

((یادداشت مهندسی))

یک شیر بازشونده سریع جدید برای لوله شوک بدون دیافراگم

محمدعلی صمیمی^۲جمال زمانی^۱

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران | دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۶)

چکیده

در این مقاله به بررسی یک نوع لوله شوک بدون دیافراگم که مجهز به شیری با طراحی ابتکاری و جدید می‌باشد، پرداخته شده است. این لوله شوک قادر است، موج شوک مسطح در دریون خود که نسبت طول به قطر آن $41/6$ می‌باشد، تولید کند. لوله شوک‌های دیافراگمی دارای نقاط قوتی مانند ساخت آسان و پارگی آبی آن می‌باشد. اما با این وجود، محدودیت‌های این لوله شوک‌ها دلیل طراحی لوله شوک‌های بدون دیافراگم می‌باشد. مهمترین این محدودیت‌ها: ۱- عدم قابلیت تکرار تولید موج شوک بدون باز کردن لوله. ۲- عدم قابلیت تنظیم نسبت فشار در یک بازه مشخص ۳- عدم امکان خودکار کردن لوله شوک؛ می‌باشد. در شیرهای جایگزین به‌جای دیافراگم، مهمترین فاکتور، سرعت باز شدن شیر می‌باشد. که در ایجاد و یکنواختی موج شوک تشکیل شده در دریون تاثیر مستقیم دارد. در این مقاله یک مکانیزم ابداعی برای رسیدن به سرعت بالای شیر، پیشنهاد شده است که زمان باز شدن 8 ms می‌باشد. این شیر خودکار دو قابلیت منحصر به فرد دارد: اول این که درایون و درایون هم راستا بوده و اغتشاش ناشی از تغییر مسیر یا چرخش گاز را نداریم که این به بهینه شدن لوله شوک کمک می‌کند و دوم این که این شیر از مرکز لوله به سمت گوشه‌ها مانند دیافراگم دوربین باز می‌شود و این بهترین حالت برای باز شدن شیر و یکنواختی موج حاصل می‌باشد. این مقاله نحوه عملکرد یک شیر پرسرعت با عملگر پنوماتیکی را توضیح داده و به مقایسه داده‌های تجربی و تئوری آن پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: لوله شوک بدون دیافراگم، شیرهای با سرعت بالا

Investigation of a New Rapid Opening Valve for a Non-Diaphragm Shock Tube

J. Zamani

M. A. Samimi

Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir University of technology, Tehran, Iran.

PHD student, Khaje Nasir University of technology, Tehran, Iran

(Received:28/May/2019; Accepted: 29/July/2019)

ABSTRACT

This paper investigates a kind of non-diaphragm shock tube equipped with an innovative and new design valve that is capable of generating well-formed shock waves within a driven tube. Diaphragm shock tubes have the advantage of easy building and instantaneous opening. However, some limitations of this kind of shock tube such as the lack of repeatability without opening, 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 the non-diaphragm shock tubes, the most important factor is the opening time of the shock tube inlet, which directly influence on the formation and uniformity of the shock wave formed in the driven. In this study, an innovative mechanism to achieve high-speed opening valve with an opening time of eight milliseconds (8ms) is proposed. Absence of any disturbances caused by a change in direction or rotation of gas and the opening from the center to the sides are two unique features of this automated non-diaphragm shock tube. Finally, in this investigation, the functional parameters of this non-diaphragm valve are calculated theoretically and compared with measured experimental data.

Keywords: Non-Diaphragm shock tube, Rapid opening valve

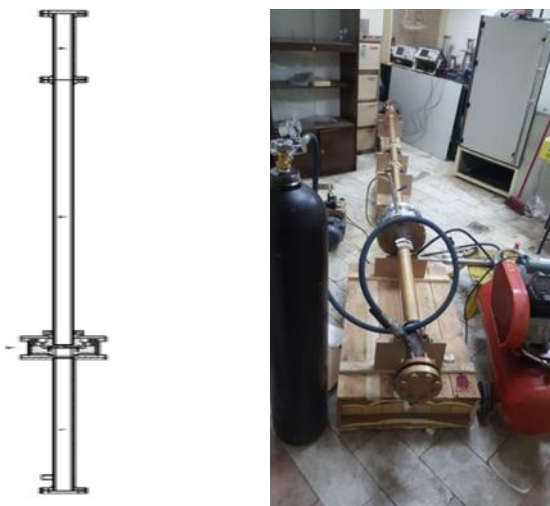
^۱استاد (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir^۲دانشجوی دکتری: m.a.samimi@kntu.ac.ir

بازشدن شیر را جبران می‌نماید [۱۰]. مهمترین دلیل برای انتخاب ساختار بدون دیافراگم، امکان خودکار کردن لوله شوک می‌باشد.

