

طراحی و ساخت لوله شوک محرک گازی انتها بسته

رامیار حسینزاده^۲

جمال زمانی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵)

چکیده

لوله شوک یکی از تجهیزاتی است که با ایجاد اختلاف فشار بین دو ناحیه آن (درایور و دریون) و حذف دیافراگم، قابلیت تولید موج شوک با زمان خیز بسیار کوتاه را دارد. از مهم ترین کاربردهای لوله شوک می توان به کالیبراسیون حسگرهای فشار دینامیکی، بررسی پارامترهای موج شوک، بررسی رفتار انواع سازه ها و هم چنین بافت های حیاتی تحت بارگذاری دینامیکی اشاره کرد. در این تحقیق، طراحی و ساخت یک لوله شوک با قابلیت ایجاد فشار ماکزیمم ۱۰۰ bar (در ناحیه درایور) که معادل انفجار ۲۱ kg TNT در فاصله ۳/۳ m از محل قرارگیری دیافراگم است، در دستور کار قرار گرفت. از دیگر شاخص های مهم که به عنوان توانایی های این مجموعه در طراحی و ساخت مدنظر قرار گرفت، ایجاد موج شوک با حداکثر سرعت ۲/۵ ماخ و هم چنین امکان ایجاد موج انعکاسی با پیک فشار ۲/۶ MPa با سرعت ۲ ماخ است که البته با تغییر نوع گاز و ایجاد اختلاف دما بین درایور و دریون، این مقادیر به شدت قابل افزایش است. طراحی لوله شوک محرک گازی براساس سه ناحیه اصلی است که نهایتاً مجموعه ساخته شده دارای طولی برابر ۴/۵ m و قطری برابر ۳ اینچ می باشد. برای اطمینان از صحت عملکرد و بررسی نشی لوله شوک، آزمایش های استاتیکی و دینامیکی متعدد با انهدام دیافراگم های مختلف انجام گرفت.

واژه های کلیدی: لوله شوک، موج شوک، بارگذاری دینامیکی، کالیبراسیون، سامانه دوبل دیافراگم

Manufacturing of Closed-End Gas Driven Shock Tube

J. Zamani

R. Hosseinzadeh

Mechanical Engineering Department

Mechanical Engineering Department

Khajeh Nasir Toosi University

Khajeh Nasir Toosi University

(Received: 05/February/2016; Accepted: 05/March/2017)

ABSTRACT

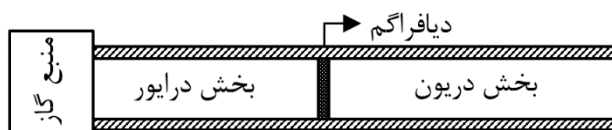
Shock tube is an equipment in which by creating a pressure difference between driver and driven sections and bursting membrane has the ability of generating shock wave with very short rise time. The most important applications of shock tube that can be mentioned are the calibration of dynamic pressure sensors, studying of shock wave parameters and the behavior of structures and also the vital tissues under dynamic loading. In this study, manufacturing of a shock tube with the ability of increasing pressure up to 100 bar (in driver section) which is equivalent to the explosion of 21 kilograms of TNT at a distance of 3.3 meters from the membrane's location was placed on the agenda. Other important manufacturing features that was considered as the abilities of this structure are making a shock wave with a maximum speed of 2.5 Mach and also the possibility of generating a reflection wave with a pressure peak of 2.6 MPa at the speed of 2 Mach, however by changing the type of gas and make a difference in temperature between the driver and driven sections, these values can be increased considerably. Gas driven shock tube design is based on three main parts, which eventually the structure is made in length and nominal diameter of 4.5 meters and 3 inches respectively. To ensure the accuracy of shock tube's performance and to investigate the system leakage some several static and dynamic experiments by bursting of different membranes was carried out.

Keywords: Shock tube, Shock wave, Dynamic loading, Calibration, Double Membrane system

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): ex.forminglab@kntu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: hrami45@gmail.com

دیافراگم^۳ بوده و معمولاً ماده ایجادکننده شوک، ماده منفجره است.



شکل (۱): اجزای اصلی لوله شوک محرک گازی.

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

از لحاظ تاریخی برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ هنشل^۴ [۱] یک لوله شوک دریون تراکم گازی از چوب ماهون^۵ و با سطح مقطع چهارگوش طراحی و ساخت. بعد از یک دهه، داف و بلکویل^۶ [۲] طرح یک لوله شوک دریون انفجاری را ارائه و با قطعات قابل تعویض کم‌قیمت آن را ساختند. طرح آن‌ها دارای قطرهای از ۰/۶ m تا ۲ m و طول ۳ m تا ۱۵ m بود که می‌توانست پیک‌های فشاری از ۷ MPa تا ۲۰۰ MPa را تولید نماید. از دهه ۱۹۶۰ به بعد، به‌صورت منظم از لوله‌شوک برای بررسی بعد شیمیایی احتراق‌های مخلوط هوا و سوخت به‌منظور بهینه کردن سوخت و موتورها استفاده می‌شود [۳].

پركوسكى^۷ به‌منظور شبیه‌سازی مدل انفجار چرخشی در محفظه احتراق موتور توربین از لوله‌شوک محرک گازی انتها باز که قطر و طول ناحیه پرفشار به‌ترتیب برابر ۴۴ mm و ۲۴۰ mm و قطر و طول ناحیه کم‌فشار به‌ترتیب برابر ۳۵ mm و ۱۰۴۰ mm و حداکثر فشار ناحیه درایور ۵۰ bar بوده، استفاده کرده است [۴]. یکی از نکات منفی این سامانه، پله‌ای بودن لوله‌شوک است که منجر به تشکیل غیریکنواخت موج شوک و افزایش طول دریون می‌گردد.

در سال ۲۰۱۲ تونل شوک انعکاسی پالسی T3 با درایور گاز ایده‌آل با آنتالپی بالا با نازل خروجی ۰/۶ m، طراحی و ساخته شده است. محفظه فشار مخصوص برای قرارگیری ۲۹ حسگر فشار پیزوالکتریک به‌منظور اندازه‌گیری فشار در ناحیه تست ساخته شد که امکان مشخصه‌سازی جریان مافوق صوت در تونل شوک T3 میسر می‌سازد. تونل شوک T3 قادر به تولید امواج شوک با رنج عدد ماخ ۲۵-۶، آنتالپی متجاوز از ۱۰ MJ/Kg و حداکثر فشار ۲۵۰ bar با زمان تست مفید ۲ ms

فهرست علائم و اختصارات

a	سرعت صوت (ms^{-1}) و قطر داخلی سیلندر (mm)
E	انرژی درونی سیال (kJkg^{-1}) و مدول الاستیسته (GPa)
p	فشار (kPa و bar)
R	ثابت جهانی گاز (Jkg^{-1}K)
t	زمان (ms)
T	دمای سیال (K)
u_j	سرعت ذرات سیال (ms^{-1})
V_s	سرعت جبهه شوک (ms^{-1})

علائم یونانی

α	ضریب انبساط حرارتی خطی ($1/\text{K}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
γ	نسبت گرمای ویژه (C_p/C_v)

زیر نویس‌ها

۱	ناحیه دریون قبل از پاره شدن دیافراگم
۲	ناحیه تحت تأثیر موج شوک
۲'	سطح تماس گاز درایور و دریون
۳	ناحیه تحت تأثیر موج انبساطی
۴	ناحیه درایور قبل از پاره شدن دیافراگم
۵	ناحیه تحت تأثیر موج شوک انعکاسی

۱- مقدمه

لوله شوک ابزاری با قابلیت تولید شوک با تکرارپذیری بالا است که می‌توان با استفاده از تجهیزات اکتساب داده در هر نقطه آن به مطالعه موقعیت مکانی شوک، سرعت، دما، فشار و شکل موج در داخل لوله پرداخت. این سامانه ابزاری مناسب برای بررسی پدیده‌های فیزیکی با نرخ تغییرات سریع و بارگذاری دینامیکی است. بنابراین، در بسیاری از کاربردها از آن به‌عنوان شبیه‌ساز موج انفجار یاد می‌نمایند. با اعمال برخی از تغییرات در طراحی آن می‌توان از لوله شوک به‌عنوان کالیبراتور حسگرهای دینامیکی استفاده نمود. یکی از متداول‌ترین انواع آن متشکل از دو قسمت اصلی بوده که شماتیکی از اجزای اصلی آن در شکل ۱ قابل ملاحظه است. در دیگر انواع لوله شوک دو قسمت درایور^۱ و دریون^۲ به‌صورت واحد و فاقد

3 - Membrane (Diaphragm)

4 - Henshall

5 - Mahogany wood

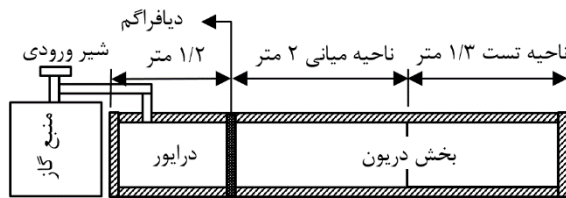
6 - Duff and Blackwell

7 - Perkowski

1 - Driver section

2 - Driven section

دستور کار قرار گرفت. به گونه‌ای که طراحی و نهایتاً لوله شوک می‌بایست از لحاظ هزینه ساخت قابل قبول باشد. همان گونه که قبلاً بحث گردید، لوله شوک مورد نظر مشتمل بر قسمت درایور، دیافراگم و دریون است که البته از تعدادی فلنج برای اتصال قسمت‌های مختلف استفاده شده است. در طراحی پیش‌روی قسمت دریون در شکل ۱ به دو قسمت مجزا تحت عناوین ناحیه میانی (بارل) و ناحیه تست تقسیم شده است. ناحیه تست محل نصب حسگرهای احتمالی است. شماتیکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده لوله شوک ساخته شده در شکل ۲ قابل ملاحظه است:



شکل (۲): شماتیکی از لوله شوک محرک گازی ۳ اینچی انتها بسته.

لوله شوک به علت توانایی تولید موج شوک با زمان خیز کوتاه و شبیه‌سازی شرایط کاری حسگر در محیط امن ابزاری مناسب برای کالیبراسیون دو مشخصه اصلی حسگر یعنی حساسیت و پاسخ فرکانسی است. از این‌رو برای تولید شوک ایده‌آل با قابلیت تکرارپذیری بالا و با هدف کالیبراسیون، سطح مقطع لوله ثابت بوده و در ناحیه تست، سوراخ‌های جانبی بر روی لوله با هدف بررسی حساسیت و در فلنج انتهایی با هدف بررسی پاسخ فرکانسی حسگر تعبیه شده است. لوله شوک سردکار با نسبت فشار ۱۰۰ در حالت معمولی و ۱۰۰۰ در صورت استفاده از پمپ خلأ با توانایی تولید موج شوک با پیک بیش‌فشار و سرعت‌های مختلف از چند صد kPa تا یک MPa و از دو تا پنج ماخ برای شبیه‌سازی پدیده انفجار و بارگذاری دینامیکی مدنظر قرار گرفت. از دیگر اهداف این طرح، افزایش انعطاف‌پذیری لوله شوک برای تحقیقات بعدی و امکان ارتقای آن بوده و برای این منظور در طرح سامانه مورد نظر، امکان تغییر طول درایور و دریون وجود داشته و همچنین فاکتورهایی برای کاهش اثرات منفی لایه مرزی و نحوه پاره‌شدن دیافراگم در نظر گرفته شده که در بخش‌های بعدی این موارد بیشتر بحث خواهد شد. برای بررسی مشخصه‌های انعکاس شوک، انتهای لوله شوک بسته بوده که در صورت تست ورق قابل

تا ۱۰ ms است. این شرایط با استفاده از نسبت سطح مقطع درایور به دریون که برابر ۲/۲۵ است، تخمین زده شده‌اند. طول قسمت دریون ۱۰۰ برابر قطر داخلی دریون ۱۲۷ mm است [۵].

