آید، در حالی که، در طرح بدون سوپاپ با سوخت مایع فرکانس ۱۱۰ هرتز و با پیشران‌های گازی حداکثر فرکانس ۳۵۰ هرتز محقق می‌شود [۳]. در سال ۲۰۱۹ پیس و همکاران مدل یک بعدی (MOC) برای ارزیابی دینامیک گاز میدان جریان در یک سیکل و عملکرد یک موتور پالسی دتونیشن کامل مجهز به نازل‌های واگرا را توسعه دادند و نتایج حاصل از مطالعه عددی خود را با نتایج تجربی و عددی موجود اعتبارسنجی کردند [۴]. در سال ۲۰۲۰ الهاواری و همکاران موتور پالس دتونیشنی که از بیوگازی به عنوان سوخت استفاده می‌کرد را به صورت تجربی مطالعه و تأثیر افزودن هیدروژن در بیوگاز را بر عملکرد موتور بررسی کردند. آن‌ها همچنین دریافتند هر چه غلظت متان در بیوگاز بیشتر باشد، ویژگی‌های انفجار بیوگاز مانند فشار، دما و عدد ماخ افزایش می‌یابد [۵]. یکی از چالش‌های اصلی در ساخت مولد قدرت موج پالسی دتونیشن مواد و الیاف‌های به کار رفته در آن‌ها است. مواد فعلی مورد استفاده در موتورهای جت، همچون سوپرآلیاژها با پایه نیکل، جهت مقاومت در برابر گرما و فشار بسیار بالای تولیدی از سیکل دتونیشن مناسب نمی‌باشند. در نتیجه در ساخت این موتورها از مواد جدیدی باید استفاده کرد [۶]. مولد قدرت موج پالسی دارای مزیت‌هایی مانند راندمان سیکل ترمودینامیکی بالا، ساختار سخت افزاری ساده، قابلیت اطمینان و عملکرد قابل تطبیق با شرایط مختلف، ایجاد تراست بالا، هزینه ساخت پایین و قطعات متحرک محدود می‌باشد. پتانسیل خود تخلیه شدن از ویژگی‌های منحصر بفرد آن‌ها است که نسبت به عملکرد و راندمان مهمتر به نظر می‌رسد. این نوع موتورها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد ذکر شده به سرعت مورد توجه صنایع گوناگون به ویژه صنایع هوایی قرار گرفتند. با توجه به اینکه موتور PDE نیروی تراست بیشتری در مقایسه با موتورهای رمجت در سرعت‌های بالا در حدود ۳ حتی ۵ ماخ ایجاد می‌نماید، جهت استفاده در قسمتی از سیستم‌های نیروی محرکه چند مرحله‌ای مناسب می‌باشد. موتور انفجار پالسی می‌تواند نیروی تراست اولیه برای رمجت و اسکرمجت تولید نموده یا در ترکیب سیستم‌های توربوپن عمل نماید. در نتیجه دارای قابلیت عملکردی در بخش‌های زیادی از جمله فضاپیما و صنایع نظامی می‌باشد.

می‌رسند که برای عملکردی بهینه بسیار مهم است. اگر موج دتونیشن دیرتر از واکنشگرها به انتهای باز محفظه برسد مقداری از واکنشگرها قبل از مصرف از محفظه خارج می‌شوند و باعث اتلاف سوخت می‌گردد. همچنین اگر دتونیشن، واکنشگرها را قبل از رسیدن به انتهای باز مصرف کند، می‌تواند انرژی رانش خود را از دست بدهد و پیش از خروج از لوله از بین برود. در انتها (شکل ۱) کلیه گازها با کمک یک گاز بی اثر یا هوا از محفظه خارج می‌شود. (فاصله‌ای بین دو سیکل و جهت جلوگیری از خود اشتعالی احتمالی)

شکل ۲، نمودار دما - انترپوی را برای سیکل ایده‌آل PDE، سیکل همفیری (احتراق در حجم ثابت) و سیکل برایتون (احتراق در فشار ثابت) نشان می‌دهد. فرایند از نقطه ۰ تا ۱، در محفظه احتراق به صورت ادیاباتیک شروع می‌شود. فرایند  $T_0$  به  $T_1$  موجب تراکم ایزنتروپیک در محفظه احتراق می‌شود. فرایند ۱ تا b در سیکل ایده‌آل PDE با افزایش انترپوی به دلیل تراکم در موج تراکمی (شاک) همراه است و فرایند ۱ تا ۲ بیان‌کننده آزاد شدن گرمای واکنش شیمیایی است. نقطه ۲ نقطه CJ (شرایط چاپمن - هوگنیوت) است، جایی که سیستم در تعادل شیمیایی است و سرعت جریان نسبت به جبهه موج دتونیشن، مادون صوت است. برای شرایط اولیه و ترکیب واکنش‌دهنده مشخص با استفاده تحلیل تعادل شیمیایی خواص موج دتونیشن در شرایط چاپمن - هوگنیوت (CJ) محاسبه می‌شود. توجه داریم که برآمدگی مربوط به فرایند اضافه شدن گرما از نقطه b تا نقطه ۲، وجود ماکزیمم دما را در هنگام افزودن گرما به یک جریان مادون صوت پایدار بازتاب می‌کند. فرایند از ۲ تا ۳ به صورت انبساط ایزنتروپیک است که همراه با کاهش فشار گازهای سوخته شده تا فشار آزاد می‌باشد. در انتها در فرایند ۳ به ۰ که یک فرایند فشار ثابت است، گرمای زیادی به محیط تخلیه می‌شود [۱۳].