۲- ساختار لوله شوک برای آزمایش‌ها

این لوله شوک برای مطالعه و بررسی موج‌های شوک متوالی ساخته شده است. در طراحی انجام گرفته، فشار اولیه درایور (P_4) بین ۳ تا ۲۰ bar و فشار اولیه دریون (P_1) بین ۰/۵ تا ۱ bar می‌باشد. قطر داخلی لوله دریون برابر ۶ mm و طول آن به نسبت قطر برابر ۴۱/۶ می‌باشد. درایور به طول ۱ m و دریون به طول ۲/۵ m در راستای همدیگر قرار دارند و نسبت قطرهای داخلی آنها که سطح جریان گاز می‌باشد با هم برابر است. برای راحتی کار، لوله شوک به نحوی طراحی شده است که در آن از هوا به‌عنوان گاز فشرده در درایور استفاده شود. یک مخزن با فشار بالا که با کمپرسور پر شده است، برای پر کردن و تامین فشار درایور، به کار گرفته شده است. برای بررسی و مطالعه شرایط موج شوک در دریون، یک حسگر نوری، طراحی و ساخته شده است که قابلیت اندازه‌گیری سرعت موج و بررسی یکنواختی آن با کمک آن حسگر محیا شده است. در شکل (۱): تصویر و شکل‌واره لوله مشاهده می‌شود.

KNTU2



شکل (۱): تصویر و شکل‌واره لوله KNTU2

در شکل ۱، بخش شماره ۱ نشان‌دهنده محرک، بخش شماره ۲ شیر چند زمانه، بخش شماره ۳ متحرک و بخش شماره ۴ نشان‌دهنده قسمت طراحی شده برای نصب سیستم اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین بخش ابتدایی محرک

۱- مقدمه

در لوله شوک‌های معمول، دو ناحیه‌ی گاز پرفشار (درایور) و گاز کم فشار (دریون) داریم که با یک دیافراگم از هم جدا شده‌اند. فشار ناحیه‌ی پرفشار، به تعداد، ضخامت و جنس دیافراگم، بستگی دارد. با پاره شدن یک‌دفعه دیافراگم جداکننده دو ناحیه، تولید موج شوک انجام می‌گیرد [۱]. اگرچه که پارگی دیافراگم، راحت‌ترین روش برای حذف لحظه‌ای جداکننده فضای درایور و دریون می‌باشد، 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 پاره شدن دیافراگم، امکان گرفتن نتیجه یکسان از تست‌های تکراری پایین است، اگرچه امکان مشخص نمودن فشار پارگی با یک درصد تغییر در تکرارها، با استفاده از دیافراگم‌های خراش خورده به‌صورت ضربدری وجود دارد [۲]. علاوه بر این، ذرات باقیمانده از دیافراگم ترکیده، ممکن است با سیستم‌های اندازه‌گیری گران‌قیمت موجود در لوله شوک برخورد کرده و سبب آسیب به آن شوند. علاوه بر آن نیاز به تخلیه ذرات باقیمانده در لوله می‌باشد [۳].

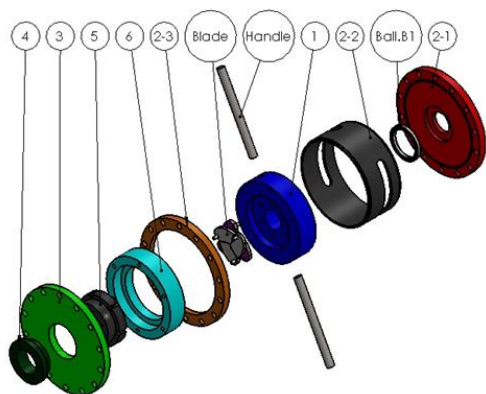
برای غلبه بر مشکلات لوله شوک دیافراگمی، طراحی انواع لوله شوک‌های بدون دیافراگم در حال گسترش است که در آن به جای دیافراگم از برخی از انواع شیرهای سرعت بالا استفاده می‌شود. در شیرهای جایگزین به جای دیافراگم، مهمترین فاکتور، سرعت باز شدن شیر می‌باشد [۴]. انواع مختلفی از این شیرها، برای ایجاد سرعت بیشتر پیشنهاد شده است؛ مانند شیرلاستیکی^۳ [۵]، شیر تک پیستونی [۶]، شیر دو پیستونی [۷]، شیر آستینی^۴ [۸]. استفاده از این شیرها، هنگامی به‌صورت ویژه سودمند است که نیاز به تست‌های تکرارپذیر و یا دستگاه خودکار باشد. با توجه به این‌که با افزایش زمان باز شدن شیر، فاصله تشکیل موج شوک از شیر بیشتر می‌شود [۹]؛ از این‌رو، چالش اصلی در لوله شوک بدون دیافراگم، رسیدن به زمان باز شدن مناسب در شیر پرسرعت، برای تشکیل موج شوک مناسب در یک طول مناسب می‌باشد. البته که بازشدن شیر از مرکز لوله، به یکنواختی موج کمک شایانی دارد و مقداری از تاثیر زمان

