



Design and Construction of a New Rapid Opening Valve with Fibre Optic Systems for a Non-Diaphragm Shock Tube

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghezelayagh M.H.¹ PhD,
Samimi M.A.² MSc,
Zamani J.^{*2} PhD

How to cite this article

Ghezelayagh M.H, Samimi M.A, Norouzi M, Zamani J. Design and Construction of a New Rapid Opening Valve with Fibre Optic Systems for a Non-Diaphragm Shock Tube. Modares Mechanical Engineering. 2019 ;19(5):1265-1274.

ABSTRACT

This paper investigates a kind of KNTU1 non-diaphragm shock tube equipped with an innovative design valve within a driven tube. The shock tube is capable of generating a flat shock wave in its driven tube with a length to diameter ratio of 41/6. The KNTU1 shock tube is diaphragm-type and some limitations of this kind of shock tube such as the lack of repeatability without disassembling, the inability to adjust pressure ratio at a specified interval, and the inability to automate the shock tube caused a development on an automated shock tube. In this study, an innovative mechanism to achieve high-speed opening valve with an opening time of 8ms and 10ms is proposed. The unique feature of this automatic valve, compared with existing valves, is its opening from the center to the sides, such as the camera aperture. This is the best way to open the valve and smooth the wave and compensates for a part of the opening time of the valve. Also, the alignment of the driver and the drain prevents disturbances caused by the redirection or rotation of the gas seen in most valves. These help optimize the shock tube. Another initiative in this paper is the design and construction of an optical system to measure the speed and the moment of shock wave arrival to check the shape surface of the shock wave. This system has the ability to move in driven. This paper has been compiled to compare theoretical and experimental data of shock wave.

Keywords Non-Diaphragm Shock Tube; Rapid Opening Valve; Shock Wave Measurement Systems

¹Electronic Department, Information & Communication Technology Faculty, Imam Hossein University, Tehran, Iran

²Manufacturing Department, Mechanics Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanics Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Pardis Avenue, Molla Sadra Avenue, Vanak Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1999143344
Phone: +98 (21) 84063384
Fax: +98 (21) 88674748
zamani@kntu.ac.ir

Article History

Received: July 09, 2018

Accepted: December 19, 2018

ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

- [1] Manufacturing of closed-end gas driven shock tube [2] Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry [3] Design of a high-pressure single pulse shock tube for chemical kinetic investigations [4] Development of a small diameter shock tube and measurement of basic characteristics [5] Diaphragmless shock wave generators for industrial applications of shock waves [6] Unsteady convective surface heat flux measurements on cylinder for CFD code validation [7] A miniature high repetition rate shock tube [8] A rapid opening sleeve valve for a diaphragmless shock tube [9] A new fast acting valve for diaphragmless shock tubes. In: Kontis K, editor. 28th international symposium on shock waves 1 [10] Introduction to hydraulics and pneumatics [11] An autoreferenced two-state optical fibre reflective sensor

طراحی و ساخت یک شیر بازشونده سریع جدید به همراه سیستم اندازه‌گیری فیبر نوری برای لوله شوک بدون دیافراگم

محمدحسین قزل‌ایاغ PhD

گروه مهندسی الکترونیک، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

محمدعلی صمیمی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

جمال زمانی PhD*

گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی یک شیر پنوماتیک سریع و سیستم اندازه‌گیری نوری ابداعی پرداخته شده که در لوله شوک بدون دیافراگم KNTU2 قرار گرفته است. این لوله شوک قادر است موج شوک مسطح در درایون خود را که نسبت طول به قطر آن ۴۱/۶ است، تولید کند. لوله شوک KNTU1 از نوع دیافراگمی بوده است که محدودیت‌هایی نظیر عدم قابلیت تکرار تولید موج شوک بدون بازکردن لوله، عدم قابلیت تنظیم نسبت فشار در یک بازه مشخص، عدم امکان خودکار کردن لوله شوک، دلیل طراحی لوله شوک‌های بدون دیافراگم است. در این مقاله یک مکانیزم ابداعی برای رسیدن به سرعت بالای شیر جایگزین دیافراگم، پیشنهاد شده که زمان باز شدن با توجه به محاسبات تئوری، ۸ میلی‌ثانیه و در تست‌های به‌عمل‌آمده با اختلاف قابل قبولی، ۱۰ میلی‌ثانیه است. قابلیت منحصربه‌فرد این شیر خودکار در مقایسه با شیرهای موجود، باز شدن آن از مرکز لوله به سمت گوشه‌ها مانند دیافراگم دوربین بوده که این بهترین حالت برای باز شدن شیر و یکنواختی موج حاصل است و بخشی از مدت‌زمان باز شدن شیر را جبران می‌نماید. همچنین هم‌راستایی درایور و درایون، از اغتشاش ناشی از تغییر مسیر یا چرخش گاز که در اغلب شیرها مشاهده می‌شود، جلوگیری می‌کند. این قابلیت‌ها به بهینه‌شدن لوله شوک کمک می‌کند. یکی دیگر از ابتکارات انجام‌گرفته در این مقاله، طراحی و ساخت یک سیستم نوری برای اندازه‌گیری سرعت و لحظه رسیدن موج شوک برای بررسی صفحه‌ای شدن آن با قابلیت جابه‌جایی در درایون است. این مقاله به مقایسه داده‌های تجربی و تئوری موج شوک تشکیل‌شده پرداخته است.

کلیدواژه‌ها: لوله شوک بدون دیافراگم، شیر بازشونده سریع، سیستم‌های اندازه‌گیری موج شوک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸

*نویسنده مسئول: zamani@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

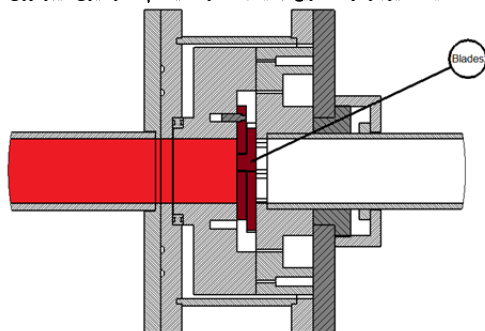
تولید و بررسی موج شوک و تأثیرات آن، یکی از سرفصل‌های اصلی در شاخه مکانیک انفجار است. یکی از محدودیت‌های موجود برای تولید موج شوک، نیاز به مواد منفجره برای تولید موج شوک است. دانشمندان این شاخه، سال‌هاست که با اختراع و ساخت لوله‌های شوک، امکان ایجاد موج شوک بدون نیاز به ماده منفجره را فراهم نموده‌اند. حتی با وجود ماده منفجره، تولید موج‌های شوک کاملاً کنترل‌شده و یکسان، کار بسیار سختی بوده که لوله شوک به‌راحتی این امکان را فراهم نموده است. برای بررسی موج شوک، کالیبره‌کردن سنسورهای شوک، در صنعت هوافضا (ایجاد تونل‌های باد) و همچنین در بیوتکنولوژی (تأثیر موج شوک بر بدن انسان) کاربرد دارد. در لوله شوک‌های معمول، دو ناحیه گاز پُرفشار (درایور) و گاز کم‌فشار (درایون) داریم که با یک دیافراگم از هم جدا شده‌اند. فشار ناحیه پُرفشار، به تعداد، ضخامت و جنس دیافراگم بستگی دارد. با پاره‌شدن یک‌دفعه دیافراگم جداکننده دو ناحیه، تولید موج شوک انجام می‌گیرد^[1]. پارگی دیافراگم، راحت‌ترین روش برای

حذف لحظه‌ای جداکننده فضای درایور و درایون است که این پارگی از مرکز دیافراگم رخ می‌دهد، اما این روش چند محدودیت کاربردی دارد. عوض کردن دیافراگم برای هر بار تست، زمان زیادی می‌گیرد و همچنین قابلیت خودکار شدن را ندارد. همچنین به دلیل تفاوت در مدل پاره‌شدن دیافراگم، امکان گرفتن نتیجه یکسان از تست‌های تکراری پایین است، اگرچه امکان مشخص نمودن فشار پارگی با ۱٪ تغییر در تکرارها، با استفاده از دیافراگم‌های خراش‌خورده به‌صورت ضربدری وجود دارد^[1]. علاوه بر این، ذرات باقیمانده از دیافراگم ترکیده ممکن است با سیستم‌های اندازه‌گیری گران‌قیمت موجود در لوله شوک برخورد کنند و سبب آسیب به آن شوند. علاوه بر آن، نیاز به تخلیه ذرات باقیمانده در لوله هست^[2].

