

بررسی عددی توزیع فشار و انتشار امواج در یک لوله شوک پله ای

چکیده: لوله شوک به عنوان یکی از تجهیزات آزمایشگاهی پرکاربرد، با ایجاد اختلاف فشار کنترل شده بین دو ناحیه و حذف دیافراگم، قابلیت تولید امواج شوک با زمان خیز بسیار کوتاه را فراهم می کند. در این مطالعه، پدیده موج ضربه ای ناشی از پاره شدن غشای جدا کننده در یک لوله شوک پله ای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی پدیده توزیع فشار و انتشار امواج در یک لوله شوک از نرم افزار انسیس فلونت استفاده شد. شبیه سازی های انجام شده در اعداد ماخ $1/3$ و $2/4$ و برای هندسه های متفاوت دیواره انتهایی اجرا شده است و پارامترهای جریان شامل توزیع فشار، میدان سرعت و تغییرات دمایی در دامنه محاسباتی به دقت تحلیل شده اند. نتایج بررسی نشان می دهد که تغییر هندسه دیواره انتهایی لوله می تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش قدرت امواج انعکاسی داشته باشد. این اثر با مقایسه نمودارهای تغییرات فشار در لحظه برخورد و انعکاس موج شوک برای هندسه های مختلف به صورت کمی ارزیابی شده است. نتایج کمی نشان می دهد که بهینه سازی هندسه دیواره انتهایی (طرح ه) اگرچه منجر به افزایش حدود ۳۳ درصدی گرادیان فشار در دو سمت موج برگشتی می شود، اما در نهایت کاهش قابل ملاحظه حدود ۷۳ درصدی در شیب فشار انعکاسی را در مقایسه با هندسه ساده (طرح الف) به همراه دارد. این کاهش، بیانگر افزایش بازه زمانی آزمایش است که امکان مطالعه دقیق تر پدیده های گذرا را فراهم می سازد.

واژه های راهنما: لوله شوک، امواج ضربه ای، امواج انبساطی، عدد ماخ، شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی

ایوب خسروی

فارسانی

مریی

حسین رحیمی

آسیابریکی*

مریی،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشگاه ملی مهارت،

تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

Ayoub Khosravi

Farsani

Instructor

Hossein Rahimi

Asiabaraki*

Instructor,

Department of Mechanical

Engineering, Technical

and Vocational

University (TVU),

Tehran

Numerical investigation of pressure distribution and wave propagation in a stepped shock tube

Abstract: The shock tube, as one of the most widely used laboratory devices, is capable of generating shock waves with very short rise times by creating a controlled pressure difference between two regions and removing the diaphragm. In this study, the shock wave phenomenon resulting from the rupture of the diaphragm in a stepped shock tube has been numerically investigated. To examine the pressure distribution and wave propagation phenomena in a shock tube, ANSYS Fluent software was used. The simulations were conducted at Mach numbers of 1.3 and 2.4 for different end-wall geometries, and flow parameters including pressure distribution, velocity field, and temperature variations were carefully analyzed in the computational domain. The results demonstrate that modifying the end-wall geometry can significantly reduce the intensity of reflected waves. This effect has been quantitatively evaluated by comparing pressure variation diagrams at the moment of shock wave impact and reflection for different geometries. Quantitative results indicate that while optimizing the end-wall geometry (Design e) leads to an approximately 33% increase in the pressure gradient across both sides of the reflected wave, it ultimately results in a significant reduction of approximately 73% in the overall reflected pressure slope compared to the simple geometry (Design a). This reduction signifies extended test duration, enabling a more detailed study of transient phenomena.

Keywords: Shock tube, Shock waves, Expansion waves, Mach number, CFD simulation

۱- مقدمه

با پاره شدن غشاء، موج ضربه‌ای ایجاد می‌شود که منجر به افزایش ناگهانی پارامترهای ترمودینامیکی از جمله فشار و دما در گاز می‌گردد. کاربرد اصلی این دستگاه، شبیه‌سازی شرایط انفجار یا تغییرات آنی فشار در محیط‌های گازی است. یکی از چالش‌های مهم در آزمایش‌های لوله شوک، محدودیت زمانی اندازه‌گیری پارامترهای جریان است. این بازه زمانی که معمولاً در محدوده چند میلی‌ثانیه قرار دارد، نیازمند استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری با پاسخ‌دهی بسیار سریع و دقت بالا می‌باشد.

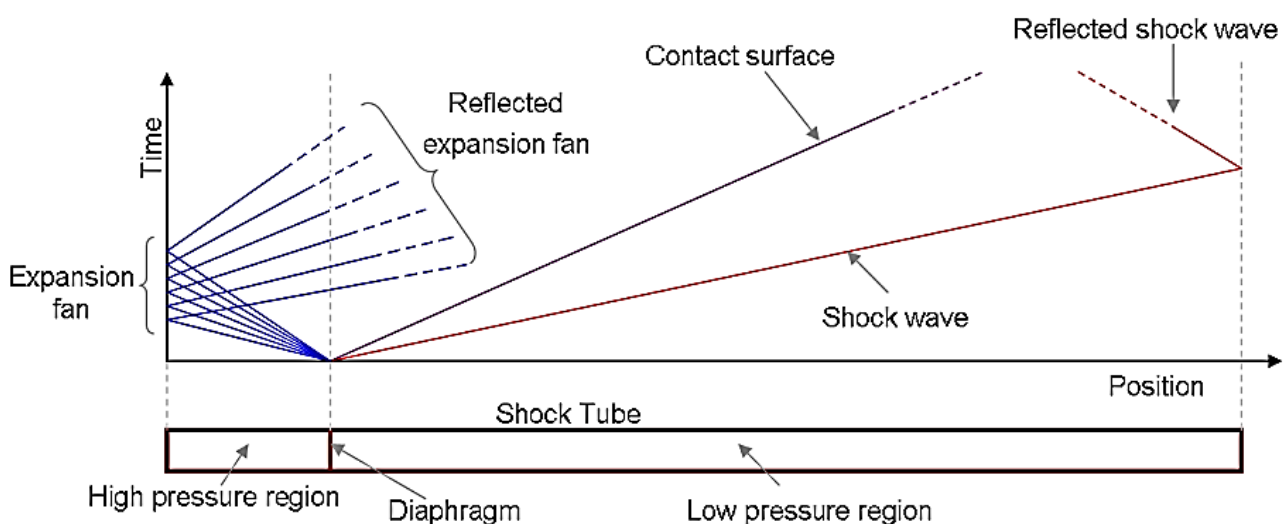
در این پژوهش، با توجه به هندسه متقارن (Symmetry) مسئله و عدم تغییرات محسوس در بعد سوم و همچنین به منظور کاهش هزینه‌های سنگین محاسباتی از مدلسازی دوبعدی به عنوان یک تقریب کارآمد استفاده شده است. این رویکرد مطابق با مطالعات معتبری همچون بوکیل [۲] است که نشان می‌دهند مدل دوبعدی اگرچه دقت کامل مدل سه‌بعدی را ندارد، اما قادر است روندهای کلی رفتار موج را به خوبی شبیه‌سازی کرده و برای درک کیفی پدیده‌های محوری بسیار مفید است.

شکل (۱) انتشار امواج ضربه‌ای، امواج برگشتی، سطح تماس و امواج انبساطی در طول لوله شوک را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌گردد که موج ضربه‌ای پس از برخورد با دیواره انتهایی لوله منعکس می‌شود [۳].

لوله شوک یکی از تجهیزات آزمایشگاهی پرکاربرد در مطالعه انتشار و انعکاس امواج ضربه‌ای محسوب می‌شود. این دستگاه به‌طور ویژه برای شبیه‌سازی شرایط انفجار واقعی و بررسی تأثیرات آن بر محیط سیالی اطراف طراحی شده است. علاوه بر این لوله شوک به همراه تجهیزات جانبی مانند تونل ضربه و لوله انبساط برای مطالعه‌ی رفتار جریان‌های تراکم‌پذیر در محدوده‌های مختلف دما و فشار استفاده می‌شود. کاربردهای نوین این تجهیز در سال‌های اخیر به حوزه تحقیقات پزشکی نیز گسترش یافته و از آن برای بررسی اثرات امواج انفجاری بر بافت‌های زنده بهره‌برداری می‌شود.