نوع دیگر از لوله‌های شوک محرک گازی، لوله شوک احتراقی است که در آن به جای استفاده از گاز پرفشار، از اکسیژن و یک ترکیب قابل احتراق استفاده می‌شود. این نوع بیشتر در زمینه مهندسی شیمی و مکانیک سیالات برای الگوی احتراق ترکیبات گازی و سوخت جامد [۶]، بررسی ترکیبات شیمیایی حاصل از احتراق و انفجار [۷] و غیره استفاده می‌شود. این نوع لوله شوک‌ها از لحاظ ساختاری تفاوتی چندانی با لوله شوک‌های محرک گازی نداشته و تنها تفاوت عمده اضافه شدن چاشنی انفجاری عمدتاً الکتریکی برای شروع احتراق در ناحیه درایور است. از معایب این روش نسبت به سامانه محرک گاز پرفشار، می‌توان به اشتعال‌زا بودن و کاهش ایمنی سامانه، نیاز به کنترل حجم مولی دقیق بین سوخت و اکسیژن برای رسیدن به فشار مربوطه، تعبیه سامانه‌ای برای حذف اجباری دیافراگم در فشار درایور مشخص و عدم امکان استفاده از دیافراگم‌های غیرفلزی اشاره داشت.

جسوس ورس^۱ [۸] در ناحیه تست لوله شوک از یک کره پرشده با ژلاتین، جایگزین مجسمه مغز انسان استفاده کرد. شبیه‌سازی مذکور به منظور مطالعه برروی مکانیزم برخورد امواج انفجار و بررسی آسیب‌های مغزی خفیف بعد از برخورد انجام شده است. لوله شوک به کاررفته شامل مجموعه‌ای از حسگرهایی است که به منظور دریافت پروفایل‌های فشار انفجار بهینه‌سازی شده‌اند. طول این لوله شوک ۱۷/۶ m بوده که دیافراگم در فاصله ۴/۱ m از ناحیه درایور قرار می‌گیرد. در ناحیه تست پنجره شفاف برای عکس‌برداری با سرعت بالا تعبیه شده است. قسمت دریون دارای سطح مقطع مربعی بوده و محدوده پیک فشار شوک ایجادشده بین ۱۰ kPa تا ۲۰۰ kPa است.

۲- طراحی لوله شوک

در این تحقیق، لوله شوک محرک گازی ۳ اینچی با هدف کالیبراسیون حسگرهای فشار دینامیکی، شبیه‌سازی موج انفجار و تحقیق برروی تغییر فرم ورق با نرخ کرنش بالا در

که در آن ها، E ، ν ، α و ΔT به ترتیب مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، ضریب انبساط حرارتی خطی و تغییرات دمای سیلندر و a ، p_4 ، b و p_1 به ترتیب شعاع و فشار داخلی و شعاع و فشار خارجی هستند، ثابت های انتگرال گیری C_1 و C_2 با استفاده از شرایط مرزی در $r=a$ ، $r=b$ و $\sigma_{rr} = -p_4$ و $\sigma_{rr} = -p_1$ (۴) برابر هستند با [9]:

$$C_1 = \frac{1}{b^2 - a^2} (p_4 a^2 - p_1 b^2 + \frac{\alpha E}{(1-\nu)} \int_a^b \Delta T r dr), \quad (4)$$

$$C_2 = -p_4 a^2$$

در محاسبات مربوط به طراحی، از تئوری انرژی کرنش برشی ماکزیمم در واحد حجم به عنوان معیار تسلیم استفاده شده که براساس آن خواهیم داشت:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن، σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش های اصلی و σ_0 برابر نسبت تنش ماکزیمم S_{max} یا تنش تسلیم S_y برضرب اطمینان SF است. برطبق استاندارد ASME B31.8 در سامانه های گازی ضریب اطمینان نباید از ۵ کمتر باشد. پس از جای گذاری تنش های اصلی (روابط ۳-۱) برحسب پارامتر مجهول در رابطه (۵) و حل معادله، مجهول مورد نظر تعیین می گردد. در روابط فوق، قطر، ضخامت و جنس لوله مجهول هستند. بنابراین، در هر مرحله با فرض دو مجهول دیگر، مجهول سوم محاسبه می گردد. برای ساده سازی محاسبات برنامه ای برای تعیین ضخامت و جنس لوله شوک با استفاده از برنامه متلب توسعه داده شده که به کمک آن در هر مرحله پس از مشخص کردن مجهول، با حل معادله (۵) برحسب پارامتر مجهول به روش حداقل مربعات و با محاسبه حجم و ورودی اولیه برای چگالی در برنامه، وزن لوله تعیین می شود. محاسبه وزن لوله به ازای هر متر و استفاده از جدول وزنی لوله برای تعیین ضخامت، مشخصات ابعادی لوله و هزینه ضروری است. پس از محاسبه تنش های اصلی، با استفاده از معادلات سازگاری کرنش ها در سه جهت اصلی در مختصات استوانه ای و جابجایی شعاعی محاسبه می گردد [۹]. در طراحی لوله شوک فشار داخلی برابر ۱۵۰ bar و فشار خارجی ۱ bar و چون هیچ نیروی محوری به لوله شوک وارد نمی شود. بنابراین، مقدار P صفر در نظر گرفته می شود. در لوله محرک گازی، اگر از گاز نیتروژن به عنوان

جایگزینی است. در کنار سامانه ابزار تحلیلی برای صحت سنجی نتایج توسعه داده شده است. براساس خروجی و توانایی از پیش فرض شده برای لوله شوک، مهم ترین مباحث در طراحی آن عبارتند از: تعیین ضخامت، جنس و طول لوله که در زیر ملاحظه می گردد.

۲-۱- تعیین ضخامت و جنس

در صورت عدم توانایی تحمل بار داخلی توسط لوله شوک، ناپایداری در سامانه، نشت گاز و برهم خوردن ایمنی سامانه ایجاد می گردد، بنابراین، ضخامت و جنس در طراحی لوله شوک از اهمیت بالایی برخوردار است. فشار گاز در قسمت درایور لوله شوک تا حد مشخصی (تا زمان انفجار دیافراگم) با یک نرخ مشخص افزایش می یابد. این افزایش فشار به تعداد، ضخامت و جنس دیافراگم بستگی دارد. فشار ناحیه درایور، به عنوان فشار طراحی برای تعیین جنس و ضخامت لوله شوک در نظر گرفته شد، چراکه در عمل فشار این قسمت بیش تر از بارل و ناحیه تست بوده و همچنین فشار ضربه ای ناشی از موج شوک به دلیل میرایی در طول پیشروی لوله شوک، بسیار کمتر از فشار اولیه (در لحظه ترکیدن دیافراگم) است. در نتیجه حداکثر مقدار فشار در لحظه ترکیدن دیافراگم برابر با فشار اولیه (p_4) در ناحیه درایور است. تا قبل از انفجار دیافراگم، لوله درایور را می توان به صورت یک سیلندر جدار ضخیم انتها بسته که محور مولد آن موازی با محور z با طول مشخص L در نظر گرفت. با توجه به شکل ۳ سیستم بار توزیعی بر روی استوانه به گونه ای است که مؤلفه سوم بردار جابجایی z (راستای طول لوله) نسبت به دو مؤلفه دیگر جابجایی قابل چشم پوشی است، از این رو می توان مسئله را کرنش صفحه با تقارن محوری در نظر گرفت. برطبق تئوری الاستیسیته تنش های اصلی در مختصات استوانه ای به صورت روابط (۳-۱) قابل تعریف است [۹]:

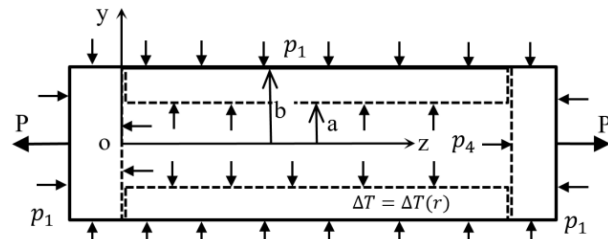
$$\sigma_{rr} = -\frac{\alpha E}{r^2(1-\nu)} \int_a^r \Delta T r dr + \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E}{r^2(1-\nu)} \int_a^r \Delta T r dr - \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} + \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) C_1 - \frac{C_2}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{p_4 a^2 - p_1 b^2}{b^2 - a^2} + \frac{P}{\pi(b^2 - a^2)} - \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} + \frac{2\alpha E}{(b^2 - a^2)(1-\nu)} \int_a^b \Delta T r dr \quad (3)$$

خارجی ۹۰ mm و داخلی ۷۰ mm و ضریب اطمینان ۵ انجام گرفته و نتایج در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار، با افزایش فشار داخلی سیلندر، تنش تسلیم لوله زیاد شده و هزینه خرید لوله فولادی افزایش می یابد. دومین موضوع این است که در فشارهای مختلف، نمودار تنش ماکزیمم بر سطح داخلی لوله نسبت به تغییرات دما دارای یک مقدار حداقلی است، به طوری که با افزایش و کاهش دما مقاومت لوله در برابر فشار داخلی کاهش یافته و باید از لوله با گرید بالاتر استفاده نمود. هرچقدر فشار داخل لوله بیش تر باشد، شیب این تغییرات ملایم تر خواهد بود. این مطلب به این صورت قابل توجیه است که در تغییرات دمایی، صفر تنش حرارتی برابر صفر بوده و با کاهش و افزایش دما میزان تنش حرارتی افزایش یافته و در نتیجه تنش ماکزیمم اعمال شده به سامانه افزایش می یابد و هرچقدر فشار داخلی سیلندر کمتر باشد، تأثیر تنش حرارتی بر تنش ماکزیمم نسبت به بارگذاری داخلی بیش تر بوده و شیب تغییرات افزایش می یابد. در شکل ۶، دو نمونه فولاد (AISI1006 و S52) با تنش تسلیم به ترتیب ۲۸۵ MPa و ۵۲۰ MPa با دو خط مستقیم نشان داده شده اند. از این رو بازه تغییرات دما برای فولاد S52 (جنس انتخابی لوله شوک) در فشار ۱۰۰ bar از -10°C تا $+22^{\circ}\text{C}$ است. با توجه به شکل در صورت افزایش و کاهش دمای درایور و یا استفاده از گاز هلیوم و احتراق اکسی استیلن و اکسیژن به عنوان گاز درایور فشار کاری لوله شوک را باید کاهش داد. آخرین مطلب این که هر دو نمونه فولاد با قطر اسمی ۳ اینچ، ضخامت ۱ cm و ضریب اطمینان ۵ قادر به تحمل فشار ۱۵۰ bar (فشار طراحی) در دمای محیط هستند. یکی از مسائلی که عملکرد لوله شوک را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد، نوع رژیم لایه مرزی است. تشکیل لایه مرزی اغتشاشی باعث غیریکنواختی موج شوک و سایر جریانات گازی ایجاد شده در لوله شوک خواهد شد. دو فاکتور کنترلی سرعت و ویسکوزیته سیال در عمل در اختیار طراح نیست، از این رو با کاهش ضریب اصطکاک سیال و سطح داخلی لوله نوع رژیم لایه مرزی را باید کنترل کرد [۱۰]. بنابراین، سطح داخلی لوله بدون درز S52-3 BK+S DIN2391 تا زبری سطح ماکزیمم $Ra=0.4\text{ }\mu\text{m}$ هونینگ شده است.