شکل ۱- چرخه موتور دتونیشن ضربه ای [۷]

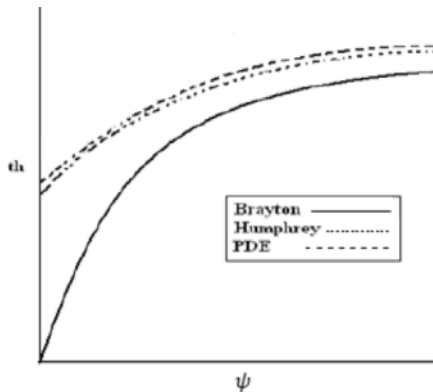
در این پژوهش بررسی تجربی پدیده پالس دتونیشن مدنظر قرار می‌گیرد. بدین منظور یک موتور پالس دتونیشن که از سوخت گاز طبیعی فشرده استفاده می‌نماید، طراحی و ساخته می‌شود. جهت ترکیب سوخت و اکسیدکننده، یک سیستم اختلاط کنترل شده در ورودی محفظه احتراق بکار گرفته می‌شود تا به کمک آن بتوان نسبت هم‌ارزی سوخت و اکسیدکننده را مورد ارزیابی قرار داد. بررسی عملکرد موتور در پالس‌ها و فرکانس‌های مختلف کاری از دیگر اهداف اصلی پژوهش می‌باشد. همچنین اثر غلظت متان روی خصوصیات احتراق دتونیشن در موتور، دما و فشار گازهای خروجی موتور اندازه گیری می‌گردد.

## ۲- تحلیل ترمودینامیکی سیکل PDE

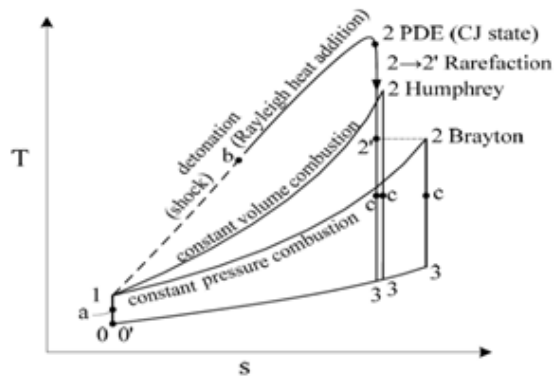
در این بخش پس از مرور مراحل سیکل PDE، تحلیل ترمودینامیکی برای مشخص کردن محدودیت‌های عملکرد یک سیکل ایده‌آل هوا مکش انجام شد. سیکل PDE از چهار مرحله تشکیل شده است که عبارتست از:

- پر کردن وسیله از مخلوط قابل احتراق
- آغاز دتونیشن در نزدیکی دیوار بسته (صفحه تراست)
- انتشار دتونیشن در امتداد لوله
- خارج شدن محصولات به محیط

شکل ۱ سیکل کامل PDE را نشان می‌دهد. در ابتدا موتور در شرایط اولیه  $P_0$  و  $T_0$  قرار دارد. سپس شیرهای انتهایی لوله باز شده، سوخت و اکسیدکننده با فشار  $P_1$  به محفظه لوله پمپ می‌شوند (بخش ۲ شکل ۱). در بخش ۳ شکل ۱ شیرهای ورودی لوله بسته شده و در انتهای بسته لوله اشتعال صورت می‌گیرد. منبع اشتعال می‌تواند قوس الکتریکی، منبع لیزر، گرمای دتونیشن سیکل قبل و یا موج تراکمی (شاک) باشد. در حالت ایده‌آل مستقیماً دتونیشن ایجاد شده و به سمت انتهایی باز لوله حرکت می‌کند. قدرت دتونیشن می‌تواند با اندازه‌گیری فشار پشت آن نسبت به فشار واکنشگرها سنجیده شود. نسبت بالای فشاری که در امواج دتونیشن دیده می‌شود، سرعت بالاتری از سرعت گازهای سوخته شده به موج دتونیشن می‌دهد. افزایش حجم واکنشگرها در اثر فرایند احتراق باعث انتشار امواج انبساطی در جهت حرکت موج دتونیشن می‌شود (بخش ۴ شکل ۱). همان‌طور که در بخش ۵ شکل ۱ مشاهده می‌شود موج دتونیشن و واکنشگرها همزمان به انتهای باز لوله