لازم به توضیح است که موج ضربه‌ای درون لوله شوک می‌تواند از دو طریق اصلی ایجاد گردد. روش اول مبتنی بر ایجاد یک انفجار کنترل‌شده با مقیاس کوچک در داخل لوله است و روش دوم که متداول‌تر می‌باشد، شامل ایجاد اختلاف فشار قابل توجه بین دو محفظه مجزا توسط دیافراگم و سپس پاره شدن این دیافراگم در اثر این اختلاف فشار است [۱].

لوله شوک ساده معمولاً لوله‌ای با مقطع دایره‌ای یا مستطیلی است که در آن دو ناحیه با سطوح فشار مختلف (یک ناحیه با فشار بالا و ناحیه دیگر با فشار پایین) توسط یک غشاء از یکدیگر جدا می‌شوند.



شکل ۱ امواج ایجاد شده در لوله شوک بعد از پاره شدن غشاء

فشار بالا همراه است، امکان استفاده از آن را به عنوان یک تونل باد ویژه فراهم می‌سازد. با این حال، محدودیت اصلی این سیستم مدت زمان بسیار کوتاه آزمایش‌ها (در حد میلی‌ثانیه) است که با تلاقی موج شوک با سطح تماس یا موج برگشتی از

لوله‌های شوک علاوه بر مطالعات مربوط به امواج ضربه‌ای، در اندازه‌گیری دقیق نرخ واکنش‌های شیمیایی و نرخ آرامش مولکولی در آزمایش جریان‌های آئروپدینامیکی نیز کاربرد دارند. جریان سیال پرسرعت ایجاد شده در لوله شوک که با دما و

انفجار در ناحیه پشتی امواج ضربه‌ای در لوله‌های شوک پرداخته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه لایه مرزی نقش اصلی در فرآیند تشکیل هسته اشتعال ایفا می‌کند. در این تحقیق خاص، محققان با تمرکز بر مرحله خطی توسعه لایه مرزی که در فرآیند دخیل بود از مدل‌سازی دوبعدی استفاده نمودند. استودز و همکاران [۱۰] با طراحی یک لوله شوک دو دیافراگمی، امکان بررسی تجربی فرآیندهای اساسی مربوط به تجزیه و اختلاط در شرایط فشار و دمای بالا را فراهم نمودند. در این پژوهش، محققان به تحلیل جامع پدیده فروپاشی موج ضربه‌ای و مکانیزم‌های حاکم بر آن پرداختند. مطالعه عددی انجام شده توسط راجاگوپال و همکاران [۱۱] به بررسی دقیق ویژگی‌های جریان در لوله‌های میکرو شوک با فرآیند پارگی تدریجی دیافراگم پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که امواج ضربه‌ای در این سیستم‌ها در مقایسه با لوله‌های شوک معمولی ماکرو، با نرخ تضعیف بسیار بالاتری روبرو هستند که این امر عمدتاً ناشی از تأثیرات مقیاس میکرو بر پدیده‌های انتقال مومنتم و انرژی می‌باشد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، فرآیند پارگی تدریجی دیافراگم منجر به تشکیل ساختارهای موجی غیرمتمارن در ناحیه‌ای جلوتر از دیافراگم می‌شود که این پدیده از توزیع غیریکنواخت تنش‌ها در حین پارگی دیافراگم نشأت می‌گیرد. همچنین، تحلیل‌های عددی انجام شده نشان می‌دهد که این مکانیزم پارگی، مسافت مؤثر انتشار موج ضربه‌ای را نسبت به شرایط ایده‌آل کاهش می‌دهد. مطالعه تجربی جیانگ [۱۲] به بررسی جامع فرآیندهای دینامیکی حاکم بر امواج تولید شده هنگام تخلیه پرتابه مافوق صوت از لوله شوک پرداخته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در حالی که الگوی کلی فرآیندهای دینامیکی موج اصلی در جریان لوله شوک در برابر تغییرات اصطکاک مقاوم بوده و ماهیت خود را حفظ می‌کنند، برخی پدیده‌های موجی خاص تحت تأثیر این تغییرات قرار می‌گیرند. به‌طور مشخص، نتایج تحقیق حاکی از آن است که پدیده‌های پیچیده‌ای نظیر برهمکنش شوک-شوک، برهمکنش شوک-جت و ناپایداری‌های سطح تماس، با تغییر در پارامترهای اصطکاکی تشدید می‌شوند. در مطالعه تجربی جوردن و همکاران [۱۳]، تأثیر نسبت انبساط بر مشخصات دینامیکی جریان در لوله‌های شوک به‌طور سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اعمال نسبت انبساط ۳۰ منجر به ایجاد تغییرات قابل توجهی در پارامترهای جریان می‌شود. از یک سو، این نسبت انبساط باعث کاهش سرعت جریان می‌گردد که ناشی از افزایش تلفات انرژی

دیواره انتهایی لوله به پایان می‌رسد [۴]. یکی از چالش‌های اساسی در طراحی لوله‌های شوک، توسعه مدل‌هایی است که بتوانند مدت زمان آزمایش را به حداکثر مقدار ممکن برسانند. در این راستا، محققان راهکارهای متعددی را برای افزایش بازه زمانی آزمایش در لوله‌های شوک ارائه کرده‌اند. از جمله این راهکارها می‌توان به طرح اضافه کردن یک نازل یا مخزن انبساط در بخش انتهایی لوله اشاره کرد که توسط هنشال [۵] انجام شده است.

مطالعات انجام شده توسط پاریزل و رابینوویچ [۳] نشان می‌دهد که با اضافه کردن غشای دوم و سوم بعد از غشای اول و همچنین اضافه کردن یک نازل به انتهای لوله شوک، می‌توان مدت زمان آزمایش را تا چند میلی‌ثانیه افزایش داد. این بهبود زمانی نه تنها امکان مطالعه دقیق‌تر پدیده‌های گذرا را فراهم می‌آورد، بلکه دقت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف جریان را نیز به‌طور قابل توجهی ارتقاء می‌بخشد.

مطالعات متعددی در زمینه بررسی پدیده‌های مختلف در لوله‌های شوک انجام شده است. شو و همکاران [۶] با تصویربرداری از احتراق هپتان در لوله شوک فشار بالا، تفاوت بین اشتعال همگن و ناهمگن را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش نشان داد که فشار بالاتر و بارگذاری سوخت کمتر می‌تواند به‌طور مؤثری اشتعال ناهمگن را سرکوب کند. مطالعه تجربی ماتسودا و همکاران [۷] به بررسی پدیده تعامل بین امواج ضربه‌ای و پلاسمای تخلیه شده با جریان مستقیم (DC) پرداخته است. در این پژوهش از یک لوله شوک برای تولید موج ضربه‌ای کنترل شده استفاده شد. برای تولید پلاسمای تخلیه شده از یک مدل آزمایش نوع گوه‌ای مجهز به الکترودهای آند و کاتد متصل به سیستم منبع تغذیه استفاده شد که در طول لوله شوک نصب گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که برهمکنش موج ضربه‌ای با پلاسمای تولید شده منجر به ایجاد انحنای موج در هر دو راستای y و z می‌شود. این مشاهدات تجربی مؤید آن است که ساختار موج ضربه‌ای در این شرایط از ماهیت سه‌بعدی برخوردار می‌باشد. شایان ذکر است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام شده به خوبی با داده‌های تجربی همخوانی داشتند. مطالعه تجربی ژنجیان یاو و همکاران [۸] به بررسی سیستماتیک پدیده میرایی موج ضربه‌ای منعکس شده در لوله‌های شوک پرداخته است. در این پژوهش جامع، محققان با به‌کارگیری روش‌های مختلف تجربی، به اندازه‌گیری دقیق فشار پله‌ای ناشی از موج ضربه‌ای پرداختند و دقت روش‌ها را با هم مقایسه کردند. مطالعه تجربی کیورین و یاکونکو [۹] به بررسی شروع اشتعال و

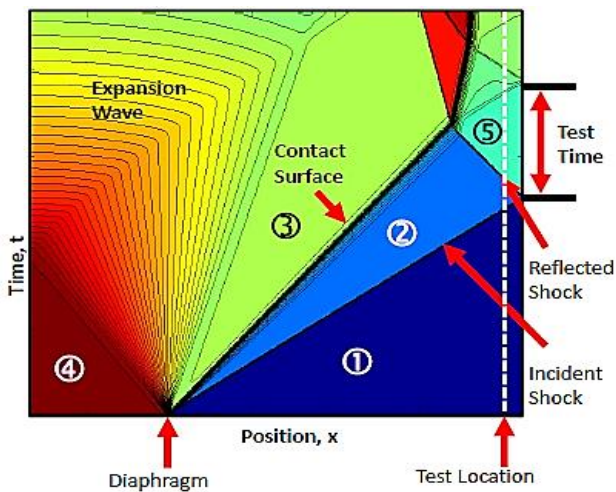
نشان می‌دهد، در حالی که در محیط‌های با گرادیان منفی، ساختار واگرا غالب می‌شود. در مطالعه تجربی مدودو و همکاران [۱۹]، عملکرد لایه‌های ضد انفجار در برابر بارهای دینامیکی ناشی از امواج ضربه‌ای با استفاده از لوله‌های شوک استوانه‌ای و مخروطی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که لوله‌های مخروطی ابزاری مؤثر برای مطالعه برهمکنش امواج ضربه‌ای کروی با لایه‌های ضد انفجار است.

