

یک شیر بازشونده سریع جدید برای لوله شوک بدون دیافراگم

محمدعلی صمیمی^۲ ID

جمال زمانی^۱ ID

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 8ms می‌باشد. این شیر خودکار دو قابلیت منحصر به فرد دارد: اول این که درایور 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

Jamal Zamani² ID

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

Mohammad Ali Samimi¹ ID

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

(Received:2018/3/1 ; Accepted:2019/1/16)

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

۱- مقدمه

به یکنواختی موج کمک شایانی دارد و مقداری از تاثیر زمان باز شدن 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 6mm و طول آن به نسبت قطر برابر ۴۱/۶ می‌باشد. درایور به طول 1m و دریون به طول ۲/۵m 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 به عنوان 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 KNTU2 مشاهده می‌شود.



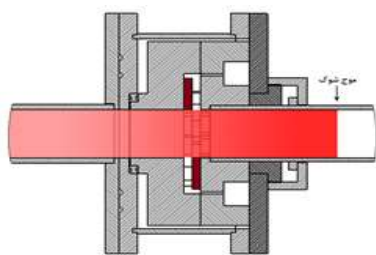
شکل (۱): تصویر و شکل‌واره لوله KNTU2.

در لوله شوک‌های معمول، دو ناحیه‌ی گاز پرفشار (درایور) و گاز کم فشار (دریون) داریم که با یک دیافراگم از هم جدا شده اند. 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، راحت ترین 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 به صورت 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 به صورت 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 باز شدن شیر از مرکز لوله،

3- Rubber valve

4- Sleeve valve



(ب)

شکل (۳): نمای برش خورده شیر KNTU2

(الف) هنگامی که شیر بسته است،

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

۱-۱- اجزای شیر و پیکره بندی آن

این مکانیسم از ۱۱ بخش تشکیل شده است. **Error!**

Reference source not found. نمای انفجاری از

این مکانیسم را نشان می دهد. در این مکانیسم بخش های

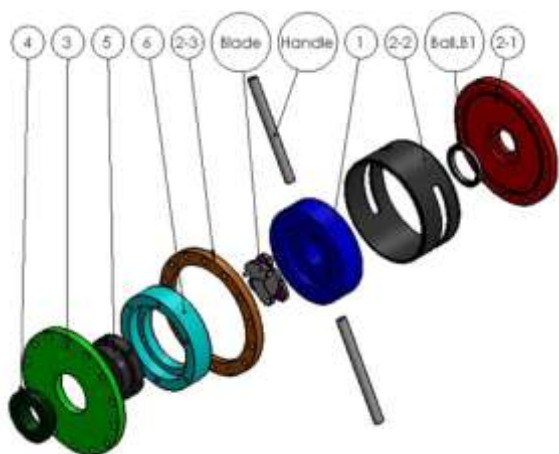
۱-۲، ۲-۲ و ۳-۲ بدنه اصلی این شیر می باشند. در داخل

بخش های ۱-۲ و ۶ دو بلبرینگ به صورت انطباق پرسی قرار

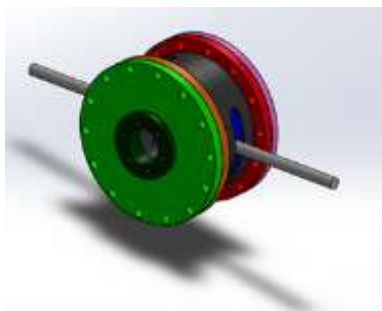
می گیرند. علت انتخاب این بلبرینگ ها تحمل نیروی محوری

ناشی از فشار گاز و همچنین اصطکاک پایین در حرکت

می باشد.



(الف)



(ب)

در شکل 1، بخش شماره ۱ نشان دهنده محرک، بخش شماره ۲ شیر چند زمانه، بخش شماره ۳ متحرک و بخش شماره ۴ نشان دهنده قسمت طراحی شده برای نصب سیستم اندازه گیری می باشد. همچنین بخش ابتدایی محرک به منظور افزایش فشار در این ناحیه و بخش انتهایی قسمت اندازه گیری به منظور قابلیت کاهش فشار در متحرک توسط فلنچ های کور کن مسدود شده اند. همان طور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می شود، در ابتدا برای راه اندازی لوله شوک، گاز پرفشار از طریق شیر تعبیه شده وارد بخش محرک می شود و پشت تیغه های طراحی شده شیر ذخیره می شود تا فشار به اندازه مطلوب برسد.