شکل ۳- نمودار دما - راندمان ترمودینامیکی سیکل‌های PDE، همفری و برایتون نسبت به تابع دمای استاتیکی بی بعد  $\psi$  [۱۴]



شکل ۲- نمودار دما - آنترپوپی برای سیکل ایده آل PDE، همفری و برایتون [۱۳]

### ۳- طراحی و ساخت موتور پالسی دتونیشن

در این قسمت مراحل تهیه تجهیزات و فرآیند ساخت موتور تشریح می‌شود. برای ساخت مولد موج انفجار پالسی، ابتدا اجزای آن و اثر آن‌ها بر یکدیگر شناخته و پارامترهای عملکردی معرفی و بررسی می‌شوند و همچنین ارتباط بین پارامترها، اجزاء و اندازه‌های موتور که شامل نوع سوخت، اکسیدکننده، نسبت اختلاط، نحوه و کیفیت اختلاط، شیوه پاشش سوخت، اندازه سلول انفجاری، سرعت موج انفجار، فشار موج انفجار، دمای مخلوط ورودی، فشار محیط، فشار سامانه تغذیه، چیدمان سامانه تغذیه، شیر ورودی، انرژی اولیه اشتعال، فرکانس موتور، تعداد لوله‌ها، طول ناحیه گذر از دفلگريشن به دتونیشن، طول لوله مولد موج انفجار، قطر داخلی لوله مولد موج انفجار، ضخامت جداره لوله، جنس جداره، نسبت مخلوط ورودی به حجم لوله می‌باشند، بررسی می‌گردد. شکل ۴ طرح‌واره ای از موتور و شکل ۵ مولد قدرت موج پالسی دتونیشن واقعی ساخته شده را نشان می‌دهند. موتور از یک بدنه اصلی، سیستم تغذیه سوخت، سیستم اشتعال و سیستم کنترلی تشکیل شده است که در ادامه نحوه طراحی و ساخت هر قسمت توضیح داده می‌شود.

#### ۳-۱- بدنه اصلی موتور

بدنه اصلی موتور از محفظه ابتدای لوله، محفظه مولد موج انفجار، فنر شلخین و فلانچ ساخته می‌شود. به منظور نصب راحت تر تجهیزات بر روی لوله مولد موج انفجار، ابتدای لوله به صورت جداگانه طراحی و ساخته می‌شود. این بخش باید فضای کافی برای نصب اتصالات تغذیه و شمع را داشته باشد.

می‌دانیم بازده ترمودینامیکی به صورت  $\mu_{th} = 1 - \frac{q_{reject}}{q}$  تعریف می‌شود که در آن به ترتیب  $q$  و  $q_{reject}$  مقدار گرمای افزوده شده در فرآیند  $b$  تا  $2$  و گرمای خارج شده از سیکل در فرآیند  $3$  تا  $0$  است. به علت تغییرات خواص در جبهه موج دتونیشن بازده ترمودینامیکی به صورت معادله (۱) بازنویسی می‌شود: [۱۳]

$$\eta_{th,PDE} = 1 - \frac{\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2 \left(\frac{\gamma_1-1}{\gamma_2-1}\right) \left(\frac{1}{M_D^2}\right) \left(\frac{1+\gamma_1 M_D^2}{1+\gamma_2}\right)^{\frac{1+\gamma_2}{\gamma_2}} \psi^{1-\left(\frac{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_1}{1+\gamma_2}\right)} - \frac{1}{q} \quad (1)$$

که در آن  $\mu_{th}$  بازده ترمودینامیکی،  $q$  مقدار گرمای افزوده شده در فرآیند،  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  به ترتیب نسبت گرمای مخصوص گازهای نسوخته و نسبت گرمای مخصوص گازهای سوخته شده هستند که توسط جبهه موج دتونیشن جدا می‌شوند.  $\psi$  نسبت دمای استاتیکی بی بعد سیکل  $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)$  است. عدد ماخ موج دتونیشن،  $M_D$  نسبت به گازهای سوخته نشده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود: [۱۳ و ۱۴]

$$M_D^2 = \left(\frac{\gamma_2^2 - \gamma_1}{\gamma_1^2 - \gamma_1} + \frac{\gamma_2^2 - 1}{\gamma_1 - 1} \left(\frac{\bar{q}}{\psi}\right)\right) + \sqrt{\left(\frac{\gamma_2^2 - \gamma_1}{\gamma_1^2 - \gamma_1} + \frac{\gamma_2^2 - 1}{\gamma_1 - 1} \left(\frac{\bar{q}}{\psi}\right)\right)^2 - \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2}} \quad (2)$$

البته توجه به این نکته الزامی است که در تحلیل بالا فرض شده است که هر تکه از سیال، فرایندهای مشابهی را در هر سیکل به ترتیب می‌پیماید و از اثرات بازگشت هوا و تخلیه اجباری صرف نظر شده است. شکل ۳ نمودار نتایج معمول راندمان حرارتی را برای سیستم هیدروژن - هوا با نسبت استوکیومتری نشان می‌دهد [۱۴].

