

مطالعه تجربی اثر ضخامت دیافراگم بر موقعیت تخت شدن موج شوک در لوله شوک گازی

جمال زمانی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۱۰)

فروغ سردارزاده^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

لوله شوک یکی از تجهیزاتی است که با ایجاد اختلاف فشار بین دو ناحیه آن (درایور و درایون) و حذف دیافراگم، قابلیت تولید موج شوک با زمان خیز بسیار کوتاه را دارد. در این تحقیق موج شوک صفحه‌ای و فاصله‌ایجاد آن در طول بخش درایون مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. با استفاده از سه حسگر فشار پیزو رزیستیو، فشار موج شوک در مقاطع مختلف در طول لوله شوک و همچنین در فاصله‌های شعاعی مختلف اندازه‌گیری شد. این آزمایش‌ها با سه دیافراگم دارای ضخامت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ mm از جنس مایلر تکرار شد. نتایج آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار TRAWW که نرم‌افزاری برای پردازش سیگنال‌های حسگر فشار از طریق دیتالاگر است، استخراج شده و فاصله صفحه‌ای شدن موج شوک برای دیافراگم‌های مختلف به دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت دیافراگم و در نتیجه افزایش فشار انفجار (فشار ناحیه درایور) فشار موج شوک ایجادشده افزایش یافته و موج شوک صفحه‌ای در فاصله دورتری در بخش درایون ایجاد می‌شود. طول دوره یکنواختی با دیافراگم ۰/۱ mm کمتر از دو دیافراگم دیگر بوده و موج شوک صفحه‌ای ایجادشده تا انتهای لوله شوک پایدار نبود. همچنین میزان افت فشار در درایون پس از پارگی دیافراگم، با افزایش ضخامت دیافراگم افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: لوله شوک، بارگذاری دینامیکی، موج شوک صفحه‌ای، فشار دینامیک

The Experimental Study of the Effect of a Diaphragm Thickness on the Position of Planar Shock Wave Formation in a Gas Shock Tube

J. Zamani

Mechanical Engineering Department
K.N.Toosi University of Technology

F. Sardarzadeh

Mechanical Engineering Department
K.N.Toosi University of Technology

(Received: 18/March/2019; Accepted: 02/October/2019)

ABSTRACT

Shock tube is an equipment in which by creating a pressure difference between driver and driven section via the bursting membrane has the ability to generate shock wave with very short rise time. One of the important parameters in the shock tube is the planar shock wave and the distance of its formation along the driven section. In this study, the shock wave pressure has measured at different sections along the shock tube as well as at different radial distances, using three piezoresistive pressure sensors. Experiments were repeated with three different thickness of diaphragms 0.1, 0.2 and 0.3 mm. Diaphragms were made of Mylar. The results of the experiments were extracted using TRAWW software, which is a software for signal processing of the pressure sensors; and the distance of the planar shock wave for different diaphragms was obtained. The results show that by increasing the diaphragm thickness and thus increasing the explosion pressure (pressure of the driver area), the shock wave pressure increased and the planar shock wave propagates further away in the driven section. The uniform duration of the shock wave using a diaphragm with a thickness of 0.1 mm is smaller than the other two diaphragms, and the planar shock wave is not stable until the end of the shock tube. Also, the pressure drop in driven section after rupture of the diaphragm increases with increasing diaphragm thickness.

Keywords shock Tube, Dynamic Loading, Planar shock wave, Dynamic pressure

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

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: sardarzadeh@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

پشت هر دو موج پیش‌رونده شوک و موج شوک منعکس شده به‌طور کلی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، فشار پشت موج شوک منعکس شده تقریباً دو برابر بزرگ‌تر از پشت موج شوک پیش‌رونده است. در مقاله‌ای که گانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۲] ارائه کردند، فشار دینامیک به‌طور تجربی در یک سامانه فشار بالا بررسی شد. مبدل‌های فشار پیزوالکتریک و حسگرهای نور برای تشخیص امواج شوک درون لوله مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که فشار در مخزن بلافاصله بعد از انتشار هیدروژن فشار بالا کاهش نمی‌یابد. نرخ تخلیه فشار در مخزن در ابتدا افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد.

حسین‌زاده در سال ۱۳۹۳ [۱۳] در تحقیقی با عنوان «طراحی و ساخت کالیبراتور حسگرهای اندازه‌گیری فشار دینامیکی» طراحی و ساخت یک لوله شوک دیافراگمی را برای واسنجی^۱ حسگرهای فشار بررسی کرد. در نهایت ابزاری با قابلیت تولید موج شوک دقیق و تکرارپذیری بالا ساخته شد.

یکی از ابزارهای لازم در بررسی عملکرد انفجار یا پاسخ سازه‌ها در برابر انفجار، بررسی و اندازه‌گیری پارامترهای مرتبط با شوک انفجار است. مهم‌ترین محورهای کاربرد مکانیک انفجار در مباحث شکل‌دهی‌ها، بررسی شکل‌پذیری‌ها، استفاده آزمایشگاهی از سرعت موج انفجار به‌منظور تست ضربه و موارد دیگر می‌باشد. برای این کار معمولاً از ترانس‌دیوسرهای دینامیکی مانند حسگرهای پیزورزیستیو^۲ و پیزوالکتریک استفاده می‌شود. هدف از انجام این تحقیق اندازه‌گیری تغییرات فشار در طول ناحیه در یون لوله شوک و بررسی فاصله صفحه‌ای شدن موج شوک است. این فاصله برای انجام آزمایش‌های تحقیقاتی و کاربردهایی همچون شکل‌دهی فلزات اهمیت فراوانی دارد.