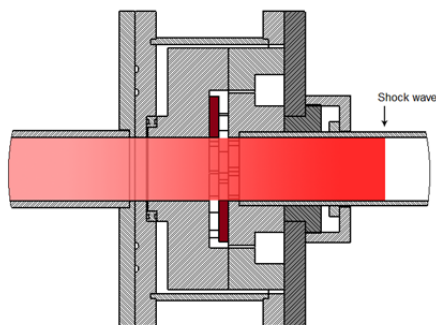
با توجه به مشکلات لوله شوک دیافراگمی، طراحی انواع لوله شوک‌های بدون دیافراگم در سال‌های اخیر مورد توجه دانشمندان این شاخه قرار گرفته است. در لوله شوک‌های جدید، شیرهای سرعت بالا جایگزین دیافراگم می‌شود که هرچه رفتاری شبیه‌تر از نظر زمان و نوع پارگی به دیافراگم داشته باشند، بهتر است. با توجه به این نکته در شیرهای جایگزین به‌جای دیافراگم، مهم‌ترین فاکتور، سرعت و نحوه باز شدن شیر است^[3]. انواع مختلفی از این شیرها، برای ایجاد سرعت بیشتر مانند شیر لاستیکی^[4]، شیر تک‌پیستونی^[5]، شیر دوپیستونی^[6] و شیر آستینی^[7] پیشنهاد شده است. استفاده از این شیرها، هنگامی به‌صورت ویژه سودمند است که نیاز به تست‌های تکرارپذیر یا دستگاه خودکار باشد. با توجه به اینکه با افزایش زمان باز شدن شیر، فاصله تشکیل موج شوک از شیر بیشتر می‌شود^[8]، از این رو چالش اصلی در لوله شوک بدون دیافراگم، رسیدن به تشکیل موج شوک یکنواخت در کوتاه‌ترین طول ممکن است. دو نقطه ضعف در طراحی شیرهایی که تا به حال ساخته شده، مورد توجه است. اولاً چرخش ۹۰ یا ۱۸۰ درجه گاز هنگام عبور از درایور به درایون که در طراحی‌های انجام‌شده در شیرهای موجود در خود مقالات مطرح است و ثانیاً باز شدن شیر از کناره‌ها که این موضوع سبب ایجاد اغتشاشات گاز در لوله شوک شده و نیاز به طول بیشتر لوله برای ایجاد یکنواختی موج شوک است. نقطه ضعف اول توسط طراحی حیف و همکاران^[9] برطرف شد و نقطه ضعف اول و دوم به‌صورت همزمان در شیر پیش رو مرتفع شده است. البته که باز شدن شیر از مرکز لوله، به یکنواختی موج کمک شایانی می‌کند و مقداری از تأثیر زمان باز شدن شیر را جبران می‌نماید^[9]. تفاوت ساختاری دیگری که وجود دارد، وابستگی سرعت باز شدن شیر حیف به فشار درایور است و با کاهش این فشار، سرعت باز شدن کم می‌شود که در شیر KNTU2، این وابستگی با کمک مدار پنوماتیک پیش‌بینی‌شده، وجود ندارد و با هر فشار دلخواهی در درایور می‌توان شیر را با سرعت مورد نظر باز نمود. مهم‌ترین دلیل برای انتخاب ساختار بدون دیافراگم، امکان خودکار کردن لوله شوک است. یکی دیگر از موارد بسیار مهم در لوله شوک، سیستم اندازه‌گیری موج شوک بوده که در این تحقیق، یک سیستم نوری ابتکاری که اساس کار آن بر پایه جابه‌جایی صفحه با انرژی موج بوده، طراحی و ساخته شده است و با کمک آن، سرعت و یکنواختی موج شوک بررسی می‌شود، امکان جابه‌جایی در درایون را دارد و قیمت تمام‌شده نسبتاً پایین از ویژگی‌های آن است. این سیستم، اولین سیستم اندازه‌گیری نوری است که قابلیت اندازه‌گیری فشار موج شوک را دارد.

۲- ساختار لوله شوک برای آزمایش‌ها

این لوله شوک برای مطالعه و بررسی موج‌های شوک متوالی

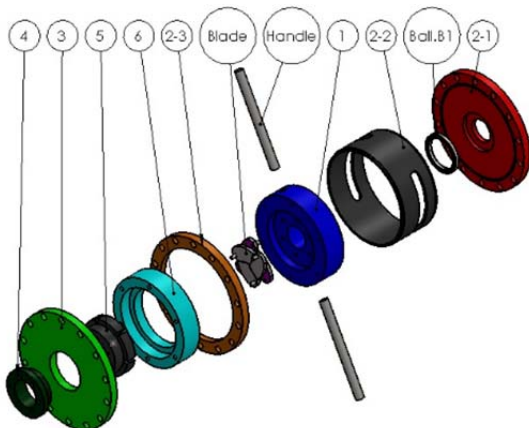


(الف)

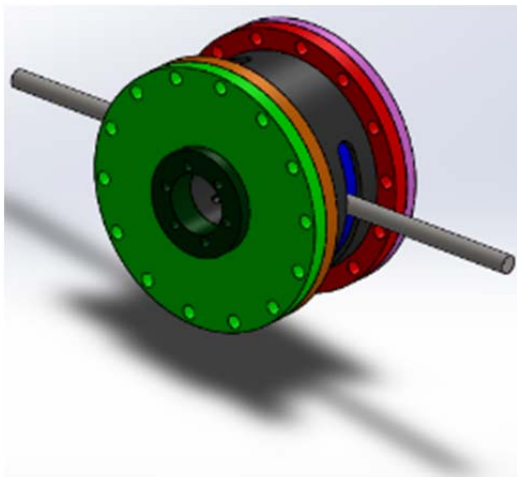


(ب)

شکل ۳) نمای برش خورده شیر KNTU2: الف) هنگامی که شیر بسته است؛ ب) هنگامی که شیر به‌طور کامل باز شده است.



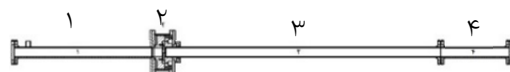
(الف)



(ب)

شکل ۴) اجزای تشکیل‌دهنده شیر KNTU2: الف) نمای انفجاری، ب) نمای مونتاژ شده

ساخته شده است. در طراحی انجام‌گرفته، فشار اولیه درایور (P_4) بین ۷ تا ۲۰ بار و فشار اولیه درایون (P_1) بین ۰/۵ تا یک‌بار است. قطر داخلی لوله درایون برابر با ۶۰ میلی‌متر و طول آن به نسبت قطر برابر با ۴۱/۶ است. درایور به طول یک‌متر و درایون به طول ۲/۵ متر در راستای همدیگر قرار دارند و نسبت قطرهای داخلی آنها که سطح جریان گاز بوده، با هم برابر است. برای راحتی کار، لوله شوک به‌نحوی طراحی شده است که در آن از هوا به‌عنوان گاز فشرده در درایور استفاده شود. یک مخزن با فشار بالا برای پُر کردن و تامین فشار درایور به کار گرفته شده است. برای بررسی و مطالعه شرایط موج شوک در درایون، یک سیستم اندازه‌گیری نوری، طراحی و ساخته شده که قابلیت اندازه‌گیری سرعت و بررسی یکنواختی موج با کمک آن سیستم مهیا شده است. در شکل ۱ شکل‌واره لوله KNTU2 و شماتیک آن مشاهده می‌شود.



شکل ۱) لوله شوک KNTU2

در شکل ۱، بخش شماره ۱ محرک، بخش شماره ۲ شیر چندزمانه، بخش شماره ۳ متحرک و بخش شماره ۴ نشان‌دهنده قسمت طراحی‌شده برای نصب سیستم اندازه‌گیری است. همچنین بخش ابتدایی محرک به‌منظور افزایش فشار در این ناحیه و بخش انتهایی قسمت اندازه‌گیری به‌منظور قابلیت کاهش فشار در متحرک توسط فلنج‌های کورکن مسدود شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در ابتدا برای راه‌اندازی لوله شوک، گاز پُر فشار از مخزن پُر فشار از طریق شیر تعبیه‌شده با دبی و سرعت بالا وارد بخش محرک می‌شود و پشت تیغه‌های طراحی‌شده شیر ذخیره می‌شود تا فشار در حداقل زمان به اندازه مطلوب برسد.