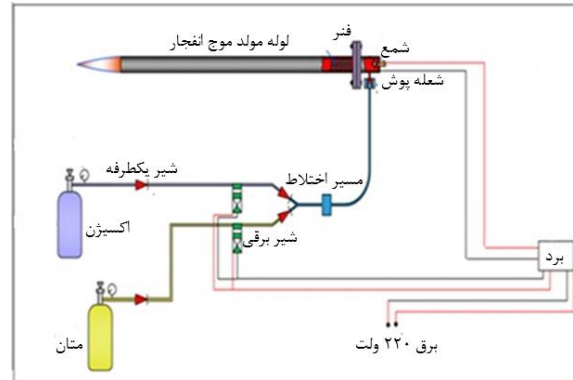
محفظه مولد موج انفجار (شکل ۷) از یک لوله با نسبت طول به قطر بالا با قابلیت تحمل فشار و حرارت بالا ساخته شده است. حداکثر فشار طراحی محفظه انفجار متان و اکسیژن، ۲۰ بار است. بنابراین برای ساخت محفظه مولد موج انفجار از لوله‌ای از جنس و نوع مانیسمن بدون درز رده ۴۰ (استاندارد ASME B36.19) به قطر یک اینچ و طول ۱٫۵ متر و ضخامت ۴ میلیمتر که تا ۴۰ بار تحمل فشار دارد، استفاده می‌شود.

محفظه ابتدای لوله و محفظه مولد موج انفجار که دو بخش جدا از یکدیگر هستند بوسیله یک فلانچ به یکدیگر متصل میشوند. برای راحتی عمل باز و بسته کردن آنها در طول آزمایشات از یک اتصال فلانچ به جنس استیل ۱۵۰\*۱" که تا ۱۵۰ بار فشار را تحمل میکند استفاده شده است. داخل فلانچ را رزوه کرده تا محفظه ابتدای لوله و محفظه مولد موج انفجار در آن بسته شده و سپس به وسیله جوش به یکدیگر متصل میشوند. در این فلانچ ۴ عدد سوراخ با قطر ۱۶ میلیمتر تعبیه شده تا بتوان با ۴ عدد پیچ آنها را به هم متصل کرد تا اتصال مناسب با استحکام لازم ایجاد گردد، (شکل ۸).

جهت جلوگیری از خروج گازهای داخل لوله از محل اتصال (فلانچ) از یک واشر نسوز در بین دو فلانچ استفاده شد. لازم به ذکر است که نشستی گاز موجب ایجاد تراست کمتر می‌گردد.



شکل ۷- مدار فرمان الکتریکی و سیستم جرقه محفظه مولد موج انفجار

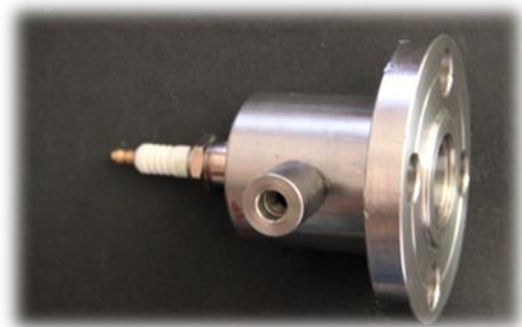


شکل ۴- شماتیک مولد قدرت موج پالسی دتونیشن ساخته شده



شکل ۵- مولد قدرت موج پالسی دتونیشن ساخته شده

برای تحمل تنش، فشار و دمای بالا، محفظه ابتدای لوله از استیل ساخته شده است. در قسمت بالای محفظه محلی برای نصب شمع، در نظر گرفته شده است (شکل ۶). همچنین در قسمت ابتدایی محفظه، یک سوراخ با رزوه  $G1/4$  برای ورود سوخت و اکسیدکننده تعبیه شده است. شیرکنترل و بدنبال آن، نازل به این سوراخ متصل شده و از طریق آن مخلوط گازهای متان و اکسیژن به محفظه دتونیشن تزریق گردند. اندازه سوراخ متناسب با نوع نازل و اندازه دبی (عبور ۶٫۵ لیتر گاز در ثانیه) می‌باشد.



