

تعیین تجربی مشخصات آکوستیکی محفظه‌ی احتراق موتورهای راکت سوخت مایع

محمد فرشی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

حبیب‌اله مهرجو (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

حسام‌الدین فاتحی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

موتورهای راکت سوخت مایع گاهی با پدیده‌ی ناپایداری احتراق و نوسانات شدید فشار محفظه، همراه با نوسانات شعله‌ی خروجی نازل، کنده شدن انژکتورها، و در نهایت انهدام موتور روبرو می‌شوند که ناگهان در حین کار رخ می‌دهد. پدیده‌ی ناپایداری احتراق فرکانس بالا در نتیجه‌ی تأثیر متقابل بین فرایند احتراق و آکوستیک محفظه‌ی احتراق به وجود می‌آید. برای بررسی این پدیده، به دست آوردن مشخصات آکوستیکی محفظه‌ی احتراق ضروری است. در این نوشتار، روش تعیین تجربی مشخصات آکوستیکی درون یک محفظه احتراق ارائه شده است. ابتدا یک آزمایشگاه صوتی مجهز به یک اتاق آکوستیکی، و تجهیزات تولید و ثبت صوت با قابلیت حرکت در فضای سه بعدی درون محفظه‌ی احتراق طراحی و ساخته شده است. پس از بررسی توان سطوح اتاق در جذب صوت و تأیید عملکرد تجهیزات تولید و ثبت صوت، مشخصات آکوستیکی چندین محفظه‌ی استوانه‌یی با ابعاد و شرایط مرزی مختلف تعیین و با نتایج تحلیلی مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که روش‌های تجربی ارائه شده امکان شناسایی و توجیه پدیده‌های آکوستیکی درون محفظه‌های سه‌بعدی و تأثیر تغییرات هندسی و شرایط مرزی مختلف را فراهم کرده است. ضمن شناسایی پدیده‌ی دگرگونی شکل امواج ایستای آکوستیکی در محفظه‌های با تقارن محوری، در شرایط نزدیک بودن اندازه‌ی قطر محفظه به طول آن، روابط پارامتریک برای پیش‌بینی این پدیده ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده، نسبت طول موج متناسب با فرکانس آستانه‌ی شروع دگرگونی موج ایستای محوری به قطر لوله، (λ_d/D) ، برابر ۱/۷ است.

مشخصات مدهای آکوستیکی محوری درون یک محفظه‌ی احتراق، شامل قسمت همگرای نازل، به روش تجربی اندازه‌گیری و با معادلات نظری پیشنهاد شده، مقایسه شده است.

مقدمه

بالا کنترل، یا حذف مدهای آکوستیکی است که از امکان همگرایی و تشدید با نوسانات ایجاد شده در فرایند احتراق برخوردارند. در این راستا روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است.^[۱] از آن جمله می‌توان به نصب حائل‌های صلیبی روی صفحه‌ی انژکتور موتور و نیز استفاده از تشدیدگرهای هلمهولتز در دیواره‌های محفظه‌ی احتراق^[۲]، و تغییرات در آرایش جای‌گذاری انژکتورها^[۳] اشاره کرد. به دست آوردن مشخصات آکوستیکی یک چنین محفظه‌ی احتراقی که شامل صفحات صلیبی، تشدیدگرهای هلمهولتز و انواع چیدمان انژکتورها باشد به منظور شناسایی میدان آکوستیکی، که با فرایند احتراق همگرایی می‌کند و باعث ایجاد ناپایداری احتراق می‌شود ضروری است.

پیچیدگی هندسی درون محفظه‌ی احتراق و امکانات محدود روش‌های تحلیلی و عددی برای به دست آوردن مشخصات آکوستیکی محفظه‌ی احتراق انجام آزمایش‌های تجربی را الزامی می‌کنند. از آنجا

ناپایداری فرکانس بالا که از نوع گاز دینامیکی است، خطرناکترین نوع ناپایداری است. سازوکار این پدیده براساس همگرایی (اندراکش) میان یکی از مدهای آکوستیکی محفظه‌ی احتراق با فرایند احتراق به وجود می‌آید. مدهای آکوستیکی ایجاد شده به مدهای طولی و عرضی تقسیم می‌شوند. در مدهای طولی موج‌ها از صفحه‌ی انژکتور به سمت گلوگاه نازل محفظه احتراق حرکت می‌کنند. در مدهای عرضی (مماسی و شعاعی) موج از دیواره‌های عرضی محفظه منعکس می‌شود. به علت رسیدن سرعت جریان به سرعت صوت در گلوگاه نازل، و افزایش سرعت در قسمت واگرایی نازل امواج پایین دست گلوگاه امکان حرکت به طرف بالا دست جریان را ندارند (شکل ۱). لذا برای مطالعه‌ی این پدیده در نظر داشتن ناحیه‌ی محفظه‌ی احتراق و نازل همگرا کافی است.

یکی از روش‌های مؤثر در جلوگیری از بروز ناپایداری فرکانس

سه‌بعدی نسبتاً ساده مقدور شد و نتایج حاصله با نتایج نظری موجود مقایسه شد. سپس هندسه‌های نزدیک به هندسه‌ی محفظه‌ی احتراق مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مقطع مشاهدات آزمایشگاهی نشان دهنده‌ی وجود تأثیرات هندسه‌ی سه‌بعدی بر میدان آکوستیکی محفظه و دور شدن نتایج تجربی از نتایج تحلیلی بوده‌اند. پس از تفکیک اثرات مختلف سه‌بعدی و تأثیرات شرایط مرزی، روش انجام آزمایش و هندسه‌های متناسب با هندسه‌ی محفظه‌ی احتراق برای انجام آزمایش‌های نهایی در نظر گرفته شدند.

در ادامه، ابتدا ساختار اتاق آکوستیکی و چیدمان آن و نحوه‌ی استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی به‌طور خلاصه ارائه می‌شود. سپس نتایج آزمایش‌های انجام شده در لوله‌های استوانه با $L/D > 1$ و با نتایج تحلیلی مقایسه خواهد شد. نهایتاً نتایج آزمایش‌های گسترده و مشروح توجیه فیزیکی مشاهدات برای هندسه‌های نزدیک به هندسه‌ی محفظه‌ی احتراق ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

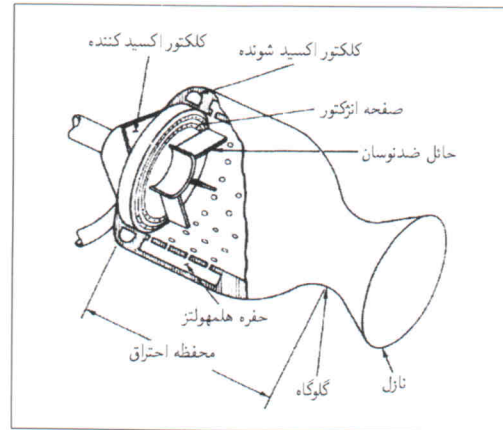
آزمایشگاه آکوستیک محفظه‌ی احتراق

هدف از ایجاد آزمایشگاه آکوستیکی فراهم آوردن قابلیت آزمایش انواع محفظه‌ی سرد با ابعاد گوناگون، و تولید و ثبت صوت به‌صورت اتوماتیک در یک فضای سه‌بعدی است. چنین آزمایشگاهی شامل یک اتاق آکوستیکی، اتاق فرمان، سیستم تولید صوت، سیستم داده برداری، و سیستم تعلیق محفظه‌ی احتراق و حرکت میکروفن‌ها است. هر یک از سیستم‌های فوق و ویژگی‌های مربوطه در این بخش مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