3- Rubber valve

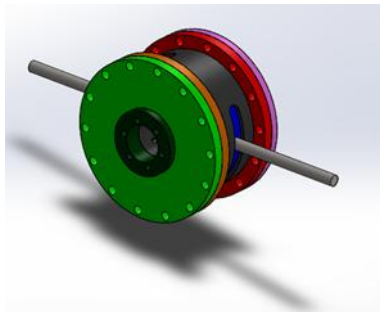
4- Sleeve valve

۱-۱- اجزای شیر و پیکره‌بندی آن

این مکانیسم از ۱۱ بخش تشکیل شده است. شکل ۴ نمای انفجاری از این مکانیسم را نشان می‌دهد. در این مکانیسم بخش‌های ۱-۲، ۲-۲، ۲-۳ و ۳-۲ بدنه اصلی این شیر می‌باشند. در داخل بخش‌های ۱-۲ و ۶ دو بلبرینگ به صورت انطباق پرسی قرار می‌گیرند. علت انتخاب این بلبرینگ‌ها تحمل نیروی محوری ناشی از فشار گاز و همچنین اصطکاک پایین در حرکت می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

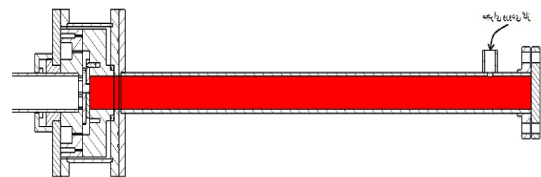
شکل (۴): اجزای تشکیل‌دهنده شیر KNTU2

(الف) نمای انفجاری

(ب) نمای مونتاژ شده، (ج) تصویر شیر ساخته شده.

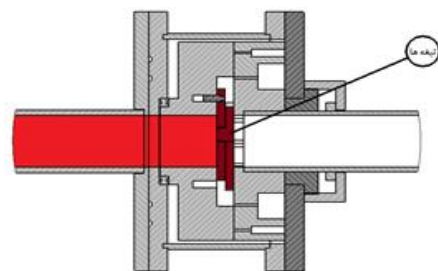
بخش ۱ بر روی بلبرینگ شماره ۱ (قطعه BallB.1) قرار می‌گیرد و دودسته (قطعه Handle) به داخل آن پیچ

به منظور افزایش فشار در این ناحیه و بخش انتهایی قسمت اندازه‌گیری به منظور قابلیت کاهش فشار در متحرک توسط فلنج‌های کور کن مسدود شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در ابتدا برای راه‌اندازی لوله شوک، گاز پرفشار از طریق شیر تعبیه‌شده وارد بخش محرک می‌شود و پشت تیغه‌های طراحی‌شده شیر ذخیره می‌شود تا فشار به اندازه مطلوب برسد.

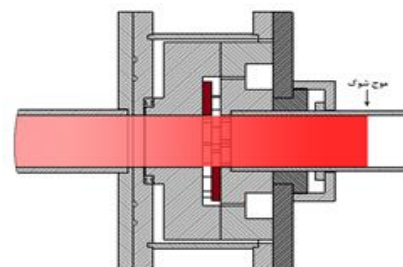


شکل (۲): شرایط اولیه هنگام پر شدن محرک.

شکل ۳- الف، نمای برش خورده از شیر KNTU2 را در حالتی که شیر بسته است، نشان می‌دهد. هنگامی که فشار در محرک به اندازه مطلوب رسید، با عمل کردن سیستم پنوماتیک شیر به عنوان محرک، دسته شیر چرخیده شده و باعث می‌گردد که تیغه‌ها در کسری از ثانیه به صورت دورانی حرکت کرده و موجب باز شدن دهانه شیر و تخلیه گاز متراکم به داخل بخش متحرک و ایجاد موج شوک در آن می‌شود. این امر در شکل ۳- ب نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

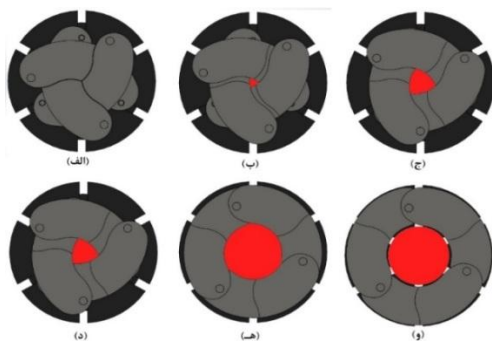
شکل (۳): نمای برش خورده شیر KNTU2

(الف) هنگامی که شیر بسته است،

(ب) هنگامی که شیر به طور کامل باز شده است.