شکل ۶- محفظه ابتدای لوله

شیرهای برقی استفاده می‌گردد. یک شیر برقی در مسیر سوخت و شیر برقی دیگر در مسیر اکسیژن قرار گرفته است. شیر برقی دارای یک بوبین است که با ولتاژهای مختلف کار میکند. در این پروژه از شیر برقی با برند RFS چین و مدل 3V210-08-NC با بوبین ۲۴ ولت و شیر برقی مدل 2W030-08-A استفاده شده است. این شیرها در حالت عادی بسته و با وصل جریان برق باز میشوند. فشار لازم برای راه اندازی این شیرها بین ۰٫۸ تا ۱٫۵ بار میباشد. با انجام آزمایش دبی خروجی با فشار ورودی ۲/۵ بار، ۴۰۰ لیتر در دقیقه بدست آمده است. جهت جلوگیری از برگشت جریان و فشار حاصل از موج انفجار به طرف سیستم تزریق سوخت، از چهار عدد شیر یک طرفه استفاده شد. دو عدد شیر یک طرفه بین کپسول‌های گاز و شیرهای برقی و دو عدد دیگر بین شیرهای برقی و محفظه اختلاط گازها نصب می‌شود تا از برگشت جریان از موتور به مخازن گاز جلوگیری شود. نقص در عملکرد شیر یک طرفه ممکن است باعث عبور شعله از شیر یک طرفه و آسیب به شیر برقی و شلنگ‌های انتقال گاز شود و حتی ممکن است شعله به مخزن سوخت نفوذ کند و باعث انفجار گردد. برای جلوگیری از این مشکل و اطمینان بیشتر، شعله پوشی از جنس استیل در نزدیک‌ترین نقطه به لوله انفجار قرار داده شد. در انتهای سیستم تغذیه (قبل از شعله پوش) محفظه اختلاط برای اختلاط سوخت و اکسید کننده نصب می‌شود (شکل ۹).

### ۳-۳- سیستم جرقه

اشتعال مخلوط سوخت و اکسیدکننده نیاز به جرقه‌ای با انرژی کافی دارد. سیستم تولید جرقه از جرقه‌زن، شمع اتومبیل و وایر ولتاژ بالا تشکیل شده است. گرمای اولیه مورد نیاز برای اشتعال واکنش‌دهنده‌ها توسط شمع اتومبیل که روی محفظه ابتدای لوله نصب شده تامین می‌شود (شکل ۹). جریان خروجی از جرقه‌زن، انرژی لازم برای تولید جرقه در شمع و اشتعال در محفظه انفجار را تامین می‌کند. جریان ورودی به جرقه‌زن ۲۲۰ ولت و ۰٫۲۵ آمپر و جریان خروجی از آن ۱۵ کیلو ولت و ۰٫۴۰ میلی آمپر است. با توجه به جریان خروجی جرقه‌زن، حداقل زمان لازم برای تولید انرژی ۰٫۲ ژول، طبق معادله ۴ برابر ۳۳ میلی ثانیه می‌باشد.



شکل ۸- فلانچ اتصال محفظه ابتدای لوله و محفظه مولد موج انفجار

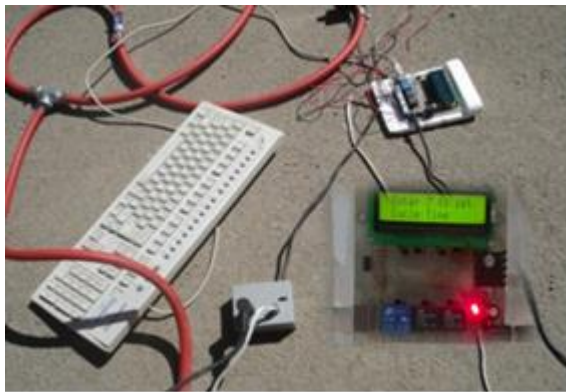
یکی از مهم‌ترین اجزاء موتور انفجار پالسی، فنر شلخین می‌باشد. بدون وجود این فنر هیچ گونه پالسی در خروجی موتور نخواهیم داشت [۱۰]. با توجه به نظریه پرفسور شلخین زبری سطح داخل لوله در ایجاد اغتشاش و رسیدن زودتر به انفجار، کوتاه و سبک‌تر شدن طول لوله انفجار بسیار موثر است. در ساخت این موتور از فنر با گام ۱۱ و قطر مفتول ۳ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. ضریب انسداد در فنر شلخین برابر تقسیم سطح مقطع پوشانده شده با فنر بر سطح مقطع داخلی لوله می‌باشد لذا از فرمول (۳) برای محاسبه ضریب انسداد فنر مجموعه، استفاده می‌شود [۱۱ و ۱۲]:

$$BR = (D2 - d2) / D2 = 0.42 \quad (3)$$

که در آن  $D$  و  $d$  به ترتیب قطر خارجی و داخلی فنر و  $BR$  ضریب انسداد فنر شلخین می‌باشد. برای نگهداری لوله و دیگر تجهیزات از پایه‌های نگهدارنده استفاده گردیده است.