محرک استفاده شود، می توان از اثرات دما بر لوله شوک صرف نظر کرد، ولی در صورت استفاده از اکسی استیلن یا هلیوم، باید اثرات تغییرات دما را در محاسبه ضخامت لوله شوک در نظر گرفته شود، چون احتراق اکسی استیلن با افزایش و انبساط هلیوم با کاهش دما همراه خواهد بود.



شکل (۳): سیلندر انتها بسته تحت فشار داخلی و خارجی [۹].

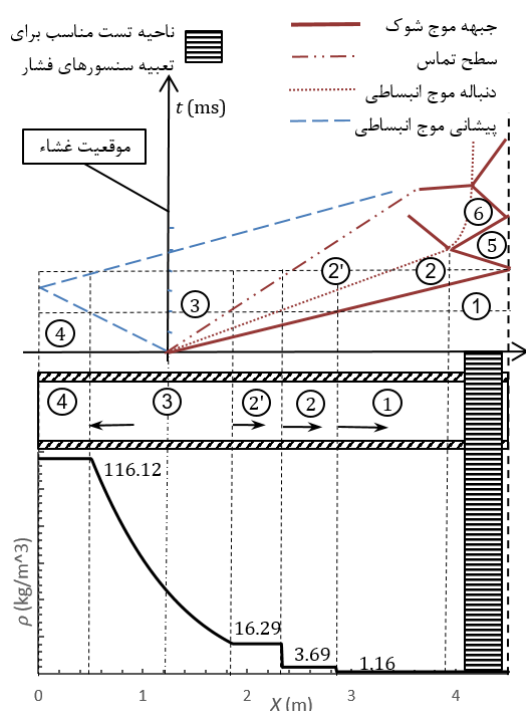
در مرحله نخست با فرض فولاد AISI 1006 با تنش تسلیم ۲۸۵ Mpa در قطر اسمی لوله های از ۲ الی ۵ اینچ و مجهول قراردادن ضخامت و وزن لوله برنامه متلب اجرا شده که نتایج در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به این نمودار، در فشار داخلی ۱۵۰ bar با افزایش قطر اسمی لوله شوک، ضخامت مورد نیاز برای تحمل فشار گاز تزریقی در ناحیه درایور و وزن لوله با شیب بیشتری افزایش یافته است که منجر به افزایش هزینه ساخت لوله شوک خواهد شد. بر طبق این نمودار، ضخامت لوله برای قطر خارجی ۹۰ mm و قطر اسمی ۳ اینچ (قطر لوله شوک طراحی شده) برابر ۱ cm است. با توجه به نمودار، جابجایی شعاعی به دست آمده از برنامه متلب برای سه قطر اسمی $\frac{1}{4}$ ، ۳ و ۴ اینچ در شکل ۵، جابجایی شعاعی و به طبع آن تنش در قطر داخلی لوله بیشتر از قطر خارجی است و تنش به تدریج تا سطح خارجی لوله کاهش می یابد. در نتیجه می توان قطر داخلی لوله $r=a$ را به عنوان معیار طراحی در محاسبه تنش تسلیم در نظر گرفت. در مرحله دوم، در صورتی که تغییر گاز درایور (هلیوم) و یا تغییر کاربری سامانه (احتراق اکسی استیلن)، دمای لوله تغییر کند، تأثیر دما باید بر تنش تسلیم و در نتیجه جنس فولاد بررسی شود. از این رو، با فرض ضریب انبساط حرارتی خطی فولاد، مدول الاستیسیته و ضریب پواسن به ترتیب $1/K \times 10^{-6}$ ، ۱۱۰ GPa و ۰/۲۹ با اجرای برنامه متلب و حل معادله (۹) با تغییر فشار داخلی، تغییرات تنش تسلیم لوله در بازه تغییرات دمایی -10°C تا 30°C بررسی شده است. در این قسمت، محاسبات با فرض قطر

دراپور و درپون در حال حرکت با سرعت u_p در پشت موج شوک و موج انبساطی در حال انتشار در بخش دراپور ایجاد می‌شود که در شکل ۷ نشان داده می‌شود. مسئله به صورت یک بعدی در نظر گرفته می‌شود. دو انتهای لوله شوک با فلنج مسدود شده که با برخورد امواج از سطوح انتهایی منعکس می‌شوند. فرض می‌شود که سیال تراکم‌پذیر و کامل است و همچنین سطح داخلی لوله هیچ‌گونه برآمدگی نداشته و سطح کاملاً پرداخت است. در نتیجه، لایه مرزی اغتشاشی تشکیل نخواهد شد. با استفاده از معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم و انرژی، معادله فشار شوک نرمال برای موج در حال حرکت در داخل گاز ایستا برابر است با [۱۱]:

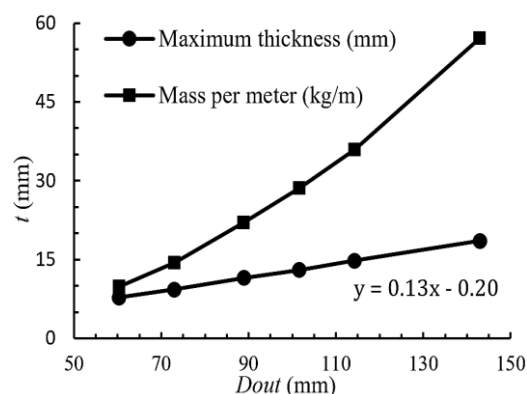
$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_s^2 - 1) \quad (6)$$

که در آن، اندیس ۱ به معنای شرایط بالادستی و اندیس ۲ شرایط پایین‌دستی موج شوک است. مقدار ماخ شوک برابر $M_s = \frac{V_s}{a_1}$ بوده و با توجه به معادله (۶)، سرعت موج شوک برابر است با:

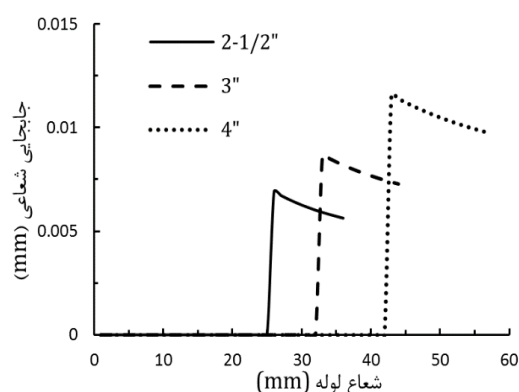
$$V_s = a_1 \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (7)$$



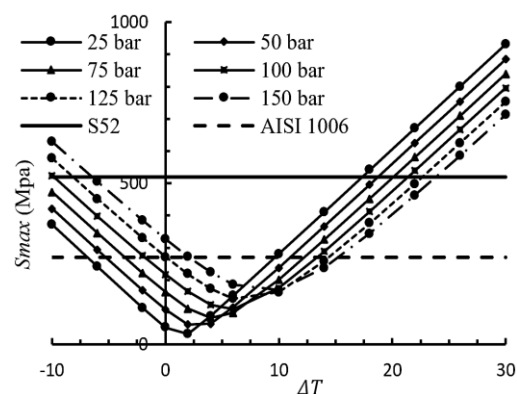
شکل (۷): نمودار تغییرات چگالی در طول لوله شوک و زمان در نسبت فشار $P_4/P_1=100$ و در زمان $t=2$ ms



شکل (۴): نمودار تأثیر قطر خارجی بر ضخامت و وزن لوله.



شکل (۵): نمودار جابجایی شعاعی نسبت به شعاع لوله.



شکل (۶): تأثیر دما در فشارهای داخلی مختلف بر تنش تسلیم.

۲-۲- تعیین طول درپون

به منظور تعیین طول لوله شوک از دو رویکرد تحلیلی و عددی استفاده شده است. در رویکرد تحلیلی، صورت مسئله، بررسی رفتار گاز کامل در داخل لوله بلند است که به وسیله دیافراگم به دو ناحیه مختلف تقسیم شده است. ناحیه دراپور شامل گاز با فشار بالا P_4 و ناحیه درپون با فشار پایین P_1 است. بعد از پاره شدن دیافراگم سه ناپیوستگی موج شوک نرمال در حال انتشار در ناحیه درپون با سرعت V_s ، سطح تماس بین گازهای

برای پیدا کردن موقعیت مکانی موج انبساطی و وسعت ناحیه تحت تأثیر آن و مشخصات فیزیکی در هر نقطه از آن، باید نموداری مشابه شکل ۷ تشکیل داده و مشخصات خطوط مستقیم را تعیین کرد. با کشیدن خط موازی با محور x می توان طول ناحیه تحت تأثیر موج را تعیین کرد. برای این منظور ابتدا شیب خطوط (که خواص فیزیکی بر روی این خطوط ثابت است) با توجه به رابطه $\frac{dx}{dt} = u - a$ تعیین شده و چون این خطوط مرکزگرا هستند، در نتیجه معادله خطوط و جای گذاری معادله (۹) به صورت زیر است:

$$x = (u - a_4 + \frac{\gamma - 1}{2}u)t \quad (11)$$

$$u = \frac{2}{\gamma + 1}(a_4 + \frac{x}{t}) \quad (12)$$

این معادله در ناحیه $-a_4 \leq \frac{x}{t} \leq u_3 - a_3$ برقرار است. در نهایت معادلات دو بخش فوق برای حل تحلیلی نزدیک به مسئله لوله شوک باهم ترکیب می شوند. با استفاده از معادلات (۱۰-۱۲) برای دنباله موج انبساطی داریم:

$$u_3 = \frac{2a_4}{\gamma_4 - 1} \left(1 - \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{(\gamma_4 - 1)/2\gamma_4} \right) \quad (13)$$

و چون $p_2 = p_3$ و $u_3 = u_2$ می توان معادلات (۸) و (۱۳) را مساوی هم قرار داده و در نتیجه قدرت موج شوک یعنی $\frac{p_2}{p_1}$ را بر طبق معادله (۱۴) محاسبه کرد:

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \left(1 - \frac{(\gamma_4 - 1) \left(\frac{a_1}{a_4} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}{\sqrt{2\gamma_1 \left(2\gamma_1 + (\gamma_1 + 1) \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \right)}} \right)^{\frac{-2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \quad (14)$$