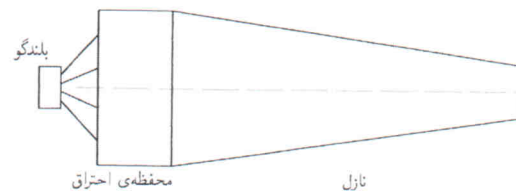
اتاق آکوستیک

یک اتاق آکوستیک مناسب باید حتی‌الامکان تأثیرات انعکاس‌های صوتی محیط را بر میدان آکوستیکی محفظه کاهش دهد و سطح اتاق همانند چاه‌های آکوستیکی در بازه‌ی فرکانسی مورد نظر عمل کنند. همچنین باید از نشر صوت به خارج از اتاق، و نیز متقابلاً از وارد شدن هرگونه صوت خارجی به داخل آن جلوگیری شود. در کنار این اتاق آکوستیکی، یک اتاق فرمان تعبیه شده که بدون حضور فرد محقق و تجهیزات جانبی غیرضروری در اتاق آکوستیکی، مشاهده‌ی رفتار سیستم‌ها را در حین انجام تجربه امکان‌پذیر می‌سازد.

ساختار دیوارهای اتاق آکوستیکی به‌گونه‌ی طراحی شده‌اند که بتوانند سطح امواج صوتی با طیف فرکانسی 200° الی 5000° هرتز را به اندازه‌ی 2° دسی بل در داخل اتاق، و به اندازه‌ی 4° دسی بل در خارج اتاق کاهش دهند. میز نگه‌دارنده‌ی محفظه‌ی احتراق و سازوکار حرکتی سه‌بعدی میکروفن متحرک به‌همراه بلندگوی تولید صوت، و



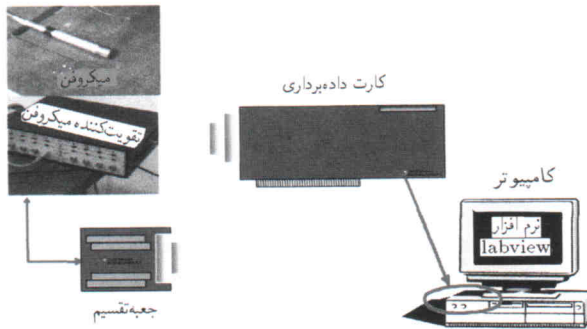
شکل ۱. نمایی کلی از رژیم‌های جریانی در موتور سوخت مایع.



شکل ۲. مدل هندسی محفظه‌ی احتراق برای شناسایی میدان آکوستیکی.

که امکانات آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌های گرم و اندازه‌گیری مشخصات محفظه‌ی احتراق در زمان عملکرد موتور بسیار پرهزینه است، و با در نظر گرفتن خطی بودن میدان آکوستیکی قبل از وقوع ناپایداری احتراق، می‌توان از یک محفظه‌ی سرد، بدون در نظر گرفتن میدان جریان و احتراق، برای شناسایی آکوستیکی محفظه استفاده کرد. [۶۵] شکل ۲ مدل محفظه‌ی سرد مورد استفاده در تحقیقات کنونی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش اهدافی همچون تعیین مشخصات آکوستیکی محفظه‌ی احتراق و تعیین تأثیر تغییرات هندسی و شرایط مرزی بر مشخصات آکوستیکی محفظه را دنبال می‌کنیم. برای رسیدن به این اهداف نیاز به تعیین فرکانس‌های حاکم بر محفظه، تعیین شکل امواج طولی و عرضی محفظه، تعیین فاز امواج نسبت به مولد صوت و تعیین میزان تأثیر هر یک از اجزاء محفظه (هندسه‌ی محفظه، آرایش انژکتورها، ناحیه‌ی خنک کاری، صفحات صلیبی، حفره‌های هلمهولتز) بر شکل موج است. لذا برای رسیدن به اهداف فوق اقدام به طراحی و ساخت یک آزمایشگاه آکوستیکی با قابلیت داده برداری اتوماتیک و آزمایش انواع محفظه شد. بعد از ایجاد آزمایشگاه مورد نظر، کلیه‌ی تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده به‌صورت استاندارد کالیبره شدند. پس از حصول اطمینان از عملکرد صحیح تک تک تجهیزات مورد استفاده آزمایش‌های آکوستیکی گسترده‌ی انجام شد. در اولین سری از این آزمایش‌ها، امکان مشاهده‌ی مدهای آکوستیکی حاکم در هندسه‌های

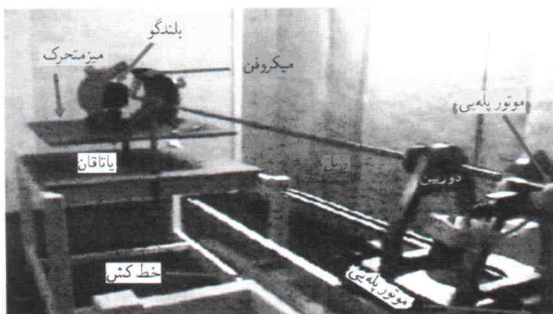


شکل ۴. طرح شماتیک نحوه ی اتصال اجزاء سیستم داده برداری.

سیستم داده برداری مناسب لازم است. برای این منظور، یک سیستم داده برداری مطابق شکل ۴ تهیه شده که اجزایی با ویژگی های زیر دارد: میکروفن با دقت ± 2 دسی بل با محدوده ی کاری 60° الی 140° دسی بل در طیف فرکانسی $1/13^\circ$ الی 20° کیلوهرتز، پری آمپلی فایر، آمپلی فایر باگین متغیر، ترمینال BOX، نرم افزار Labview، کارت داده برداری A/D با هشت کانال آنالوگ ورودی که از قابلیت داده برداری با فرکانس 20° کیلوهرتز برای هر کانال به طور هم زمان برخوردار است. کالیبراسیون میکروفن ها، پری آمپلی فایرهای مربوطه و آمپلی فایر توسط نمایندگی ذی صلاح انجام شد.