شکل ۳- الف، نمای برش‌خورده از شیر KNTU2 را در حالتی نشان می‌دهد که شیر بسته است. هنگامی که فشار در محرک به اندازه مطلوب رسید، با عمل‌کردن سیستم پنوماتیک شیر به‌عنوان محرک (که با یک کمپرسور تغذیه می‌شود)، دسته شیر می‌چرخد و در نتیجه، تیغه‌ها در کسری از ثانیه به‌صورت دورانی حرکت می‌کنند و موجب باز شدن دهانه شیر و تخلیه گاز متراکم به داخل بخش متحرک و ایجاد موج شوک در آن می‌شوند. این امر در شکل ۳- ب نشان داده شده است.

۲-۱- اجزای شیر و پیکربندی آن

این مکانیزم از ۱۱ قطعه تشکیل شده است. شکل ۴، نمای انفجاری از این مکانیزم را نشان می‌دهد. در این مکانیزم، قطعه‌های ۱-۲، ۲ و ۳-۲ بدنه اصلی این شیر هستند. در داخل قطعه‌های ۱-۲ و ۶، دو بلبرینگ به‌صورت انطباق پرسی قرار می‌گیرند. علت انتخاب این بلبرینگ‌ها، تحمل نیروی محوری ناشی از فشار گاز و همچنین اصطکاک پایین در حرکت است.

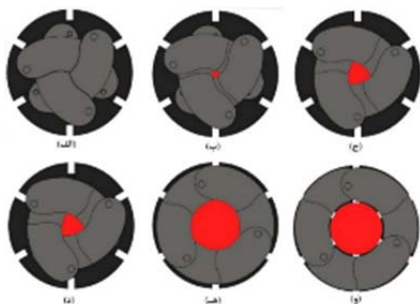


شکل ۲) شرایط اولیه هنگام پُر شدن محرک

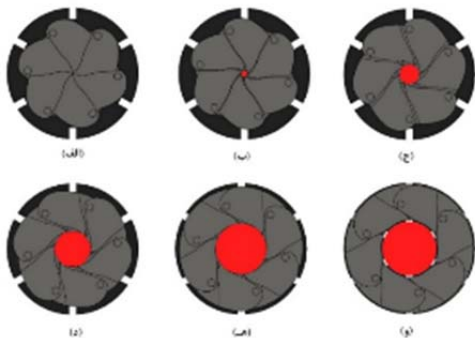
سرعت بازشدن شیر تاثیرگذار است. برای جلوگیری از نشتی، از چسب‌های واشرساز و اورینگ‌ها استفاده شده است. دو نکته در طراحی‌های صورت‌گرفته مدنظر بوده است. اولین نکته، بررسی بازشدن دهانه شیر دقیقاً از مرکز شیر، در حالتی که دهانه به‌صورت ترکیبی از سه منحنی باز شده (شکل ۶) و حالتی که شیر به‌صورت ترکیبی از شش منحنی (شکل ۷) باز می‌شود. بدین ترتیب امکان اثر شکل بازشدن دهانه روی موج شوک قابل بررسی است. نکته بعد، بررسی اثر بازشدن شیر دقیقاً از مرکز و قسمت‌های کناری روی یکنواختی موج شوک است. علت بررسی این نکته، پاره‌شدن برخی از دیافراگم‌ها از قسمت کناری دیافراگم در لوله‌های شوک دیافراگمی است که موجب تغییر شکل موج شوک ایجاد شده می‌شود. به همین منظور، دسته سوم از تیغه‌ها برای شیر طراحی و ساخته شده است (شکل ۸). ثالثاً این شیر، امکان تنظیم فشار اولیه درایور بین ۷ تا ۲۰ بار با کمک مخزن فشار بالا و درایون بین یک تا ۰/۵ بار به‌کمک پمپ خلأ را دارد که می‌توان موج‌های تکرارپذیر شوک با سرعت و فشارهای مختلف و دلخواه را ایجاد نمود.



شکل ۵) تیغه‌های آلومینیومی



شکل ۶) شماتیک مجموعه سه‌تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام بازشدن از مرکز شیر: الف) $t=0\text{ms}$ ، ب) $t=1/6\text{ms}$ ، ج) $t=3/2\text{ms}$ ، د) $t=4/8\text{ms}$ ، ه) $t=6/4\text{ms}$ ، و) $t=8\text{ms}$ ناحیه قرمز نشانگر قسمت باز شده دهانه است که سیال پرفشار از آن عبور می‌کند.



شکل ۷) شماتیک مجموعه شش‌تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام بازشدن از مرکز شیر: الف) $t=0\text{ms}$ ، ب) $t=1/6\text{ms}$ ، ج) $t=3/2\text{ms}$ ، د) $t=4/8\text{ms}$ ، ه) $t=6/4\text{ms}$ ، و) $t=8\text{ms}$

قطعه ۱ روی بلبرینگ شماره یک قرار می‌گیرد و دو دسته به داخل آن پیچ می‌شوند. این دسته‌ها از طریق سیستم پنوماتیک که در بخش‌های بعد توضیح داده می‌شود، وظیفه تامین نیروی لازم برای عملکرد شیر را دارند. به‌علت استفاده از پیکره‌بندی‌های متفاوت، روی قطعه شماره ۱ شیار به‌اندازه زاویه 100° ایجاد شده است که امکان چرخش قطعه ۱ را فراهم می‌کند. قطعه ۶ روی قطعه ۱ توسط پیچ‌های آلن با قطر ۶ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر روی قطعه ۱ پیچ می‌شود. به‌منظور بستن دهانه شیر از یک مجموعه تیغه استفاده می‌شود. این تیغه‌ها دارای دو پایه در دو سر خود هستند. یکی از آن پایه‌ها در سوراخ‌های تعبیه‌شده در روی قطعه ۱ قرار می‌گیرد. در ادامه، بیشتر به بررسی این تیغه‌ها خواهیم پرداخت. پس از قرارگیری تیغه‌ها، بلبرینگ شماره دو روی قطعه ۶ به‌صورت پرسی نصب می‌شود و قطعه ۵ روی آن قرار می‌گیرد. با این کار، پایه دوم تیغه‌ها در شیارهای تعبیه‌شده روی قطعه ۶ قرار می‌گیرد. سپس فلنج شماره ۳ روی قطعه ۵ توسط قطعه واسط پیچ می‌شود تا مانع از حرکت شعاعی قطعه شماره ۵ شود. به این ترتیب با حرکت میله‌های تعبیه‌شده، دهانه توسط تیغه‌ها بسته خواهد شد. قسمت ۴ نیز در این شیر به‌منظور نگهداری کامل متحرک در داخل شیر در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور موقعیت‌دهی دقیق متحرک در شیر، در داخل قطعه شماره ۵، یک پله تعبیه شده است تا لوله متحرک از بخش معینی جلوتر نرود.

۲-۲- مشخصه‌های ویژه شیر سریع:

شیر طراحی و ساخته شده، ویژگی‌های طراحی قابل توجهی دارد که نیاز است به‌صورت خاص به آن پرداخته شود. اولاً طراحی لوله‌های شوک بدون دیافراگم غالباً براساس پیستون‌های حرکت سریع است. در این گونه طراحی، محرک، پیرامون متحرک قرار می‌گیرد. حرکت پیستون در یک بازه کم موجب بازشدن کامل شیر می‌شود. عیب اصلی این روش، چرخش 180° درجه‌ای جریان گازی است که موجب اغتشاشات چشمگیر در موج شوک می‌شود [9]. به‌منظور جابجایی دیافراگم با مکانیزمی که همانند آن عمل کند، می‌بایست چند موضوع مدنظر باشد. اول اینکه مقطع لوله باید در کسری از ثانیه باز شود. موضوع مهم‌تر این است که هندسه شیر باید به‌گونه‌ای باشد که اثر چشمگیری روی فرآیند موج شوک در طول بازشدن این مکانیزم نداشته باشد. بهترین حالت لوله، آن است که بخش درایور و درایون در یک راستا بوده و شیوه بازشدن آن برای تولید موج یکنواخت، بازشدن از وسط و به‌صورت متقارن باشد که در طراحی لوله شوک در نظر گرفته شده است و حتی این موضوع می‌تواند مقداری از کم‌بودن سرعت بازشدن شیر را هم جبران نماید. مهم‌ترین ویژگی این شیر هم بازشدن متقارن از وسط در کسری از ثانیه است که به تولید موج یکنواخت در زمان و فاصله کمتر کمک می‌کند.