۲- شرح مسئله

یکی از مسائل مهم در طراحی لوله شوک صفحه‌ای شدن موج شوک می‌باشد. منابع محتمل در غیر صفحه‌ای بودن موج شوک در یک لوله شوک به‌طور کل به دودسته ایستا و غیر ایستا تقسیم می‌شود. اثرات ایستا در مختصات شوک

هنگامی که گاز فشار بالا به‌طور ناگهانی به تماس با گاز کم‌فشار می‌رسد، گاز فشار بالا به منطقه فشار پایین گسترش پیدا می‌کند، که باعث ایجاد یک موج تراکمی ضعیف می‌شود که درون گاز فشار پایین انتشار می‌یابد. برای یک اختلاف فشار کافی بین گازها (معمولاً بیشتر از ۲۰۵ بار)، تعدادی از امواج تراکمی به یک موج شوک تبدیل می‌شوند. دمای آن تقریباً بلافاصله افزایش می‌یابد و افزایش آنتروپی در طول شوک ایجاد می‌شود که جریان را بازگشت‌ناپذیر می‌کند. این اتفاق باعث تغییر یکنواخت در خواص سیال مانند سرعت (که از فراصوت تا فروصوت تغییر می‌کند)، فشار، دما و تراکم می‌شود. لوله شوک یا شبیه‌ساز موج انفجار ابزاری با قابلیت تولید شوک با تکرارپذیری بالا است که به دو ناحیه اصلی محرک و متحرک تقسیم می‌شود که افزایش فشار گاز در ناحیه محرک باعث حذف المان غشاء که دو ناحیه را از هم جدا می‌کند، شده و اختلاف سطح فشار گاز بین دو ناحیه باعث تولید موج شوک می‌شود. این افزایش فشار به طرق مختلفی از جمله انفجار، احتراق و یا مخزن گاز پرفشار تأمین می‌گردد [۱-۵].

دامنه کاربرد لوله شوک بسیار گسترده است که از آن جمله می‌توان به بررسی جریان‌ات گازی [۶]، مدل‌سازی و بررسی لایه‌مرزی بر روی نمونه‌های فیزیکی [۷]، الگوی احتراق ترکیبات گازی و سوخت جامد [۸] و کاربردهای پزشکی و نظامی از جمله بررسی آسیب مغزی ناشی از انفجار [۹] و ساخت زره و تجهیزات محافظتی برای کاهش این اثرات اشاره کرد.

زیتون و برتشل [۱۰] در سال ۲۰۰۶ یک شبیه‌سازی از جریان لوله شوک با استفاده از معادله دوبعدی ناپایدار نویر- استوکس با دو سرعت لغزش در لایه‌های مرزی و افزایش ناگهانی دما انجام دادند. آن‌ها نتایج عددی را ارائه کردند که میرایی بالا برای موج‌های شوک بسیار قوی در طول لوله شوک بین موج و سطح تماس را نشان می‌داد. لی و همکاران [۱۱] در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثرات موانع داخل لوله بر انتشار موج شوک و احتراق خود به خودی در هنگام آزادسازی هیدروژن فشار بالا پرداخته‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش فشار انفجار، فشارهای

¹ Calibration² Piezoresistive

ثابت پایدار هستند و شامل اثر لایه‌مرزی و به دنبال آن صافی سطح می‌باشد. در فشارهای متعادل لایه‌مرزی در مقایسه با شعاع لوله نازک است و تئوری صفحه تخت ساده صادق است. در فشارهای پایین تر شکل موج شوک به واسطه تعامل‌های متعدد ناحیه ویسکوز در دامنه شوک و انحرافات دیواره، پیچیده است.

اثرات غیر ایستا شکلی از موج را ایجاد می‌کند که با زمان و فاصله در لوله تغییر می‌کند و شامل اختلالات برآمدگی و تغییرات ناحیه، اثرات سطح تماس غیر مسطح و اغتشاشاتی که از باز شدن غیرایده‌آل دیافراگم منتج می‌شود. تمامی این اثرات غیر ایستا، موجب به وجود آمدن موج عرضی می‌شود که در اثر اغتشاشات ایجاد می‌شود و به عقب و جلو بازتابیده می‌شود.



شکل (۱): نمونه‌ای از دیافراگم که به صورت گلبرگی پاره شده است.

هدف از این تحقیق بررسی چگونگی شکل‌گیری موج شوک یکنواخت و تأثیر فشار انفجار و ضخامت دیافراگم بر روی فاصله صفحه‌ای شدن موج شوک در درایون لوله شوک با استفاده از لوله شوک KNTU1 موجود در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی بود.

این لوله شوک از نوع محرک گازی سرد کار ۳ اینچی انتها بسته بوده که گاز نیتروژن به داخل محفظه مربوطه تزریق می‌گردد. برای این منظور از یک کیسول فشارقوی استفاده شده که به وسیله رگلاتور فشار خروجی تنظیم و توسط شیر کنترلی به داخل محفظه محرک هدایت می‌شود. این لوله شوک سرد کار با رنج نسبت فشار ۱۰۰ bar در دامنه حرارتی ۱۰۰-۰ درجه سانتی‌گراد در نسبت‌های فشار بالا، توانایی تولید موج شوک با پیک بیش فشار و سرعت‌های مختلف از چند صد کیلو پاسکال تا چند مگا پاسکال و از دو تا پنج ماخ را دارا است.

دیافراگم در لوله شوک KNTU1 فقط با اختلاف فشار بین محرک و متحرک پاره می‌شود. به همین دلیل اگر دیافراگم‌ها یکسان نباشند، این موضوع می‌تواند منجر به اختلافات بزرگی در فشارهای انفجار شود.

دیافراگم‌هایی از جنس‌های مختلف دارای فشارهای انفجار مختلفی هستند. برای این آزمایش‌ها، در اختلاف فشارهای پایین، ورق‌های مایلر استفاده شد. هنگامی که

در این پژوهش از سه نوع ورق مایلر با ضخامت‌های mm ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ استفاده شد. با توجه به اینکه نوع پارگی دیافراگم تأثیر به‌سزایی در تشکیل موج شوک ایدئال و رسیدن به موج شوک صفحه دارد، آزمایش‌هایی که در آن‌ها دیافراگم به‌صورتی غیر از حالت گلبرگی پاره شد از روند تحقیق حذف شدند. نمونه از دیافراگم و پارگی ایدئال آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

مبدل فشار پیزورزیستو یک مبدل است که خروجی الکتریکی آن متناسب با فشار روی سطح حساسه آن است. اگرچه کاربرد آن شبیه به مبدل کرنش‌سنج است، مبدل پیزورزیستو دارای مزایای وزن سبک‌تر، اندازه کوچک‌تر، خروجی بالاتر و پاسخ فرکانسی بالاتر در مقایسه با انواع دیگر مبدل ارائه می‌دهد. برخلاف مبدل پیزوالکتریک، مبدل پیزورزیستو برای اندازه‌گیری فشار پایدار یا استاتیک نیز به‌اندازه فشارهای دینامیک مفید است. پاسخ فرکانسی صفر در اندازه‌گیری‌های دقیق طولانی‌مدت و گذرا ضروری است. در این تحقیق از سه مبدل پیزورزیستو مدل 8530B شرکت Endevco استفاده شده است (شکل ۲). این حسگرها علاوه بر کیفیت و عملکرد بالا، بسیار مینیاتوری هستند. بخش فعال از سطح حساس به فشار که از سیلیکون ساخته شده است، فقط ۲ mm قطر دارد. کلید عملکرد و

یک خروجی ولتاژ AC متناسب با ولتاژ ورودی است و برای توان‌های ۹۰-۲۴۰ VDC طراحی شده است.