سابوراج و همکاران [۲۰] به بررسی تأثیر الگوهای مختلف باز شدن دیافراگم بر پارامترهای شوک در نزدیکی دیواره انتهایی بخش محرک می‌پردازند. آزمایش‌ها با استفاده از هلیوم و آرگون به عنوان گازهای محرک، در فشارهایی از $1/32$ تا $2/09$ بار و دماهای 1073 تا 2126 کلونین پشت شوک منعکس‌شده انجام شد. هاگیوارا و همکاران [۲۱] به دستیابی به اثر مشابهی با تغییر هندسه خروجی لوله شوک پرداختند. با فرض یک جریان حالت پایدار و زیرصوت در ناحیه پساجریان، شرایط هندسه خروجی را به دست آوردند که تحت آن نه امواج ضربه‌ای و نه امواج انبساطی بازتاب نمی‌شوند. آزمایش‌های لوله شوک را با اعداد ماخ ضربه‌ای تا تقریباً $1/07$ انجام دادند و دریافتند که رفتار بازتاب موج ضربه‌ای نه تنها تحت تأثیر نسبت سطح مقطع لوله، بلکه تحت تأثیر شکل خاص روزنه نیز قرار می‌گیرد. گولواستو و همکاران [۲۲] به مطالعه تجربی در مورد تضعیف امواج ضربه‌ای قوی در یک کانال، در حین تعامل با صفحات فولادی سوراخ‌دار با نفوذپذیری $0/11$ تا $0/39$ ، پرداختند. اعداد ماخ امواج ضربه‌ای از $1/5$ تا $4/3$ متغیر بود و آن‌ها وابستگی تضعیف امواج ضربه‌ای عبوری و بازتابی را به عدد ماخ موج ضربه‌ای برخوردی و نفوذپذیری مطالعه کردند. اسوت و همکاران [۲۳] در مقاله خود دو پیکربندی از عناصر تمرکز موج ضربه‌ای را که بر اساس نظریه دینامیک ضربه‌ای طراحی شده‌اند، ارائه و به صورت تجربی بررسی نمودند. هدف این طرح‌ها افزایش مؤثر قدرت امواج ضربه‌ای و در نتیجه افزایش فشارهای انتهایی محرک تولید شده در لوله شوک بود. در پیکربندی اول، شکل دیواره شامل یک بخش تبدیل مقعر است که موج ضربه‌ای صفحه‌ای فرودی را به صورت یکنواخت به یک موج ضربه‌ای همگرای کروی تبدیل می‌کند و متعاقباً یک بخش تبدیل محدب، موج کروی را به‌طور یکنواخت‌تری به موجی صفحه‌ای تبدیل می‌نماید که سپس به سمت دیواره انتهایی لوله خروجی منتشر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این عناصر متمرکزکننده، حد بالای فشار در لوله‌های ضربه را به ترتیب به $13/4$ مگاپاسکال و 44 مگاپاسکال افزایش می‌دهد. نوک و همکاران [۲۴] در مقاله خود به صورت تجربی

در اثر فرآیند انبساط است. از سوی دیگر، منجر به افزایش فشار در ناحیه انعکاس موج ضربه‌ای شده و در نتیجه شدت ضربه موج را تقویت می‌نماید. مطالعه عددی لیبکواز [۱۴] به بررسی احتراق در محیط لوله‌های شوک پرداخته است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار احتراق به شدت تحت تأثیر ساختار شوک منعکس‌شده قرار دارد. در شرایطی که شوک منعکس‌شده دوشاخه‌ای نباشد، افزایش دما در اثر تضعیف شوک حاصل می‌شود. در مقابل، در مواردی که شوک منعکس‌شده دارای ساختار دوشاخه‌ای باشد، تشکیل یک ضربه عادی در مجاورت خط لغزش نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیند احتراق از راه دور ایفا می‌کند. ستشل و همکاران [۱۵] به بررسی تحلیلی تأثیر قطر لوله بر ویژگی‌های جریان در لوله‌های شوک پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات قطر لوله تأثیر مستقیم و معناداری بر دو پارامتر کلیدی سیستم دارد: اولاً، با افزایش قطر لوله، مدت زمان آزمایش به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد که این پدیده عمدتاً ناشی از کاهش نسبت سطح به حجم و در نتیجه تضعیف اثرات لزجت دیواره است. ثانیاً، نتایج نشان می‌دهد که قطر بزرگتر لوله منجر به کاهش قابل توجه دامنه ناهمگنی‌های جریان، شامل نوسانات چگالی و فشار، می‌شود. سمبین و لیورتس [۱۶] از امواج شوک همگرا برای تقویت فشار در لوله‌های شوک به صورت تجربی استفاده کردند. آن‌ها با طراحی آزمایش‌های دقیق، به مقایسه کمی و کیفی مشخصات پالس‌های فشار در شرایط مختلف پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از امواج شوک همگرا منجر به افزایش چشمگیر فشار می‌شود که این امر ناشی از مکانیزم تمرکز انرژی در اثر کاهش تدریجی سطح مقطع است. مطالعه جامع توبنر و همکاران [۱۷] به بررسی همزمان تجربی و عددی امواج ضربه‌ای ناشی از لیزر پلاسما در محیط‌های میکرو شوک پرداخته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتقال از مقیاس ماکرو به میکرو تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر مشخصات دینامیکی امواج ضربه‌ای دارد و باعث تضعیف موج ضربه‌ای می‌شود.

ژای و همکاران [۱۸] به مطالعه مکانیزم‌های ناپایداری و دینامیک برهمکنش موج-سیال در لوله‌های شوک پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که امواج ضربه‌ای با ساختار اولیه مسطح تحت تأثیر برهمکنش با محیط سیالی دچار تحول ساختاری می‌شوند. این تحول به صورت انتقال به امواج همگرا یا واگرا بسته به مشخصات ترمودینامیکی محیط رخ می‌دهد. در محیط‌های با گرادیان چگالی مثبت (افزایش چگالی به سمت مرکز)، موج تمایل به ساختار همگرا از خود

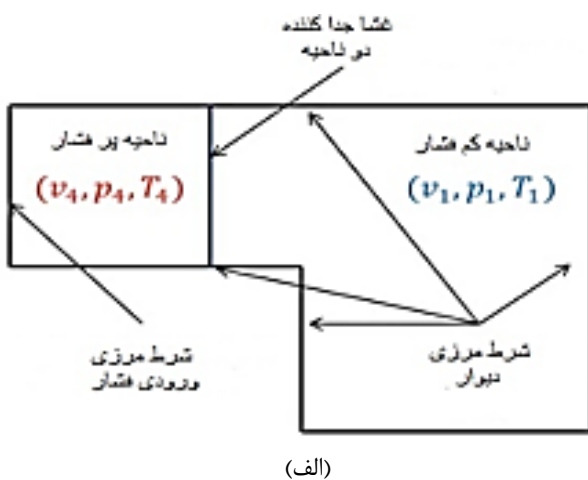
این هندسه خاص و برای اعداد ماخ ۱/۳ و ۲/۴ به صورت عددی شبیه‌سازی و تحلیل می‌گردد.