که بخش درایور و درایون در یک راستا بوده و شیوه باز شدن آن برای تولید موج یکنواخت، باز شدن از وسط و به صورت متقارن باشد که در طراحی لوله شوک در نظر گرفته شده است که حتی این موضوع می‌تواند مقداری از کم بودن سرعت باز شدن شیر را هم جبران نماید. مهمترین ویژگی این شیر هم باز شدن متقارن از وسط در کسری از ثانیه می‌باشد که به تولید موج یکنواخت در زمان و فاصله کمتر کمک می‌کند.

ثانیا مزیت دیگر این سازوکار به‌عنوان شیر لوله شوک، قابلیت نصب تیغه‌های مختلف است که امکان باز شدن دهانه در حالت‌های مختلف امکان بررسی تاثیر آن در تشکیل و یکنواختی موج شوک را می‌دهد. ۳ نوع تیغه طراحی و ساخته شده است که علت استفاده از این تیغه‌ها تفاوت در نحوه باز شدن دهانه شیر می‌باشد. در طراحی‌های صورت گرفته دو نکته مدنظر بوده است. اولین نکته بررسی باز شدن دهانه شیر دقیقاً از مرکز شیر در حالتی که دهانه به‌صورت ترکیبی از سه منحنی باز شده (شکل ۵) و حالتی که شیر به‌صورت ترکیبی از شش منحنی (شکل ۶) باز می‌شود. بدین ترتیب امکان اثر شکل باز شدن دهانه بر روی موج شوک قابل بررسی است. (در شکل‌ها ناحیه قرمز نشانگر قسمت باز شده دهانه بوده که سیال پرفشار از آن عبور می‌کند). نکته بعد بررسی اثر باز شدن شیر به‌طور دقیق از مرکز شیر و باز شدن از قسمت‌های کناری بر روی موج شوک و یکنواخت شدن موج می‌باشد. علت بررسی این نکته پاره شدن برخی از دیافراگم‌ها از قسمت کناری دیافراگم در لوله‌های شوک دیافراگمی می‌باشد که موجب تغییر شکل موج شوک ایجاد شده می‌شود. به همین منظور دسته سوم از تیغه‌ها برای شیر طراحی و ساخته شده است (شکل ۷).



شکل (۵): نمایش شماتیک مجموعه سه تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام باز شدن از مرکز شیر، (الف) $t=0$ ms، (ب) $t=1.6$ ms، (ج) $t=3.2$ ms، (د) $t=4.8$ ms، (ه) $t=6.4$ ms و (و) $t=8$ ms.

می‌شوند. این دسته‌ها از طریق سیستم پنوماتیک که در بخش‌های بعد توضیح داده می‌شود، وظیفه تأمین نیروی لازم برای عملکرد شیر را دارند. به‌علت استفاده از پیکره‌بندی‌های متفاوت، بر روی قطعه شماره ۱ شیر به‌اندازه زاویه‌ای ۱۰۰ درجه ایجاد شده است که امکان چرخش بخش یک را فراهم می‌کند. بخش ۶ بر روی بخش یک توسط پیچ‌های آلن با قطر ۶ mm و طول ۲۵ mm بر روی بخش یک پیچ می‌شود. به‌منظور بستن دهانه شیر از یک مجموعه تیغه (قطعه Blade) استفاده می‌شود. این تیغه‌ها دارای دو پایه در دو سر خود می‌باشند. یکی از آن پایه‌ها در سوراخ‌های تعبیه‌شده در روی بخش یک قرار می‌گیرد. در ادامه بیشتر به بررسی این تیغه‌ها خواهیم پرداخت. پس از قرارگیری تیغه‌ها، بلب‌رینگ شماره دو بر روی بخش شش به‌صورت پرسی نصب شده و بخش ۵ بر روی آن قرار می‌گیرد. با این کار پایه دوم تیغه‌ها در شیرهای تعبیه‌شده بر روی بخش ۶ قرار می‌گیرد. سپس فلنج شماره ۳ بر روی بخش ۵ توسط قطعه واسط پیچ شده تا مانع از حرکت شعاعی قطعه شماره ۵ گردد. به‌این‌ترتیب 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.

۲-۱- مشخصه‌های ویژه شیر

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 بر اساس پیستون‌های حرکت سریع می‌باشد. در این‌گونه طراحی محرک پیرامون متحرک قرار می‌گیرد. حرکت پیستون در یک بازه کم موجب باز شدن کامل شیر می‌شود. عیب اصلی این روش چرخش ۱۸۰ درجه‌ای جریان گازی که موجب اغتشاشات چشمگیر در موج شوک می‌شود، می‌باشد [۱۰].