معادله (۱۴) برای تصحیح ولتاژ خروجی حسگر فشار با فشار تئوریک به کار می رود. موج شوک با برخورد به سطح فلنج انتهایی ناحیه در یون منعکس می شود. با معلوم بودن مشخصه های موج برخوردی می توان خواص شوک منعکس شده را تعیین کرد. شرط مرزی این است که سرعت در نزدیکی دیوار پشت شوک انعکاسی برابر صفر باشد. منطقه تحت تأثیر موج انعکاسی با عدد ۵ در شکل ۷ مشخص شده است. چون انتشار شوک انعکاسی در داخل سیال در حال حرکت منطقه ۲ است،

مقدار a_1 سرعت صوت در گاز در یون است که بر طبق معادله $a = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\gamma RT}$ و شرایط اولیه لوله شوک محاسبه می گردد. سرعت سطح تماس گازهای درایور و در یون u_p برابر است با:

$$u_p = \frac{a_1}{\gamma} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1 + \frac{p_2}{p_1}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

در داخل حوزه تحت تأثیر موج انبساطی (ناحیه ۳ در شکل ۷)، ذرات گاز با سرعت $u - a$ حرکت می کنند. در منطقه ۴، گاز ساکن است؛ در نتیجه $u_4 = 0$ و پیشانی موج انبساطی با سرعت $u_4 - a_4 = -a_4$ در حال حرکت است. از این رو پیشانی موج انبساطی در نمودار مکان-زمان (شکل ۷)، به صورت خط مستقیم است. در داخل موج، حرکت موج با سرعت u انجام می شود که سرعت مثبت در جهت راست در نظر گرفته می شود. دما و پیرو آن سرعت صوت کاهش می یابد، چراکه پیشانی موج انبساطی سریع تر حرکت می کند. در نتیجه موج طول درایور به تدریج کشیده می شود. سرعت حرکت دنباله موج انبساطی نیز برابر $\frac{dx}{dt} = u_3 - a_3$ است. باید توجه داشت که اگر $u_3 \geq a_3$ باشد، در این حالت دنباله موج به سمت راست منتشر شده در حالی که موج به سمت چپ در حال پیشروی است. می توان مشخصات موج انبساطی به صورت خطوط مستقیم نشان داد که مقادیر u و a (در نتیجه ρ و T) گاز در امتداد هر خط ثابت می ماند. برای حل تحلیلی نزدیک به مسئله، موج انبساطی مقدار $u + \frac{2a}{\gamma - 1}$ در امتداد موج انبساطی ثابت در نظر گرفته می شود که با قراردادن شرایط منطقه ۴ در معادله فوق خواهیم داشت:

$$\frac{a}{a_4} = 1 - \frac{\gamma - 1}{2} \left(\frac{u}{a_4} \right) \quad (9)$$

که مقادیر a و u در حوزه موج انبساطی است و برای بقیه قسمت ها صحت ندارد. چون فرض می شود که جریان ایزوتروپیک است، در نتیجه فشار گاز در ناحیه موج انبساطی بر حسب مقدار u برابر است با:

$$\frac{p}{p_4} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \left(\frac{u}{a_4} \right) \right)^{2\gamma/(\gamma - 1)} \quad (10)$$

تماس گاز رخ دهد. در این حالت با فرض طول ۶۵ cm برای تعبیه حسگرهای فشار، سرعت شوک و انعکاس آن را از معادلات (۷) و (۱۵) و سرعت سطح تماس گاز را از معادله (۸) محاسبه و با رسم نمودار مکان- زمان طول دریون تعیین می‌گردد.

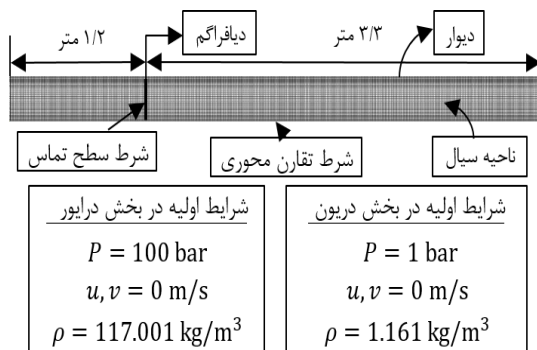
نمودار شکل ۷ تاریخچه تغییرات چگالی در طول لوله شوک را در نسبت فشار $P_4/P_1=100$ که در آن، P_4 برابر ۱۰۰ bar (فشار طراحی لوله شوک) و دمای محیط 27°C است و از فیلر در ناحیه درایور (طول درایور ۱/۲ m) استفاده نشود، به‌منظور تعیین تقریبی طول مطلوب ناحیه دریون، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، در مسئله لوله شوک چهار منطقه مجزا وجود دارد. منطقه ۱ ناحیه گاز کم‌فشار است که هنوز توسط موج شوک دچار اغتشاش نشده است. ناحیه ۲ که توسط سطح تماس گاز درایور و دریون به دو قسمت ۲ و ۲' تقسیم می‌شود، شامل گازی است که بلافاصله بعد از عبور جبهه شوک با سرعت ثابت ایجاد می‌شود. سطح تماس در میانه این ناحیه قرار می‌گیرد که این دو ناحیه از لحاظ دما و چگالی متفاوت هستند. منطقه بین پیشانی و دنباله موج انبساطی با ناحیه ۳ مشخص شده است. در این منطقه چون فرآیند انبساط به‌صورت آیزونتروپیک اتفاق می‌افتد، خواص جریان به‌تدریج تغییر می‌کند. منطقه ۴ حالت اولیه گاز در منطقه پرفشار است. ناحیه ۵ و ۶ نواحی تحت تأثیر انعکاس شوک از انتهای لوله شوک است. برای تعیین طول ناحیه دریون که خود به دو ناحیه بارل و تست تفکیک می‌شود، باید ابتدا به این نکته توجه داشت که قبل از اندازه‌گیری فشار موج شوک و انعکاس آن به‌وسیله حسگرها، نباید سطح تماس و انعکاس موج انبساطی با موج شوک دچار تداخل شوند. از طرفی، هر میزان گاز پرفشار در ناحیه درایور چگالی‌تر باشد، سرعت پیش‌روی سطح تماس و موج انبساطی بیشتر خواهد بود و در نتیجه تعامل با موج شوک و انعکاس آن زودتر اتفاق افتاده و طول ناحیه تست مناسب برای تعبیه حسگرهای فشار محدود می‌گردد. بنابراین حداکثر فشار در ناحیه درایور (۱۰۰ bar)، معیار طراحی طول ناحیه دریون قرار گرفت. از این‌رو، با توجه به شکل ۷، در صورتی که طول درایور برابر ۱/۲ m باشد، برای این‌که طول ناحیه تست در دسترس برای تعبیه حسگرها از ۰/۵۰ m کمتر نباشد، در نسبت فشار ۱۰۰ نباید مجموع طول بارل و ناحیه تست (ناحیه دریون) از ۳/۳ m

پس عدد ماخ برگشتی به‌صورت $M_R = \frac{u_R + u_2}{a_2}$ تعریف می‌شود. سرعت شوک انعکاسی توسط معادله زیر تعیین می‌شوند [۱۲]:

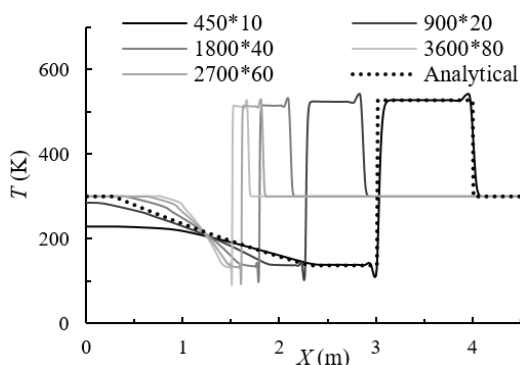
$$\frac{u_R}{a_1} = \frac{1 + 2 \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M_s^2 - 1)}{M_s} \quad (15)$$

حل تحلیلی مسئله لوله‌شوک پیچیده بوده و حل دستی آن عملاً امکان‌پذیر نیست، به‌همین دلیل با استفاده از برنامه متلب، برنامه تحلیلی برای حل مسئله و تعیین طول درایور و دریون توسعه یافته است. متغیرهای ورودی برنامه شامل زمان بعد از پاره‌شدن دیافراگم، فشار اولیه ناحیه پرفشار P_4 ، فشار اولیه ناحیه کم‌فشار P_1 ، دمای اولیه ناحیه پرفشار T_4 ، کم‌فشار T_1 و طول مؤثر ناحیه درایور و دریون است. ثابت‌های مسئله برای هوا شامل نسبت گرمای ویژه هوا با انحراف ۱٪ ثابت و برابر $\gamma=1.4$ فرض می‌شود و ثابت جهانی گاز برای گاز ایده‌آل $R=287/0.5 \text{ J/kg.K}$ است. خروجی‌های برنامه نیز در سرتاسر طول شوک با وارد کردن تعداد مش، به‌ازای هر یک سانتی‌متر از طول لوله شوک محاسبه می‌شوند. این خروجی شامل تغییرات سرعت صوت a در سیال در یک زمان مشخص، سرعت ذرات سیال u ، تغییرات فشار، چگالی و دما در نقاط مختلف لوله شوک می‌باشد. در این برنامه پس از تعیین شرایط اولیه (قبل از انفجار دیافراگم)، پیک فشار موج شوک P_2 با استفاده از معادله (۱۴) با استفاده از روش درونیابی درجه دو معکوس^۱ و با استفاده از یک جواب اولیه مشخص می‌گردد. پس از محاسبه مقدار P_2 و محاسبه سرعت بر طبق روابط یاد شده، موقعیت مکانی سه ناپیوستگی ایجاد شده بعد از انفجار دیافراگم (جبهه شوک و انعکاس آن، سطح تماس گاز درایور-دریون و دنباله و پیشانی موج انعکاسی) با استفاده از زمان ورودی مشخص می‌شوند. در نهایت متغیرهای خروجی برای هر نقطه (نود) محاسبه و به‌صورت ماتریس با فرمت برنامه اکسل ذخیره شده که امکان رسم نمودار و بررسی‌های بعدی را امکان‌پذیر می‌سازد. به‌منظور تعیین طول دریون، فرض می‌شود که طول درایور به‌اندازه کافی بلند بوده که در نتیجه اولین تعامل انعکاس شوک تا قبل از انعکاس موج انبساطی از انتهای درایور با سطح

تغییرات دما حاصل، در شکل ۹ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار، هرچقدر تعداد مش بیشتر باشد، پرش دما با عبور جبهه شوک در گاز در یون، تیزتر و دقت مدل عددی بهبود می‌یابد اما از طرفی، با افزایش تعداد مش، حل مسئله بسیار زمان‌بر خواهد بود. بنابراین تعداد مش ۵۶۰۰۰ برای انجام محاسبات بعدی در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ کانتور چگالی لوله شوک در درایور $1/2$ m را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، علاوه بر سه ناپیوستگی موج شوک، سطح تماس و موج ترقیقی (سرعت پیش‌روی شوک برابر $2/2$ ماخ)، چهارمین ناپیوستگی تشکیل لایه مرزی و گسترش آن در طول در یون است. بنابراین، استفاده از لوله با صافی سطح بالا برای جلوگیری از تغییر رژیم لایه مرزی به اغتشاشی، ضرورت دارد. با توجه به نتایج عددی، در زمان 4 ms بعد از انفجار دیافراگم، موج شوک انعکاس یافته و در 5 ms با موج انبساطی برخورد می‌کند که با توجه به شکل ۱۰، طول مناسب برای تعبیه ناحیه تست و حسگرهای فشار برای اندازه‌گیری انعکاس شوک در طول در یون $3/3$ m، برابر $0/6$ m است. بعد از این با تشکیل جریانات اغتشاشی، سرعت گاز به شدت کاهش یافته و با تشکیل موج ترقیقی (8 ms) جریانات گازی در داخل لوله شوک میرا می‌شوند.