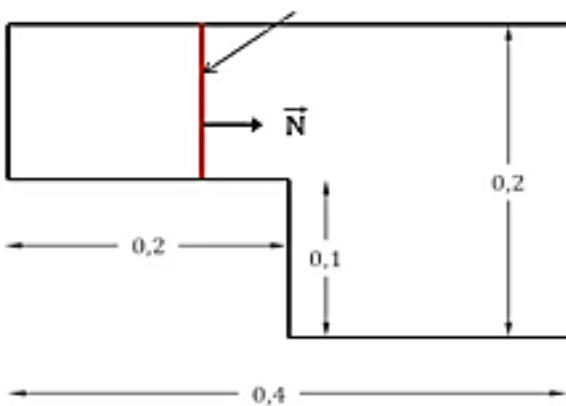
شکل ۲ تغییرات زمان بر حسب مکان امواج یک لوله شوک معمولی

۲- روش تحقیق

۲-۱- هندسه لوله شوک



(الف)



(ب)

شکل ۳ الف- شرایط مرزی، ب- هندسه و ابعاد لوله شوک به متر

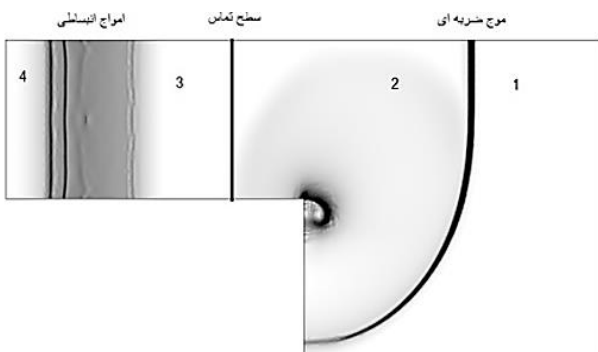
اثر قطر داخلی لوله شوک را بر توزیع سرعت امواج شوک تولیدشده در امتداد لوله تجزیه و تحلیل کردند. آزمایش‌ها در لوله‌های شوک بدون دیافراگم و با استفاده از بخش‌های محرک با قطرهای داخلی ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر، ترکیبات مختلف گازهای محرک و فشارهای اولیه مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که با کاهش قطر لوله شوک، سرعت موج شوک تولیدشده افزایش می‌یابد که این امر به نوبه خود منجر به افزایش گام فشار دیواره انتهایی می‌شود؛ از این سیگنال فشار می‌توان به عنوان ورودی مرجع برای کالیبراسیون دینامیکی سنسورهای فشار استفاده نمود. شن و همکاران [۲۵] در مطالعه‌ای به پیش‌بینی تأثیر سطوح مقطع متغیر بر عملکرد جریان در یک لوله شوک با دمای بالا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پس از اضافه کردن یک نازل انقباض-انبساط، موج شوک ورودی در حین عبور از بخش انقباض شتاب گرفته و در داخل همین بخش منعکس می‌شود. همچنین، نوسانات شدیدی در طول جریان رخ می‌دهد که شدت آن با کاهش اندازه گلوگاه افزایش می‌یابد. در پژوهش‌های مربوط به امواج ضربه‌ای در لوله‌های شوک، استفاده از سنسورهای فشار پیزوالکتریک به دلیل توانایی ثبت تغییرات سریع فشار در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این وجود، چالش اصلی در به‌کارگیری این سنسورها تعیین موقعیت بهینه نصب آن‌ها در طول لوله است، چرا که قرارگیری نامناسب سنسور می‌تواند منجر به تداخل سیگنال‌های موج اولیه و منعکس‌شده گردد و دقت اندازه‌گیری‌ها را به شدت کاهش دهد.

برای حل این مشکل، پژوهشگران با تحلیل دقیق مشخصات دینامیکی موج از جمله سرعت انتشار، نقاط انعکاس و الگوی حرکت موج در طول لوله، موقعیت‌هایی را شناسایی می‌کنند که در آنها فاصله زمانی بین رسیدن موج اولیه و موج منعکس‌شده به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

شکل (۲) نشان می‌دهد که زمان آزمایش به موج برگشتی و سطح تماس محدود می‌شود.

با بررسی پیشینه تحقیق، مشاهده می‌شود که اگرچه مطالعات متعددی به بررسی لوله‌های شوک پرداخته‌اند، اما پژوهش‌های کمتری به صورت عددی به بررسی همزمان تأثیر لوله شوک پله‌ای و پیکربندی‌های مختلف دیواره انتهایی بر توزیع فشار و انتشار امواج پرداخته است. از این رو، نوآوری اصلی این تحقیق در تمرکز بر روی یک لوله شوک پله‌ای و بررسی هندسه‌های مختلف دیواره انتهایی با هدف کاهش قدرت موج برگشتی از طریق تحلیل کمی شیب فشار انعکاسی است. در این راستا، پدیده موج ضربه‌ای ناشی از پاره شدن غشا در

صفر و دمای یکنواخت ۳۰۰ کلوین لحاظ شد. در مرحله دوم، شرایط مرزی به گونه‌ای تنظیم شد که امکان بررسی سیستم تحت گرادیان‌های شدیدتر فراهم گردد. نسبت فشار در دو طرف غشاء به ۶/۵۵ افزایش یافت، در حالی که شرایط دمایی به صورت نامتقارن با دمای ۶۱۲ کلوین در ناحیه پر فشار و ۳۰۰ کلوین در ناحیه کم فشار تعیین شد. این اختلاف دمای قابل توجه (۳۱۲ کلوین) به همراه سرعت اولیه ۵۷۴ متر بر ثانیه در ناحیه پر فشار (معادل عدد ماخ $\sim 1/5$) در جهت مثبت X و دمای دیواره ورودی ۷۵۴ کلوین، شرایط کاری پیچیده‌ای را ایجاد می‌نماید که به بررسی اثرات همزمان گرادیان فشار، اختلاف دما و سرعت اولیه بر رفتار موج ضربه‌ای می‌پردازد. فشار محیط خارجی نیز در ۱۵/۰۳ اتمسفر در نظر گرفته شد تا شرایط عملیاتی با فشار بالا شبیه‌سازی شود. انتخاب فشار، دما و سرعت گازها در دو طرف دیافراگم بر اساس اصول طراحی لوله شوک انجام شده است تا تأثیر پله بر الگوی جریان در شرایط نزدیک به واقعیت عملیاتی با دقت بیشتری مطالعه گردد. این پارامترها که شدت موج ضربه‌ای را مشخص می‌کنند، بر اساس استانداردهای طراحی و هدف آزمایش بهینه‌سازی شده‌اند تا موج ضربه‌ای با مشخصات مورد نظر ایجاد شود [۲۶].



شکل ۴ معرفی نواحی مختلف لوله شوک پس از پاره شدن غشاء؛ (۱) ناحیه کم‌فشار، (۲) ناحیه مؤثر از عبور موج ضربه‌ای (۳) ناحیه مؤثر از امواج انبساطی (۴) ناحیه پرفشار

۲-۳- معادلات حاکم

مبنای تئوری این پژوهش با تعریف عدد ماخ آغاز می‌شود [۲۷]:

$$M = \frac{N}{a} \quad (1)$$

که در این رابطه N سرعت موج و a سرعت صوت در جلوی موج بر حسب (m/s) می‌باشد.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییرات هندسی بر رفتار دینامیکی جریان در لوله‌های شوک، به طراحی و تحلیل یک پیکربندی جدید پرداخته است. در طراحی پیشنهادی که در شکل (۳) نشان داده شده، یک پله در ناحیه کم‌فشار لوله شوک تعبیه شده تا تأثیر آن بر مشخصات جریان به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گیرد. این مطالعه با استفاده از روش عددی به بررسی الگوی انتشار امواج ضربه‌ای، توزیع فشار و دما در طول لوله و تغییرات بازه زمانی آزمایش می‌پردازد. طراحی منحصر به فرد این لوله شوک با ویژگی پله‌ای در ناحیه کم‌فشار، نوآوری اصلی این تحقیق محسوب می‌شود که امکان بررسی همزمان اثرات هندسی بر انتشار موج و پارامترهای ترمودینامیکی را فراهم می‌سازد.

۲-۲- روش تحلیل

این پژوهش به بررسی عددی رفتار دینامیکی جریان در یک لوله شوک پله‌ای با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent پرداخته است. در حل عددی از روش گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم (Second order upwind) استفاده گردید و معیار همگرایی 10^{-3} در نظر گرفته شد.