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

Error! Reference source not found. نمای

برش خورده از شیر KNTU2 را در حالتی که شیر بسته

است، نشان می دهد. هنگامی که فشار در محرک به اندازه

مطلوب رسید، با عمل کردن سیستم پنوماتیک شیر به عنوان

محرک، دسته شیر چرخیده شده و باعث می گردد که تیغه-

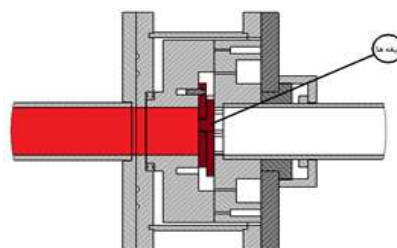
ها در کسری از ثانیه به صورت دورانی حرکت کرده و موجب

باز شدن دهانه شیر و تخلیه گاز متراکم به داخل بخش

متحرک و ایجاد موج شوک در آن می شود. این امر در

Error! Reference source not found. ب نشان

داده شده است.



(الف)

۲-۱- مشخصه های ویژه شیر

شیر طراحی و ساخته شده، ویژگی‌های طراحی قابل توجهی دارد که نیاز است به صورت خاص به آن پرداخته شود؛

اولاً طراحی لوله‌های شوک بدون دیافراگم غالباً بر اساس پیستون‌های حرکت سریع می‌باشد. در این گونه 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].

به منظور جایگزینی دیافراگم با مکانیسمی که همانند آن عمل کند، می‌بایست چند موضوع مدنظر باشد. اول این که مقطع لوله می‌بایست در کسری از ثانیه باز شود. موضوع مهم‌تر این است که هندسه شیر می‌بایست به گونه‌ای باشد که اثر چشمگیری بر روی فرآیند موج شوک در طول باز شدن این مکانیسم نداشته باشد. بهترین حالت لوله آن 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 مکانیسم به عنوان 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 به صورت ترکیبی از سه منحنی باز شده (شکل ۵) و حالتی که شیر به صورت ترکیبی از شش منحنی (شکل ۶) باز می‌شود. بدین ترتیب امکان اثر شکل باز شدن دهانه بر روی



(ج)

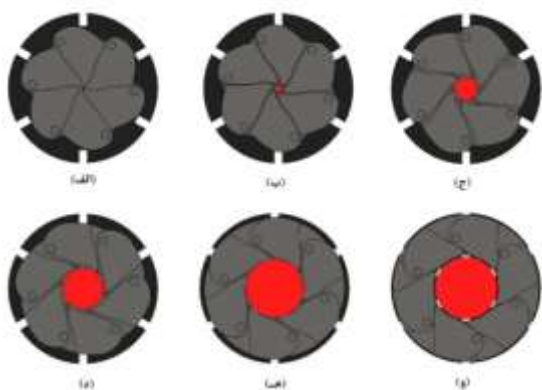
شکل (۴): اجزای تشکیل دهنده شیر KNTU2

الف) نمای انفجاری

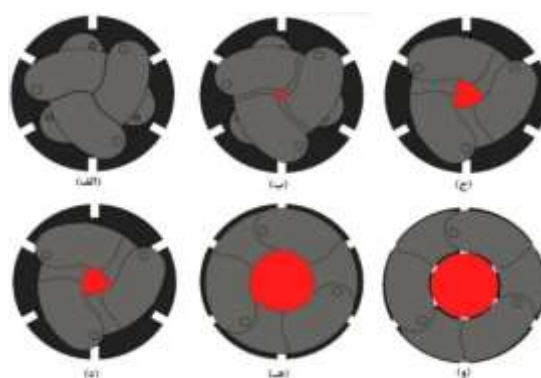
ب) نمای مونتاژ شده، ج) تصویر شیر ساخته شده.

بخش ۱ بر روی بلبرینگ شماره ۱ (قطعه BallB.1) قرار می‌گیرد و دودسته (قطعه Handle) به داخل آن پیچ می‌شوند. این دسته‌ها از طریق سیستم پنوماتیک که در بخش‌های بعد توضیح داده می‌شود، وظیفه تأمین نیروی لازم برای عملکرد شیر را دارند. به علت استفاده از پیکره‌بندی‌های متفاوت، بر روی قطعه شماره ۱ شیار به اندازه 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 6mm و طول 25mm بر روی بخش یک پیچ می‌شود. به منظور 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 به صورت پرسی نصب شده و بخش ۵ بر روی آن قرار می‌گیرد. با این کار پایه دوم تیغه‌ها در شیارهای 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. به این ترتیب با حرکت میله‌های تعبیه‌شده، دهانه توسط تیغه‌ها بسته خواهد شد. قسمت ۴ نیز در این شیر به منظور نگهداری کامل متحرک در داخل شیر در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور موقعیت-دهی دقیق متحرک در شیر، در داخل قطعه شماره ۵ یک پله تعبیه شده است تا لوله متحرک از بخش معینی جلوتر نرود.