### ۳-۲- سیستم تغذیه سوخت

این سیستم از دو عدد کپسول متان و اکسیژن به همراه رگولاتورهای فشار، سیستم اختلاط سوخت و اکسیدکننده، شیرهای برقی، شیر یک طرفه، شیر قطع و وصل دستی و فلاشبک و تجهیزات اتصالات تشکیل شده است. مخازن اکسیژن و متان به رگولاتورهای فشار بالا با برند زینسر (zinsler) آلمان با بازه فشار ۱۰/۴۰ بار جهت تنظیم فشار خروجی سوخت و اکسیدکننده مجهز شده‌اند. برای کنترل جریان سوخت و اکسیدکننده (به منظور تکرار پالس انفجار) از



شکل ۱۰- برد و مدار فرمان الکتریکی

#### ۴- نتیجه و بحث

##### ۴-۱- نحوه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق، دو دسته آزمایش تک پالس و تکرار پالس روی سیستم مولد موج انفجار پالسی انجام می‌گیرد که برای انجام آنها ابتدا مدار فرمان برنامه‌ریزی شد. برای برنامه‌نویسی بر روی ریزپردازنده موجود در مدار الکتریکی، به پارامترهای مهمی مانند حجم لوله انفجاری، مدت زمان باز و بسته شدن شیر برقی، مدت زمان مورد نیاز برای جرقه و ..... نیاز است.

با توجه به دبی خروجی شیر برقی، در مدت زمان ۲ ثانیه با فشار ۲/۵ بار، ۱۳ لیتر گاز از مسیر تغذیه عبور می‌کند. با معلوم بودن حجم لوله (۰/۷۶ لیتر) و دبی خروجی گاز، مدت مورد نیاز (T) برای پر شدن محفظه انفجار نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T = (2000 \times 0.76) / 13 = 117ms \quad (5)$$

لازم به ذکر است با زمان بدست آمده می‌توان PDE را در صورت استفاده از شیر برقی سرعت بالا تا ۸ پالس در ثانیه نیز طراحی نمود. با توجه به این که هدف از ساخت نمونه آزمایشگاهی موتور، تولید موج انفجاری است و برای اطمینان بیشتر از همگن بودن مخلوط سوخت و اکسیدکننده و تخلیه گازهای موجود در لوله، مدار فرمان برای یک و دو پالس در ثانیه طراحی گردید. زمان بندی اجرا شده در مدار فرمان PDE برای یک پالس در ثانیه به صورت شکل ۱۱ می‌باشد.

$$W = VIT \quad (4)$$

در این معادله W توان الکتریکی، V ولتاژ جریان، I شدت جریان ورودی و T زمان است. در آزمایشات تک پالس با قطع و وصل کلید معمولی جریان برق به جرقه زن و از آنجا به شمع منتقل می‌شود ولی در آزمایشات تکرار سیکل این عمل توسط مدار برقی کنترل می‌شود.

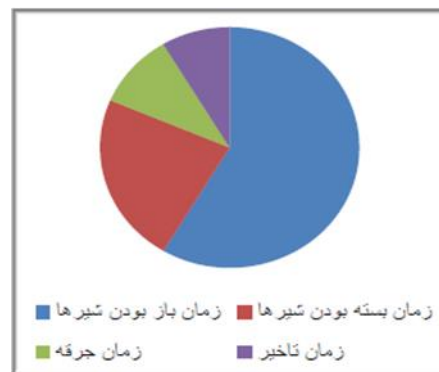


شکل ۹- اتصالات تغذیه و شمع روی محفظه ابتدای لوله

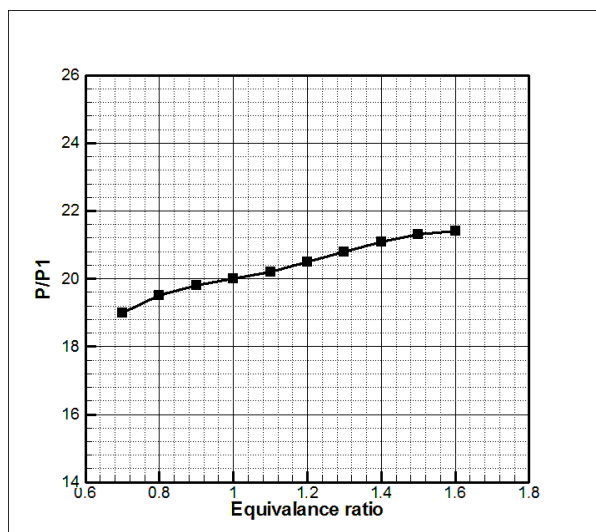
##### ۴-۲- مدار فرمان الکتریکی

جهت انجام این پروژه و فعال‌سازی منظم شیرها و سیستم جرقه‌زن، برد کنترلی طراحی گردید که در آن از میکروکنترلر ATMEGA 16 بهره گرفته شده است و نیز سه عدد رله، باز و بسته کردن شیرها و فعال‌سازی سیستم جرقه‌زن را بر عهده دارند. از آنجایی که این پروژه در سطح تحقیقاتی و آزمایشگاهی انجام گرفته است لازم بود تا زمان بندی شیرها و سیستم جرقه‌زن قابل تغییر بوده تا بتوان به صورت عملی بهترین بازده را بدست آورد. لذا قابلیت اتصال صفحه کلید کامپیوتر به برد جهت وارد کردن زمان‌های دلخواه و نیز نمایشگر LCD جهت نمایش زمان‌ها در طراحی این برد لحاظ گردیده است. به جهت کاهش متعلقات، ولتاژ تغذیه برد همانند ولتاژ کاری شیرها (۲۴ ولت) در نظر گرفته شد و با استفاده از رگلاتورهای متناسب، ولتاژ تغذیه قطعات و IC تامین شد. برنامه میکروکنترلر به زبان C نوشته، توسط نرم افزار CODEVISION کامپایلر و توسط دستگاه PROGRAMMER، میکروکنترلر برنامه‌ریزی شد (شکل ۱۰).