در این مطالعه، دو عدد ماخ $1/3$ و $2/4$ مورد تحلیل قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده طیف وسیعی از شرایط جریان است. بر اثر پاره شدن غشای جداکننده گاز فشار بالا از گاز فشار پایین، یک موج ضربه‌ای در سمت فشار پایین و یک دسته موج انبساطی در سمت فشار بالا ایجاد می‌شود و به دلیل عبور کردن موج ضربه‌ای از روی پله یک موج چرخشی در محل پله تشکیل می‌گردد. گاز مورد مطالعه هوا در نظر گرفته شده که تحت شرایط استاندارد و با فرض رفتار ایده‌آل مدل‌سازی شده است. در این تحلیل، تمام فرآیندها به جز پاره شدن غشاء، آیزنتروپیک فرض شده‌اند. بعد از پاره شدن غشاء نهایتاً سیستم به تعادل ترمودینامیکی می‌رسد و حالت نهایی در لوله بسته از قانون اول ترمودینامیک محاسبه می‌شود. بر اساس قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های بسته، در چنین شرایطی مجموع انرژی داخلی گازها در حالت نهایی تعادل دقیقاً برابر با مجموع انرژی‌های داخلی اولیه گازها در دو طرف غشاء خواهد بود. نکته حائز اهمیت این است که حالت تعادل نهایی گاز مدنظر نیست و تمرکز اصلی تحقیق بر پدیده گذرای ضربه که بلافاصله بعد از پاره شدن غشاء رخ می‌دهد، می‌باشد.

شبیه‌سازی در دو مرحله انجام شد: در مرحله اول نسبت فشار در دو طرف غشاء ۳/۴۵، سرعت اولیه در دو طرف غشاء

که در این روابط: T_0 و p_0 به ترتیب دمای سکون و فشار سکون می‌باشند و M_2 عدد ماخ پس از موج ضربه‌ای است که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_2 = \frac{v_2}{\sqrt{kRT_2}}$$

برای دو حالت عدد ماخ ورودی (۱/۳ و ۲/۴)، محاسبات به شرح جدول (۳) انجام شده است:

جدول ۳ مقادیر فشار و دمای سکون هوا

M	M_2	$P_{0,atm}$	$T_{0,K}$
۱/۳	۰/۴۱	۲/۰۲۱۲	۳۸۶
۲/۴	۱/۱۶	۱۵/۰۳۴۹	۷۴۵

۲-۴- استقلال حل از شبکه

نتایج بررسی استقلال از شبکه در جدول (۴) ارائه شده است که در آن دقت حل عددی برای سایزهای مختلف المان‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس این تحلیل‌ها، شبکه‌ای با ۸۱۵۶۱ المان به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد که ضمن حفظ دقت محاسباتی قابل قبول از کارایی محاسباتی مناسبی نیز برخوردار است. در این شبکه‌بندی بهینه، از المان‌های چهاروجهی با توزیع غیریکنواخت استفاده شده است به طوری که در نزدیکی دیواره‌ها و نواحی با گرادیان‌های شدید (همچون محل پله و امواج ضربه‌ای)، شبکه به صورت موضعی ریز شده است (شکل (۵)). این رویکرد موجب افزایش دقت محاسبات در نواحی حساس شده، در حالی که از افزایش بی‌مورد تعداد المان‌ها در نواحی با تغییرات ملایم جلوگیری می‌کند.

جدول ۴ تأثیر تعداد سلول بر دمای میانگین در لوله شوک برای عدد ماخ ۱/۳

تعداد سلول	دمای میانگین در لوله شوک (k)
۱۵۴۵۵	۲۸۵/۲۰
۲۶۷۸۷	۲۹۰/۳۱
۴۵۳۲۴	۲۹۱/۴۷
۸۱۵۶۱	۲۹۲/۵۶
۱۱۰۵۶۰	۲۹۲/۸۰

با اعمال معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای موج ضربه‌ای نرمال، نسبت فشار در دو طرف موج به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۸]:

$$\frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1} \right) \left[1 - \frac{k-1}{k+1} \left(M - \frac{1}{M} \right) \right]^{\frac{2k}{k-1}} \quad (۲)$$

شرایط مرزی و اولیه سیستم برای دو حالت عدد ماخ ۱/۳ و ۲/۴ به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

$$v_1 = v_4 = 0$$

$$T_1 = T_4 = 300$$

جدول ۱ مقادیر فشار در ناحیه ۱ و ۴

عدد ماخ	P_1 (atm)	P_4 (atm)
۱/۳	۱	۳/۴۵
۲/۴	۱	۶/۵۵

با حل معادلات (۱) و (۲)، پارامترهای جریان در ناحیه ۲ پس از گذر از موج ضربه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 \left(\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1} \right) \\ v_2 &= \frac{2\sqrt{kRT_1}}{k+1} \left(M - \frac{1}{M} \right) \\ T_2 &= T_1 \left(\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1} \right) \left(\frac{k-1}{k+1} + \frac{2}{k+1} M^2 \right) \end{aligned} \quad (۳)$$

جدول (۲) مقادیر به دست آمده پارامترهای جریان در ناحیه ۲ را نمایش می‌دهد:

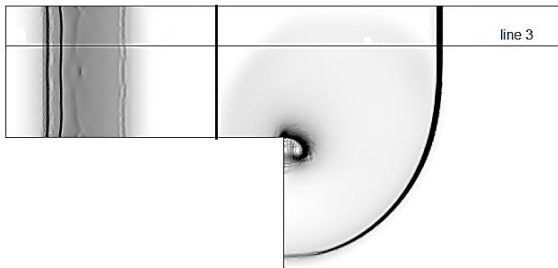
جدول ۲ مقادیر فشار، دما و سرعت هوا در ناحیه ۲

M	$P_{2,atm}$	V_2	T_2
۱/۳	۱/۸۰۵۰	۱۵۴	۳۵۷
۲/۴	۶/۵۵۳۳	۵۷۴	۶۱۲

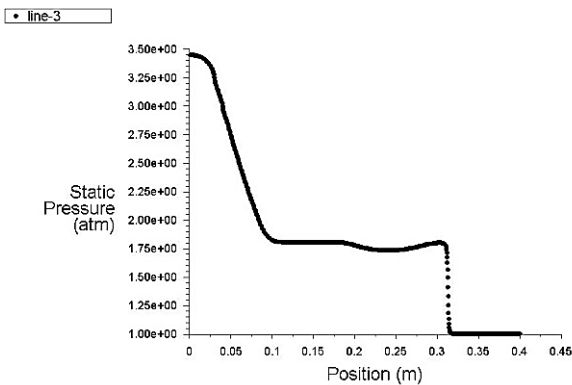
با استفاده از معادلات (۲) و (۳)، معادلات حاکم بر پارامترهای سکون به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\begin{aligned} p_{02} &= p_2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ T_{02} &= T_2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2 \right) \end{aligned} \quad (۴)$$

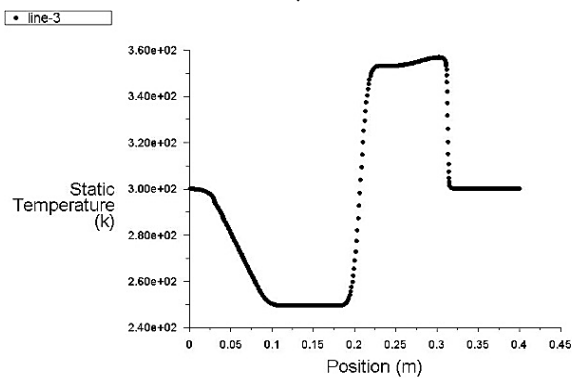
افزایش دمای موضعی و تشکیل جریان برگشتی در ناحیه مجاور پله را به تصویر می‌کشند. این تغییرات بیانگر تشکیل ساختارهای پیچیده جریان در اثر تغییر ناگهانی مقطع است.