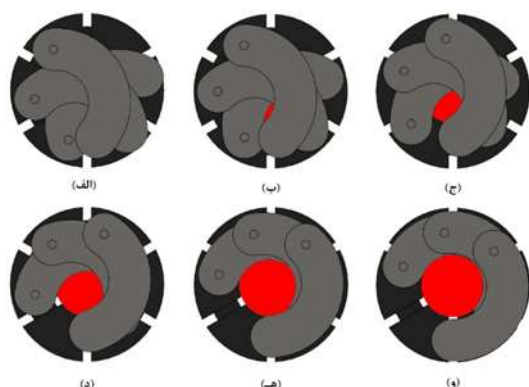
موج شوک قابل بررسی است. (در شکل‌ها ناحیه قرمز نشانگر قسمت باز شده دهانه بوده که سیال پرفشار از آن عبور می‌کند). نکته بعد بررسی اثر باز شدن شیر به‌طور دقیق از مرکز شیر و باز شدن از قسمت‌های کناری بر روی موج شوک و یکنواخت شدن موج می‌باشد. علت بررسی این نکته پاره شدن برخی از دیافراگم‌ها از قسمت کناری دیافراگم 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 (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 و) $t=8$ ms.



شکل (۷): 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.



شکل (۸): نمایش شماتیک مجموعه دو 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 و) $t=8$ ms.

۳- جنس تیغه‌ها

با توجه به این‌که فشار کاری در لوله شوک در بازه ۳ تا ۲۰ بار می‌باشد. به‌منظور انتخاب جنس مناسب برای تیغه‌های موردنظر به‌طوری‌که 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، به‌منظور دستیابی به سرعت بالای باز شدن دهانه شیر و همچنین مقرون‌به‌صرفه بودن،

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 100lit 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 ۴۰×۳۲۰ دوطرفه فستو استفاده شده است. این جک دارای قطر پیستون 40mm و کورس حرکتی 320mm می‌باشد که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.

جدول (۱): مشخصات عملگر پنوماتیک.

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

۴-۱- مدت زمان باز شدن شیر

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

دو نوع جنس آلومینیوم و تیتانیوم برای این کار انتخاب شدند. با توجه به محدودیت‌های موجود از تیغه‌های تیتانیومی با ضخامت 2mm برای هنگامی که دهانه شیر از قسمت کناری باز می‌شود و از تیغه‌های آلومینیومی (شکل ۸) با ضخامت 9mm برای دیگر حالت‌ها بهره برده شد.

ثالثاً این شیر امکان تنظیم فشار بین ۳ تا 20bar را دارد که می‌توان موج‌های تکرار پذیر شوک با سرعت و فشارهای مختلف و دلخواه ایجاد نمود.

رابعا 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 مکانیسمی می‌باشد 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، مناسب تر و مقرون به صرفه تر است.

اجزا این سیستم پنوماتیک عبارت‌اند از: کمپرسور، واحد مراقبت کمپرسور، شیرهای کنترل، عملگر

شیر.

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.

Error! Reference source not found. شماتیک

شیر و سیستم پنوماتیک را نشان می‌دهد. در مثلث ABC زاویه A، تتا می‌باشد که مقدار آن از صفر تا آلفا تغییر می‌کند. هنگامی که تتا 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 تتا از صفر تا آلفا و x_1 از صفر تا ۲۰cm 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:

$$r^2 = x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta \quad (۶)$$

همچنین با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون، داریم:

$$x_1 = 1/2 at^2 \quad (۷)$$

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

$$\frac{r}{\sin \beta} = \frac{x_1}{\sin \theta} \quad (۸)$$

$$\theta = \sin^{-1}(x_1/r \sin \beta) \quad (۹)$$

با جاگذاری رابطه ۶ در ۹ داریم:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x_1}{\sqrt{x_0^2 + x_1^2 - 2x_0x_1 \cos \beta}} \sin \beta\right) \quad (۱۰)$$

که با جاگذاری ۷ در ۱۰ داریم:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1/2 at^2}{\sqrt{x_0^2 + 1/4 a^2 t^4 - x_0 at^2 \cos \beta}} \sin \beta\right) \quad (۱۱)$$