شکل (۳): آمپلی‌فایر مدل ۱۳۶ شرکت Endeveco.

۳- مبانی تئوری موج شوک

در فهم رابطه بین حالت سیال قبل و بعد از جبهه شوک عبوری، استفاده از روابط رانکین-هوگونیوت (R-H) مفید است. با دانستن شرایط اولیه و سرعت موج شوک، مقدار بیش فشار در رابطه با پرش شوک اولیه است که می‌توان آن را با استفاده از شرایط پرش R-H تعیین کرد. بعد از تعیین تئوری فشار می‌توان از آن برای بیان ارتباط با خروجی ولتاژ حسگر تحت تأثیر فشار شوک بعد از توجیه‌پذیری ساده‌سازی‌های انجام‌شده، استفاده کرد. قوانین بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای بیان حالت گاز برای قبل و بعد از عبور جبهه شوک استفاده می‌شوند. در این بخش فرض می‌شود که موج شوک صفحه‌ای یک‌بعدی در محیط گازی نامحدود در حال انتشار است.

سرعت صوت که در اینجا با α تعریف‌شده، وابسته به خصوصیات فیزیکی و حالت محیط انتقال است [۱۴].

در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در هوای خشک سرعت صوت تقریباً 343 m/s است. عدد ماخ به‌صورت نسبت سرعت صوت بر سرعت صوت عمومی (در هوای خشک) تعریف می‌شود. برای مثال سرعت موجی با عدد ماخ ۲ در دمای اتاق در هوا برابر 686 m/s است.

قدرت حسگر، طراحی حسگر منحصربه‌فرد آن است که دارای پل چهارگانه و تستون است که در تراشه سیلیکون قرار می‌گیرد. Endeveco به‌جای یک دیافراگم تخت ساده، چیپ سیلیکونی شکل خاصی تولید کرده که تنش را در محل عناصر مقاومتی ایجاد می‌کند. این باعث حساسیت بیشتر برای یک فرکانس رزونانس داده شده و همچنین افزایش قابل‌ملاحظه‌ای از ناپایداری می‌شود.



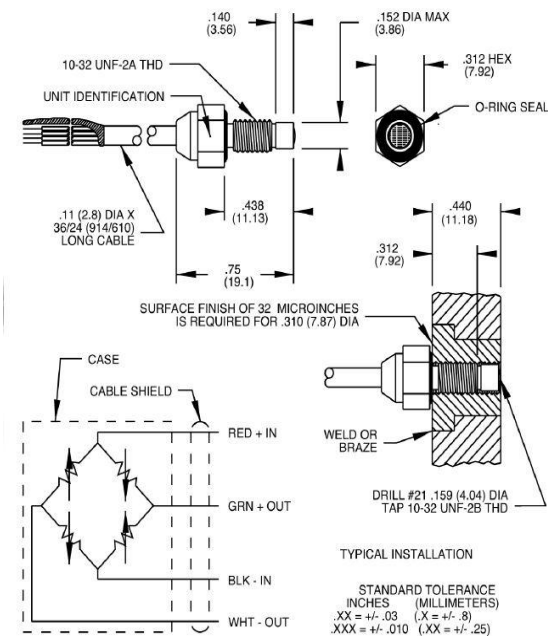
شکل (۲): یک نمونه از حسگر پیزورزیستيو مورد استفاده در آزمایش‌ها.

در بسیاری از کاربردها، سیگنال خروجی از یک مبدل فشار پیزورزیستيو به‌اندازه کافی بزرگ است که نیازی به تقویت ندارد. با این حال، استفاده از تقویت‌کننده‌ها گاهی برای رسیدن به امپدانس تطبیق یا تحریک گالوانومتر لازم است. امپدانس ورودی تقویت‌کننده باید به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از مقاومت خروجی مبدل متصل باشد. تقویت‌کننده‌های ورودی-متغیر برای ایجاد شرایط ایزوله در هر دو طرف سیگنال ورودی موردنیاز است. پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده باید برای محدوده فرکانسی مورد انتظار در ورودی مناسب باشد و سطح نویز باید بسیار پایین‌تر از پایین‌ترین سیگنال اندازه‌گیری باشد.

تقویت‌کننده مورد استفاده در این پژوهش مدل ۱۳۶ شرکت Endeveco است که یک تقویت‌کننده سه کاناله DC می‌باشد که به‌صورت دستی یا کامپیوتری قابل‌برنامه‌ریزی است (شکل ۳). این مدل تقویت‌کننده برای استفاده با شتاب سنج‌های پیزورزیستيو، شتاب سنج‌های ظرفیت متغیر و مبدل‌های فشار طراحی شده است. دستگاه دارای

۴- آزمایش‌های تجربی

هدف از این تحقیق بررسی چگونگی شکل‌گیری موج شوک یکنواخت و تأثیر فشار انفجار و ضخامت دیافراگم بر روی فاصله صفحه‌ای شدن موج شوک در دریون لوله شوک با استفاده از لوله شوک موجود در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی بود. برای دستیابی به فاصله یکنواخت شدن موج شوک، آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شد که حسگرهای پیروززیستیو در فاصله‌های مختلف در طول دریون قرار بگیرند. از آنجایی که برای تشخیص صفحه‌ای شدن موج باید فشار آن را در نقاط مختلف مقطع موج اندازه گرفت، فیکسچری طراحی شد تا با استفاده از آن امکان نصب حسگرها در فاصله‌های مختلف شعاعی مقطع لوله را فراهم آورد. این فیکسچر از یک قطعه آلومینیومی به قطر ۷ cm یعنی برابر با قطر داخلی لوله شوک ساخته شد. ضخامت این قطعه با توجه به اندازه‌های به‌دست‌آمده از کاتالوگ حسگر که توسط شرکت سازنده ارائه شده است، ۱۱/۱۸ mm انتخاب شد (شکل ۴).



شکل (۴): شماتیک حسگر و اجزای تشکیل‌دهنده آن و

مدار پل وتستون المان حسگر [۱۶].