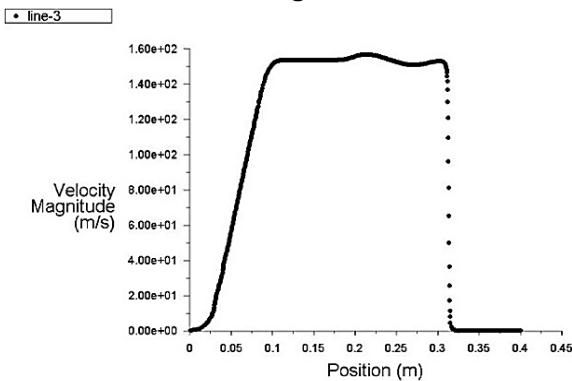
(الف)



(ب)

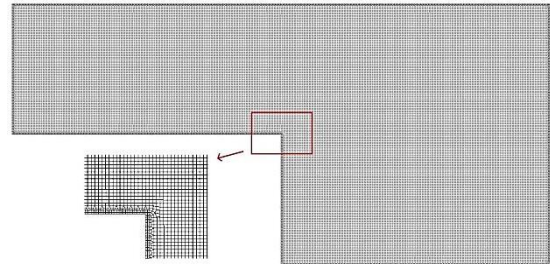


(ج)



(د)

شکل ۷ الف- امواج و موقعیت خط ۳ در طول لوله برای عدد ماخ ۱/۳
 ب- تغییر فشار در طول لوله شوک، ج- تغییر سرعت در طول لوله شوک، د- تغییر دما در طول لوله شوک

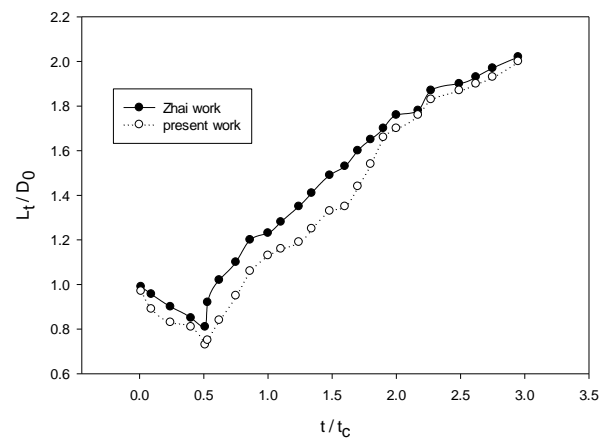


شکل ۵ شبکه محاسباتی در ناحیه حل

۲-۵- صحت سنجی

پیش از انجام شبیه‌سازی اصلی، صحت روش عددی با مقایسه نتایج حاصل با داده‌های تجربی معتبر [۲۹] مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج این مطالعه و داده‌های مرجع وجود دارد.

بیشینه اختلاف (خطای ماکزیمم) بین دو منحنی، مقداری معادل ۰/۱۸ واحد (۱۱/۷۶ درصد) در زمان ۱/۶ است که با توجه به سرعت بسیار بالای موج ضربه‌ای و مقیاس زمانی میکروثانیه، این میزان اختلاف قابل توجیه بوده و دقت قابل قبول روش عددی مورد استفاده را تأیید می‌کند.



شکل ۶ مقایسه مسئله حاضر با تحقیق ژای [۲۹]

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، رفتار جریان در یک لوله شوک پله‌ای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای دو نسبت فشار متفاوت (۳/۴۵ و ۶/۵۵) و دو عدد ماخ ۱/۳ و ۲/۴ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent در محیط Workbench انجام شده است. نتایج حاصل شامل توزیع فشار، دما و سرعت در امتداد خط ۳ به فاصله عمودی ۰/۰۳۳ متر از بالای لوله در شکل (۷) ارائه گردیده که به وضوح تأثیر وجود پله بر مشخصات جریان را نشان می‌دهد. برای عدد ماخ ۱/۳، نمودارهای ترسیم‌شده کاهش ناگهانی فشار در محل پله،

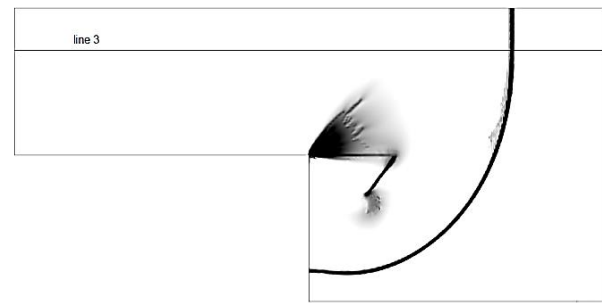
سطح تماس به عنوان یک ناپیوستگی حرارتی عمل می‌کند که گاز متراکم شده پس از عبور موج ضربه‌ای را از گاز سرد شده ناشی از فرآیند انبساط تفکیک می‌نماید. گازهای نواحی ۲ و ۳ از نظر سرعت جریان ($V_2 = V_3$) و فشار استاتیک ($P_2 = P_3$) در شرایط یکسانی قرار دارند، اما تفاوت چشمگیری در پارامترهای ترموفیزیکی آنها مشاهده می‌شود. این تمایز عمدتاً ناشی از اختلاف چگالی ($\rho_2 \neq \rho_3$) و دمای ($T_2 \neq T_3$) بین دو ناحیه است.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در این حالت به دلیل سرعت اولیه‌ی زیادی که از سمت ناحیه پر فشار وارد می‌گردد پارامترهای ترمودینامیکی شامل دما، فشار و سرعت تقریباً بدون تغییر نسبت به مقادیر اولیه باقی می‌مانند. به عبارت دیگر، مقادیر اولیه تعیین شده برای دما (۶۱۲ کلوین)، فشار (۶/۵۵ اتمسفر) و سرعت (۵۷۴ متر بر ثانیه) در این ناحیه حفظ می‌شوند. با این حال، هنگام عبور موج ضربه‌ای، تغییرات ناگهانی و قابل توجهی در این پارامترها مشاهده می‌شود که منجر به رسیدن به مقادیر تعیین شده برای ناحیه کم‌فشار شامل فشار ۱ اتمسفر، دمای ۳۰۰ کلوین و سرعت نزدیک به صفر می‌گردد. این تغییرات شدید که در محدوده بسیار باریکی از جریان رخ می‌دهد، ناشی از مکانیسم‌های فیزیکی خاصی شامل فشردگی شدید گاز در اثر موج ضربه‌ای، تبدیل انرژی جنبشی به انرژی داخلی و تشکیل ناپیوستگی در مشخصات جریان است.

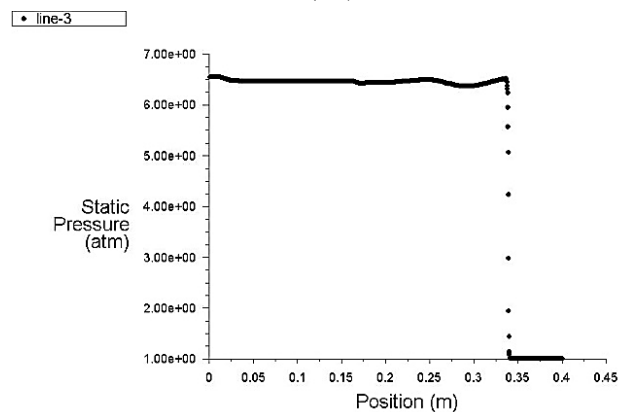
در انتها، تأثیر تغییر هندسه دیواره انتهایی لوله شوک بر میزان انعکاس موج و مدت زمان آزمایش به دقت بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، پنج طرح مختلف برای دیواره انتهایی مورد ارزیابی قرار گرفته که هدف اصلی آنها کاهش قدرت موج برگشتی و در نتیجه افزایش زمان آزمایش بوده است. تحلیل نمودارهای فشار نشان می‌دهد که در طرح (۵)، شیب تغییرات فشار در محل انعکاس به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این کاهش شیب که به‌وضوح در نمودار قابل مشاهده است، بیانگر کاهش قابل توجه قدرت موج انعکاسی در این نوع هندسه می‌باشد.

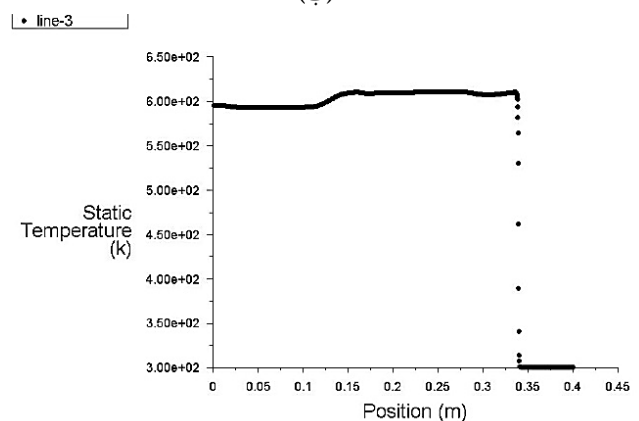
نتایج حاصل از این بررسی حاکی از آن است که با بهینه‌سازی شکل دیواره انتهایی می‌توان تا حد زیادی از شدت موج برگشتی کاست و در نتیجه بازه زمانی برای انجام آزمایش را افزایش داد.