سیستم حرکتی میکروفن و نگه دارنده ی محفظه

برای به دست آوردن شکل امواج محوری، مماسی و شعاعی لازم است میکروفن در این امتدادها به صورت پیوسته حرکت کند و به طور هم زمان داده برداری صورت گیرد. برای این منظور مطابق شکل ۵، سازوکاری متشکل از سیستم حرکتی میکروفن و سیستم نگه دارنده ی محفظه طراحی و ساخته شده است. سیستم حرکتی میکروفن از یک استپر موتور با دقت حرکت $1/4$ میلی متر بر ثانیه در راستای محوری و یک استپر موتور با دقت حرکت 5° درجه بر ثانیه در راستای زاویه یی و امکان حرکت در راستای شعاعی با دقت 2 سانتی متر به صورت دستی، به همراه کنترل کننده ی استپر موتورها تشکیل شده است.



شکل ۵. سیستم حرکتی میکروفن و میزنگه دارنده ی محفظه.

میکروفن های نصب شده بر محفظه ی احتراق در وسط اتاق آکوستیکی قرار گرفته است. اتصالات لازم به منظور تحریک بلندگو و داده برداری از مجرای مناسب با عایق آکوستیکی از اتاق آکوستیک به اتاق فرمان آورده شده است. حرکت میکروفن در زمان تولید صوت و داده برداری به وسیله ی دو دوربین مدار بسته در اتاق فرمان کنترل می شوند. کلیه ی تجهیزات مورد نیاز برای کنترل تولید صوت شامل مولد علائم، رایانه و سیستم داده برداری در اتاق فرمان مستقرند.

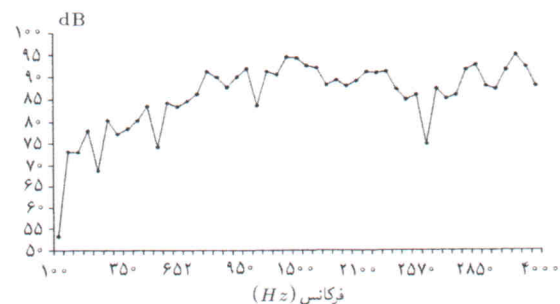
سیستم تولید صوت

فرایند احتراق در نزدیکی صفحه ی انژکتور موتور به عنوان منبع تولیدکننده ی صوت باعث تولید صوت هایی با دامنه ی زیاد و طیف فرکانسی گسترده می شود. برای مدل کردن این چشمه ی صوتی از یک بلندگو به عنوان منبع صوتی و با قابلیت تولید سطح صوت بالا و طیف فرکانسی گسترده که به صورت محوری بر روی محفظه ی احتراق نصب شده استفاده می شود (شکل ۲). سیستم تولید صوت شامل مولد علائم، آمپلی فایر، مولتی متر، اسپیکوسکوپ و انواع بلندگو است. بلندگوهای مورد استفاده باید از دو ویژگی توان تولید سطح صوت 140° دسی بل و حداکثر نوسان ± 4 دسی بل در طیف فرکانسی برخوردار باشند. به دلیل اینکه بلندگوهای قابل دسترس در داخل کشور مشخصات فنی معتبری ندارند، عملکرد بلندگوها در محدوده ی فرکانسی مورد نظر می بایست مشخص شود. مثلاً مشخصات یک بلندگوی 8 اهم، 25 وات، و به قطر 13° میلی متر در شکل ۳ ارائه شده است.

با توجه به نمودار فوق، علی رغم وجود نوسان زیاد سطح صوت در طیف فرکانسی، این تغییرات در طیف فرکانسی مورد نظر به صورت تدریجی است؛ لذا می توان از این بلندگو در آزمایشگاه استفاده کرد.

سیستم داده برداری

چنانچه در شکل ۲ مشاهده می شود، یک بلندگو باعث تولید و تحریک نوسانات فشاری در محفظه ی احتراق می شود. برای مشخص کردن ساختار آکوستیکی امواج داخل محفظه به کمک این نوسانات، یک



شکل ۳. نمودار مشخصه ی بلندگو 8 اهم، 25 وات، قطر 13° میلی متر.

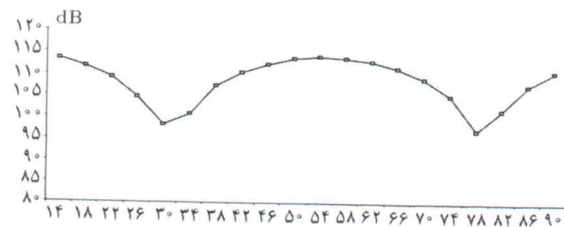
نتایج تجربی

ابتدا مشخصات آکوستیکی یک لوله با نسبت طول به قطر زیاد ($L/D > 1$)، با شرایط مرزی سر بسته و سر باز را به دست آورده و بعد از حصول اطمینان از صحت داده برداری، لوله های $L/D \sim 1$ ، مطابق هندسه محفظه احتراق، آزمایش شدند. نتایج حاصل در این ابعاد هندسی با نتایج لوله های $L/D \gg 1$ متفاوت بود و پدیده دگرگونی شکل موج ایستا مشاهده شد. شناسایی علل تخریب شکل امواج در هارمونی های حاکم بر لوله های $L/D \sim 1$ با روش های تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. هم زمان با انجام آزمایش های گسترده برای شناسایی پدیده فوق، معادلات حاکم و روش های تحلیلی برای بررسی میدان آکوستیکی درون محفظه های استوانه ای با دقت مطالعه شدند. پس از شناسایی نسبی پدیده دگرگونی شکل موج ایستا درون لوله های $L/D \sim 1$ ، مشخصات آکوستیکی محفظه احتراق تعیین شد. در ادامه مطالعات فوق به تفصیل شرح داده خواهد شد.

لوله ای استوانه ای $L/D \gg 1$

هدف از انجام این آزمایش ها مقایسه نتایج تجربی با روابط نظری موجود، به منظور حصول اطمینان از صحت عملکرد ابزار و روش های تولید، ثبت مشخصات آکوستیکی، و نیز تعیین میزان وابستگی مشخصات آکوستیکی به نوع بلندگو است. برای این منظور از یک لوله استوانه ای به طول 100 سانتی متر و قطر 6.35 سانتی متر استفاده شده است. لوله در حالت های یکسر بلندگو - یکسر بسته، و یکسر بلندگو - یکسر باز مورد آزمایش قرار گرفت. در حالت یکسر بلندگو - یکسر بسته، لوله را در فرکانس های مختلف به کمک بلندگو تحریک می کنیم. فرکانس هارمونی n ام امواج محوری لوله های سر بسته، f_n ، از رابطه $f_n = nC/2L$ حاصل می شود. در این رابطه C سرعت صوت و L طول لوله است. در شکل ۶ نتایج تجربی به دست آمده با ساختار نظری امواج ایستا در لوله مقایسه شده است. سرعت صوت در هوا با درجه حرارت 25 درجه سانتی گراد معادل 340 متر بر ثانیه است.