برای قرارگیری حسگرها روی فیکسچر سوراخ‌هایی در فاصله‌های شعاعی مختلف و با قطر ۳/۸۶ mm بر اساس

وقتی به دلیل اختلال مکانیکی، سرعت هوا بیشتر از سرعت صوت باشد، موج شوک ایجاد می‌شود. با توجه به قدرت اختلال، می‌توان با حالت اولیه سیال، حالت سیال بلافاصله بعد از جبهه شوک تعیین کرد. این وضعیت با استفاده از قانون گاز، سطح واحد و تراکم آدیاباتیک اندازه‌گیری می‌شود.

با استفاده از معادلات پیوستگی جرم، مومنتوم و انرژی

برای موج شوک نرمال می‌توان قدرت موج شوک یعنی $\frac{P_2}{P_1}$

را محاسبه نمود [۱۵]:

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \left(1 - \frac{(\gamma_4 - 1) \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_4} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)}{\sqrt{2\gamma_1(\gamma_1 + 1) \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)}} \right)^{\frac{-2\gamma_4}{(\gamma_4 - 1)}} \quad (1)$$

که مقدار a_1 سرعت صوت در گاز متحرک است که از

معادله $\alpha = \sqrt{\gamma RT}$ برای گاز ایدئال محاسبه می‌شود.

هم‌چنین اندیس ۱ به معنای شرایط بالادستی و اندیس ۲ شرایط پایین‌دستی موج شوک را نشان می‌دهند.

حال با در دست داشتن قدرت موج شوک می‌توان

سرعت آن را نیز محاسبه نمود:

$$V_s = \alpha_1 \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) + 1} \quad (2)$$

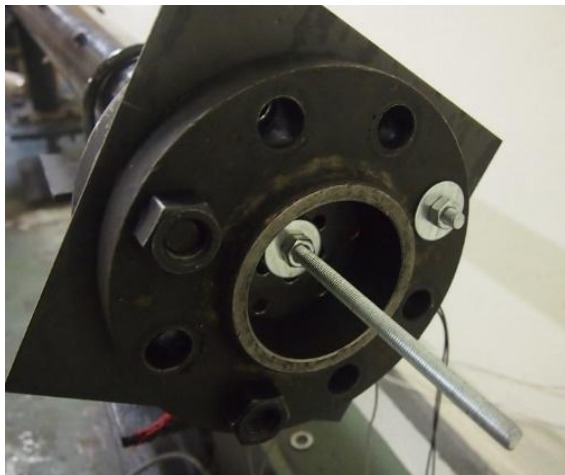
در نتیجه عدد ماخ موج شوک برابر خواهد بود با:

$$M_s = \frac{V_s}{\alpha_1} \quad (3)$$

با محاسبه عدد ماخ موج شوک و جایگذاری آن در معادله زیر می‌توان پیک بیش فشار جبهه موج شوک را محاسبه کرد.

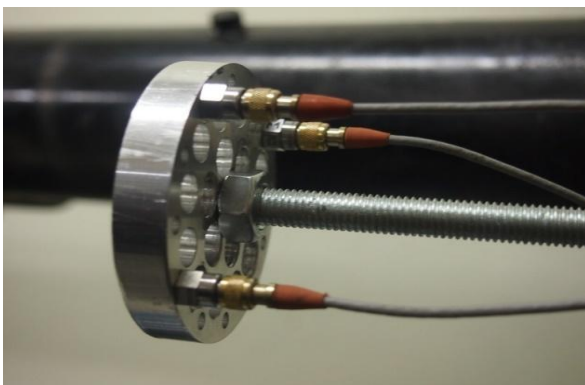
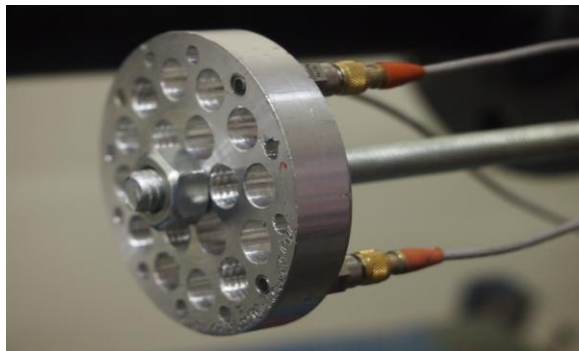
$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{(\gamma + 1)} \quad (4)$$

این مقدار با پیک بیش فشار به‌دست‌آمده از حسگر پیروززیستیو مقایسه می‌شود.



شکل (۶): حالت مقید شده انتهای لوله.

طراحی آزمایش‌ها به این صورت بود که حسگرها در سه موقعیت مختلف روی فیکسچر قرار داده شد و در فاصله‌های ۲۰۵، ۲۲۰، ۲۴۰، ۲۵۰، ۲۶۰، ۲۷۵، ۲۸۰، ۲۹۵ و ۳۰۰ cm از محل قرارگیری دیافراگم در لوله شوک قرار داده شده و در هر یک از این فاصله‌ها آزمایش برای هر سه ورق مایلر در ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ تکرار شد. نحوه چیدمان حسگرها روی فیکسچر در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): نحوه چیدمان حسگرها روی فیکسچر.

کاتالوگ حسگر ایجاد شد. نمونه‌ای از این فیکسچر شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل (۵): فیکسچر طراحی شده برای قرارگیری حسگرها.

برای مقید کردن فیکسچر در داخل لوله شوک، سه نمونه از این فیکسچر ساخته شده و بر روی میله‌ای به طول ۲/۵ m در فاصله‌های مختلف قرار گرفتند.

پس از قرارگیری حسگرها بر روی این فیکسچر، مجموعه درون لوله شوک باید در جهت محور لوله نیز مقید شود تا در اثر ضربه ناشی از شوک حرکتی نداشته باشد زیرا در صورت حرکت قطعه در راستای محوری حسگرها قادر به اندازه‌گیری مقدار صحیح فشار موج شوک نخواهند بود. برای این کار، میله رابط قطعات آلومینیومی در انتهای بخش درایون، با استفاده از سه پیچ و مهره و دو فلنج به یک صفحه فولادی متصل شده و کاملاً مقید شد (شکل ۶). این نکته قابل ذکر است که صفحه فولادی و فلنج‌ها با فاصله از انتهای لوله شوک قرار گرفتند تا انتهای بخش درایون لوله باز بوده و گاز موجود در آن هوا باشد.