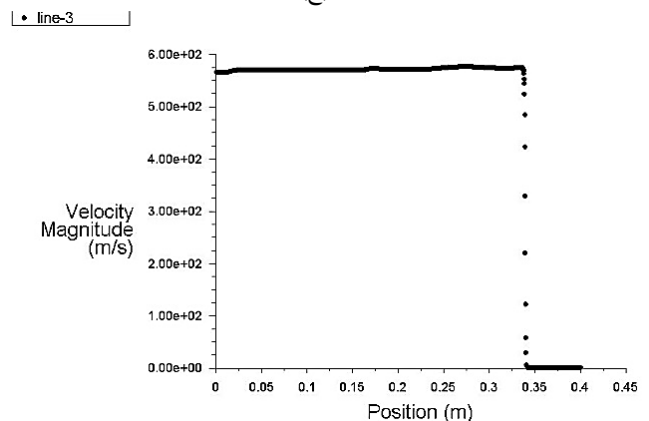
(الف)



(ب)

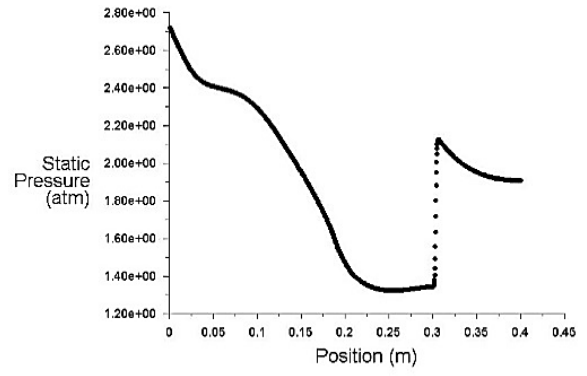
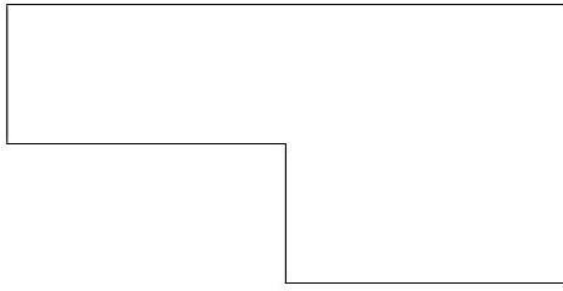


(ج)

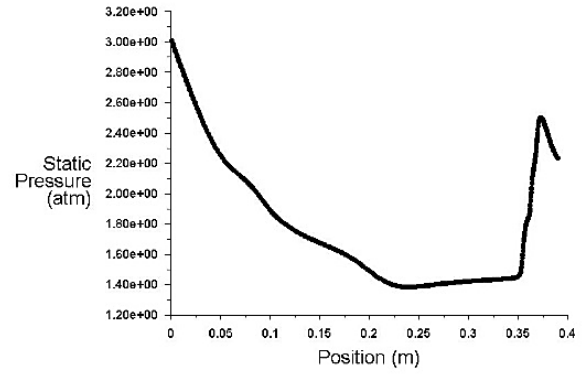
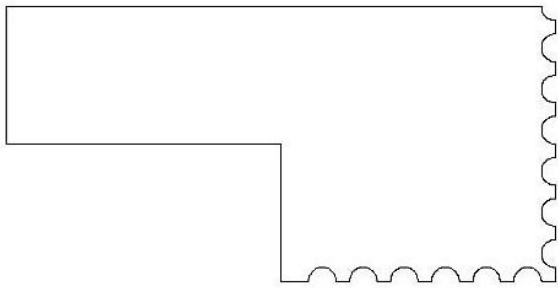


(د)

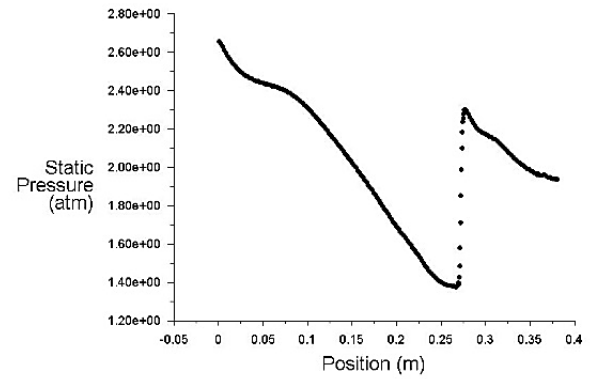
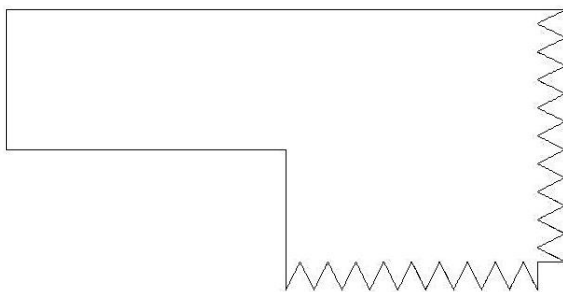
شکل ۸ الف- امواج و موقعیت خط ۳ در طول لوله برای عدد ماخ ۲/۴ ب- تغییر فشار در طول لوله شوک، ج- تغییر سرعت در طول لوله شوک، د- تغییر دما در طول لوله شوک



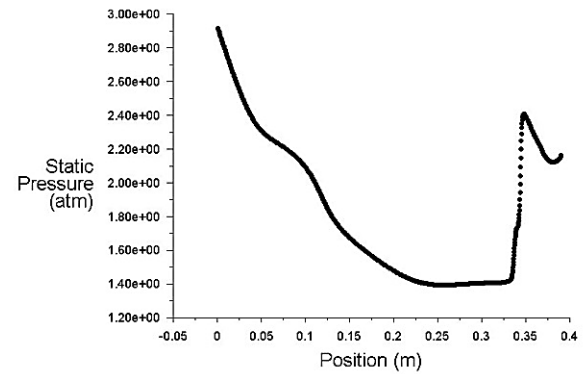
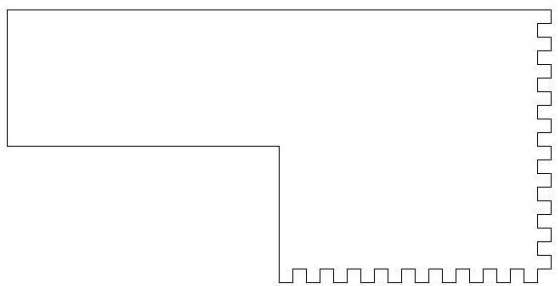
(الف)



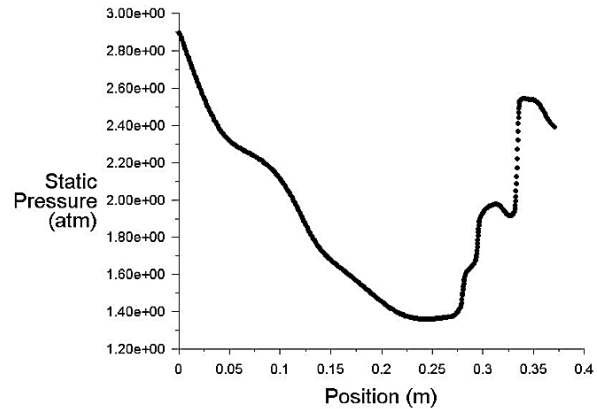
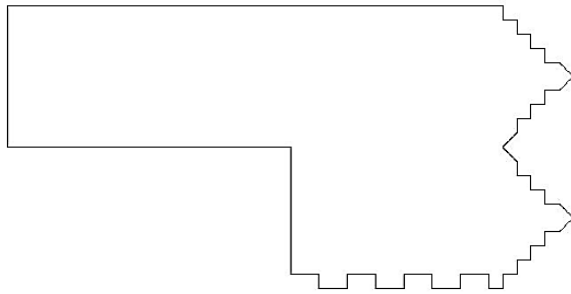
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۹ سمت راست: تغییر فشار در طول لوله شوک، سمت چپ: هندسه لوله شوک