ثانیاً مزیت دیگر این مکانیزم به‌عنوان شیر لوله شوک، قابلیت نصب تیغه‌های مختلف است که امکان بررسی تاثیر بازشدن دهانه در حالت‌های مختلف بر تشکیل و یکنواختی موج شوک را فراهم می‌کند. سه نوع تیغه طراحی و ساخته شده است که علت استفاده از این تیغه‌ها، تفاوت در نحوه بازشدن دهانه شیر است. برای طراحی شکل هر گروه از تیغه‌ها از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و برای ساخت آنها از CNC‌های چندبُعدی استفاده شده است. با توجه به شبیه‌سازی که با نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت، دو جنس آلومینیوم با ضخامت ۹ میلی‌متر و تیتانیوم با ضخامت ۲ میلی‌متر قابل استفاده هستند (شکل ۵). حسن آلومینیوم، ماشین‌کاری راحت و قیمت پایین آن و حسن تیتانیوم، وزن کم آن بوده که در

طراحی و ساخت یک شیر بازشونده سریع جدید به همراه سیستم اندازه‌گیری فیبر نوری... ۱۷۶۹
کمپرسور ایجاد می‌شود و همچنین قطر پیستون ۴۰ میلی‌متر، نیروی ایجاد شده وارد به پیستون محاسبه می‌شود:

$$F = PA = 7 \times 10^5 \times \pi \times 0.02^2 = 879.2 \text{ N} \quad (۱)$$

اکنون با کمک قانون دوم نیوتون، با توجه به جرم پیستون و ممان اینرسی چرخشی بخش‌های متحرک درون شیر که معلوم است، شتاب حرکت پیستون از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum F = ma + Ia/r^2 \quad (۲)$$

در اینجا این نکته قابل ذکر بوده که با توجه به اتصال سیلندر به مخزن، فشار داخل سیلندر و همچنین ممان اینرسی چرخشی نیز ثابت فرض شده است.

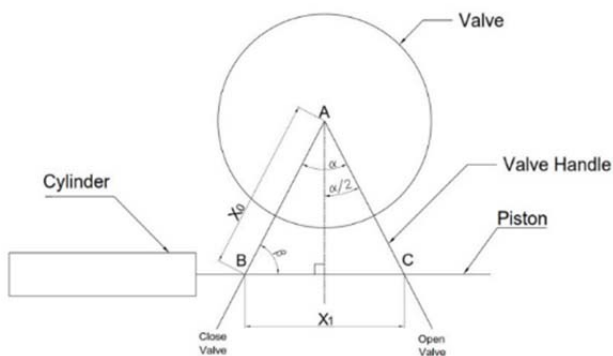
در ادامه با توجه به کورس حرکتی لازم برای باز شدن کامل شیر که ۲۰ سانتی‌متر است و جای‌گذاری آن در رابطه سینماتیک حرکت با شتاب ثابت (رابطه ۳)، مدت زمان باز شدن شیر برابر با ۸/۳ میلی-ثانیه است:

$$\Delta x = \frac{1}{2} at^2 \quad (۳)$$

نکته مورد توجه در طراحی، محل و نوع قرارگیری سیلندر است، به نحوی که کورس حرکتی حداقل ممکن شود. با حل یک مساله بهینه‌سازی، کمترین کورس در حالتی به دست می‌آید که سیلندر در $\alpha/2$ زاویه دوران شیر برای باز شدن به طور کامل است، بر میلیه دوران عمود باشد (شکل ۹). در این صورت، سر پیستون در هر باز یا بسته شدن، یک حرکت رفت و برگشتی روی دسته شیر انجام می‌دهد و به کمک این حرکت که با یک زانویی در سر پیستون و یک بلبرینگ روی دسته شیر ایجاد شده است، حرکت خطی پیستون به حرکت دورانی شیر تبدیل می‌شود.

جدول ۱) مشخصات عملگر پنوماتیک

سیلندر پنوماتیک	نوع سیلندر
۳۲۰	کورس حرکتی (میلی‌متر)
۷۷۰	حداکثر نیروی اعمال شده توسط سیلندر (بار)
۱۰	حداکثر فشار کاری (بار)
۴۰	قطر پیستون (میلی‌متر)

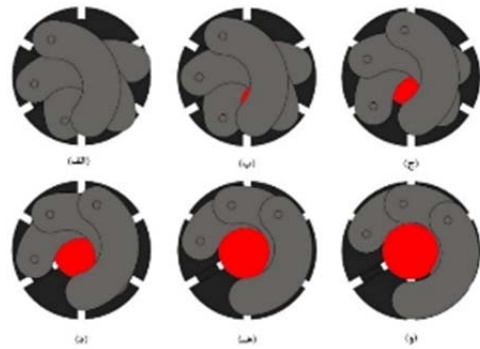


شکل ۹) شکل‌واره شیر پرسرعت در حالت بسته و باز

۴- طراحی و ساخت سیستم اندازه‌گیری نوری

با توجه به شرایط و محدودیت‌ها، سیستم اندازه‌گیری مورد نیاز در این تحقیق، باید دارای الزامات زیر باشد:

- ۱- سرعت بسیار بالای اندازه‌گیری برای بررسی موج شوک
- ۲- قابلیت تنظیم برای فشار در بازه‌های مختلف
- ۳- عدم ایجاد اختلال به وسیله نویزهای الکتریکی
- ۴- قابلیت اندازه‌گیری لحظه رسیدن و سرعت موج شوک
- ۵- قابلیت اندازه‌گیری سرعت باز شدن شیر



شکل ۸) شماتیک مجموعه سه‌تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام باز شدن از قسمت کناری شیر؛ الف) $t=0\text{ms}$ ، ب) $t=1/6\text{ms}$ ، ج) $t=1/4\text{ms}$ ، د) $t=3/4\text{ms}$ ، ه) $t=6/4\text{ms}$ ، و) $t=8\text{ms}$

همچنین، این شیر به صورت کاملاً خودکار عمل کرده و به محض رسیدن فشار درایور و درایون به حد مورد نظر عمل می‌کند و قابلیت تولید موج‌های شوک متوالی با فاصله چندثانیه (بسته به فشارهای اولیه دوره تولید موج متغیر است) را داراست.

۳- تجزیه و تحلیل باز شدن شیر

برای باز نمودن سریع شیر مورد استفاده در لوله شوک، نیاز به مکانیزمی است که بتواند این سازوکار را به درستی و تحت زمان مورد نظر به انجام برساند. با توجه به مطالعات صورت گرفته، از سیستم پنوماتیک در مواردی که نیروهای نسبتاً پایین (حدود یک‌گتن) و سرعت‌های حرکتی بالا مورد نیاز باشد (مانند سیستم‌هایی که در قسمت‌های محرک ربات‌ها به کار می‌روند)، استفاده می‌کنند. در صورتی که کاربردهای سیستم‌های هیدرولیک عمدتاً در مواردی است که قدرت‌های بالا و سرعت‌های کنترل شده دقیق مورد نظر باشد (مانند جک‌های هیدرولیک، ترمز و فرمان هیدرولیک و غیره) [10] که در واقع با توجه به مطالب گفته شده، سیستم پنوماتیک برای باز نمودن شیر مورد نظر، مناسب‌تر و مقرون به صرفه‌تر است.

اجزای این سیستم پنوماتیک عبارت از کمپرسور، واحد مراقبت کمپرسور، شیرهای کنترل و عملگر هستند. کمپرسورها در سیستم پنوماتیک، وظیفه تامین انرژی مورد نیاز را انجام می‌دهند که از طریق تراکم سیال به دست می‌آید. در این سیستم از کمپرسوری با ظرفیت ۱۰۰ لیتر بر دقیقه استفاده شد.

هر واحد مراقبت معمولاً از یک فیلتر، یک شیر تنظیم فشار، یک روغن زن و یک نمایشگر فشار تشکیل شده است. این بخش، وظیفه جداسازی ذرات جامد موجود در هوا، روغن زنی هوا به منظور افزایش عمر قطعات مدار پنوماتیک و کاهش رطوبت موجود در هوای خروجی را بر عهده دارد.