شکل ۱۲ نشان داده شده است. فشار در این نمودار به صورت بی بعد (نسبت فشار اولیه مخلوط‌های نسوخته به مخلوط سوخته) نشان داده شده است. سوخت و اکسیدکننده با فشار ۱ اتمسفر و دمای ۳۰۰ کلوین وارد موتور می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰٫۷ تا ۱٫۶ فشار به طور تقریباً یکنواخت از ۱۷ تا ۲۱ بار افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های الهاواری در سال ۲۰۲۰ هم‌خوانی خوبی دارد [۵].



شکل ۱۱- نمودار میزان زمان بندی در اجرای یک سیکل در ثانیه



شکل ۱۲- اثر نسبت اختلاط متان و اکسیژن بر فشار خروجی موتور PDE

#### ۴-۲-۲- اثر نسبت اختلاط گازها روی دمای دتونیشن

اثر تغییر درصد غلظت متان در مخلوط سوخت و اکسیدکننده و نسبت هم‌ارزی بر روی دمای خروجی موتور ساخته شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. دما در این نمودار به صورت بی‌بعد (نسبت دمای اولیه مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته) نشان داده شده است. نتایج یک رابطه سهموی بین نسبت دما و نسبت هم‌ارزی را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌ارزی تا نسبت هم‌ارزی استوکیومتری نسبت دما افزایش و سپس به تدریج شروع به کاهش می‌کند. بیشترین نسبت دمای اندازه‌گیری شده در حالت استوکیومتریک برابر با ۱۱ می‌باشد. این نتایج با یافته‌های الهاواری در سال ۲۰۲۰ هم‌خوانی خوبی دارد [۵].

در ابتدا برای روشن کردن موتور ۵ ثانیه تاخیر، برنامه‌ریزی می‌گردد. زمان تاخیر اولیه به دلیل فرصت دور شدن از سیستم و جلوگیری از خطر احتمالی است. سپس شیر سوخت و اکسیدکننده به مدت ۶۰۰ میلی‌ثانیه باز می‌شود. بعد از ۱۵۰ میلی‌ثانیه تاخیر، شمع به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه جرقه می‌زند. در انتها پس از ۱۵۰ میلی‌ثانیه تاخیر سیکل تکرار می‌شود.

در آزمایش‌های اولیه و قبل از اطمینان از عملکرد سیستم، با آزمایش‌های تک پالس عملکرد سیستم بررسی و از ایمن بودن آن اطمینان حاصل گردید. پس از چندین بار آزمایش و تنظیم سیستم اختلاط گازها و اطمینان از زمان جرقه، آزمایش نوع دوم که همان آزمایش تکرار پالس است انجام می‌شود. در این مرحله مدار فرمان برای یک پالس در ثانیه تنظیم گردید و سیستم بدون اختلال و به صورت منظم با فرکانس تنظیم شده عمل کرد. با تغییر زمان بندی شیرهای برقی و جرقه‌زن و توانایی شیرهای برقی در تامین پالس مورد نظر می‌توان به فرکانس‌های بالاتر رسید.

#### ۴-۲-۲- اثر نسبت اختلاط گازها روی عملکرد سیستم

در این بخش اثر غلظت متان روی خصوصیات احتراق دتونیشن در موتور بررسی شده است. برای این منظور با نصب سنسورهای دما و فشار، اثر غلظت متان روی دما و فشار گازهای خروجی موتور مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲-۱- اثر نسبت اختلاط گازها روی فشار دتونیشن

اثر تغییر غلظت متان در مخلوط سوخت و اکسیدکننده و نسبت هم‌ارزی بر روی فشار خروجی موتور ساخته شده در

## ۶- فهرست علائم و اختصارات

ضریب انسداد فنر شلخین	BR
قطر خارجی فنر شلخین	D
قطر داخلی فنر شلخین	d
شدت جریان	I
عدد ماخ موج دتونیشن	$M_D$
گرما	q
زمان	T
ولتاژ جریان	V
توان الکتریکی	W
بازده ترمودینامیکی	$\mu_{th}$
ترتیب نسبت گرمای مخصوص گازها	$\gamma$
نسبت دمای استاتیکی بی بعد	$\psi$