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی عددی تأثیر طراحی لوله شوک پله‌ای و بهینه‌سازی هندسه دیواره انتهایی بر رفتار دینامیکی جریان در یک لوله شوک پرداخت. نتایج به وضوح نشان داد که طراحی هوشمندانه هندسی می‌تواند پدیده انعکاس امواج تراکمی را به‌طور مؤثری کنترل نماید. برجسته‌ترین دستاورد کمی این مطالعه، کاهش شیب فشار انعکاسی در حدود ۷۳ درصد برای هندسه بهینه (طرح ه) در مقایسه با لوله ساده (طرح الف) بود که علیرغم مشاهده یک افزایش حدود ۳۳ درصدی در گرادیان فشار دو سمت موج برگشتی رخ داده است؛ این نتیجه نشان‌دهنده کاهش قابل توجه قدرت موج برگشتی است. این کاهش قدرت موج، منجر به افزایش بازه زمانی آزمایش گردید که امکان مطالعه دقیق‌تر پدیده‌های گذرا را فراهم می‌سازد. همچنین، مشاهدات حاکی از آن بود که اثرات مثبت این طراحی در عدد ماخ بالاتر (۲/۴) بارزتر است و تشکیل ناحیه گردابی پایدار در پایین دست پله، سهم بسزایی در تضعیف اولیه انرژی موج داشت. در مجموع، یافته‌ها اثبات می‌کنند که ترکیب یک لوله شوک پله‌ای با دیواره انتهایی بهینه‌شده، راهکاری عملی برای افزایش کارایی و قابلیت اطمینان آزمایش‌های لوله شوک می‌باشد و زمینه را برای پژوهش‌های آینده در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه هموار می‌سازد.

۵- مراجع

- M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Utah, Salt Lake City, UT, USA, 2010,
<https://www.proquest.com/openview/60633f7c0dd18e9b9bdc0bbeedcfff646/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- [3] N. Parziale, J. Rabinovitch, G. Blanquart, H. Hornung, and J. Shepherd, "Proposed vertical expansion tunnel," *AIAA journal*, vol. 51, no. 12, pp. 2792-2799, 2013, <https://doi.org/10.2514/1.J052389>
- [4] M. Chavko, W. A. Koller, W. K. Prusaczyk, and R. M. McCarron, "Measurement of blast wave by a miniature fiber optic pressure transducer in the rat brain," *Journal of neuroscience methods*, vol. 159, no. 2, pp. 277-281, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2006.07.018>
- [5] B. Henshall, "On some aspects of the use of shock tubes in aerodynamic research," Aeronautical Research Council, 1955, <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/3613>
- [6] J. Shao et al., "High-speed imaging of n-heptane ignition in a high-pressure shock tube," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 1, pp. 911-918, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.158>
- [7] A. Matsuda, Y. Kondo, and N. Aoyama, "Shock wave modulation due to discharged plasma using a shock tube," *Mechanical Engineering Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 16-00120, 2016, <https://doi.org/10.1299/mej.16-00120>
- [8] Z. Yao, X. Liu, C. Wang, and W. Yang, "Improved traceable measurement of the reflected step pressure in shock tube with the compensation of shock wave attenuation," *Aerospace Science and Technology*, vol. 107, p. 106302, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106302>
- [1] I. Cernak, "The importance of systemic response in the pathobiology of blast-induced neurotrauma," *Frontiers in Neurology*, vol. 1, p. 151, 2010, <https://doi.org/10.3389/fneur.2010.00151>
- [2] M. M. Bokil, "Characterization of the pressure wave from a shock tube using numerical simulations,"

- no. 5, pp. 946-950, 2020, <https://doi.org/10.1134/S1990793120060251>
- [20] J. Subburaj, M. Figueroa-Labastida, and A. Farooq, "Predicting non-ideal effects from the diaphragm opening process in shock tubes," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 1, 2025, <https://doi.org/10.1063/5.0251146>
- [21] J. Hagiwara, N. Shigeta, N. Kimura, D. Custodio, T. Asahi, K. Ozawa, T. Yamaguchi, Y. Nakamura, and A. Sasoh, "Geometrical impedance matching for weak shock waves at shock tube end wall," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 4, 2025, <https://doi.org/10.1063/5.0260782>
- [22] S. Golovastov, G. Bivol, and F. Kuleshov, "Interaction of strong shock waves with perforated stainless-steel plate in a shock tube," *Experiments in Fluids*, vol. 66, no. 6, 2025, <https://doi.org/10.1007/s00348-025-04051-8>
- [23] A. Svete, B. Novak, U. Planko, and J. Kutin, "Experimental investigation of the developed focusing elements for generating extreme pressures in a diaphragmless shock tube," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08529-7>
- [24] B. Novak, A. Svete, and J. Kutin, "Effects of the shock tube diameter on shock wave propagation in a diaphragmless shock tube," *Measurement: Sensors*, vol. 31, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101687>
- [25] J. Shen, D. Yao, Z. Shao, F. Ji, X. Chen, W. Chen, and J. Li, "The Effect of Contraction–Expansion Nozzle on High-Temperature Shock Tube Flow," *Aerospace*, vol. 12, no. 2, 2025, <https://doi.org/10.3390/aerospace12020120>
- [26] J. Teichter, "Design of a shock tube," 2005, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962327/FULLTEXT01.pdf>
- [27] R. E. Duff and A. N. Blackwell, "Explosive driven shock tubes," *Review of Scientific Instruments*, vol. 37, no. 5, pp. 579-586, 1966, <https://doi.org/10.1063/1.1720256>
- [28] A. C. Courtney, L. P. Andrusiv, and M. W. Courtney, "Oxy-acetylene driven laboratory scale shock tubes for studying blast wave effects," *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 4, p. 045111, 2012, <https://doi.org/10.1063/1.3702803>
- [29] Z. Zhai, T. Si, X. Luo, and J. Yang, "On the evolution of spherical gas interfaces accelerated by a planar shock wave," *Physics of Fluids*, vol. 23, no. 8, p. 084104, 2011, <https://doi.org/10.1063/1.36>
- [9] A. Kiverin and I. Yakovenko, "Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube," *Combustion and Flame*, vol. 204, pp. 227-236, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.03.012>
- [10] I. Stotz, G. Lamanna, and B. Weigand, "Fluid disintegration studies in a specialized shock tube," *Progress in Propulsion Physics*, vol. 2, pp. 165-206, 2011, <https://doi.org/10.1051/eucass/201102165>
- [11] R. A. Kumar, K. H. Dong, and S. Toshiaki, "Computational study on micro shock tube flows with gradual diaphragm rupture process," *Open Journal of Fluid Dynamics*, vol. 2, no. 4, pp. 143-150, 2012, <https://doi.org/10.4236/ojfd.2012.24A027>
- [12] Z. Jiang, "Wave dynamic processes induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube," *Physics of fluids*, vol. 15, no. 6, pp. 1665-1675, 2003, <https://doi.org/10.1063/1.1566752>
- [13] G. Jourdan et al., "Analysis of shock-wave propagation in aqueous foams using shock tube experiments," *Physics of Fluids*, vol. 27, no. 5, p. 052103, 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4919905>
- [14] J. T. Lipkowicz et al., "Numerical investigation of remote ignition in shock tubes," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 106, pp. 471-498, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00219-w>
- [15] M. Satchell et al., "Analytical method of evaluating nonuniformities in shock tube flows: Application," *AIAA Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 669-676, 2022, <https://doi.org/10.2514/1.J060991>
- [16] S. Sembian and M. Liverts, "On using converging shock waves for pressure amplification in shock tubes," *Metrologia*, vol. 57, no. 3, p. 035008, 2020, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab7f99>
- [17] U. Teubner et al., "Laser-plasma induced shock waves in micro shock tubes," *New Journal of Physics*, vol. 19, no. 10, p. 103016, 2017, <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa83d8>
- [18] Z. Zhai, L. Zou, Q. Wu, and X. Luo, "Review of experimental Richtmyer-Meshkov instability in shock tube: From simple to complex," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 232, no. 16, pp. 2830-2849, 2018, <https://doi.org/10.1177/0954406217727305>
- [19] S. Medvedev et al., "Testing of explosion-proof coatings in cylindrical and conical shock tubes," *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 14,