برای به کار انداختن عملگر و کنترل روی جریان سیال متراکم سیستم، نیاز به شیر است. در این سیستم از یک شیر پنوماتیک ۳ به ۲ (شرکت فستو) استفاده شده است. نکته حائز اهمیت در انتخاب عملگر، تامین سرعت مورد نیاز برای باز کردن شیر است. برای این منظور از جک 40×320 دو طرفه فستو استفاده شده است. این جک دارای قطر پیستون ۴۰ میلی‌متر و کورس حرکتی ۳۲۰ میلی‌متر است که در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

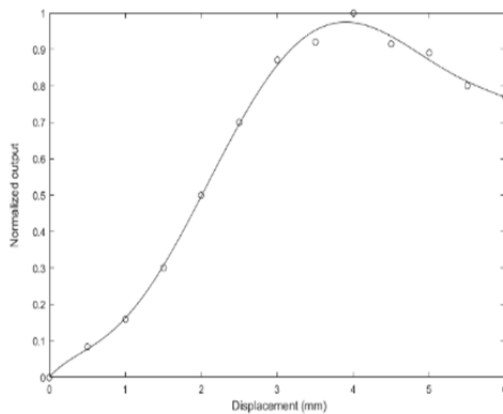
۳-۲- مدت زمان باز شدن شیر

ابتدا محاسبات اولیه‌ای برای به دست آوردن زمان باز شدن، آورده و با مقایسه آن با نتایج تجربی، صحت آن سنجیده می‌شود. با توجه به فشار داخلی پیستون به اندازه y_{atm} که با کمک اتصال به مخزن

برای دستیابی به ویژگی‌های فوق با گرفتن ایده کلی از مطالعه/لیور و همکاران^[11]، سنسور مورد نظر طراحی و ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. در این سنسورها، یک صفحه فلزی با سطحی براق در فاصله مشخص از دو فیبر نوری (فرستنده و گیرنده) روی یک فنر نصب می‌شود (شکل ۱۰) و در مقابل موج شوک قرار می‌گیرد و با رسیدن فشار موج به این صفحه، در آن جابه‌جایی رخ می‌دهد.

این جابه‌جایی، سبب تغییر در میزان نور بازتابی از صفحه به فیبر گیرنده است که با بررسی میزان نور دریافت‌شده به کمک یک مدار الکترونیکی، آن را به یک سیگنال الکترونیکی (ولتاژ) تبدیل می‌کند و می‌توان با کالیبره کردن دستگاه، میزان جابه‌جایی را به دست آورد. با داشتن زمان شروع جابه‌جایی، در اصل، زمان رسیدن پیشانی موج شوک به دست آمده است. حال با قراردادن چند سنسور در مختصات مختلف از یک سطح مقطع مشخص و به دست آوردن زمان رسیدن موج به هر سنسور، می‌توان صفحه‌ای شدن موج شوک را بررسی نمود. همچنین با قراردادن دو سنسور در فاصله معلوم از یکدیگر در بخش درایون و داشتن زمان رسیدن به هر سنسور می‌توان سرعت موج شوک را محاسبه کرد. نکته قابل توجه در این سیستم، طراحی فیکسچری است که با کمک آن می‌توان سنسورها را در هر سطح مقطع دلخواهی از درایون قرار داد و این بدان معناست که می‌توان شرایط موج را در هر بخش درایون به دست آورد.

نکته قابل توجه، تکرارپذیری تک تک سنسورها است و اینکه خروجی آنها یکسان و شبیه به هم باشد. برای اثبات این موضوع، نمودار نرمالایز شده ولتاژ بر حسب جابه‌جایی آنها به دست آمد که برای همه، شبیه به هم و به صورت نمودار ۱ است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر، نمودار شکلی خطی دارد و این به معنای امکان جابه‌جایی صفحه در این بازه برای گرفتن خروجی صحیح است. خارج از این بازه، نمودار از حالت خطی خارج می‌شود و تحلیل آن امکان‌پذیر نیست. برای انجام تست‌ها، صفحه در فاصله ۲/۲ میلی‌متر از فیبر قرار داده شد تا امکان جابه‌جایی به میزان ۰/۷ میلی‌متر میسر شود.



نمودار ۱) تغییرات ولتاژ بر حسب جابه‌جایی فنر

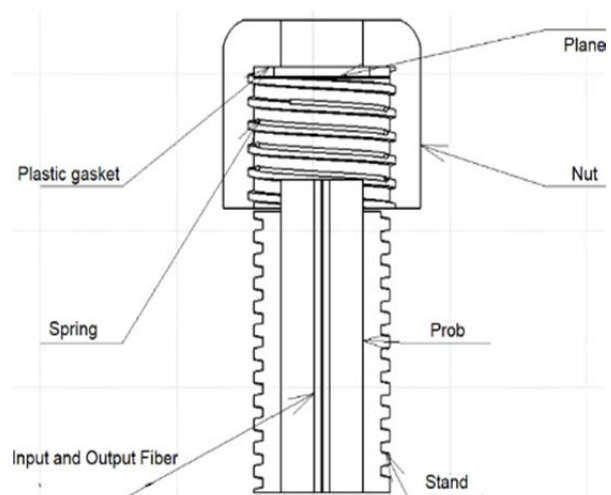
به منظور قرارگیری این سامانه در انتهای لوله شوک نیاز به دو بخش قسمت اندازه‌گیری و فیکسچر است (در ادامه به آن پرداخته می‌شود) که اجزای سنسور روی فیکسچر نصب می‌شوند و با کمک فیبر نوری، سیگنال‌ها از لوله به بخش مدار الکترونیکی انتقال می‌یابد.

۴-۱- قسمت اندازه‌گیری در لوله شوک

به منظور نصب حسگرها در لوله شوک و همچنین فراهم کردن شرایط برای کاهش فشار در متحرک نیاز به قسمت اندازه‌گیری در لوله شوک است. این بخش بعد از درایون قرار گرفته و دارای طولی به اندازه ۰/۵ متر و قطری معادل با قطر متحرک و همجنس با آن است. برای اتصال این بخش به درایون از فلنجهایی از نوع اسلیپون و کلاس ۳۰۰ و شماره نامی ۲ استفاده شد. همچنین یک شیر تخلیه سریع در انتهای این لوله نصب شده است که در زمان رسیدن موج شوک به انتهای لوله با افزایش ناگهانی فشار این شیر عمل می‌کند و موجب می‌شود اثر بازتابش موج شوک به داخل لوله به حداقل مقدار ممکن برسد.

۴-۲- فیکسچر سیستم اندازه‌گیری

به منظور موقعیت‌دهی و ثابت کردن حسگرها در قسمت اندازه‌گیری در انتهای لوله شوک، نیاز به فیکسچر است. از آنجایی که هدف اصلی در استفاده از حسگرها، بررسی یکنواختی و پروفیل فشار موج شوک است، این فیکسچر با محاسبات مقاومت لازم، از جنس آلومینیوم به گونه‌ای طراحی شد که بتوان تا حد امکان، پروفیل فشار نقاط مختلف از موج شوک درون لوله را اندازه‌گیری کرد. قسمت پیشانی در این فیکسچر دارای ۱۸ سوراخ است. این سوراخ‌ها قابلیت نصب کلگی حسگرها را دارند (شکل ۱۱). بنابراین برای بررسی یکنواختی موج شوک، یک حسگر در مرکز فیکسچر قرار می‌گیرد و دو حسگر دیگر در سایر نقاط به صورت تصادفی نصب می‌شوند. بدین صورت اگر موج شوک از حالت کروی خارج شود و به صورت صفحه‌ای و یکنواخت در بیاید، سیگنال خروجی از سه حسگر اطراف با سیگنال خروجی از حسگر مرکزی یکسان است. اما اگر موج شوک در فاصله طی‌شده یکنواخت نشده باشد، خروجی حسگرها با یکدیگر تفاوت چشمگیری خواهند داشت. بیان این نکته ضروری است که اگر تعداد حسگرها افزایش یابد و قطر موثر صفحه حساس آنها تا حد ممکن کاهش یابد، با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری می‌توان پروفیل موج شوک را به صورت سه‌بعدی ترسیم نمود و نمای برش‌خورده و جانبی آن را بدون استفاده از دستگاه‌هایی نظیر دوربین پُرسرعت یا شلرین به دست



شکل ۱۰) طرح شماتیک کلگی سیستم اندازه‌گیری نوری

انتخاب شده اهمیت بسزایی دارد. بدین منظور برای هر سنسور از دو رشته فیبر نوری (به‌عنوان فرستنده نور و گیرنده نور بازتابی) با استاندارد ۱۲۵-۶۲/۵ استفاده شده است. این فیبر نوری از نوع فیبرهای نوری با قابلیت حساسیت بالا است و قیمت مناسبی نیز دارد. پوشش این فیبرها از جنس پلیمر PTFE است. این دو رشته فیبر وارد پروب می‌شود و از طرف دیگر، خود به مدار الکترونیکی متصل می‌شود.