شکل (۸): شرایط اولیه و مرزی در مدل عددی لوله شوک.



شکل (۹): تأثیر تعداد و اندازه مش بر دقت مدل عددی.

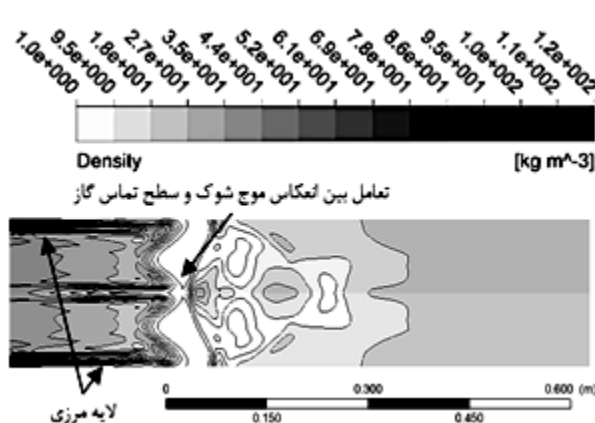
کمتر باشد که البته به دلیل اثرات انعکاس شوک و انشعاب آن و همچنین ایجاد زمان خیز به اندازه کافی طولانی بین پیک شوک برخوردی و انعکاسی توسط حسگر فشار فاصله 15 cm از انتهای ناحیه در یون در طراحی نیز باید در نظر گرفته شود. برای امکان تغییر طول در یون لوله شوک، در یون به صورت دو ناحیه مجزا بارل و تست به ترتیب با طول 2 m و $1/3$ m ساخته شده که با حذف لوله تست، می‌توان طول مؤثر در یون را کاهش داد. علاوه بر این، درگاه‌هایی نیز برای تعبیه حسگرهای اندازه‌گیری در ناحیه بارل پیش‌بینی شده است. برای افزایش انعطاف‌پذیری لوله شوک، اتصال قسمت‌های مختلف با استفاده از فلنج انجام گرفته است که با بازکردن پیچ‌های فلنج و تعویض گسکت می‌توان طول در یون را با توجه به کارکرد خاص لوله شوک کم یا زیاد کرد.

برای اطمینان از صحت نتایج تحلیلی، مدل عددی لوله شوک برای شبیه‌سازی انتشار موج شوک و انعکاس آن، توسعه داده شد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد تجاری CFD در نوار ابزار فلوئنت بر پایه حل عددی معادلات ناویر استوکس با روش حجم محدود انجام گرفته که روش حل صریح^۱، گذرا و بر پایه چگالی برای سیال لزج (لایه مرزی لمینار) تراکم‌پذیر است. مدل هندسی لوله شوک، دوبعدی بوده و به منظور کاهش محاسبات با اعمال تقارن محوری بر محور لوله شوک کاهش داده شد که هندسه، شرایط اولیه و مرزی آن در شکل ۸ نشان داده می‌شود. از المان چهار وجهی Quad برای مش‌زنی ناحیه سیال، و از ابزار سازگاری شبکه^۲ برای بهبود مش در نواحی با گرادیان شدید نظیر لایه مرزی استفاده شده است. برای تجزیه بردار شار از طرح تفاضل AUSM و برای گسسته‌سازی ترم‌های همرفت از دو روش جریان از بالادست^۳ درجه دوم و طرح MUSCL درجه سوم استفاده شد. در داخل سلول‌ها، گرادیان‌ها و مشتق‌ها با استفاده از اطلاعات مربوط به نقاط شبکه و رابطه گرین گوس^۴ محاسبه شده‌اند. سیال به کاررفته در طراحی نیتروژن با وزن مولکولی $28/02$ ، ایده‌آل و در دمای 300 K است. اندازه مش، نقش مهمی در دقت و تفکیک‌پذیری نتایج حاصله از مدل عددی ایفا می‌کند. به منظور بررسی این نقش، پنج اندازه مش مختلف در نسبت فشار $P_4/P_1=100$ به کار گرفته شد که نمودار

- 1 - Explicit
- 2 - Grid adoption
- 3 - Upwind
- 4 - Green-Gauss node-based

نمودار شکل ۱۱- الف حالتی از آزمایش لوله شوک را نشان می‌دهد که با جای‌گذاری فیلر، طول ناحیه مؤثر درایور به ۴۰ cm کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار پیشانی موج ترقیقی، در این حالت خاص بلافاصله قبل از رسیدن به ناحیه تست، به موج شوک می‌رسد که بیان‌گر طول درایور ایده‌آل برای استفاده در آزمایش‌های انفجار است (شکل ۱۲). وقتی دنباله ترقیقی به جبهه شوک می‌رسد، صدای (نویز) موج شوک کاهش می‌یابد که این وضعیت برای ساخت اتاقک مافوق صوت برای شبیه‌سازی و بررسی جریان هوا در جت‌های مافوق صوت و همچنین شبیه‌سازی الگوی رفتاری انفجار و اثرات انفجار بر ورق‌های مختلف در صنایع نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دامنه شوک با پیش‌روی موج ترقیقی و اثر فرسایشی آن بیشتر شده و در نتیجه پیک بیش‌فشار به تدریج کاهش می‌یابد. با تنظیم دقیق طول درایور، می‌توان به وضعیت ایده‌آل در شبیه‌سازی موج شوک دست یافت. موج شوک ایده‌آل وقتی اتفاق می‌افتد که پیک بیش‌فشار در ناحیه تست، قله‌ای نوک‌تیز داشته که مقدار بیش‌فشار، معادل موج سر تخت تولیدشده در درایور طول‌تر با تعداد دیافراگم برابر است. در صورتی که درایور خیلی کوتاه باشد، حالت نشان داده شده در شکل ۱۱-ب ایجاد می‌شود. در این حالت، طول درایور به ۲۰ سانتی‌متر کاهش یافته است. با توجه به نمودار، جبهه ترقیق قبل از رسیدن به ناحیه تست (ناحیه هاشورزده) در لحظه ۳/۳۵ ms در فاصله ۲/۸ m از موقعیت دیافراگم به جبهه شوک برخورد کرده است. در این حالت، پیک بیش‌فشار به دلیل تعامل دو موج، قبل از رسیدن به حسگر، به شدت کاسته و راندمان تست با لوله شوک کاهش می‌یابد (شکل ۱۲).

شکل ۱۲، نمودار فشار-زمان لوله شوک در لحظه انعکاس شوک از انتهای آن است. با توجه به نمودار، پیک فشار تحلیلی و عددی موج شوک در درایور ۱/۲ m به ترتیب برابر ۶۳۹ kPa و ۶۳۶ kPa است. در درایور ۰/۴ m، پیک بیش‌فشار موج شوک بدون تغییر مانده ولی جبهه انبساطی در پشت جبهه شوک قرار می‌گیرد. در درایور ۰/۳ m و ۰/۲ m متری به دلیل تعامل شوک و موج ترقیقی، پیک بیش‌فشار شوک به ترتیب به مقدار ۶۱۴ kPa و ۵۷۶ kPa کاهش می‌یابد.



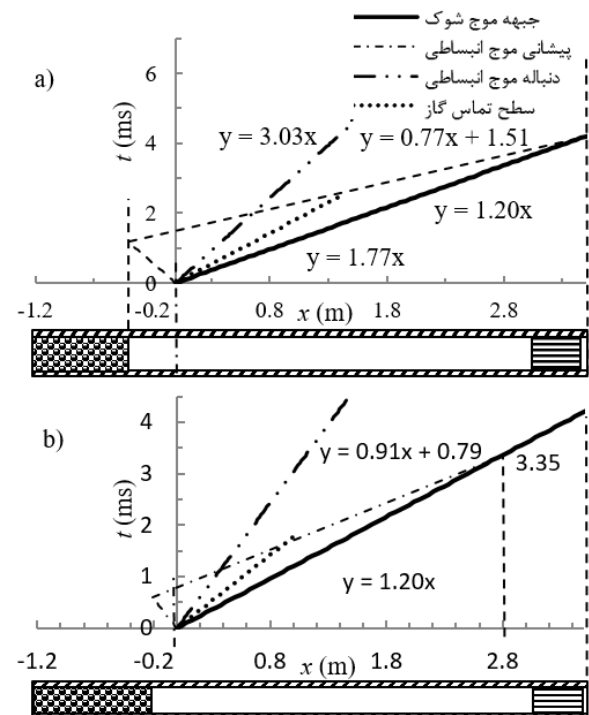
شکل (۱۰): کانتور تغییرات چگالی (بالا) و عدد ماخ (پایین) در طول لوله شوک در نسبت فشار $P_4/P_1=100$.

۳-۲- تعیین طول درایور

طول درایور، یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در تعاملات جریان‌های گازی در لوله شوک است. در لوله شوک ساخته شده، برای تغییر شکل نمودار فشار-زمان موج شوک، طول درایور حدود ۱/۲ m برآورد شد که امکان تغییر حجم گاز درایور با استفاده از فیلر^۱ وجود دارد. برای ساخت فیلر، از پلی‌اتیلن برای جلوگیری از آسیب و خراش بر سطح هونینگ شده لوله استفاده شد. این فیلر شامل چهار قطعه به طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری است که توسط پیچ M14 بر روی فلنج کور کلاس ۶۰۰ در ناحیه درایور جوش شده و به هم وصل می‌شوند. نمودارهای شکل ۷، ۱۱ و ۱۲، به نتایج تحلیلی و عددی به دست آمده برای بررسی اثر طول فیلرها بر تعاملات امواج تشکیل شده در داخل لوله شوک می‌پردازند. شکل ۷ حالتی از لوله شوک را نشان می‌دهد که هیچ فیلری در ناحیه درایور تعبیه نشده است. از این حالت بیشتر برای کالیبراسیون حساسیت حسگرهای فشار و بررسی نمودار فشار-زمان شوک برخوردی و انعکاسی در ناحیه تست استفاده می‌شود. در این حالت، فرصت زمانی کافی برای ثبت پروفایل شوک قبل از رسیدن موج انبساطی و ایجاد جریان اغتشاشی در اثر تعامل دو موج و در نتیجه افزایش نویز در فرکانس ولتاژ خروجی ایجاد می‌شود (شکل ۱۲). برطبق نمودار شکل ۷ در نسبت فشار ۱۰۰ درایور نیتروژن، اولین تعامل شوک انعکاسی و سطح تماس در ۴/۹۵ ms از لحظه انفجار دیافراگم رخ می‌دهد.