به‌منظور جایگزینی دیافراگم با سازوکاری که همانند آن عمل کند، می‌بایست چند موضوع مدنظر باشد. اول این‌که مقطع لوله می‌بایست در کسری از ثانیه باز شود. موضوع مهم‌تر این است که هندسه شیر می‌بایست به‌گونه‌ای باشد که اثر چشمگیری بر روی فرآیند موج شوک در طول باز شدن این مکانیسم نداشته باشد. بهترین حالت لوله آن است

شدند. با توجه به محدودیت‌های موجود از تیغه‌های تیتانیومی با ضخامت ۲ mm برای هنگامی که دهانه شیر از قسمت کناری باز می‌شود و از تیغه‌های آلومینیومی (شکل ۸) با ضخامت ۹ mm برای دیگر حالت‌ها بهره برده شد.

ثالثاً این شیر امکان تنظیم فشار بین ۳ تا ۲۰ bar را دارد که می‌توان موج‌های تکرارپذیر شوک با سرعت و فشارهای مختلف و دلخواه ایجاد نمود.

رابعاً این شیر به صورت کاملاً خودکار عمل کرده و به محض رسیدن فشار درایور و درپون به حد مورد نظر، عمل می‌کند.

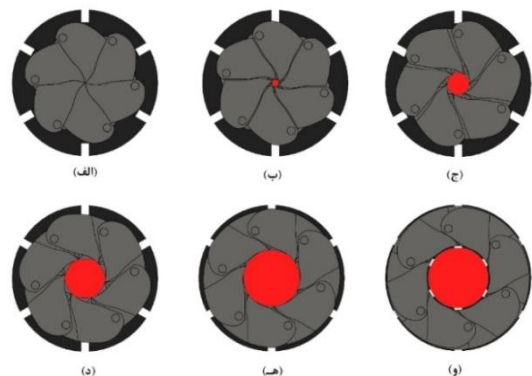


شکل (۸): تیغه‌های آلومینیومی.

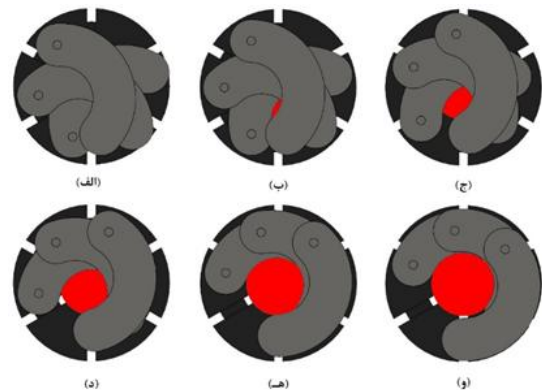
۴- تجزیه و تحلیل باز شدن شیر

برای باز نمودن سریع شیر مورد استفاده در لوله شوک، نیاز به فرآیندی 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 یک تن) 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 ...) [۱۱] 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 عبارت‌اند از: کمپرسور، واحد مراقبت کمپرسور، شیرهای کنترل، عملگر.



شکل (۶): نمایش شماتیک مجموعه شش تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام باز شدن از مرکز شیر، (الف) $t=0$ ms (ب) $t=1.6$ ms (ج) $t=3.2$ ms (د) $t=4.8$ ms (ه) $t=6.4$ ms (و) $t=8$ ms.



شکل (۷): نمایش شماتیک مجموعه سه تیغه‌ای برای بستن دهانه در زمان‌های مختلف هنگام باز شدن از قسمت کناری شیر، (الف) $t=0$ ms (ب) $t=1.6$ ms (ج) $t=3.2$ ms (د) $t=4.8$ ms (ه) $t=6.4$ ms (و) $t=8$ ms.

۳- جنس تیغه‌ها

با توجه به این که فشار کاری در لوله شوک در بازه ۳ تا ۲۰ بار می‌باشد. به منظور انتخاب جنس مناسب برای تیغه‌های مورد نظر به طوری که این تیغه‌ها تحت تنش ناشی از این فشار کاری و فشار محلی در هنگام باز شدن دهانه شیر، در ناحیه الاستیک باقی بمانند، لازم بود که جنسی انتخاب شود که تنش تسلیم آن بیشتر از این مقدار تنش (که بیشینه مقدار تنش است) باشد. به همین منظور از نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی استفاده گردید و با بررسی چندین نوع از جنس‌های مختلف، به منظور دستیابی به سرعت بالای باز شدن دهانه شیر و همچنین مقرون به صرفه بودن، دو نوع جنس آلومینیوم و تیتانیوم برای این کار انتخاب

اکنون با کمک قانون دوم نیوتون، با توجه به جرم پیستون و ممان اینرسی چرخشی بخش‌های متحرک دورن شیر که معلوم می‌باشد، شتاب حرکت پیستون را از رابطه زیر به دست آوردیم:

$$\Sigma F = ma + Ia / r^2 \quad (2)$$

در اینجا این نکته قابل ذکر می‌باشد 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 cm می‌باشد و جایگذاری آن در رابطه سینماتیک حرکت با شتاب ثابت، داریم:

$$\Delta x = 1/2 at^2 \quad (3)$$

$$t^2 = 2 \times 0.20 / 5784 = 0.0000691 \quad (4)$$

$$t = 0.0083s \quad (5)$$

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مدت زمان باز شدن شیر برابر با ۸/۳ ms می‌باشد.