بدین ترتیب سه حسگر در موقعیت‌های مختلف روی فیکسچر قرار گرفته و به آمپلی‌فایر متصل شده و در نهایت با اتصال آمپلی‌فایر به دستگاه پردازش سیگنال نتایج حاصل از سنجش فشار درون لوله توسط تک‌تک حسگرها به صورت خروجی ولتاژ نمایش داده می‌شود. حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق دارای ضریب تبدیل ۱/۳۷۹ می‌باشند، به این معنی که با ضرب کردن ولتاژ خروجی حاصل از اندازه‌گیری در این عدد می‌توان مقدار فشار نقطه موردنظر را برحسب bar به دست آورد.

جدول (۱): نتایج آزمایش‌ها برای دیافراگم با ضخامت ۰/۱ mm

شماره تست	فشار انفجار P4 (بار)	فاصله حسگر از دیافراگم (سانتی‌متر)	فشار حسگر شماره ۱ (بار)	فشار حسگر شماره ۳ (بار)	فشار حسگر شماره ۲ (بار)
۱	۶	۲۰۵	۱/۹۵۸	۲/۶۲۴	۲/۰۶۱
۲	۵	۲۲۰	۱/۵۹۲	۱/۶۰۶	۱/۶۲
۳	۵/۵	۲۴۰	۱/۵۷۸	۱/۶۵۴	۱/۷۳
۴	۶	۲۵۰	۱/۵۷۲	۱/۸۱۲	۱/۶۸۴
۵	۵/۵	۲۶۰	۱/۳۰۶	۱/۲۹۷	۱/۲۵۱
۶	۷/۵	۲۷۵	۱/۲۳۴	۱/۲۲۳	۱/۱۰۲
۷	۴/۵	۲۸۰	۱/۱۱	۱/۱۹۲	۱/۰۴۵
۸	۶	۲۹۵	۱/۰۳۷	۱/۱۴۴	۰/۹۷۹
۹	۷	۳۰۰	۰/۸۴۵	۱/۳۲۳	۰/۹۴۴

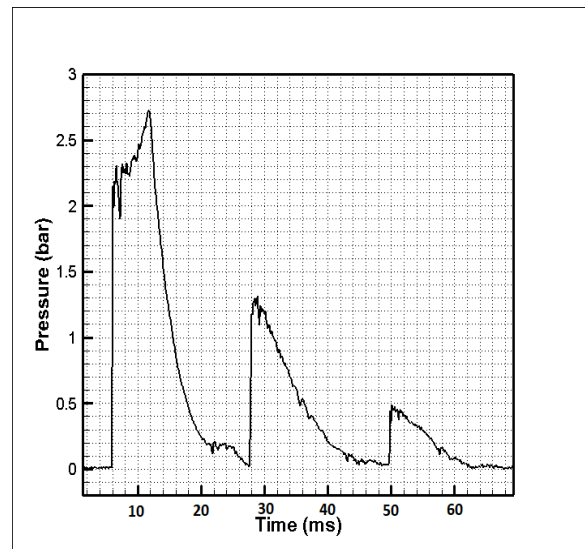
جدول (۲): نتایج آزمایش‌ها برای دیافراگم با ضخامت ۰/۲ mm

شماره تست	فشار انفجار P4 (بار)	فاصله حسگر از دیافراگم (سانتی‌متر)	فشار حسگر شماره ۱ (بار)	فشار حسگر شماره ۳ (بار)	فشار حسگر شماره ۲ (بار)
۱۰	۱۱/۵	۲۰۵	۳/۶۴	۶/۲۸۱	۳/۹۸۵
۱۱	۱۱/۵	۲۲۰	۳/۹۵	۴/۰۲۴	۳/۵۹۹
۱۲	۱۱	۲۴۰	۳/۲۶	۳/۲۲۶	۳/۱۸۵
۱۳	۱۲/۵	۲۵۰	۲/۹۷۸	۳/۰۴	۳/۴۰۵
۱۴	۱۱	۲۶۰	۳/۱۷۸	۳/۱۷۸	۳/۳۷۱
۱۵	۱۲	۲۷۵	۲/۴۹۵	۲/۴۵۳	۲/۸۸۸
۱۶	۱۲	۲۸۰	۱/۹۷۸	۲/۰۱۸	۱/۹۴۶
۱۷	۱۲	۲۹۵	۱/۱۹۸	۱/۲۳۳	۱/۳۷۸
۱۸	۱۲	۳۰۰	۱/۱۸۵	۱/۱۴۳	۱/۲۱۸

بدین ترتیب آزمایش‌های موردنظر در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی انجام شد. برای بررسی تکرارپذیری دستگاه و اطمینان از صحت نتایج، برخی از آزمایش‌ها تکرار شد و تعدادی از آزمایش‌ها که به دلیل خطاهای انسانی و یا مشکلاتی اعم از پارگی غیر ایدئال دیافراگم قابل اطمینان نبود از روند تحلیل خارج شد. در نهایت ۲۷ تست صحیح از بین نتایج آزمایش‌ها انتخاب شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۵- نتایج و بحث

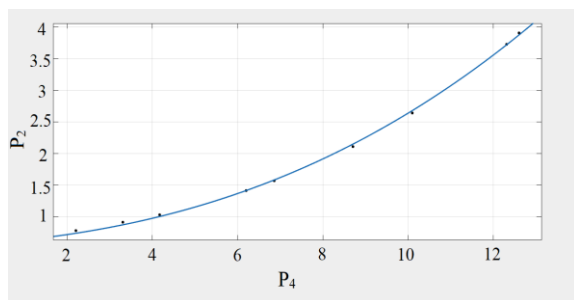
پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج به صورت نمودارهای ولتاژ-زمان از نرم‌افزار استخراج شد. برای اندازه‌گیری پیک بیش فشار در هر آزمایش از امکانات نرم‌افزار جهت مشخص کردن میزان ولتاژ ماکزیمم استفاده شده و با ضرب این مقدار در عدد تبدیل حسگر یعنی ۱/۳۷۹ مقدار بیش فشار برحسب bar به دست آمد (شکل ۸).



شکل (۸): نمونه‌ای از نمودار فشار-زمان به دست آمده از حسگرها.

مقادیر فشار در فاصله‌های مختلف و دیافراگم‌هایی با ضخامت مختلف که توسط سه حسگر اندازه‌گیری شدند، در جداول ۱ تا ۳ جمع‌آوری شده است.