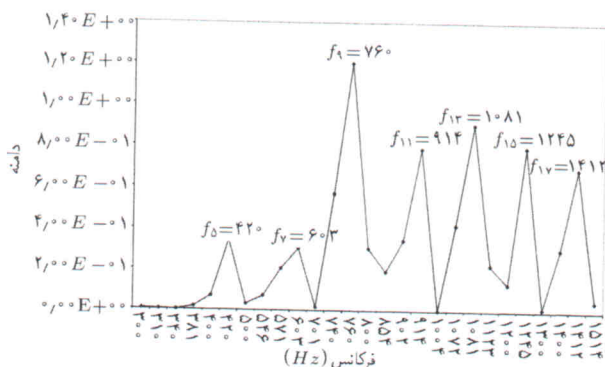
اجرای شرط مرزی یکسر بسته با مسدود کردن انتهای لوله مدل



شکل ۶. مقایسه ی شکل مد دوم موج در لوله ی یکسر بلندگو - یکسر بسته با ساختار نظری موج ایستا.

امکان پذیر است. در این حالت میکروفن اندازه گیری از یک سوراخ کوچک در وسط صفحه مسدودکننده انتهای لوله به داخل هدایت می شود. در حالت یکسر باز ته لوله باز گذاشته شده و میله ی میکروفن از مرکز لوله به داخل هدایت می شود. در معادلات نظری شرط مرزی یکسر باز با مساوی صفر قرار دادن نوسانات فشار در انتهای لوله (مرز خروجی) اعمال می شود؛ در صورتی که این شرط در آزمایشگاه عملاً با فاصله ی معینی از انتهای لوله ممکن می شود و سطح صوت تدریجاً در خارج از لوله کاهش می یابد. به همین دلیل فرکانس های تشدید حاصل از آزمایش با استفاده از طول معادل لوله با نتایج نظری قابل مقایسه اند. رابطه ی نظری برای هارمونی n ام محوری یک لوله ی یکسر بلندگو - یکسر باز $f_n = nC/4L$ است. برای مقایسه با نتایج تجربی باید از طول معادل $L_{eff} = L + 0.3D$ در معادله ی فوق استفاده شود.^[۷] این تصحیح برای لوله های $L/D \gg 1$ ناچیز و بی اهمیت است، ولی برای لوله های $L/D \sim 1$ تأثیر قابل توجهی بر مقدار فرکانس های تشدید محوری خواهد داشت. با توجه به نکات فوق لوله ی مذکور را در حالت یکسر بلندگو - یکسر باز در محدوده ی گسترده یی از فرکانس های تشدید مورد آزمایش قرار می دهیم. برای این منظور با استفاده از مولد کنش طیف فرکانس ها را در لوله ایجاد کرده، با میکروفنی که در وسط لوله ی ثابت قرار گرفته داده برداری صورت می گیرد. فرکانس های اصلی لوله با گرفتن FFT از داده های حاصله به صورت تجربی به دست می آید (شکل ۷). فرکانس های به دست آمده انطباق خوبی با رابطه ی نظری $f_n = nC/4L_{eff}$ برای هارمونی های لوله ی یکسر بسته - یکسر باز دارند. توجه داشته باشید که برای لوله ی یکسر بلندگو - یکسر باز فقط هارمونی های فرد امکان پذیرند.

چنان که قبلاً گفته شد، مدل آکوستیکی محفظه ی احتراق شامل محفظه ی استوانه ایی با $L/D \leq 1$ و بخش همگرای نازل است (شکل ۲). در شرایط سرد و بدون جریان داخل محفظه تعیین دقیق شرایط مرزی آکوستیکی در مرز خروجی از نازل همگرا امکان پذیر نیست. در تحلیل



شکل ۷. فرکانس های حاکم بر لوله به طول 100 سانتی متر در حالت یکسر بلندگو - یکسر باز.

در این آزمایشات پدیده‌ی دگرگونی موج مشاهده شد. این پدیده از یک فرکانس خاص با کج کردن شکل موج ظاهر شده و در فرکانس‌های بالاتر کاملاً شکل ایستای مورد انتظار را دگرگون می‌کند. برای بررسی علل این پدیده و مشخص کردن میزان وابستگی آن به مشخصات هندسی لوله، آزمایش‌های زیر انجام شد. ابتدا شکل امواج در لوله‌یی به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۶/۳۵ سانتی‌متر بررسی شد. ساختار هارمونیک امواج ایستاده تا فرکانس ۳۰۰۰ هرتز به خوبی حفظ شده و هیچیک از علائم پدیده‌ی دگرگونی شکل موج ظاهر نشد (شکل ۸).

در آزمایش بعدی، لوله‌یی به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۳ سانتی‌متر در حالت یکسر بلندگو-یکسر باز مورد آزمایش قرار گرفت. امواج ایستا شکل هارمونیک خود را تا فرکانس ۱۵۳۸ هرتز حفظ کردند، ولی افزایش فرکانس باعث دگرگونی شکل موج ایستا می‌شود. شکل ۹ د نشان می‌دهد که در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز در فاصله‌ی کوتاهی از بلندگو سطح صوت به شدت افت کرده و پس از یک افزایش سریع کم‌وبیش در یک سطح ثابت تا مقطع خروجی لوله باقی می‌ماند.

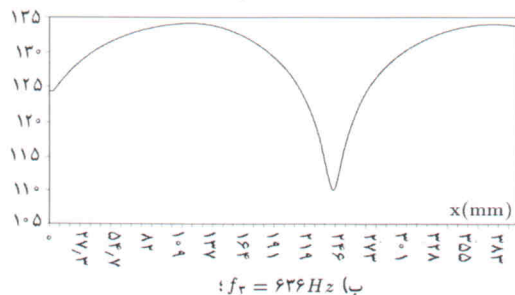
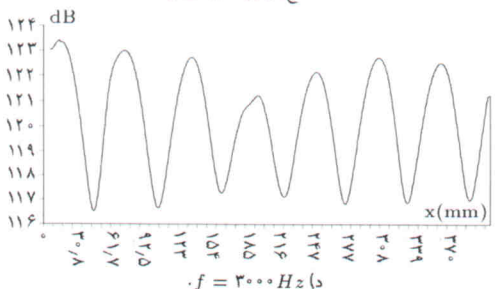
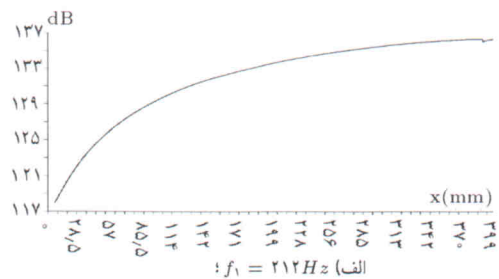
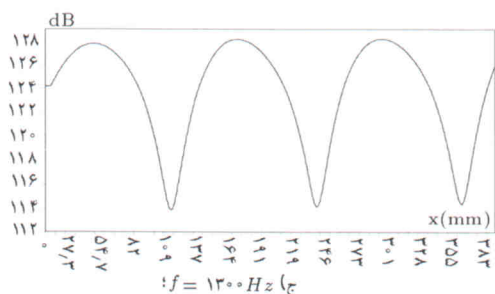
ابتدا میزان تأثیر سطح توان تحریک بلندگو در بروز پدیده‌ی تخریب شکل موج مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا میزان توان اعمالی تحریک بلندگو از ۱۰ وات به ۱۰۰ وات تقلیل داده شد. مشاهده شد که شکل موج و فرکانس بروز پدیده‌ی دگرگونی دقیقاً مشابه شرایط بلندگو با وات بالا است و سطح توان اعمالی به بلندگو تأثیری بر تخریب شکل موج ندارد. میزان تأثیر اندازه قطر بلندگو نیز بررسی شد و تغییری در فرکانس آستانه‌ی شروع یا شکل دگرگونی موج مشاهده نشد.