نکته مورد توجه قرار گرفته در طراحی، محل و نوع قرارگیری سیلندر می‌باشد به نحوی که کورس حرکتی حداقل ممکن شود. با حل یک مسئله بهینه‌سازی، کمترین کورس در حالتی به دست می‌آید که سیلندر در $\alpha/2$ زاویه دوران شیر برای باز شدن به‌طور کامل می‌باشد. بر میله دوران عمود باشد (شکل ۹).

در این صورت، سر پیستون در هر باز شدن 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، حرکت خطی پیستون به حرکت دورانی شیر تبدیل می‌شود.



شکل (۹): تبدیل حرکت خطی پیستون به حرکت دورانی شیر.

کمپرسور

کمپرسورها در سیستم پنوماتیک وظیفه تأمین انرژی موردنیاز که از طریق تراکم سیال به دست می‌آید را انجام می‌دهند. در این سیستم از کمپرسوری با ظرفیت ۱۰۰ lit بر دقیقه استفاده گردید.

واحد مراقبت

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 پنوماتیکی و کاهش رطوبت موجود در هوای خروجی را بر عهده دارد.

شیر کنترل

برای به کار انداختن عملگر و کنترل روی جریان سیال متراکم سیستم، نیاز به شیر می‌باشد. در این سیستم از یک شیر پنوماتیکی ۳ به ۲ ساخت شرکت فستو استفاده شده است.

عملگر

نکته حائز اهمیت در انتخاب عملگر، تأمین سرعت موردنیاز برای باز کردن شیر می‌باشد. برای این منظور از جک ۳۲۰×۴۰ دوطرفه فستو استفاده شده است. این جک دارای قطر پیستون ۴۰ mm و کورس حرکتی ۳۲۰ mm می‌باشد که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

جدول (۱): مشخصات عملگر پنوماتیک.

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

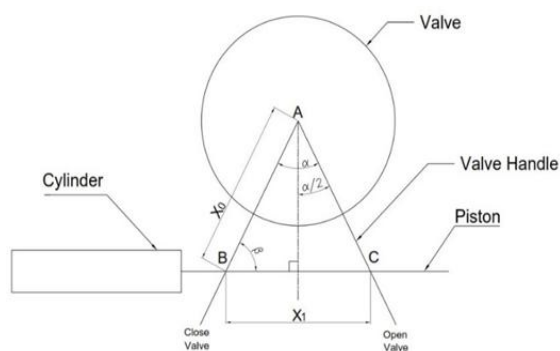
۴-۱- مدت زمان باز شدن شیر

با توجه به فشار داخلی پیستون به اندازه ۷ atm که با کمک اتصال به مخزن کمپرسور ایجاد می‌گردد و همچنین قطر پیستون ۴۰ mm، نیروی ایجاد شده وارد به پیستون محاسبه می‌گردد:

$$F = PA = 7 \times 10^5 \times \pi \times 0.02^2 = 879.2N \quad (1)$$

جدول (۲): مقادیر معلوم در محاسبات.

مقدار ثابت	نماد	متغیر
۵۸	β	زاویه اولیه بین راستای دسته و سیلندر
۱۷ Cm	x_0	طول اولیه دسته شیر
۶۴	α	حداکثر چرخش دسته شیر
۷ Bar	P	فشار سیستم پنوماتیک
۵۷۸۴ m/s	a	شتاب حرکت پیستون



شکل (۱۰): شکل‌واره شیر پر سرعت در حالت بسته و باز.

نمودار آبی رنگ در شکل ۱۱ از محاسبات تئوری و رابطه ۱۱ به دست آمده است که با توجه به چرخش ۶۴ درجه برای باز شدن کامل شیر، نشان می‌دهد که شیر در ۸ ms کاملاً باز شده است. اما زمان قرارگیری شیر در سه زاویه مشخص ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ درجه، به صورت تجربی و با یک حسگر اندازه‌گیری شده است که با + در نمودار نشان داده شده است. خط قرمز رنگ هم بر اساس شتاب به دست آمده تا ۲۰ درجه با کمک برنامه‌نویسی در متلب ترسیم شده است. این افت شتاب که در نمودار شاهد آن هستیم، به دو دلیل می‌باشد: ۱- کاهش فشار در سیلندر رخ می‌دهد؛ ۲- 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 به بعد شاهد افت شتاب می‌باشیم و شیر به جای ۸ ms در ۱۰ ms باز می‌گردد.