## منابع و مراجع

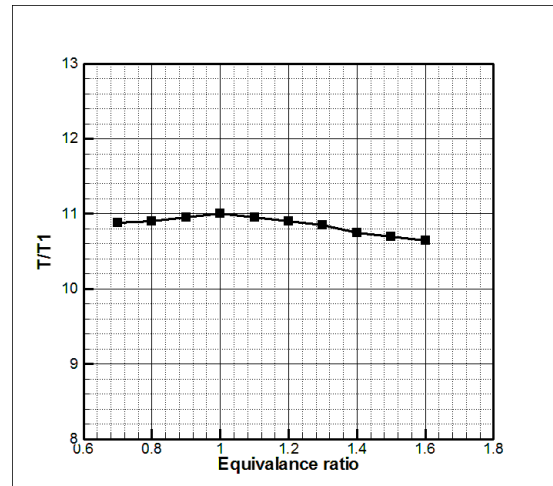
- [1]. Wolanski, P., "Detonation engine", Journal of kones powertrain and transport, Volume 18, pp. 1-7, 2011.
- [2]. Pandey, K.M., Debnath, P., "Review on recent advances in pulse detonation engines", Journal of combustion, Volume 10, pp. 1-16, 2016.
- [3]. Wang, K., Fan, W., "Efforts on high-frequency pulse detonation engines", Journal of propulsion and power, pp. 1-12, 2016.
- [4]. Peace, J., Lu, F., "Performance modeling of pulse detonation engines using the method of characteristics", Aerospace science and technology, pp. 1-14, 2019.
- [5]. Elhawary, S., Saat, A., Wahid, M., Ghazali, A., "Experimental study of using biogas in Pulse detonation engine with hydrogen enrichment", international journal of hydrogen energy, Volume 45, pp.15414-15424, 2020.

[۶]. صابری نژاد، حجت، "طراحی و ساخت موتور پالسی

دتونیشن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده هوافضا

دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷

- [7]. Frank, K. Lu., "Prospects for Detonations in Propulsion" Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental



شکل ۱۲- اثر نسبت اختلاط متان و اکسیژن بر فشار خروجی موتور PDE

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مولد قدرت موج پالسی دتونیشن طراحی و ساخته می شود. این مولد از گاز طبیعی فشرده (CNG) با درجه خلوص ۸۸ درصد متان، به عنوان سوخت و از گاز اکسیژن به عنوان اکسیدکننده استفاده می کند. به منظور سهولت نصب فنر شلخین، لوله انفجاری به صورت دو تکه ساخته شده و ابعاد لوله به کار رفته به طول ۱۵۰ سانتی متر و قطر ۲/۵ سانتی متر است. در این مولد قدرت موج پالسی دتونیشن، سوخت و اکسیدکننده در دو مخزن جداگانه قرار گرفته و برای ترکیب مناسب آن ها، در مسیر ورود به لوله انفجاری سیستم اختلاط مناسبی قرار داده شده است. در این پژوهش مولد قدرت تحت آزمایش های تک پالس و تکرار پالس با فرکانس ۱ پالس در ثانیه قرار گرفت و سیستم بدون اختلال و به صورت منظم با فرکانس تنظیم شده کار کرد. با تغییر زمان بندی شیرهای برقی و جرقه زن و توانایی شیرهای برقی در تامین پالس مورد نظر می توان به فرکانس های بالاتر رسید. با مطالعه اثر غلظت متان روی دما و فشار گازهای خروجی موتور مشخص شد که با افزایش نسبت هم آرز، فشار به طور تقریباً یکنواخت افزایش می یابد. ولی دما تا نسبت هم آرز استوکیومتری افزایش و سپس به تدریج شروع به کاهش می نماید.

- and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAI9), Korea, Gyeongju. 8~11 Sep. 2009.
- [8]. Wintenberger, E., Austin, J.M., Cooper, M., Jackson, S., Shepherd, J.E, “An analytical model for the impulse of a single-cycle pulse detonation tube” *Propulsion and Power*, Volume 19, pp.1-17, 2003.
- [9]. Tangirala, V., Dean, A., “Performance on a pulse detonation engine under subsonic and supersonic flight conditions” *Proceedings of 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, Reno, 8-11 January 2007.*
- [10]. Schultz, E., Wintenberger, E., Shepherd, J.E., “Investigation of Deflagration to Detonation Transition for Application to Pulse Detonation Engine Ignition System” *California Institute of Technology, USA, Pasadena, 1999.*
- [۱۱]. رضایی، عباس، "طراحی و ساخت مولد موج انفجار پالسی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۲.
- [12]. Pavel V. Bulata and Konstantin N. Volkov., “Detonation Jet Engine. Part II – Construction Features”, *international journal of environmental & science education* 2016, VOL. 11, NO. 12, 5020-5033
- [13]. Yuhui Wu, F. Ma, V. Yang., “System Performance and Thermodynamic Cycle Analysis of Airbreathing Pulse Detonation Engines” *Journal of Propulsion and Power*, 1 July 2003
- [14]. Nejaamtheen, M., KIM, J, “Review on the Research Progresses in Rotating Detonation Engine”. *Detonation Control for Propulsion*, pp 109–159., 2017