برای بررسی میزان وابستگی این پدیده به طول لوله، لوله‌هایی با قطر ثابت ۱۳ سانتی‌متر و با طول‌های متفاوت تحت آزمایش قرار گرفتند.

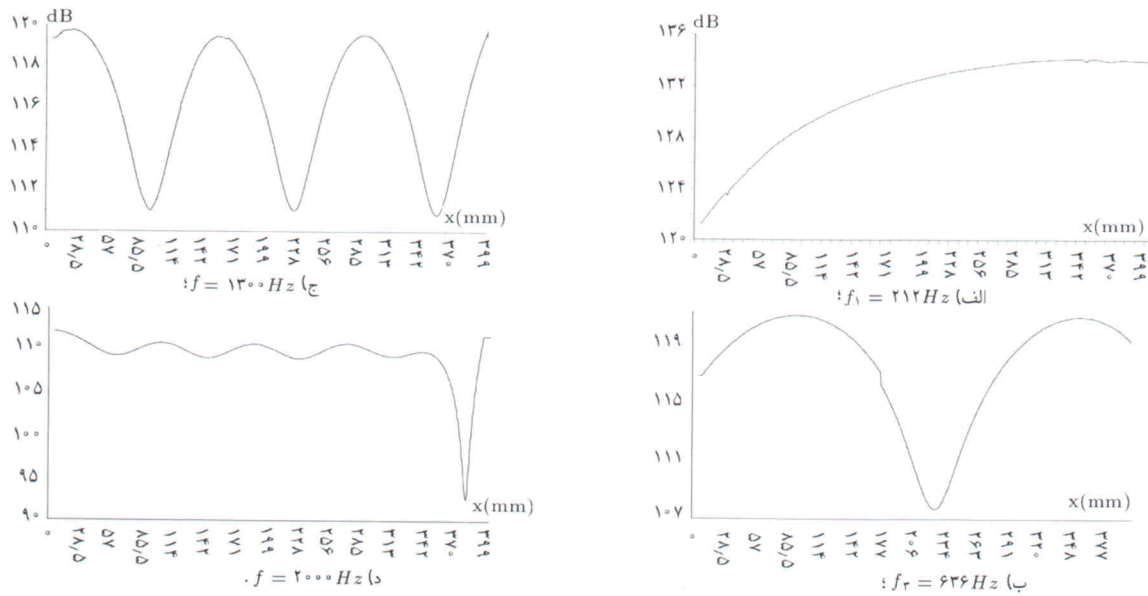
محفظه‌های مورد نظر بعضی از محققین^[۸] به علت عدم امکان نفوذ امواج آکوستیکی از پایین دست به بالا دست شرط مرزی دیواره‌ی صلب را در این مرز به‌کار برده‌اند. نوسانات سرعت روی دیواره‌ی صلب صفر شده و در نتیجه گرادینان نوسانات فشار در این مرز باید معادل صفر باشد. در مراجع دیگر شرط صفر شدن نوسانات فشار، یعنی مرز باز ملحق به یک منبع بی نهایت پیشنهاد شده است.^[۷] شرایط فوق در آزمایشگاه با بسته یا باز کردن انتهای مدل محفظه قابل دسترسی‌اند. در تحقیقات فعلی شرط مرزی یکسر باز محفظه‌ی احتراق مورد مطالعه قرار گرفته است.

لوله‌های استوانه‌یی $L/D \sim 1$ و پدیده‌ی دگرگونی شکل امواج

پیش از این گفته شد که محفظه‌های احتراق مورد نظر، بدون احتساب قسمت همگرای نازل، لوله‌های استوانه‌یی شکل $L/D \sim 1$ هستند. امواج آکوستیکی در لوله‌های استوانه‌یی از ساختاری ایستا شامل نقاط گره (حداقل نوسانات) و شکم (حداکثر نوسانات) برخوردارند. این ساختار امواج درون لوله به شرط آنکه طول موج، (λ) ، در فرکانس تحریک خیلی بیش از قطر لوله باشد امکان‌پذیر است.^[۷] نسبت دقیق طول موج به قطر لوله برای ایجاد ساختار هارمونیک شکم-گره و چگونگی تغییر شکل ساختار امواج در صورت عدم وجود شرط فوق مشخص نیست. برای پاسخ به سؤالات فوق، بعد از بررسی لوله‌های $L/D \gg 1$ و حصول اطمینان از صحت عملکرد سیستم و روش تجربی، لوله‌هایی در ابعاد $L/D \sim 1$ در شرایط یکسر بلندگو-یکسر باز مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۸. شکل امواج ایستا در لوله‌یی به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۶/۵ سانتی‌متر.



شکل ۹. شکل امواج در لوله‌ی به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۳ سانتی‌متر.

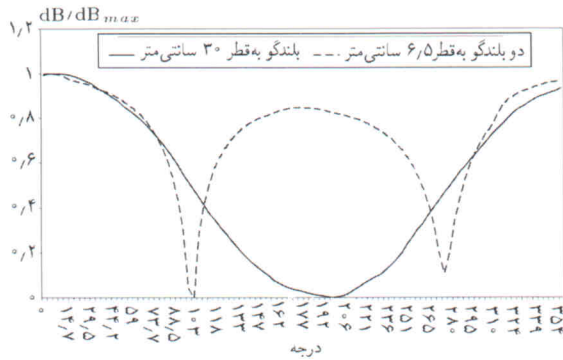
همانطور که مشاهده می‌شود فرکانس آستانه‌ی شروع پدیده دگرگونی موج (f_d) در تمام لوله‌های با قطر ۱۳ سانتی‌متر ثابت است و تغییرات طول لوله از ۴۰ سانتی‌متر تا ۱۲/۳ سانتی‌متر هیچ تأثیری بر فرکانس آستانه‌ی دگرگونی موج نداشته است. مهم‌ترین که نسبت طول موج متناسب با فرکانس آستانه‌ی شروع دگرگونی موج به قطر لوله (λ_d/D)، در تمام آزمایش‌های انجام شده ثابت و مساوی ۱/۷ است. با استفاده از این مشاهدات تجربی می‌توان پیش‌بینی کرد که پدیده‌ی تخریب و دگرگونی موج همیشه در فرکانس $f_d = C/(1/7D)$ پدیدار می‌شود. این پدیده در لوله‌های با قطر بزرگ مانع تشکیل امواج محوری با ساختار هارمونیک شده و تخریب شکل موج خود را از مد اول محوری نشان می‌دهد. قابل ذکر است که رفتار دگرگونی شکل موج در شعاع‌های مختلف کمی متفاوت است، به نحوی که در محور استوانه این تخریب شدید بوده و در نزدیک دیواره‌ی استوانه رفتار تخریبی کم‌تری مشاهده می‌شود.