در ادامه با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون داریم:

$$V=at \quad (12)$$

۵- تحلیل نتایج تئوری و تجربی

در ادامه روش ترسیم نمودارهای زمان-زاویه شیر و زاویه-سرعت خطی و زاویه-سرعت زاویه‌ای شیر آمده است.

شکل ۱۰ شماتیک شیر و سیستم پنوماتیک را نشان می‌دهد. در مثلث ABC زاویه A، تا می‌باشد که مقدار آن از صفر تا α تغییر می‌کند. هنگامی که تا برابر صفر است، شیر کاملاً بسته و در حال پرشدن است و به محض رسیدن به فشار پیش‌بینی شده، مدار پنوماتیک عمل کرده و پیستون شروع به حرکت می‌کند و تا از صفر تا x_1 از صفر تا ۲۰ cm تغییر می‌کند. x_0 هم که ثابت و برابر با طول AB می‌باشد. β نیز زاویه راس B می‌باشد که همواره ثابت است. فاصله بین پیستون و مرکز دوران را هم r (طول موثر دسته شیر) فرض می‌کنیم که در ابتدا و انتها برابر با x_0 است و در بین مسیر کوچکتر از آن. با توجه به مطالب مذکور از قانون کسینوس‌ها داریم:

$$r^2 = x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta \quad (6)$$

همچنین با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون، داریم:

$$x_1 = 1/2 at^2 \quad (7)$$

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 ، r در هر زمان به دست می‌آید. حال با به دست آمدن r و قانون سینوس‌ها داریم:

$$\frac{r}{\sin \beta} = \frac{x_1}{\sin \theta} \quad (8)$$

$$\theta = \sin^{-1}(x_1/r \sin \beta) \quad (9)$$

با جاگذاری رابطه ۶ در ۹ داریم:

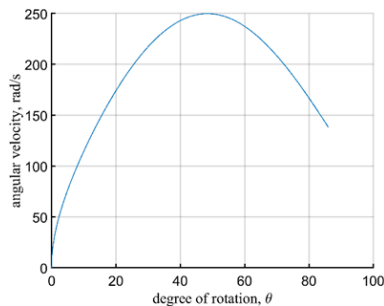
$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x_1}{\sqrt{x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta}} \sin \beta\right) \quad (10)$$

که با جاگذاری ۷ در ۱۰ داریم:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1/2 at^2}{\sqrt{x_0^2 + 1/4 a^2 t^4 - x_0 at^2 \cos \beta}} \sin \beta\right) \quad (11)$$

از این رابطه با توجه به مقادیر معلوم جدول ۲، نمودار زمان-زاویه شیر به صورت زیر به دست می‌آید:

تدریج با کم شدن زاویه و افزایش اختلاف بین راستاهای حرکت، سرعت زاویه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل (۱۳): مقدار سرعت زاویه‌ای شیر بر حسب درجه باز شدن.

۶- نتیجه‌گیری

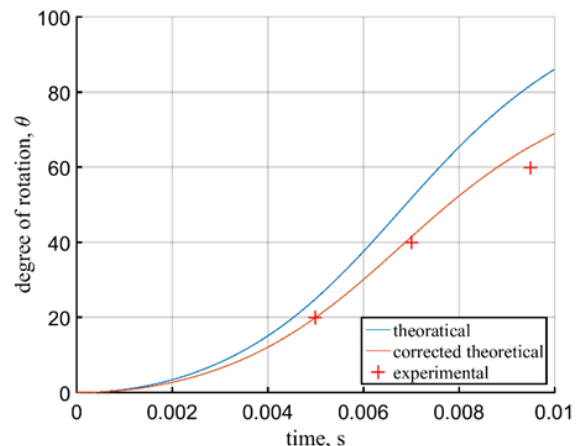
در مقاله حاضر، یک شیر با سرعت بالا با عملگر پنوماتیکی جایگزین دیافراگم در لوله شوک گردیده است. این طراحی در مقایسه با طرح‌های قبلا منتشر شده، امکان جایگزینی به جای دیافراگم در یک لوله شوک مستقیم و معمول را دارد. این شیر بین بخش پرفشار و کم‌فشار لوله شوک قرار گرفته و تقریباً مستقل از این دو بخش عمل می‌کند. این امر امکان استفاده از طول‌های مختلف بخش پرفشار و کم‌فشار با میزان فشار دلخواه در بازه مورد نظر را به ما می‌دهد. علاوه بر این، تغییر جهت حرکت گاز که در مدل‌های طراحی شده دیگر وجود دارد، در این شیر به وجود نمی‌آید و همچنین باز شدن شیر از مرکز لوله انجام می‌گیرد.