حل تحلیلی مسئله لوله شوک پیچیده بوده و حل دستی آن عملاً امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل برای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی، از نتایج تحقیقات پیشین استفاده شد که در این تحقیقات با استفاده از برنامه متلب، برنامه تحلیلی برای حل مسئله و تعیین طول درایور و دریون توسعه یافته است [۱۶][۱۷]. متغیرهای ورودی برنامه شامل زمان بعد از پاره شدن دیافراگم، فشار اولیه ناحیه پرفشار، فشار اولیه ناحیه کم‌فشار، دمای اولیه ناحیه پرفشار، دمای اولیه ناحیه کم‌فشار و طول مؤثر ناحیه درایور و دریون است. ثابت‌های مسئله برای هوا شامل نسبت گرمای ویژه هوا برابر ۱/۴ فرض می‌شود و ثابت جهانی گاز برای گاز ایدئال ۲۸۷/۰۵ است. خروجی‌های برنامه نیز شامل تغییرات سرعت صوت در سیال در یک‌زمان مشخص، سرعت ذرات سیال، 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 با استفاده از معادله ۱ با استفاده از روش درون‌یابی درجه‌دو معکوس و با استفاده از یک جواب اولیه مشخص می‌گردد. در شکل ۱۰ نمودار فشار پیک موج شوک برحسب فشار اولیه ناحیه پرفشار (P_4-P_2) با استفاده از روابط تحلیلی نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نمودار P_2-P_4 حاصل از نتایج تحلیلی.

با استفاده از نتایج به‌دست آمده برای نسبت فشار P_2 به فشار حاصل از تحلیل و با کمک نرم‌افزار متلب معادله برای رابطه بین این دو مقدار فشار به دست آمد که به صورت زیر است:

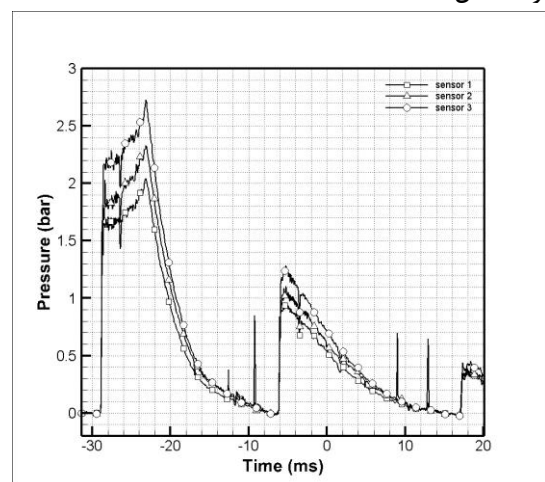
$$P_2 = (-3.847 \times 10^{-6} P_4^4) + (0.0003574 P_4^3) + (-0.01297 P_4^2) + (0.2753 P_4) + 0.8708 \quad (5)$$

جدول (۳): نتایج آزمایش‌ها برای دیافراگم با ضخامت

۰/۳ mm

شماره تست	فشار انفجار P4 (بار)	فاصله حسگر از دیافراگم (سانتی‌متر)	فشار حسگر شماره ۱ (بار)	فشار حسگر شماره ۳ (بار)	فشار حسگر شماره ۲ (بار)
۱۹	۱۳	۲۰۵	۶/۳۲۹	۸/۹۷	۶/۲۳۳
۲۰	۱۳	۲۲۰	۶/۱۷۷	۷/۱۰۱	۶/۱۶۳
۲۱	۱۳/۵	۲۴۰	۶/۰۰۵	۶/۱۵۷	۵/۷۴۳
۲۲	۱۳	۲۵۰	۵/۳۹۸	۵/۹۳	۵/۳۵
۲۳	۱۳/۵	۲۶۰	۴/۶۴	۴/۷۰۹	۴/۲۴۷
۲۴	۱۳	۲۷۵	۴/۴۱۵	۴/۴۸۴	۴/۲۳۳
۲۵	۱۴	۲۸۰	۴/۳۵	۴/۴۷۴	۴/۱۲۲
۲۶	۱۳/۵	۲۹۵	۴/۲۵۳	۴/۲۵۳	۴/۱۹۸
۲۷	۱۳	۳۰۰	۴/۱۳۶	۴/۱۵۵	۴/۱۷۱

برای یافتن محل صفحه‌ای شدن موج شوک، فشارهای اندازه‌گیری شده توسط هر سه حسگر را باهم مقایسه کرده و فاصله‌ای که این فشارها کمتر از ۱۰٪ (مقدار خطای قابل قبول آزمایش) بود به عنوان فاصله صفحه‌ای شدن موج در نظر گرفته شد. همچنین طبق نتایج به‌دست آمده از طریق نمودارهای موج شوک نیز می‌توان محل تشکیل موج صفحه‌ای را تشخیص داد؛ به این ترتیب که برای هر فاصله و دیافراگم مورد آزمایش نمودارهای موج شوک هر سه حسگر را در یک صفحه نمایش داده سپس با مقایسه میزان پیک فشار آن‌ها زمان همپوشانی نمودارها قابل مشاهده خواهد بود (شکل ۹).



شکل (۹): نمودار فشار-زمان سه حسگر در فاصله یکسان از دیافراگم قبل از صفحه‌ای شدن موج شوک.

روند تغییرات فشار حاصل از حل تحلیلی و آزمایش‌های تجربی تقریباً مشابه است. اختلافات موجود بین این دو حل به علت فرضیات موجود در حل تحلیلی؛ از جمله فرض گاز ایدئال و سایر شرایط مرزی بوده و در آزمایش‌ها تجربی این اختلافات ناشی از خطاهای آزمایش است. خطای موجود بین نتایج تجربی و تحلیل از روش خطای میانگین مربعات محاسبه شد که مقدار آن ۱۹٪ بود.

با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای فشار-زمان اندازه‌گیری توسط حسگرها مشاهده شد که در ابتدای بخش درایون اختلاف فشار بین حسگرها (اختلاف فشار در نقاط مختلف سطح مقطع لوله) زیاد است که نشان‌دهنده صفحه‌ای نبودن موج شوک است. در این نواحی جریان کاملاً آشفتگی است. با افزایش فاصله مشاهده می‌شود که فشار دو حسگر که در موقعیت شعاعی یکسان قرار دارند به یکدیگر نزدیک می‌شوند و این نشان‌دهنده کروی شدن موج شوک است. هرچند در این قسمت هنوز موج شوک به موج شوک صفحه‌ای تبدیل نشده است.