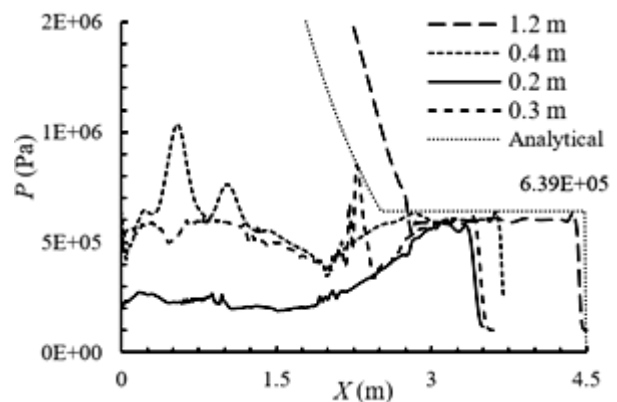
استفاده از سامانه دیافراگم دابل یکی از متداول ترین روش های موجود برای بهبود عملکرد ناحیه دیافراگم است. از مزایای این روش می توان به سادگی و امکان دستیابی به فشارهای بالا ترکیدن دیافراگم اشاره کرد. عملکرد این سامانه به این صورت است که با باز شدن شیر ورودی، فشار در ناحیه درایور تا زمانی که دیافراگم اول پاره شود، افزایش می یابد. بعد از انفجار دیافراگم اول، انفجار دیافراگم دوم به صورت ایده آل تری نسبت به تکنیک تک دیافراگم انجام می گیرد. از یک فلنج اورفیس به عنوان حایل بین دو ناحیه درایور و دریون استفاده شد. علت استفاده از فلنج اصلاح شده اورفیس، امکان تخلیه و تزریق گاز به ناحیه میانی است. بنابراین، فشار ناحیه میانی را می توان به گونه ای تنظیم کرد که بهترین الگوی پاره شدن دیافراگم دوم حاصل گردد. نتایج نشان می دهند که کمترین فشار گاز ناحیه میانی نسبت به دریون، می تواند الگوی یکنواخت تری از شکل گیری موج شوک در لوله شوک را ایجاد کند (شکل ۱۴).

دومین موضوع در طراحی ناحیه دیافراگم، ضرورت آب بندی کامل قبل از ترکیدن دیافراگم است. وجود نشتی در لوله شوک به خصوص در ناحیه درایور، مانع از رسیدن به پیک فشار و عدم پارگی دیافراگم و یا در صورت پارگی، باعث ایجاد جریانات اغتشاشی در دریون می شود که اثرات نامطلوبی بر جبهه شوک تشکیل شده خواهد گذاشت. به علت قرارگیری ورق بین دو فلنج نمی توان از سامانه فلنج-گسکت-فلنج استفاده کرد. در نتیجه از سامانه اورینگ برای آب بندی ناحیه مقسم درایور و دریون استفاده شده است. سه جنس الاستومر بر طبق استاندارد ASTM D1418 در کاربرد لوله شوک مد نظر قرار گرفت. در لوله شوک محرک گازی (نیترژن و هلیوم) از NBR، در کاربردهای احتراق و انفجار FFKM و در صورت استفاده از پمپ خلأ در قسمت دریون، باید از الاستومر FKM استفاده شود. آب بندی فلنج، جزو کاربردهای استاتیکی-محوری محسوب می شود که به منظور تنظیم بهتر فشار، برجستگی کمتر و تolerانس بزرگ تر، بهتر است از اورینگ با سطح مقطع بزرگ تر استفاده کرد. اما به دلیل محدودیت فضای پشتیبانی (از $90.7_0^{+0.08}$ mm تا 127 ± 0.4 mm میلی متر) برای تعبیه شیر اورینگ، بازه قطر اورینگ بین ۳ تا ۵ میلی متر انتخاب شد. در طراحی، از واشر حلقوی متریک، به دلیل در دسترس بودن و تنوع بالا (مطابق با استاندارد DIN 3771) استفاده شد. برای فشار $3/5$ MPa تا ۷ MPa، سختی اورینگ باید برابر 70 shore A باشد. اولین گام در طراحی شیر اورینگ، تعیین تعداد شیار



شکل (۱۱): تعاملات امواج ایجاد شده در لوله شوک،

(الف) درایور ۴۰ سانتی متری (ب) درایور ۲۰ سانتی متری.



شکل (۱۲): نمودار فشار- مکان در اندازه درایورهای مختلف.

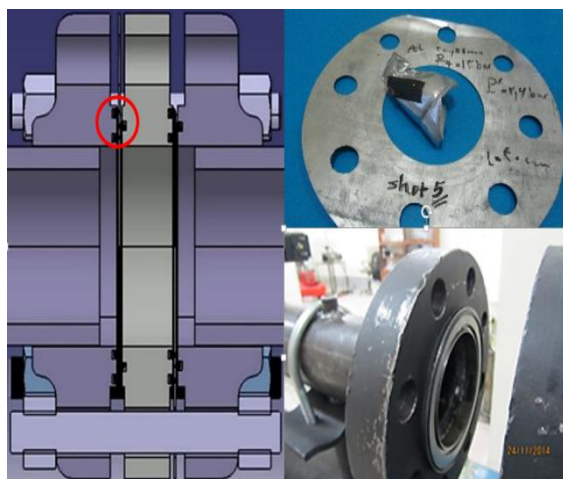
۴-۲- طراحی ناحیه دیافراگم

یکی از عواملی که بر شکل گیری یکنواخت موج شوک اثر می گذارد، الگوی پاره شدن دیافراگم است. برای بهبود عملکرد لوله شوک، باید عملکرد دیافراگم را بهبود داد. ترکیدن دیافراگم از کناره ها و یا ناحیه کلمپ، باعث ایجاد جریان غیرعمود و غیریکنواخت بر محور لوله شوک شده که بر روی صحت نتایج تأثیر منفی می گذارد. شکل ایده آل و غیرایده آل پاره شدن دیافراگم، در شکل ۱۳ نشان داده می شود. شکل مناسب ترکیدن دیافراگم، ایجاد ترک در وسط و رشد ترک از این ناحیه است. در این حالت شکل موج شوک خروجی یکنواخت تر و میزان اغتشاش بعد از ترکیدن دیافراگم کاهش می یابد.

دومین موضوع مورد بررسی در خصوص افزایش فشار P_4 افزایش ضخامت ورق مایلر است. با توجه به شکل ۱۵-ب، با افزایش ضخامت می‌توان به فشار P_4 بالاتری دست یافت. الگوی خط به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این موضوع است که شیب افزایش فشار P_4 تا یک حد مشخصی ($0/25 \text{ mm}$) بیش‌تر بوده و سپس کاهش می‌یابد. در ورق‌های ضخیم‌تر، پاره‌شدن مایلر به الگوی فلزی (آلومینیوم) نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین بهتر است که برای افزایش P_4 در دمای پایین، حداکثر از ورق به ضخامت $0/25 \text{ mm}$ با تعداد لایه بیشتر استفاده کرد. در صورتی که دمای گاز افزایش یابد، دیافراگم‌های فلزی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. استفاده از آلومینیوم به دلیل ایجاد ترکش، باعث آسیب دیدن تجهیزات اندازه‌گیری به خصوص دیافراگم حسگرهای پیزوالکتریک و آسیب دیدن فرد آزمایش‌کننده می‌شود. (شکل ۱۴) باتوجه به مشاهدات پاره‌شدن ورق آلومینیوم در ضخامت‌های کم به صورت ایده‌آل‌تری انجام می‌گردد.



شکل (۱۳): الگوی پاره‌شدن دیافراگم ورق مایلر، (چپ) ایده‌آل، (راست) غیرایده‌آل.



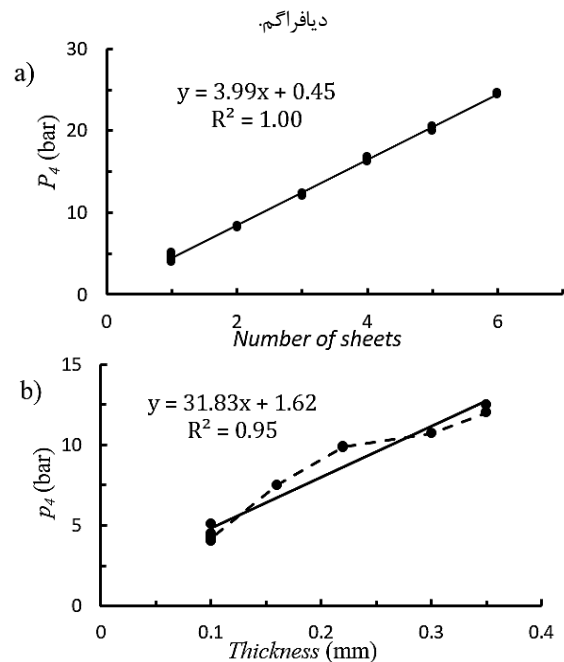
شکل (۱۴): نحوه جانمایی شیر و اورینگ در ناحیه دیافراگم و قرارگیری

است که در محدوده مکانی فلنج قابل تعبیه است. مزیت استفاده از چندین اورینگ، ایجاد حباب گازی بین دو اورینگ است (شکل ۱۴). هرچه تعداد این حباب‌های گازی بیشتر شود، عملکرد سامانه به‌منظور آب‌بندی بهبود می‌یابد. از طرفی، تعداد شیر به علت محدودیت مکانی فلنج و قطر استاندارد سطح مقطع اورینگ (که نباید کمتر از 3 mm باشد) محدود می‌شود. با توجه به نتایج، حداکثر و حداقل ۳ شیر با بازه عرض 3 mm الی 4 mm می‌توان ایجاد کرد. در طراحی شیر باید به فاکتورهای دما، تراکم اولیه، فشار لهیدگی و میزان پرشدگی شیر توجه نمود. برای طراحی شیر از قطر $3/5 \text{ mm}$ با استاندارد ISO3601 استفاده شد. شکل ۱۴ سامانه دابل دیافراگم و نحوه آب‌بندی در لوله شوک را نشان می‌دهد.