پس از انجام آزمایشات فوق برای تعیین میزان تأثیر قطر لوله در بروز پدیده‌ی دگرگونی شکل موج یک لوله‌ی استوانه‌ی به طول ۴۷ سانتی‌متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر، و نیز یک لوله‌ی استوانه‌ی به طول ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۵۷ سانتی‌متر نیز مورد آزمایش قرار داده شدند. که اطلاعات به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است: در ستون اول جدول مشخصات هندسی لوله، در ستون دوم نسبت طول به قطر لوله (L/D)، در ستون سوم طول معادل لوله‌ی یکسره باز (L_{eff})، در ستون چهارم فرکانس مد اول محوری (f_1)، در ستون پنجم نسبت طول موج مد اول محوری به قطر لوله (λ_1/D)، در ستون ششم فرکانس آستانه‌ی شروع دگرگونی شکل موج (f_d)، که از آزمایش‌ها حاصل شده‌اند، در ستون هفتم نسبت طول موج آستانه‌ی شروع دگرگونی به قطر لوله (λ_d/D)، در ستون هشتم فرکانس بالاترین مد محوری بدون دگرگونی (f_n)، و در ستون آخر نسبت طول موج مد n ام به قطر لوله (λ_n/D)، ثبت شده است.

جدول ۱. تأثیر طول و قطر لوله بر فرکانس آستانه‌ی شروع دگرگونی شکل موج.

λ_n/D	n, f_n	λ_d/D	f_d	λ_1/D	f_1	L_{eff}	L/D	هندسه
۱/۷۶	۱۵, ۳۰۴۳	۱/۷	۳۱۵۰	۲۶/۴	۲۰۳	۰/۴۱۹	۶/۳	$L=40\text{ cm}, D=6.35\text{ cm}$
۱/۹۳	۷, ۱۳۵۵	۱/۷	۱۵۳۸	۱۳/۵	۲۰۲	۰/۴۳۹	۳/۱	$L=40\text{ cm}, D=13\text{ cm}$
۲/۰۹	۵, ۱۲۵۳	۱/۷	۱۵۳۸	۱۰/۴	۲۵۰	۰/۳۳۹	۲/۳	$L=30\text{ cm}, D=13\text{ cm}$
۱/۷۸	۵, ۱۴۷۰	۱/۷	۱۵۳۸	۸/۹	۲۹۴	۰/۲۸۹	۱/۹	$L=25\text{ cm}, D=13\text{ cm}$
۵/۰	۱, ۵۲۴	۱/۷	۱۵۳۸	۵	۵۲۴	۰/۱۶۲	۰/۹۵	$L=12.3\text{ cm}, D=13\text{ cm}$
۲/۴۹	۳, ۴۵۵	۱/۷	۶۶۶	۷/۵	۱۵۲	۰/۵۶	۱/۵۷	$L=47\text{ cm}, D=30\text{ cm}$
۴/۷	۱, ۱۲۷	۱/۷	۳۵۱	۴/۷	۱۲۷	۰/۶۷۱	۰/۸۸	$L=50\text{ cm}, D=57\text{ cm}$

$$f_n = nC/4L_{eff}, L_{eff} = L + 0.37D, \lambda = C/f$$

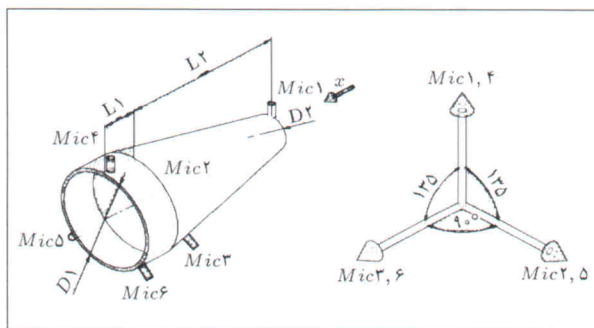


شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج تجربی سطح صوت (بدون بعد) بلندگوها در انتهای لوله (نزدیکی بلندگو) در فرکانس ۶۶۴ هرتز، مد اول مماسی.

بلندگو و ۱۳ سانتی‌متری از محور استوانه، با حرکت در جهت عقربه‌ی ساعت از ساعت ۱۲ در فواصل ۶ درجه است.

نتایج آزمایش‌های محفظه‌ی احتراق و نازل همگرا

همانطور که قبلاً اشاره شد برای محفظه‌های احتراقی که طول آن‌ها مساوی یا کوچکتر از قطرشان است، می‌بایست خواص آکوستیکی مجموعه محفظه‌ی احتراق و قسمت همگرای نازل به‌طور یکپارچه بررسی شود. شکل و ابعاد هندسی محفظه‌ی استفاده شده در تجربیات آزمایشگاهی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این محفظه از الحاق یک لوله‌ی استوانه‌یی به طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر به یک لوله‌ی مخروطی به طول ۴۷ سانتی‌متر با گلوگاهی به قطر ۱۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. اندازه‌گیری زمانی سطح صوت در نقاط مختلف محفظه توسط شش میکروفن ثابت که بر روی دیواره‌ی محفظه نصب شده‌اند و میکروفنی که توانایی حرکت در راستای محور را دارد، به‌طور همزمان انجام می‌شود. فرکانس‌های تشدید محوری حاکم در محفظه با ثابت قرار دادن میکروفن محوری در نزدیکی بلندگو، تحریک بلندگو در طیف فرکانسی، و ثبت سطح صوت در تمامی کانال‌ها حاصل می‌شود. شکل ۱۲ فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده در محفظه را نشان می‌دهد، و در جدول ۲ نیز مقایسه‌ی نتایج تجربی فوق با نتایج حاصل از رابطه‌ی



شکل ۱۱. شکل و ابعاد هندسی محفظه‌ی احتراق و محل نصب میکروفن‌ها.

روش‌های فعلی مطالعه‌ی ناپایداری محفظه‌ی احتراق موتورهای سوخت مایع^[۹] دو ناحیه اصلی، شامل محفظه احتراق و نازل همگرا، را به‌طور مجزا در نظر گرفته و سپس در مرز آنها از شرط تساوی امپدانس صوتی استفاده می‌کنند. مشاهدات تجربی فوق نشان می‌دهد که این روش برای محفظه‌های با $L/D > 1$ قابل قبول است ولی برای محفظه‌های با $L/D \sim 1$ مدل کردن آکوستیکی محفظه‌ی احتراق بدون در نظر گرفتن قسمت همگرای نازل امکان‌پذیر نیست یک مدل مناسب برای بررسی رفتار موتور در فرکانس‌های بالا باید شامل محفظه‌ی احتراق و قسمت همگرای نازل باشد. قطر گلوگاه نازل کوچک‌تر از قطر محفظه بوده و امکان ایجاد امواج محوری ایستای هارمونیک در فرکانس‌های بالا را فراهم می‌کند.