چنانچه در بخش قبل گفته شد، موج شوک ابتدا دارای آشفتگی بوده و پس از طی مسافتی به حالت یکنواخت می‌رسد، این حالت یکنواخت و صفحه‌ای بودن موج پایدار نبوده و پس از مدتی موج دوباره دچار آشفتگی می‌شود. با رسم نمودارهای فشار-فاصله هر سه حسگر برای دیافراگم‌های مختلف می‌توان تقریبی از این ناحیه موج صفحه‌ای را مشاهده کرد.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نمودار فشار-فاصله حسگرها را برای دیافراگم‌های با ضخامت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ نشان می‌دهند.

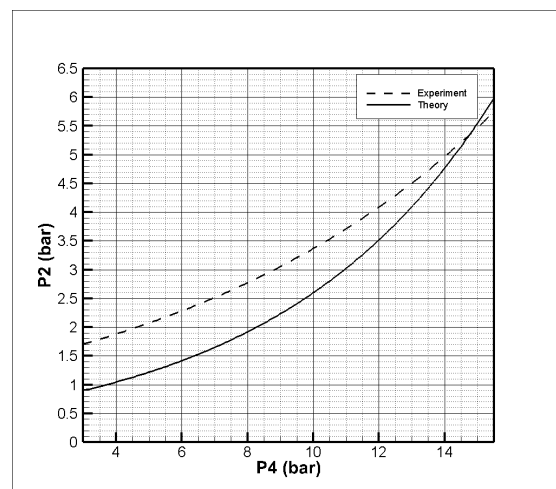
نمودار فشار-مکان رسم‌شده در شکل ۱۲ نشان‌دهنده مقادیر پیک فشار اندازه‌گیری شده توسط هر سه حسگر در فاصله‌های مختلف از دیافراگم است. فشارهای اندازه‌گیری شده در ابتدا دارای اختلاف زیادی هستند و به‌مرور به هم نزدیک می‌شوند و در یک بازه که برای این دیافراگم (ضخامت ۰/۱ mm) در حدود ۲۴۵ تا ۲۶۴ سانتی‌متری از دیافراگم است، حالت صفحه‌ای موج پایدار باقی می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این موج صفحه‌ای تا انتهای لوله شوک از بین رفته و دوباره دچار آشفتگی می‌شود که این پدیده به علت ضعیف بودن شوک ایجادشده توسط این

نتایج حاصل از آزمایش‌ها تجربی و تئوری برحسب فشار انفجارهای یکسان در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

جدول (۱): فشار به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و تحلیلی.

فشار انفجار P_4 (bar)	فشار P_2 تحلیلی (bar)	فشار P_2 تجربی (bar)
۴/۵	۱/۱۲۵	۱/۹۷
۵	۱/۲۱۷	۲/۰۷۲
۵/۵	۱/۳۱۱	۲/۱۷۳
۶	۱/۴۱۸	۲/۲۸۵
۷	۱/۶۴۷	۲/۵۱۵
۷/۵	۲/۷۸۱	۲/۶۴۴
۱۱	۳/۰۲۸	۳/۷۱۵
۱۱/۵	۳/۲۶۳	۳/۸۹۷
۱۲	۳/۵۱۷	۴/۰۸۸
۱۲/۵	۳/۷۹	۴/۲۸۹
۱۳	۴/۰۹۹	۴/۵۰۹
۱۳/۵	۴/۴۱۷	۴/۷۳۱
۱۴	۴/۷۶	۴/۹۶۳

با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و فشار پیک موج شوک (P_2) در آزمایش‌هایی با دیافراگم‌های مختلف و در دست داشتن فشار لحظه پارگی دیافراگم (P_4) با استفاده از گیج فشار می‌توان نمودار P_2 برحسب P_4 را برای نتایج تجربی نیز رسم کرد. در شکل ۱۱ این نمودار به همراه نمودار حاصل از نتایج تئوری نشان داده شده و نتایج تئوری و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی.

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ که به ترتیب مربوط به تغییرات فشار در طول لوله شوک برای دیافراگم‌های با ضخامت ۰/۲ mm و ۰/۳ mm می‌باشد، مشاهده می‌شود که ناحیه یکنواختی برای این دو سری آزمایش که نسب به آزمایش‌های دیافراگم ۰/۱ mm دارای فشار بالاتر و در نتیجه قدرت شوک بالاتری هستند، طولانی‌تر است و این ناحیه تا انتهای لوله شوک ادامه پیدا کرده است. برای آزمایش‌ها با دیافراگم ۰/۲ mm ناحیه یکنواختی و صفحه‌ای شدن موج از فاصله ۲۷۸ سانتی‌متری دیافراگم شروع می‌شود و برای آزمایش‌ها با دیافراگم ۰/۳ mm مشاهده شد که این ناحیه از فاصله دورتر، یعنی فاصله ۲۸۳ سانتی‌متری دیافراگم شروع می‌شود. از مقایسه این نمودارها مشخص می‌شود که با افزایش ضخامت دیافراگم و در نتیجه افزایش فشار انفجار در پست دیافراگم، موج صفحه‌ای در فاصله دورتری تشکیل شده و طول ناحیه یکنواختی آن بیشتر می‌شود.

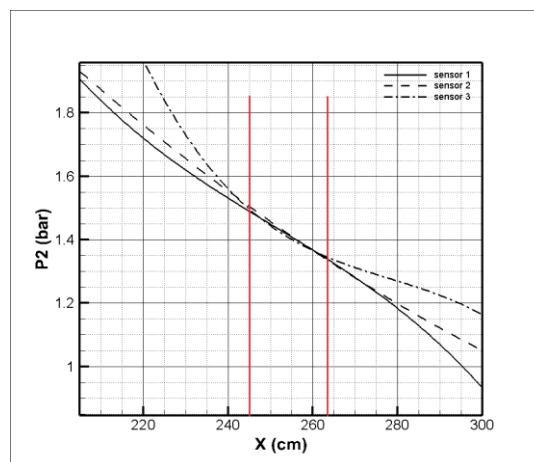
۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای استخراج شده از حسگرها مشخص شد که فشار موج شوک در طول درایون به‌مرور کاهش پیدا می‌کند و رابطه‌ای غیرخطی برای این تغییرات فشار به دست آمد. همچنین مشاهده شد که موج شوک در ابتدای درایون حالت آشفته و غیریکنواخت دارد و با حرکت در طول لوله به موج شوک کروی تبدیل شده و سپس تبدیل به موج شوک صفحه‌ای می‌شود. این موج شوک صفحه‌ای در یک محدوده پایدار مانده و پس از آن موج شوک دوباره دچار آشفتگی می‌شود.