۲- پروب اندازه‌گیری: بخش حساس این سیستم اندازه‌گیری را تشکیل می‌دهد و به عبارت دیگر، قسمتی از سیستم اندازه‌گیری است که در معرض موج شوک قرار می‌گیرد و مقدار فشار موج شوک (P_2) را اندازه‌گیری می‌کند. این قسمت شامل یک میله مسی با دو سوراخ تعبیه‌شده در درون آن به‌منظور قرارگیری دو رشته فیبر نوری مورد استفاده در سنسور است. در سنسور نیاز است که دو رشته فیبر با ظرافت و دقت در کنار هم قرار بگیرند. این دو فیبر توسط چسب در پروب فیکس شده‌اند.

۳- فنر واسط بین پروب و صفحه بازتابنده: پس از آن که جبهه موج به صفحه بازتابنده برخورد می‌کند، این صفحه دچار جابه‌جایی می‌شود. برای آن که تاخیر زمانی بین فرآیند برخورد موج شوک به صفحه و جابه‌جایی صفحه، به حداقل زمان خود برسد، از یک فنر واسط بین صفحه و پروب استفاده شده است (شکل ۱۰). این فنر قطر داخلی ۶ میلی‌متر را دارد و مقدار سختی آن با توجه به داشتن مقدار محاسبه‌شده فشار موج و جابه‌جایی مجاز به دست آمده است.

۴- صفحه بازتابنده: این صفحه همچون آینه عمل می‌کند و با برخورد موج به علت جابه‌جایی خطی که دارد، باعث تغییر در زوایای بازتابش نور می‌شود. با توجه به محاسبات و شبیه‌سازی انجام‌گرفته، جنس این صفحه از استیل انتخاب شده و ضخامت آن ۰/۱ میلی‌متر و قطر آن ۵ میلی‌متر است. این صفحه توسط فنر واسط، به پروب متصل می‌شود. چنانچه فشار گاز به پشت صفحه منتقل شود، ممکن است در جابه‌جایی صفحه خلل ایجاد شود. به همین دلیل، برای آب‌بندی و جلوگیری از نشتی گاز پُرفشار به پشت صفحه، از یک واشر لاستیکی نرم بین صفحه و سر پروب استفاده شد.

۵- خروجی و ورودی پروب: پس از ایجاد سوراخ‌هایی با مشخصات ذکرشده در میله مسی پروب، دو رشته فیبر مورد نظر در درون این سوراخ‌ها به‌شکل مناسبی تعبیه می‌شوند. این دو رشته فیبر از دو سر دیگر خود به مدار الکترونیکی مورد نظر متصل می‌شود که در واقع، نقش خروجی و ورودی پروب را ایفا می‌کنند.

۶- مدار الکتریکی متصل به پروب: این مدار الکترونیکی، به‌طور کلی شامل یک کیت الکترونیکی به‌همراه یک فرستنده و گیرنده نور است. مدار، شدت نور ورودی را به ولتاژ تبدیل می‌کند و آنها زل به اسیلوسکوپ می‌فرستد. کیت مورد نظر درون یک محفظه فلزی قرار می‌گیرد که به‌منظور کاهش تاثیر نویزهای محیط آزمایشگاه، به یک فیلتر مجهز شده است. لازم به ذکر است خروجی و ورودی پروب، به این محفظه فلزی شامل مدار الکترونیکی متصل می‌شوند.

۷- بدنه سنسور: به‌منظور قرارگیری پروب اندازه‌گیری در بخش اندازه‌گیری لوله شوک، فیکسچری طراحی شد که به‌منظور قرارگیری صحیح پروب در درون این فیکسچر، نیاز به ساخت سازوکاری برای این امر بود. به همین دلیل با استفاده از یک پیچ با قطر داخلی ۰/۱ میلی‌متر و قراردادن پروب در درون آن، صلبیت پروب در فیکسچر بخش اندازه‌گیری لوله شوک، تامین شد.

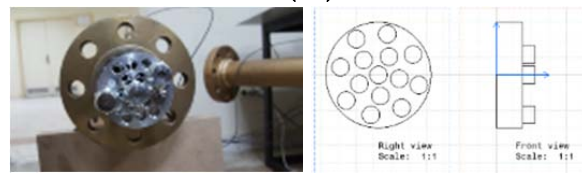
آورد که البته در این مقاله به‌دلیل محدودیت‌ها این امر صورت نپذیرفته است.

همچنین، در این سیستم اندازه‌گیری، امکان بررسی یکنواختی موج در فواصل مختلف از شیر در محرک ایجاد شده است. فیکسچر با استفاده از پیچ‌های تنظیم تعبیه‌شده، قابلیت تثبیت سنسورها در مکان‌های گوناگون از دهانه شیر لوله شوک را دارد. بدین ترتیب بدون تعویض محرک می‌توان یکنواختی موج شوک را در فاصله‌های دلخواه از شیر بررسی نمود.

بخش‌های مختلف سیستم اندازه‌گیری به‌شرح فیبر نوری، پروب اندازه‌گیری، فنر واسط بین پروب و صفحه بازتابنده، صفحه بازتابنده، خروجی و ورودی پروب، مدار الکتریکی متصل به پروب، بدنه سنسور، منبع تغذیه و اسیلوسکوپ (شکل ۱۲) است.



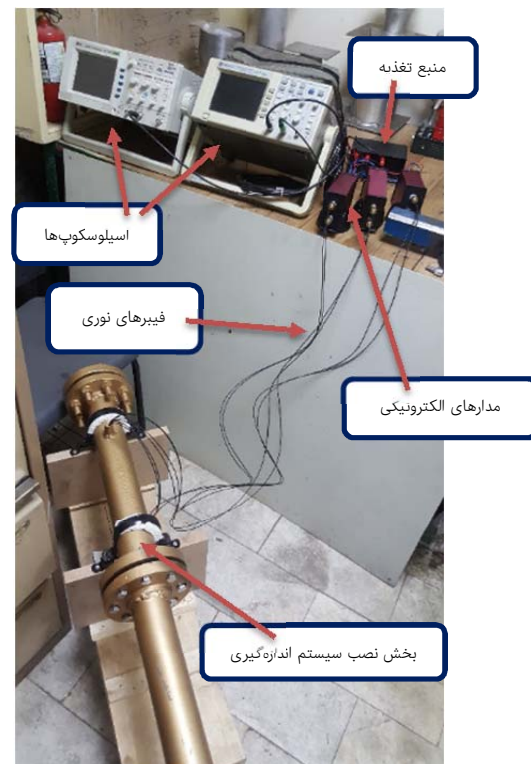
(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۱۱) فیکسچر به‌منظور موقعیت‌دهی سنسور در انتهای لوله شوک: (الف) نمای جانبی، (ب) نمای روبه‌رو، (ج) طرح شماتیک قرارگرفتن کلکی سنسور روی پایه



شکل ۱۲) بخش‌های مختلف سیستم اندازه‌گیری

۱- فیبر نوری: در این بخش از سیستم اندازه‌گیری، نوع فیبر

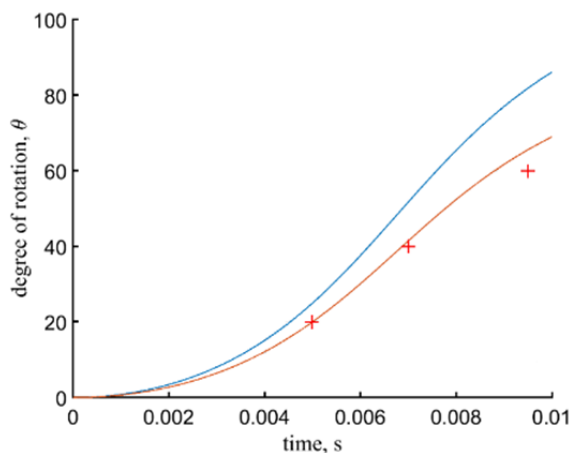
به بعد، افت شتاب رخ می‌دهد و شیر به جای ۸ میلی‌ثانیه در ۱۰ میلی‌ثانیه باز می‌شود.
در ادامه با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون:

$$V = at \quad (10)$$

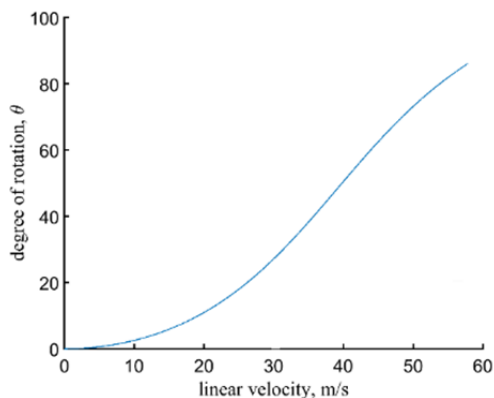
از این رابطه با جای‌گذاری t از عکس معادله ۹، نمودار زاویه-سرعت خطی به صورت نمودار ۳ به دست می‌آید. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، شکل کلی آن شبیه به نمودار زمان-زاویه شد، چرا که حرکت پیستون شتاب، ثابت فرض شده است.