روش تولید امواج عرضی

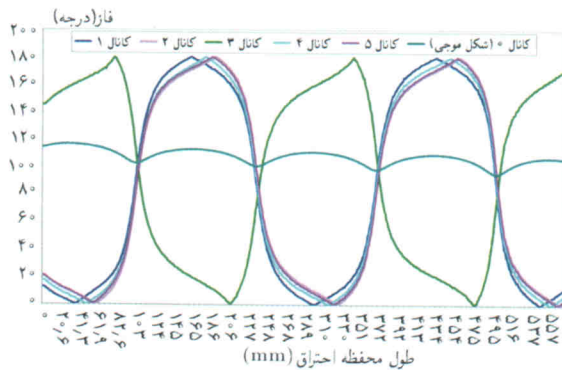
مطالعه‌ی ساختار امواج ایستای عرضی (مماسی و شعاعی) نیازمند روشی مناسب برای ایجاد این امواج است. آزمایشات اولیه نشان می‌دهد که ایجاد و مشاهده‌ی امواج عرضی نسبت به امواج طولی از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار است. در مرحله‌ی اول امکان ایجاد امواج عرضی با قراردادن یک بلندگو در مرکز صفحه‌ی سطح مقطع، در امتداد محور لوله‌ی استوانه‌یی به طول ۴۷ سانتی‌متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر در حالت یکسر بلندگو-یکسرباز بررسی شد. ابتدا تأثیر قطر بلندگو در تحریک امواج عرضی به‌کمک بلندگوهای به قطر ۱۳ و ۳۰ سانتی‌متر بررسی شد. هر دو بلندگو در صورت تحریک در فرکانس مد اول شعاعی، قابلیت ایجاد امواج ایستای مد اول شعاعی را داشته و نتایج موج مد اول شعاعی برای دو بلندگو کاملاً با یکدیگر و با نتایج نظری منطبق‌اند.^[۱۰]

در صورت تحریک بلندگو در فرکانس مد اول مماسی، بلندگو با قطر ۱۳ سانتی‌متر میدان آکوستیکی ضعیف و با اندکی عدم تقارن ولی کم‌وبیش منطبق با نتایج نظری تولید می‌کند. ولی بلندگوی با قطر ۳۰ سانتی‌متر اصلاً قابلیت تولید صحیح مد اول مماسی را ندارد. به‌علت اهمیت امواج مماسی خالص و امواج طولی-مماسی و امکان ایجاد و مشاهده‌ی آنها در داخل محفظه‌ی احتراق، آزمایش‌های گسترده‌یی به‌منظور دستیابی به بهترین روش ایجاد این امواج انجام گرفت که توضیح همه‌ی نتایج از حوصله‌ی این نوشتار خارج است.

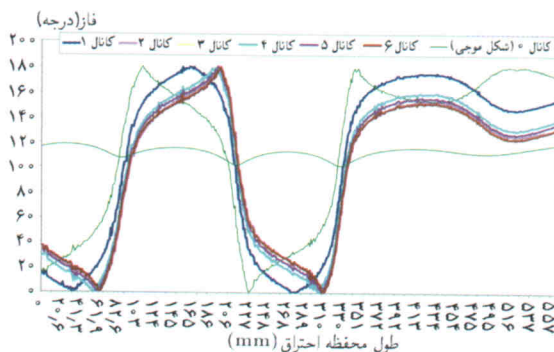
به‌طور خلاصه باید یادآور شویم که بهترین نحوه برای ایجاد امواج مماسی استفاده از دو بلندگو به قطر ۶/۵ سانتی‌متر به‌طور همزمان، یکی در مرکز و دیگری در پایین یا بالای محور محفظه است. در شکل ۱۰ مقایسه نتایج حاصل از تحریک دو بلندگوی ۶/۵ سانتی‌متری همزمان و یک بلندگوی ۳۰ سانتی‌متری در مد اول مماسی نشان داده شده است. جهت حرکت میکروفن نصب شده در فاصله‌ی ۱ سانتی‌متر از

۱۴۰° هرتز می‌توان با اندازه‌گیری اختلاف فاز میان شش کانال روی محفظه‌ی احتراق نسبت به کانال متحرک محوری پدیده‌ی تخریب موج را به‌سادگی مشاهده کرد. موج بعد از هرگره فاز نوسانی خود را به‌اندازه‌ی ۱۸۰° درجه تغییر می‌دهد (شکل ۱۳). با استفاده از تعیین اختلاف فاز در شکل موج می‌توان فرکانس تخریب شکل موج را مشخص کرد. موج در فرکانس ۱۴۳° هرتز شکل هارمونی خود را از دست داده است (شکل ۱۴)؛ در نتیجه می‌توان گفت که گرچه در شکل ۱۲ برای فرکانس‌های بیشتر از ۱۴۰° هرتز قله‌های تشدید آکوستیکی ملاحظه شده است، ولی این قله‌ها با ساختار ایستای امواج آکوستیکی در داخل محفظه همراه نیست و توزیع سطح صوت در داخل محفظه شبیه به توزیع ارائه شده در شکل ۹ است و قابلیت همگرایی با فرکانس‌های حاکم بر فرایند احتراق را نخواهد داشت.

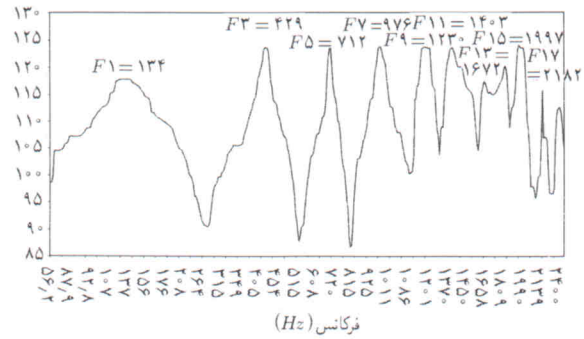
بر اثر مخروطی شدن استوانه فرکانس امواج مماسی افزایش می‌یابد و نیز شکل امواج مماسی تنها در قسمت استوانه‌ی خود را نشان می‌دهند. به بیان دقیق‌تر بخش مخروطی باعث محدود کردن دامنه‌ی تغییرات امواج مماسی در ناحیه‌ی محفظه‌ی احتراق می‌شود. از طرفی مشاهده می‌شود که شکل محفظه‌ی احتراق تأثیری در شکل و محل بیشینه‌ی دامنه‌ی موج نداشته و فقط در مد اول مماسی باعث تغییر فاز ۱۸۰° درجه نسبت به لوله‌ی استوانه‌ی شده است.



شکل ۱۳. نحوه‌ی تغییر اختلاف فاز موج در فرکانس ۱۳۳۶ هرتز.



شکل ۱۴. نحوه‌ی تغییر اختلاف فاز موج در فرکانس ۱۴۳۰ هرتز.



شکل ۱۲. فرکانس‌های تشدید در محفظه‌ی احتراق.