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

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 بدست آوردیم:

$$\sum F = ma + Ia / r^2 \quad (۲)$$

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 ۲۰cm می‌باشد و جایگذاری آن در رابطه سینماتیک حرکت با شتاب ثابت، داریم:

$$\Delta x = 1/2 at^2 \quad (۳)$$

$$t^2 = 2 \times 0.20 / 5784 = 0.0000691 \quad (۴)$$

$$t = 0.0083s \quad (۵)$$

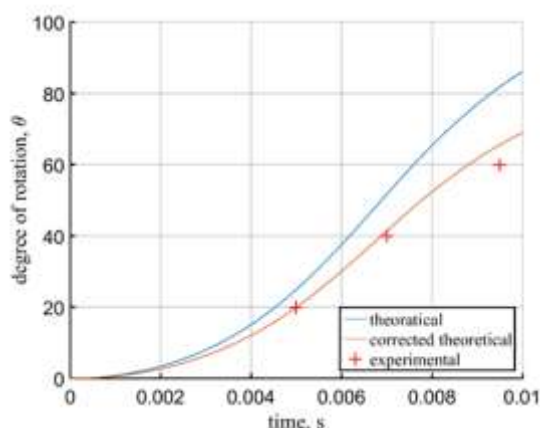
همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مدت زمان باز شدن شیر برابر با ۸/۳ ms می‌باشد.

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 به‌دست می‌آید که سیلندر در $\alpha/2$ زاویه دوران شیر برای باز شدن به‌طور کامل می‌باشد. بر میله دوران عمود باشد (شکل ۹).

در این‌صورت، 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



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

در ادامه با توجه به حرکت شتاب ثابت پیستون داریم:

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

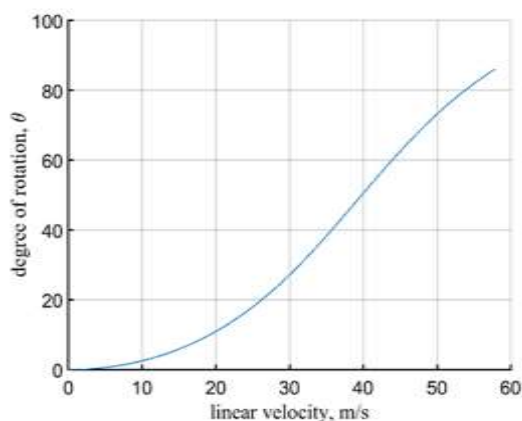
که از این رابطه، با جاگذاری t از عکس معادله ۱۱ نمودار زاویه-سرعت خطی به صورت زیر بدست می‌آید:

شکل کلی این نمودار شبیه به نمودار زمان-زاویه شد، چرا که حرکت پیستون شتاب ثابت فرض شده است.

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

$$\omega = \frac{-v \sin(\theta + \beta)}{r} \quad (12)$$

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



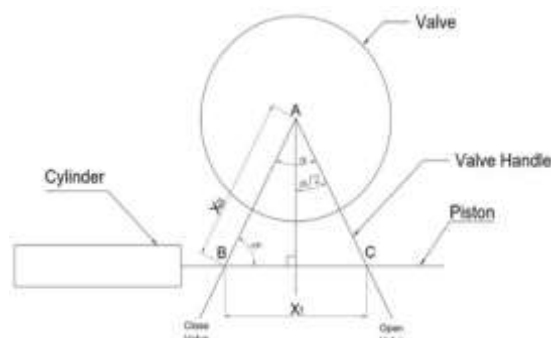
شکل (۱۲): مقدار سرعت خطی پیستون بر حسب زاویه باز

شدن شیر.

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

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 |
| 5784 m/s | a | شتاب حرکت پیستون |

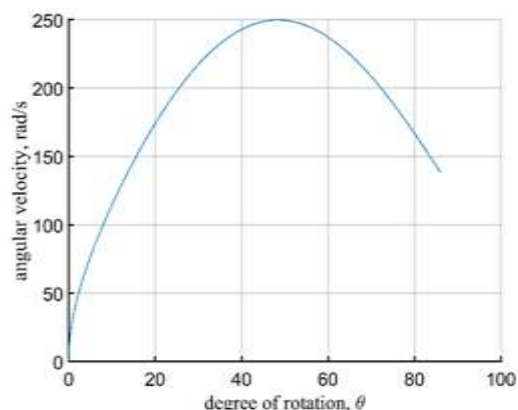


شکل (۱۰): شکل واره شیر پر سرعت در حالت بسته و باز.

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 8ms کاملاً باز شده است. اما زمان قرارگیری شیر در سه زاویه مشخص ۲۰، 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 8ms در 10ms باز می‌گردد.

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 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.
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.

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



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 قبلاً منتشر شده، امکان جایگزینی به‌جای 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 به‌وجود 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 به‌صورت چشمگیری کاهش و در حد چند دقیقه برده است.

۷- مراجع