جدول ۲) مقادیر معلوم در محاسبات

مقدار ثابت	نماد	متغیر
۵۸ درجه	β	زاویه اولیه بین راستای دسته و سیلندر
۱۷ سانتی‌متر	X_0	طول اولیه دسته شیر
۶۴ درجه	α	حداکثر چرخش دسته شیر
۷ بار	P	فشار سیستم پنوماتیک
۷۸۴ متر بر ثانیه	a	شتاب حرکت پیستون



نمودار ۲) رابطه بین زمان و زاویه باز شدن شیر



نمودار ۳) مقدار سرعت خطی پیستون بر حسب زاویه باز شدن شیر

در هر لحظه، سرعت خطی پیستون موجود است. اکنون با توجه به معلوم بودن t در هر زمان مشخص از رابطه ۹ و r از رابطه ۴، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \frac{-v \sin(\theta + \beta)}{r} \quad (11)$$

با توجه به معادله فوق، نمودار زاویه-سرعت زاویه‌ای به صورت نمودار ۴ به دست می‌آید. همان‌طور که قابل پیش‌بینی هم بود، با افزایش سرعت خطی و عمود شدن راستای پیستون بر راستای دسته شیر، سرعت زاویه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به تدریج با کم شدن

۸- منبع تغذیه: منبع تغذیه ساخته شده برای سیستم اندازه‌گیری، از نوع DC است که دو خروجی با ولتاژ مثبت و منفی ۹ ولت دارد و منبع تغذیه انرژی مورد نیاز مدار الکترونیکی را تامین می‌کند.
۹- اوسیلوسکوپ: دو اوسیلوسکوپ دوکاناله برای ثبت داده‌ها در نظر گرفته شد که در آن واحد، ۴ سنسور به آنها متصل می‌شود.

۵- تحلیل نتایج نظری و تجربی

باز شدن شیر: شکل ۹، شماتیک شیر و سیستم پنوماتیک را نشان می‌دهد. θ در مثلث ABC زاویه راس A است که مقدار آن از صفر تا α تغییر می‌کند. هنگامی که t برابر صفر بوده، شیر کاملاً بسته و در حال پُر شدن است و به محض رسیدن به فشار پیش‌بینی شده، مدار پنوماتیک عمل کرده و پیستون شروع به حرکت می‌کند و t از صفر تا α و x_1 از صفر تا ۲۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. x_0 هم که ثابت و برابر با طول AB است. β نیز زاویه راس B بوده که همواره ثابت است. فاصله بین پیستون و مرکز دوران هم r (طول موثر دسته شیر) فرض می‌شود که در ابتدا و انتها برابر با x_0 بوده و در بین مسیر کوچک‌تر از آن است. با توجه به مطالب مذکور و قانون کسینوس‌ها:

$$r^2 = x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta \quad (4)$$

همچنین با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون:

$$x_1 = \frac{1}{2}at^2 \quad (5)$$

با توجه به معلوم بودن a ، در هر زمان مشخص، x_1 به دست می‌آید که با توجه به معلوم بودن مقادیر x_0 و β ، در هر زمان r به دست می‌آید. حال با توجه به مشخص شدن r و قانون سینوس‌ها:

$$\frac{r}{\sin \beta} = \frac{x_1}{\sin \theta} \quad (6)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{x_1}{r} \sin \beta \right) \quad (7)$$

با جای‌گذاری رابطه ۴ در ۷:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{x_1}{\sqrt{x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta}} \sin \beta \right) \quad (8)$$

که با جای‌گذاری ۵ در ۸:

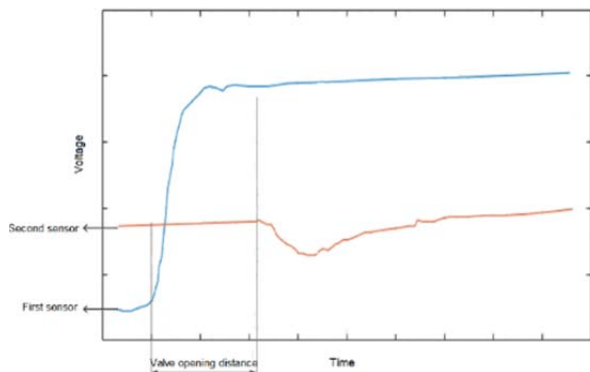
$$(9)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}at^2}{\sqrt{x_0^2 + \frac{1}{4}a^2t^4 - x_0at^2 \cos \beta}} \sin \beta \right)$$

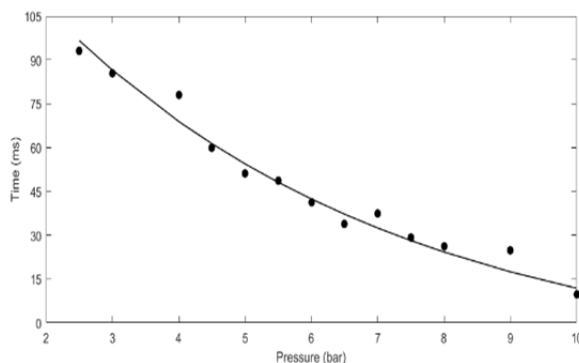
از این رابطه با توجه به مقادیر معلوم جدول ۲، نمودار زمان-زاویه شیر به صورت نمودار ۲ به دست می‌آید. نموداری که با خط آبی نشان داده شده، از محاسبات نظری و رابطه ۹ به دست آمده که با توجه به چرخش ۶۴ درجه برای باز شدن کامل شیر نشان می‌دهد که شیر در ۸ میلی‌ثانیه کاملاً باز شده است. اما زمان قرارگیری شیر در سه زاویه مشخص ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ درجه، به صورت تجربی و با سنسور اندازه‌گیری شده که در نمودار با علامت + نشان داده شده است. در نمودار ۲، خط عبوری از آزمایش‌ها (نقاط نشان داده شده با +) که با رنگ قرمز مشخص شده، براساس شتاب به دست آمده تا ۲۰ درجه با کمک برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB ترسیم شده است. این افت شتاب که در نمودارها شاهد آن هستیم، به سه دلیل زیر است:
۱- از اصطکاک در محاسبات صرف نظر شده است.

۲- کاهش فشار در سیلندر رخ می‌دهد.

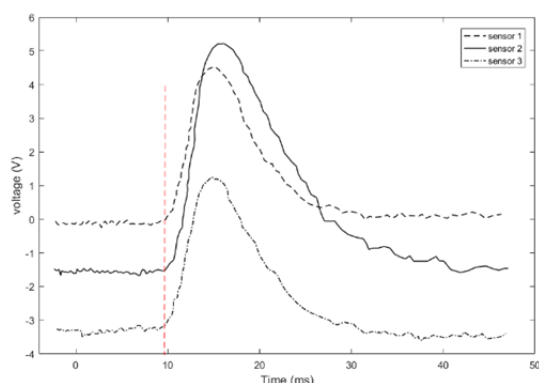
۳- با باز شدن تیغه‌ها چون فاصله از مرکز زیاد می‌شود، ممان اینرسی چرخشی افزایش می‌یابد که در محاسبات ممان اینرسی چرخشی متوسط قرار داده شده است و به همین دلیل، از یک جایی



نمودار ۵) موج‌های دریافت‌شده از سنسورها در اوسیلوسکوپ؛ نمودار آبی مربوط به سنسور ۱ و نمودار قرمز، سنسور ۲ است



نمودار ۶) زمان بازشدن شیر در فشارهای مختلف؛ با افزایش فشار مدار پنوماتیک، زمان بازشدن شیر تا ۱۰ میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد



نمودار ۷) سه موج دریافت‌شده از سنسورها در داخل لوله بر اوسیلوسکوپ؛ که نقطه شروع یکسانی دارند و این نشان صفحه‌ای شدن موج است.