که در آن $f_n = nc/4L_{eff}$ ، $L_{eff} = L + 0.3D_{ave}$ با قطر متوسط $D_{ave} = (L_1D_1 + L_2D_2)/(L_1 + L_2)$ است، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که روابط پارامتریک فوق برای محاسبه‌ی فرکانس مدهای محوری هارمونیک ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ به‌خوبی قابل استفاده‌اند. اختلاف نتایج تجربی با نتایج معادله‌ی فوق کم‌تر از ۴٪ است، و اختلاف قابل ملاحظه‌ی بین فرکانس‌های اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از روابط فوق برای مدهای ۱۱ تا ۱۷ مشاهده می‌شود. علت این عدم هماهنگی تخریب شکل ایستای امواج برای فرکانس‌های بیشتر از ۱۴۰° هرتز است. فرکانس آستانه‌ی تخریب شکل موج به‌وسیله‌ی رابطه‌ی $f_d = C/(1/\sqrt{D_{ave}})$ قابل محاسبه است. برای محفظه‌ی فوق D_{ave} برابر ۱۳/۵ سانتی‌متر، و فرکانس تخریب برابر ۱۴۸° هرتز تخمین زده می‌شود. مقدار اختلاف با نتیجه‌ی تجربی می‌تواند به‌علت نحوه‌ی محاسبه‌ی D_{ave} باشد. برای حصول اطمینان از وجود پدیده‌ی دگرگونی شکل امواج ایستا در فرکانس‌های بیشتر از

جدول ۲. مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی نتایج تجربی و رابطه‌ی تجربی به دست آمده برای محفظه‌ی احتراق.

مد محوری	نتایج تجربی	$f_n = nc/4L_{eff}$	درصد خطا
۱	۱۳۴	۱۳۹٫۲	٪۳٫۹
۳	۴۲۹	۴۱۷٫۶۷	٪-۲٫۶
۵	۷۱۲	۶۹۶٫۱۲	٪-۲٫۲
۷	۹۷۶	۹۷۴٫۵۷	٪-۰٫۱۴
۹	۱۲۳۰	۱۲۵۳٫۰۲	٪۱٫۹
۱۱	۱۴۰۳	۱۵۳۱٫۴۶	٪۹٫۱
۱۳	۱۶۷۲	۱۸۰۹٫۹	٪۸٫۳
۱۵	۱۹۹۷	۲۰۸۸٫۳۶	٪۴٫۶
۱۷	۲۱۸۲	۲۳۶۶٫۸	٪۸٫۵

$$L_{eff} = L + 0.3D_{ave} = (L_1D_1 + L_2D_2)/(L_1 + L_2), L = L_1 + L_2$$

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش به دست آوردن مشخصات آکوستیکی برای محفظه‌ی احتراق موتور موشک سوخت مایع بوده است. در این راستا یک آزمایشگاه آکوستیکی مجهز به تجهیزات تولید و ثبت صدا در محفظه‌های سه‌بعدی ایجاد شده است و امکان ایجاد امواج آکوستیکی محوری و عرضی در محفظه‌های استوانه‌یی، با شرایط مرزی باز و بسته بررسی شده و نتایج حاصله با نتایج نظری مقایسه شده است.

شکل امواج محوری ایستا در محفظه‌های استوانه‌یی بررسی و شرط دگرگونی و تخریب ساختار شکم و گره امواج ایستا متناسب با نسبت طول موج به قطر لوله مشخص شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که نسبت طول موج متناسب با فرکانس آستانه‌ی شروع دگرگونی موج ایستای محوری به قطر لوله، (λ_d/D) ، برابر ۱/۷ است. همچنین از نتایج تجربی فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل مناسب برای بررسی آکوستیک محفظه‌ی احتراق در فرکانس‌های بالا، باید شامل محفظه‌ی احتراق و قسمت همگرای نازل باشد. امواج عرضی درون محفظه به وسیله‌ی یک یا چند بلندگوی با قطر

کوچک نسبت به قطر محفظه، که روی صفحه‌ی انژکتور نصب می‌شوند، قابل تولیدند. همچنین استفاده از شش میکروفون ثابت بر روی بدنه‌ی محفظه و یک میکروفون متحرک در راستای محور مرکزی محفظه، امکان ثبت امواج تشدید حاکم بر محفظه و نسبت بزرگی و اختلاف فاز آنها را ایجاد می‌کند. مطابق نتایج تجربی اختلاف فاز نوسانات موج بعد از هر گره 180° درجه تغییر می‌کند.

معادلات حاکم برای تعیین فرکانس‌های هارمونیک یک لوله‌ی استوانه‌یی را می‌توان برای محفظه‌های حاصل از الحاق یک محفظه‌ی استوانه‌یی و یک نازل همگرای مخروطی استفاده کرده و با تعیین صحیح طول و قطر معادل می‌توان مقادیر فرکانس‌های تشدید حاکم در محفظه را با تقریب ۵٪ محاسبه کرد. مرز فرکانس تخریب امواج ایستا با طول موج کوتاه به وسیله‌ی مطالعه‌ی اختلاف فاز میکروفون‌های ثابت نسبت به میکروفون متحرک قابل تعیین است.

بررسی‌های فعلی نشان می‌دهد که تغییر شکل یک استوانه به یک مخروط باعث افزایش مقدار فرکانس امواج مماسی شده و اثرات امواج محوری-مماسی در جهت گلوگاه نازل به سرعت از بین می‌رود.

منابع

1. Sutton, G. P. and Biblarz, O., "Rocket propulsion elements", 7th edition, Wiley-Interscience, (2000).
2. Zinn, B. T., "A theoretical study of nonlinear damping by helmholtz resonators", *AIAA Paper* 69-481, AIAA Fifth Propulsion Specialists Meeting (June 1969).
3. Reardon F. H., McBride, J. M. and Smith, A. J., "Effect of injection distribution on combustion instability", *AIAA Journal*, 4(3), pp. 506-512 (1966).
4. Reardon F. H., Crocco, L. and Harrje, D. T., "Velocity effects in transverse mode liquid propellant rocket combustion instability", *AIAA Journal*, 2(9), pp. 1631-1641 (1964).
5. Anthoine, J., Planquart, P. and Olivari, D., "Cold flow investigation of the flow acoustic coupling in solid propellant boosters", *AIAA paper*, 98-0475 (1998).
6. Hessler, R. O., Glick, R. L., Tion, C., Stramezzi, F., Bertele, R., Cedro, D. and Deluca, L. T., "Passive stability measurements in a model rocket motor", 26 th Congress National, Palermo, Italy, (2001).
7. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, 2nd Edition, Wiley (2000).
8. Laudien, E., Pongratz, R., Pierro, R., and Perclik, D., "Experimental procedures aiding the design of acoustic cavities", in *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Progress in Astronautics and Aeronautics, 169, AIAA (1995).
9. Harrje, D. T. and Reaedon, F. H., "Liquid propellant rocket combustion instability", NASA SP-194 (1972).
10. French, J. C., Flanagan, S. N., and Flandro, G.A., "A new method for combustion instability mode shape and frequency computations", JANNAP Propulsion Conference, Monterey, CA (November 1996).