برای آزمایش‌های عملکردی لوله‌شوک، نخست با استفاده از پمپ هیدرواستاتیک با حداکثر فشار 250 bar ، با تزریق گاز تا فشار 150 bar ، میزان نشتی سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله دوم آزمایش‌های دینامیکی، انفجار دیافراگم با استفاده از دو جنس آلومینیوم و پلی‌استر مایلر انجام شد. نمودار شکل ۱۵-الف نشان‌دهنده خطی بودن افزایش فشار انفجار دیافراگم با تعداد ورق مایلر به کار برده شده است. این الگوی افزایش فشار انفجار دیافراگم، یکی از مزایای استفاده از مایلر به عنوان دیافراگم به شمار می‌آید. در اکثر آزمایش‌ها، شکل مناسب ترکیدن دیافراگم، یعنی ایجاد ترک در وسط و رشد ترک از این ناحیه مشاهده شده است (شکل ۱۳). در این حالت شکل موج شوک خروجی، دقیق‌تر و در نتیجه میزان اغتشاش بعد از ترکیدن دیافراگم کاهش می‌یابد. تکرارپذیری بالای فرآیند با استفاده از این ماده و مشخص بودن فشار احتمالی با افزایش تعداد ورق از مزایای دیگر استفاده از مایلر است. شیب خط به‌دست‌آمده برابر $75^\circ = \tan^{-1}(3.99)$ است. از معایب استفاده از مایلر این است که با افزایش دمای گاز، مدول الاستیسته آن کاهش یافته و درصد ازدیاد طول ورق افزایش می‌یابد که این تغییرات، عملکرد مناسب لوله شوکر مخدوش می‌کند، چراکه برای دستیابی به موج ایده‌آل، دیافراگم در کم‌ترین زمان ممکن، باید به‌طور کامل حذف شود تا جریان گردابه‌ای در اطراف دیافراگم ایجاد نشود. از طرف دیگر با کاهش دمای گاز درایور، می‌توان به پارگی آنی مایلر (افزایش مدول الاستیک و کاهش درصد ازدیاد طول) دست یافت. در احتراق اکسی‌استیلن و اکسیژن در لوله شوک بهتر است از دیافراگم‌های فلزی نظیر آلومینیوم استفاده شود.

۴ در شکل ۱۶ محل قرارگیری گیج فشار به منظور اندازه‌گیری فشار ناحیه درایور تا قبل از ترکیدن دیافراگم است. مقدار فشار درایور P_4 کمیتی مهم در صحت محاسبات است و از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که با استفاده از یک دوربین، تغییرات فشار گیج در طول تست ضبط شود. جزء ۵ محل اتصال لوله شوک به سامانه تزریق است، گاز پرفشار (کپسول یا کمپرسور) که می‌تواند به صورت گازهای منفرد (نیتروژن و هلیوم) و یا به صورت ترکیبی از گازهای مختلف (اکسیژن و اکسی‌استیلن) باشد، توسط رگلاتور فشار تا یک فشار مشخص تنظیم شده و با عبور از فلومتر به لوله شوک تزریق شود. با استفاده از شیر سلونوئیدی تزریق گاز به درایور کنترل می‌شود. ناحیه دریون از دو قسمت بارل جزء ۹ و ناحیه تست جزء ۱۸ تشکیل شده است. تقسیم دریون به دو ناحیه مجزا، امکان تغییر طول دریون با حذف ناحیه تست را فراهم می‌سازد، لوله شوک به گونه‌ای طراحی شده که با حذف جزء ۱۸، سایر اجزا (از جمله پورت‌های حسگر فشار، دما و سرعت) را بتوان بر جزء ۹ نصب کرد. پورت‌های متعددی برای قرارگیری سامانه‌های اندازه‌گیری در بارل پیش‌بینی شده است. پورت‌های ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ محل قرارگیری انواع تجهیزات اندازه‌گیری کمیت‌های از قبیل فشار، سرعت و دما جبهه شوک هستند. این درگاه‌ها با توجه به استاندارد آداپتور حسگرهای پیزوالکتریک اومگا طراحی شده‌اند [۱۳]. ویژگی دیگر این درگاه‌ها این است که این پورت‌ها به صورت سوراخ سرتاسری بر بدنه لوله ایجاد می‌شوند که امکان عبور سیم و یا میله‌های سوختی را فراهم می‌آورد که کارایی سامانه و امکان استفاده از لوله شوک در کاربردهای صنعتی دیگر فراهم می‌آورد. در صورت کاهش طول دریون با حذف جزء ۱۸، درگاه‌های ۱۴-۱۲ می‌توانند برای ثبت مشخصه‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گیرند. درگاهی ۱۱ محل قرارگیری گیج فشار برای اندازه‌گیری فشار ناحیه دریون قبل از انفجار دیافراگم P_1 است. این مقدار بر صحت محاسبات و کالیبراسیون حسگر تأثیر می‌گذارد.

وقتی دیافراگم پاره می‌شود، نیروی پیش‌ران برای ایجاد موج شوک، باعث ایجاد نیروی عکس‌العمل و شتاب در جهت عکس به لوله شوک می‌شود. علاوه بر این، ضربه‌ای در اثر برخورد موج شوک به فلنج انتهایی دریون ایجاد شده که مقدار نیروی اعمال شده به پیک بیش‌فشار و دوره زمانی (فرکانس) موج شوک بستگی دارد. برای جذب ضربه ناشی از موج شوک و نیروی عکس‌العمل در هنگام ترکیدن دیافراگم، از دو کمک‌فرد



شکل (۱۵): تأثیر افزایش تعداد و ضخامت ورق میلار بر فشار P_4 .

۳- ساخت و مونتاژ لوله شوک

بعد از طراحی قسمت‌های مختلف (درایور، دیافراگم، بارل و ناحیه تست)، موضوع مهم دیگر، نحوه اتصال آن‌ها به هم است. برای افزایش انعطاف‌پذیری سامانه از جمله باز و بسته شدن بخش انتهایی درایور به منظور جای‌گذاری فیلرها و کاهش و افزایش درایور، باز و بسته کردن ناحیه دیافراگم برای جای‌گذاری و برداشتن دیافراگم در هر آزمایش و کاهش و افزایش طول دریون از فلنج برای اتصال قسمت‌های مختلف استفاده شده است. براساس استاندارد ANSI B16.5، در دمای اتاق برای ناحیه پرفشار (درایور) فلنج کلاس ۶۰۰ و برای کاهش هزینه ساخت در ناحیه کم‌فشار (دریون) فلنج کلاس ۳۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. اجزای تشکیل‌دهنده لوله شوک در شکل ۱۶ نشان داده می‌شود. از فلنج کور ۳ اینچی، برای کور کردن نواحی انتهایی لوله شوک استفاده شد. فلنج در دو ناحیه (سطح خارجی و پیشانی لوله) با استفاده از جوش آرگون به بدنه لوله متصل شد. اتصال بین این فلنج با فلنج مقابل با استفاده از استاد بولت $3/4"$ انجام می‌گیرد. استفاده از سامانه فلنج-گسکت-فلنج آب‌بندی کاملی در این ناحیه ایجاد کرد. نشتی گاز در لوله عملکرد لوله شوک را به شدت کاهش می‌دهد، از این‌رو، گسکت‌هایی از جنس آربست تقویت‌شده با سیم فلزی به‌خصوص در فشارهای بالا ناحیه درایور پیشنهاد می‌شود. جزء

DPX-101 پدیده‌های با فشار دینامیکی در فرکانس کاری از کسری از یک هرتز تا ۲۵ kHz و همچنین پالس‌های فشاری با محدوده زمانی از چند میکروثانیه تا چند ثانیه را اندازه‌گیری می‌کنند. محدوده ولتاژ خروجی آن برابر ۵ ولت است. به‌منظور طراحی درگاهی حسگر، در صورتی که حسگر فشار در داخل قطعه با میزان تورفتگی L نصب شود، فرکانس تشدید و زمان خیز دریافتی از آن تغییر می‌کند. این تغییرات باعث محدود شدن طول L می‌شود. ستون گاز یا مایع در داخل حفره بر روی دیافراگم حسگر به‌صورت یک سامانه درجه دوم نسبت به فرکانس رزونانس عمل می‌کند. با استفاده از فرمول زیر که به‌عنوان فرمول عضو لوله شناخته شده، می‌توان نوشت [۱۳]:

$$f = v / 4L \quad (۱۶)$$

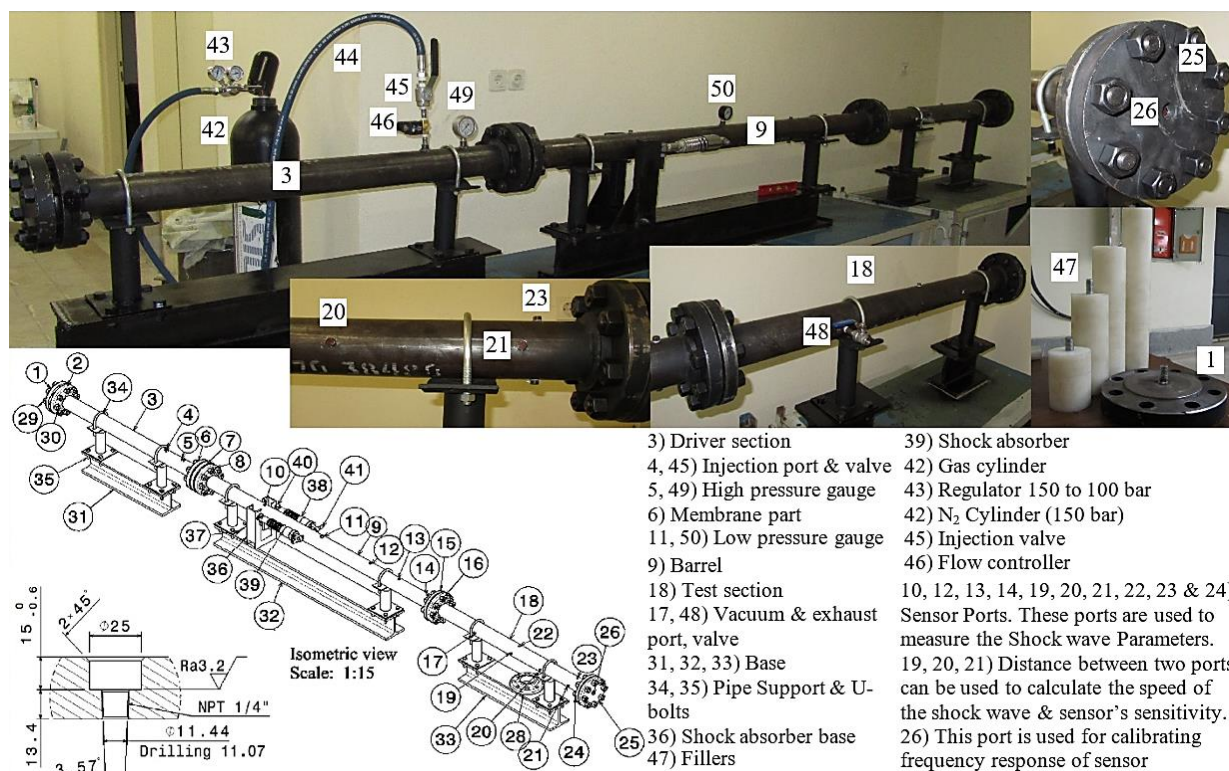
که در آن، f فرکانس رزونانس طول مسیر، v سرعت صوت در هوا (in/sec) و L طول حفره برحسب اینچ است. برای کاهش اثر طول حفره بر حساسیت فرکانسی حسگر باید عمقی که آداپتور حسگر در لوله شوک پیچ می‌شود، برابر یک سانتی‌متر باشد؛ بنابراین با توجه به ضخامت یک سانتی‌متری لوله، حسگر دقیقاً بر سطح داخلی لوله شوک مماس شده و در نتیجه اثر تورفتگی حسگر بر فرکانس و زمان خیز قابل صرف‌نظر کردن است. ولی در مورد سوراخی که در فلنج کور انتهایی در ناحیه تست برای نصب حسگر تعبیه شده، بایستی این اثر بررسی شود. با توجه به شکل ۱۶، ضخامت فلنج کور به‌اضافه طول سطح برآمده فلنج برابر $29/4 \text{ mm}$ است، در نتیجه طول حفره L (طول رزوه آداپتور 10 mm) برابر $19/4 \text{ mm}$ است. سرعت صوت در هوا در دمای 20°C برابر $348/95 \text{ m/s}$ است که با جای‌گذاری در معادله (۸)، فرکانس طبیعی برابر $4/5 \text{ kHz}$ است که در نتیجه فرکانس کاری حسگر به $1/5 \text{ kHz}$ کاهش می‌یابد. برای فرکانس طبیعی $4/5 \text{ kHz}$ زمان خیز به مقدار $68 \mu\text{s}$ افزایش می‌یابد. این زمان خیز قادر به اندازه‌گیری پیک موج فشار انفجار نیست. برای این منظور ابتدا با استفاده مته مربوط به استاندارد NPT سوراخ سرتاسری ایجاد کرده و سپس با استفاده از تیغچه فرز 25 mm تا عمق 15 mm سوراخ کاری انجام می‌گیرد. انتخاب قطر 25 mm با توجه به قطر آچار بوکس که برای بستن آداپتور حسگر به‌کار می‌رود، انجام گرفته و برای جلوگیری از کاهش مقاومت فلنج در برابر فشار شوک حداکثر تا عمق 15 mm ماشین‌کاری انجام گرفته است. دومین ابزار اندازه‌گیری فشار، گیج فشار برای اندازه‌گیری