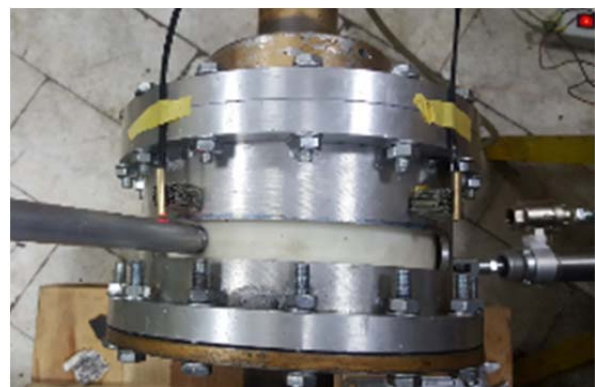
سنسور شماره ۲ در مرکز لوله و سنسورهای ۱ و ۳ در مقاطع دیگر لوله قرار گرفته‌اند. اطلاعاتی که در این نمودارها بسیار مهم بوده، لحظه شروع این نمودارها است که همان‌طور که با خط‌چین مشخص شده، یکسان بوده و این به معنای صفحه‌ای شدن موج شوک در این مقطع است. نقطه شروع نمودارها با اسیلوسکوپ قابل تنظیم بوده و به نحوی تنظیم شده است که نمودارهای حاصل قابل تفکیک باشند. تغییر ولتاژ در هر نمودار، ارتباط مستقیمی با نیروی وارده از سمت جبهه موج دارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مقدار در سنسور مرکز لوله بیشتر از نقاط دیگر است. مدت زمان رسیدن به اوج نمودار، از پیش‌بینی‌های نظری بیشتر بوده که دلیل آن تاخیری است که در حرکت فیزیکی صفحه سنسور به وجود می‌آید.

زاویه و افزایش اختلاف بین راستاهای حرکت، سرعت زاویه‌ای کاهش می‌یابد. در انتها با برخورد به ترمز لاستیکی و تغییر جهت فشار سیلندر، شیر، متوقف و به حالت اولیه باز می‌گردد.

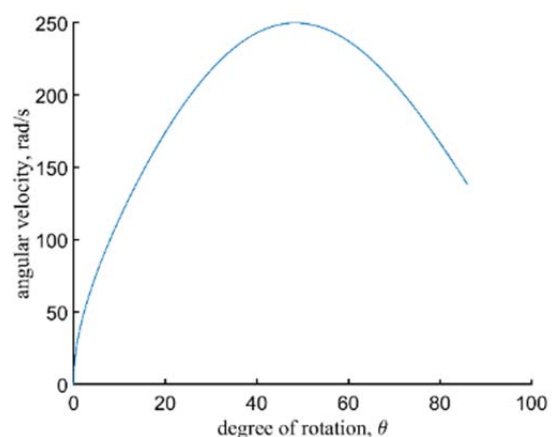
برای محاسبه مدت زمان بازشدن شیر به صورت تجربی از سنسورهای نوری معرفی شده در بخش قبل استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ابتدا شیر در حالت بسته و سنسور اول (نمودار آبی) در مقابل شیر و سنسور دوم (نمودار قرمز) در انتهای قسمت بازشونده شیر قرار گرفت. در این حالت، هنگام بازشدن شیر، سنسور اول و دوم هر یک به‌طور جداگانه اختلاف ولتاژ ناشی از برخورد نور به شیر را دریافت می‌کنند. سنسور اول با شروع حرکت و کناره‌رفتن دسته از جلوی صعود می‌کند و سنسور دوم با رسیدن دسته شیر، افت ولتاژ را نشان می‌دهد. یک نمونه از نمودارهای دریافت‌شده در اوسیلوسکوپ در نمودار ۵ مشاهده می‌شود. با استفاده از این نمودارها و محاسبه فاصله موج دریافتی از سنسور اول و دوم در اوسیلوسکوپ، زمان بازشدن شیر به صورت تجربی محاسبه شده است.

با تکرار این آزمایش در فشارهای مختلف، نمودار ۶ به دست می‌آید. این نمودار، سرعت بازشدن شیر در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، سرعت بازشدن شیر در فشار ۱۰ بار، ۱۰ میلی‌ثانیه است که مطابقت خوبی با نتایج نظری دارد.

برای بررسی یکنواختی موج شوک، سه سنسور نوری در مقاطع مختلف لوله شوک قرار داده شده‌اند که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. خروجی این سنسورها به اسیلوسکوپ وارد می‌شود که نمودار آنها مطابق با نمودار ۷ است.



شکل ۱۳) وضعیت سنسورها روی شیر پنوماتیک



نمودار ۱۴) مقدار سرعت زاویه‌ای شیر در درجه بازشدن‌های صفر تا

در مقاله حاضر، یک شیر با سرعت بالا با عملگر پنوماتیک، جایگزین دیافراگم در لوله شوک شده است. این طراحی در مقایسه با طرح‌های قبلاً منتشرشده، امکان جایگزینی به‌جای دیافراگم در یک لوله شوک مستقیم و معمول را دارد. این شیر بین بخش پُرفشار و کم‌فشار لوله شوک قرار می‌گیرد و تقریباً مستقل از این دو بخش عمل می‌کند. این امر، امکان استفاده از طول‌های مختلف بخش پُرفشار و کم‌فشار با میزان فشار دلخواه در بازه مورد نظر را می‌دهد. علاوه بر این، تغییر جهت حرکت گاز که در مدل‌های طراحی‌شده دیگر وجود دارد، در این شیر به وجود نمی‌آید. همچنین باز شدن شیر از مرکز لوله انجام می‌گیرد که به تشکیل موج یکنواخت در فاصله کمتر کمک کرده است.

آزمایش‌ها نشان داد که زمان باز شدن شیر ۱۰ میلی‌ثانیه بوده و موج یکنواخت در انتهای بخش کم‌فشار تشکیل شده است. نوع عملکرد این شیر خودکار بوده و زمان انجام هر آزمایش در مقایسه با لوله شوک‌های دیافراگمی به‌صورت چشمگیری کاهش و در کمتر از ۳۰ ثانیه بوده است. همچنین سیستم اندازه‌گیری نوری طراحی و ساخته‌شده به‌درستی عمل کرده است و در اندازه‌گیری سرعت باز شدن شیر و یکنواختی موج شوک، با دقت بالایی عمل نمود که در نهایت، موج شوک صفحه‌ای در لوله شوک تشکیل شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از آقایان مجید حاج‌علی‌کوهپایه و امیرحسین سودمند اصلی و خانم فروغ سردارزاده که در طول انجام کار از هیچ کمکی دریغ نکردند، کمال تشکر را دارند.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: محمدحسین قزلایاغ (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۳٪)؛ محمدعلی صمیمی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۴٪)؛ جمال زمانی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۳٪)

منابع مالی: بخشی توسط آزمایشگاه انفجار دانشکده مکانیک خواجه‌نصیرالدین طوسی و بخشی بصورت شخصی هزینه شده است.

منابع

- 1- Zamani J, Hosseinzadeh R. Manufacturing of closed-end gas driven shock tube. *Aerospace Mechanics*. 2017;14(2):27-42. [Persian]
- 2- Hanson RK, Davidson DF. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2014;44:103-114.
- 3- Tranter RS, Brezinsky K, Fulle D. Design of a high-pressure single pulse shock tube for chemical kinetic investigations. *Review of Scientific Instruments*. 2001;72(7):3046-3054.
- 4- Udagawa Sh, Ota M, Maeno K. Development of a small diameter shock tube and measurement of basic characteristics. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*. 2012;78(785):36-48.
- 5- Hariharan MS, Janardhanraj S, Saravanan S, Jagadeesh G. Diaphragmless shock wave generators for industrial applications of shock waves. *Shock Waves*. 2011;21(3):301-306.
- 6- Saito T, Menezes V, Kuribayashi T, Sun M, Jagadeesh G, Takayama K. Unsteady convective surface heat flux measurements on cylinder for CFD code validation. *Shock Waves*. 2003;13(5):327-337.
- 7- Tranter RS, Lynch PT. A miniature high repetition rate shock tube. *Review of Scientific Instruments*. 2013;84(9):094102.
- 8- Downey MS, Cloete TJ, Yates ADB. A rapid opening sleeve valve for a diaphragmless shock tube. *Shock Waves*. 2011;21(4):315-319.
- 9- Heufer KA, Olivier H, Drumm S, Murrenhoff H. A new fast acting valve for diaphragmless shock tubes. In: Kontis K, editor. 28th international symposium on shock waves 1. 1st Volume. Heidelberg: Springer; 2012. pp. 535-540.
- 10- Sivaraman I. Introduction to hydraulics and pneumatics. 3rd Edition. Delhi: PHI Learning Private Limited; 2017.
- 11- Oliver MR, Spooncer RC, Ghezelayagh MH. An autoreferenced two-state optical fibre reflective sensor. *Proceeding of Fibre Optics '86*, 1986, London, United Kingdom. Bellingham: SPIE; 1986.