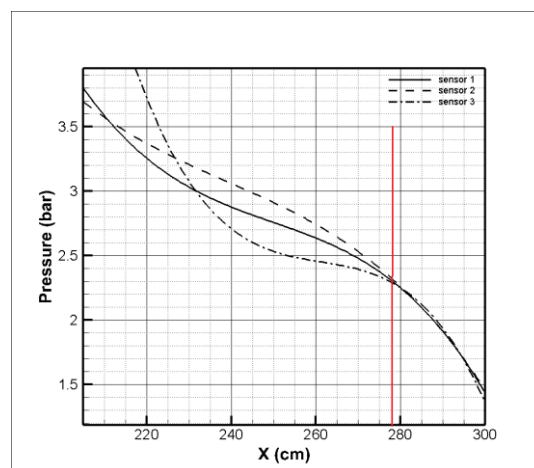
با توجه به نمودارهای فشار-زمان استخراج شده و انطباق نمودارهای حسگرها در یک فاصله، فاصله‌ای که موج به حالت صفحه‌ای خود می‌رسد مشخص شد و مشاهده شد که این فاصله برای دیافراگم‌ها با ضخامت‌های مختلف متفاوت بوده و هرچه ضخامت دیافراگم افزایش می‌یابد فاصله یکنواخت شدن موج شوک از ابتدای بخش درایون بیشتر می‌شود.

در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش، نمودارهای فشار-مکان حسگرها برای دیافراگم‌های مختلف رسم شده و محدوده‌ای که در آن صفحه‌ای بودن موج شوک پایدار است، مشخص شد. برای دیافراگم ۰/۱ mm محدوده

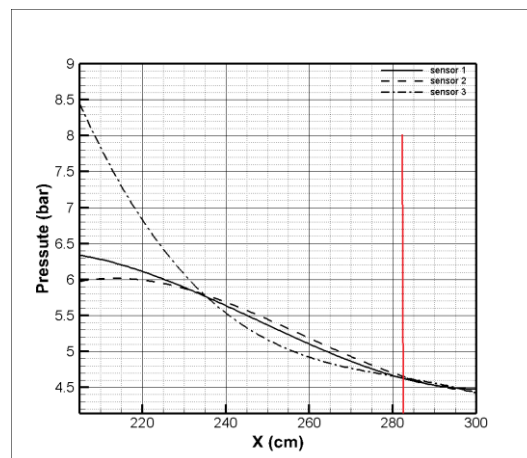
دیافراگم و برخورد آن با محل تعبیه‌شده برای قرارگیری حسگرها رو لوله شوک است.



شکل (۱۲): نمودار فشار-فاصله برای دیافراگم با ضخامت ۰/۱ mm



شکل (۱۳): نمودار فشار-فاصله برای دیافراگم با ضخامت ۰/۲ mm



شکل (۱۴): نمودار فشار-فاصله برای دیافراگم با ضخامت ۰/۳ mm

10. Zeitoun, D. E., and Burtschell, Y. "Navier-stokes Computations in Micro Shock Tubes", *Shock Waves*, Vol. 15, No. 3, pp.241-246, 2006.
 11. Li, P., Duan, Q., Gong, L., Jin, K., Chen, J., and Sun, J. "Effects of Obstacles Inside the Tube on the Shock Wave Propagation and Spontaneous Ignition of High-pressure Hydrogen", *Fuel J.*, Vol. 236, pp. 1586–1594, 2019.
 12. Gong, L., Duan, Q., Jiang, L., Jin, K., and Sun, J. "Experimental Study of Pressure Dynamics, Spontaneous Ignition and Flame Propagation During Hydrogen Release from High-pressure Storage Tank through 15 mm Diameter Tube and Exhaust Chamber Connected to Atmosphere", *Fuel J.*, Vol. 182, pp. 419–427, 2016.
 13. Hosseinzadeh, R. "Design and Fabrication of Dynamic Pressure Sensors Calibrator.", Master Dissertation, K. N. Toosi University, Faculty of Mechanical Engineering, 1393 (in Persian).
 14. Justusson, B., Pankow, M., Heinrich, C., Rudolph, M., and Waas, A. M. "Use of a Shock Tube to Determine the Bi-axial Yield of an Aluminum Alloy under High Rates", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 58, pp. 55–65, 2013.
 15. Laboratory, N. P. "Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum", London: Institute of Measurement and Control, 1998.
 16. Endevco, "Piezoresistive Pressure Transducer Model 8530B -1000." 2015.
- موج شوک صفحه‌ای در بازه ۲۴۵ تا ۲۶۴ سانتی‌متری، برای دیافراگم با ضخامت ۰/۲ mm در بازه ۲۷۸ تا ۳۰۰ سانتی‌متری و برای دیافراگم با ضخامت ۰/۳ mm این فاصله در محدوده ۲۸۳ سانتی‌متری تا انتهای دریون بود.

۷- مراجع

1. Richmond, D. R., Yelverton, J. T., Fletcher, E. R., and Phillips, Y. Y. "Biologic Response to Complex Blast Waves", *Symp. A Q. J. Mod. Foreign Lit.*, 1985.
2. Saad, M. A. "Compressible Fluid Flow", Prentice-Hall, Inc., 1985.
3. Anderson J. D., "Hypersonic and High-Temperature Gas Dynamics", Second Edition. 2012.
4. Wright, J. K. "Shock Tubes (Methuen's Monographs on Physical Subjects)", First. Methuen & Co, 1961.
5. Zamani, J. "Mechanic of Explosion", K. N. Toosi University Press, 1392 (in Persian).
6. Glass, I. "An Experimental Determination of the Speed of Sound in Gases from the Head of the Rarefaction Wave", University of Toronto, 1951.
7. Resler, E. L., Lin, S. C., and Kantrowitz, A. "The Production of High Temperature Gases in Shock Tubes", *J. Appl. Phys.* Vol. 23, No. 12, pp.1390-1399, 1952.
8. Emrich, R. J., and Curtis, C. W. "Attenuation in the Shock Tube", *J. Appl. Phys.*, Vol. 24, No. 3, pp.360-363, 1953.
9. Lundquist, G. A. "Shock Wave Formation in a Shock Tube", *J. Appl. Phys.*, Vol. 23, No. 3, 1952.