آزمایشات نشان داد که زمان باز شدن شیر ۱۰ ms می‌باشد و موج یکنواخت در انتهای بخش کم‌فشار تشکیل شده است. نوع عملکرد این شیر خودکار بوده و زمان انجام هر تست را در مقایسه با لوله شوک‌های دیافراگمی به صورت چشمگیری کاهش و در حد چند دقیقه برده است.

۷- مراجع

1. Zamani, J., Hosseinzadeh, R. "Manufacturing of Closed-End Gas Driven Shock Tube", aerospace mechanics 14, no. 2, pp. 27-42, 2017.
2. Bradley, I. N. "Shock Waves in Chemistry and Physics.", New York : John Wiley and Sons Inc., 1962.
3. Tranter, R.S., Brezinsky, K., Fulle, D. "Design Of A High-Pressure Single Pulse Shock Tube For Chemical

که از این رابطه، با جاگذاری t از عکس معادله ۱۱ نمودار زاویه- سرعت خطی به صورت زیر به دست می‌آید: شکل کلی این نمودار شبیه به نمودار زمان-زاویه شد، چرا که حرکت پیستون شتاب ثابت فرض شده است.

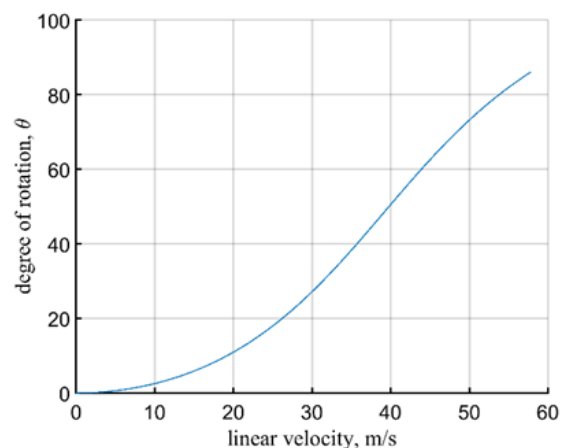


شکل (۱۱): رابطه بین زمان و زاویه باز شدن شیر.

در هر لحظه، سرعت خطی پیستون موجود می‌باشد، حالا با توجه به معلوم بودن t در هر زمان مشخص از رابطه (۱۱) و ۲ از رابطه (۶) داریم:

$$\omega = \frac{-v \sin(\theta + \beta)}{r} \quad (13)$$

با توجه به معادله فوق نمودار زاویه-سرعت زاویه‌ای به صورت شکل ۱۲ به دست می‌آید.



شکل (۱۲): مقدار سرعت خطی پیستون بر حسب زاویه باز شدن شیر.

همان‌طور که قابل پیش‌بینی هم بود و با توجه به شکل ۱۳، با افزایش سرعت خطی و عمود شدن راستای پیستون بر راستای دسته‌ی شیر، سرعت زاویه‌ای افزایش می‌یابد و به

8. Downey, M. S., Cloete, T. J., Yates, A. D. B. "A rapid opening sleeve valve for a diaphragmless shock tube", *Shock Waves* 21, pp.315-319, 2011.
9. Hanson, R.K., and Davidson, D.F. "Recent Advances in Laser Absorption and Shock Tube Methods for Studies of Combustion Chemistry", *Progress in Energy and Combustion Science* 44, pp.103-114, 2014.
10. Heufer, K.A., Olivier, H., Drumm, S., and Murrenhoff, H. "A New Fast Acting Valve for Diaphragmless Shock Tubes", 28th International Symposium on Shock Waves. Springer, pp.535-540, 2012.
11. Sivaraman, A., Ilango, D. "Introduction to Hydraulics and Pneumatics", delhi: phi learning, 2017.
12. Udagawa, S. "Development of a Small Diameter Shock Tube and Measurement of Basic Characteristics", *Transactions of JSME* 78, no. 785, pp.3648, 2012.
- Kinetic Investigations", *Rev.Sci. Instr* 72, pp. 3046-3054, 2001.
4. Abe, A., Sugahara, K. and Yamada, Y. "Rapid Opening Valve Assisted by Magnetic Force for a Diaphragmless Shock Tube", in 29th International Symposium on Shock Waves 1. springer, 2015.
5. Hariharan, M.S. "Diaphragmless Shock Wave Generators For Industrial Applications Of Shock Waves", *Shock Waves* 21, pp.301-306, 2011.
6. Saito, T. "Unsteady Convective Surface Heat Flux Measurements On Cylinder For CFD Code Validation", *Shock Waves* 5, no. 13, pp.327-337, 2003.
7. S. Udagawa, Ota, M. and Maeno, K. "Propagation Characteristics of the Shock Wave in Small Diameter Tubes at Atmospheric Initial Driven Pressure", 28th International Symposium on Shock Waves. springer, 2012.