استفاده شده است. این کمک‌فنها انرژی جذب‌شده از ضربات لوله شوک از طریق پایه کمک‌فتر به پایه لوله شوک انتقال می‌دهند. محل قرارگیری این کمک‌فنها می‌تواند در ناحیه درایور یا بارل باشد ولی به‌علت فضای آزاد بیشتر در قسمت بارل، این کمک‌فنها در دو طرف بارل موقعیت‌دهی شدند (شکل ۱۶).

جزء ۱۸ ناحیه تست لوله‌شوک است که با نصب حسگر در درگاهی‌های تعبیه‌شده در نقاط مختلف آن مشخصه‌های فیزیکی موج انفجار و پارامترهایی از قبیل حساسیت و پاسخ فرکانسی برای کالیبراسیون حسگر قابل دسترسی است. پورت ۱۷ دو وظیفه اساسی را در لوله‌شوک ایفا می‌کند، اول این که از این پورت برای تخلیه گاز درون قبل از تست با استفاده از پمپ خلأ و دومین کاربری آن تخلیه گاز بعد از انجام تست است. پورت‌های ۲۱-۱۹ محل قرارگیری حسگرهای فشار برای بررسی حساسیت حسگر معیوب و اندازه‌گیری فشار دینامیکی موج و درگاه‌های ۲۳-۲۲ با سوراخ سرتاسری محل نصب سایر تجهیزات اندازه‌گیری از قبیل سرعت و دما است که در صورت عدم استفاده هر یک از آن‌ها با استفاده از پلاگ فولادی با رزوه NPT و نوار تفلون مسدود می‌شوند. برای اندازه‌گیری حساسیت حسگر درگاهی‌های تعبیه‌شده بر روی بدنه لوله شوک دارای فاصله دقیقی نسبت به هم بوده که با توجه به خروجی دو حسگر فشار (و یا حسگر سرعت) فاصله زمانی که موج شوک از دو حسگر عبور می‌کند، اندازه‌گیری می‌شود؛ در نتیجه، با تقسیم‌کردن فاصله مکانی دو حسگر و فاصله زمانی اندازه‌گیری‌شده، می‌توان سرعت جبهه شوک را تعیین کرد. با محاسبه عدد ماخ شوک و جای‌گذاری در معادله
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{(\gamma + 1)}$$
 می‌توان پیک بیش‌فشار جبهه موج شوک را تعیین کرد. این مقدار با پیک بیش فشار به‌دست‌آمده از حسگر پیزوالکتریک مرجع و یا مقادیر تحلیلی مقایسه می‌شود. دومین پارامتر در کالیبراسیون حسگر فشار دینامیکی، پاسخ فرکانسی حسگر است. انعکاس شوک از قسمت انتهایی باعث ایجاد موج شوکی با خیز بسیار کوتاه و فرکانس بالا می‌شود، برای این منظور درگاهی در فلنج کور انتهایی ناحیه تست با توجه به شکل ۱۶ برای بررسی پاسخ فرکانسی حسگر تعبیه شده است. همان‌طور که اشاره شد، از استاندارد حسگر پیزوالکتریک DPX-101 شرکت اومگا برای طراحی درگاهی و آداپتورهای لوله شوک استفاده شد. حسگرهای مدل

آن‌ها، کوپلری فولادی از جنس A105 در کلاس ۳۰۰۰ (معادل ۲۰۰ bar) با رزوه مخروطی NPT ۱/۴" بر روی لوله - شوک جوش داده شده است.

فشار استاتیکی است؛ گنج‌های فشار براساس استاندارد ASME B40.100 برای اندازه‌گیری فشار قبل و بعد از انفجار دیافراگم در ناحیه درایور و دریون به کار می‌روند. برای ساخت درگاهی



شکل (۱۶): اجزای تشکیل‌دهنده لوله شوک محرک گازی انتها بسته ۳ اینچی طراحی و ساخته شده.

معیار طراحی طول دریون، اولین تعامل انعکاس شوک از انتهای دریون با موج انبساطی در نسبت فشار ۱۰۰ به گونه‌ای است که حسگرهای تعبیه‌شده قادر به اندازه‌گیری کمیت‌های دینامیکی شوک و انعکاس آن از انتهای لوله شوک باشند. برای این منظور با استفاده از مدل تحلیلی لوله شوک برای طول درایور ۱/۲ m متر و طول ۶۵ cm برای تعبیه حسگرهای فشار، طول دریون نباید از ۳/۳ m کمتر باشد. به منظور صحت‌سنجی با استفاده از مدل عددی، با فرض جریان لزج به دلیل تشکیل لایه مرزی لمینار، طول مناسب برای جای‌گذاری حسگرهای فشار به ۶۰ cm کاهش می‌یابد. برای افزایش انعطاف‌پذیری سامانه، دریون به صورت دو جزء مجزا (بارل ۲ و تست ۱/۳ m) ساخته شد که در مرحله نخست با چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ناحیه تست و در مرحله دوم با حذف ناحیه تست، موقعیت قرارگیری حسگرها به ترتیب به ۲/۷ m و ۲ m کاهش یافت. سومین موضوع کنترل پروفایل فشار با استفاده از فیلر برای کاهش

۴- نتیجه‌گیری

یک نمونه لوله شوک محرک گازی انتها بسته برای کالیبراسیون حسگرهای دینامیکی، شبیه‌سازی الگوی تشکیل موج شوک و بارگذاری دینامیکی بر روی سازه طراحی و توسعه داده شد. لوله شوک یادشده دارای چهار جزء اصلی درایور، دیافراگم، بارل و ناحیه تست است. اولین موضوع مهم در طراحی لوله شوک، تعیین ضخامت و جنس آن بوده که با در نظر گرفتن فشار گاز ناحیه درایور در لحظه پاره‌شدن دیافراگم به عنوان معیار طراحی، برای فشار ۱۰۰ bar و در محدوده دمایی ۵۰-۰ °C، ضخامت و تنش تسلیم لوله فولادی برای قطر اسمی ۳ اینچ به ترتیب برابر ۱ cm و ۵۰۰ MPa است. برای کاهش و کنترل اثرات لایه مرزی در لوله شوک سطح داخلی آن تا سطح $Ra=0.4 \mu m$ هونینگ شده است. دومین گام در طراحی، تعیین طول دریون (بارل و تست) و درایور است.

11. B. M. Genick, "Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics, Minneapolis", USA, pp. 25-115, 2007.
12. J. Belanger, "Studies Of Mixing and Combustion in Hypervelocity Flows with Hot Hydrogen Injection", Ph.D Thesis, California Institute of Technology, 1993.
13. High-Frequency pressure sensor. DPX101, Accessed 27 December, 2014;
<http://www.omega.com/pptst/DPX101.html>.

طول درایور است. با توجه به نتایج در درایور $1/2$ m در نسبت فشار ۱۰۰، پیک بیش فشار شوک در دو مدل تحلیلی و عددی به ترتیب 639 MPa و 636 MPa بود که با کاهش طول درایور به $0/2$ m در اثر تعامل شوک و موج انبساطی به 537 kPa کاهش می یابد. چهارمین موضوع، طراحی ناحیه دیافراگم است که برای بهبود عملکرد آن از سامانه دیافراگم دوپل و ضرورت آب بندی کامل در این ناحیه، فلنج ها با استفاده از سامانه اورینگ بازطراحی شده اند. بر طبق نتایج تجربی، مایلر با داشتن الگوی خطی ترکیدن دیافراگم برای آزمایش های لوله شوک در دمای محیط پیشنهاد می شود.

۵- مراجع

1. B. Henshall, "On Some Aspects Of The Use Of Shock Tubes In Aerodynamic Research", HM Stationery Office, pp. 4-7, 1957.
2. R. E. Duff, A. N. Blackwell, "Explosive Driven Shock Tubes, In Review Of Scientific Instruments", pp. 579-586, 1966.
3. A. C. Courtney, L. P. Andrusiv, M. W. "Courtney, Oxy-Acetylene Driven Laboratory Scale Shock Tubes For Studying Blast Wave Effects, Review Of Scientific Instruments", Vol. 83, 2012.
4. W. Perkowski, A. Irzycki, M. Kawalec, "Measurements of Pressure in Front of Shock Wave - Assessment of Methodology Influence on the Measurement Results on the Basis of Experiments with the Shock Tube", Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 4, 2013.
5. D. R. Pinto, T. Marcos, V. Galvão, A. Oliveira, J. Chanes Jr, M. Minucci, P. Toro, "Flow Characterization of the T3 Hypersonic Shock Tunnel, in 28th International Symposium on Shock Waves", pp. 547-553, 2012.
6. U.-K. Hsu, "Numerical and Experimental Investigation Of A Supersonic Flow Field Around Solid Fuel on an Inclined Flat Plate, Modelling and Simulation In Engineering", Vol. 4, pp.1-10, 2009.
7. H. Her, A. Courtney, M. Courtney, "Quantifying Momentum Transfer Due to Blast Waves from Oxy-Acetylene Driven Shock Tubes, Air Force Academy Colorado Springs CO", Vol. 9, pp.0704-0188, 2012.
8. J. M. Varas, M. Philippens, S. Meijer, A. Van Den Berg, P. Sibma, J. Van Bree, D. De Vries, "Physics of Ied Blast Shock Tube Simulations for Mtbi Research, Frontiers in Neurology", Vol. 2, 2011.
9. P. Boresi, R. J. Schmidt, O. M. Sidebottom, "Advanced Mechanics of Materials", pp. 389-422: Wiley New York, 1993.
10. J. Anderson, "Fundamentals of Aerodynamics", pp. 437-847: McGraw-Hill, 2003.