

بررسی تجربی و نظری رفتار اکوستیکی انژکتور چرخشی مورد استفاده در موتورهای راکتی سوخت مایع

حمید مهدیقلی
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شریف
mehdi@sharif.ir

عطاله پور محمود*
دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف
poormahmood@ae.sharif.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

در این مقاله انژکتور چرخشی هم‌محور دارای حفره (انژکتور حفره‌پشتی) به‌منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری‌های فرکانس بالا در موتورهای راکتی سوخت مایع بررسی می‌شود. برای بررسی و تحلیل تأثیر انژکتور حفره‌پشتی به‌عنوان یک جاذب اکوستیکی، این انژکتور به‌صورت یک رزوناتور یک‌چهارم موجی ملاحظه شده است. همچنین حجم و شکل حفره هوای انژکتور چرخشی بررسی شده است. از جمله نتایج رویکردهای تحلیلی و آزمایشی، تنظیم دقیق انژکتور حفره‌پشتی با مدهای ناپایدار محفظه احتراق است تا بتواند به‌عنوان جاذب عمل کند. همچنین بازده میرایی با اندازه‌گیری تجربی نرخ میرایی برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از انژکتورهای مدل، دامنه قله را در فرکانس‌های ناپایدار محفظه بدون انژکتور کاهش می‌دهند. همچنین موقعیت شعاعی انژکتورهای مدل در صفحه انژکتور اندازه‌گیری و مشخص شد که در بازده میرایی بسیار مؤثر است. اگر انژکتور در مرکز صفحه انژکتور نصب شود، به‌سختی مدهای مماسی خالص و ترکیب آنها را میرا می‌کند.

واژگان کلیدی: انژکتور، ناپایداری، جاذب اکوستیکی، مدهای محفظه احتراق، نرخ میرایی

۱. مقدمه

حفره به محفظه احتراق، عمدتاً به شکل رزوناتورهای هلمهولتزی است که برای محفظه احتراق تشدید اکوستیکی فراهم می‌کند. در واقع، هدف اصلی استفاده از این رزوناتورها طراحی محفظه‌ای است که مدهای اکوستیکی آن با مدهای اکوستیکی فرایند احتراق برهم‌نهی

عمده مطالب این مقاله برگرفته از مأخذ [۱] است و هدف اصلی آن بررسی راه‌کارهایی به‌منظور حذف ناپایداری‌های اکوستیکی فرکانس بالا از فرایند کاری موتور موشک سوخت مایع می‌باشد. از جمله روش‌های شناخته‌شده و معروف که در این مأخذ به آن پرداخته شده، اتصال تعدادی

داشته باشند تا از این رهگذر عملکرد پایای محفظه احتراق تضمین شود. ایراد عمده این روش در فرم پیچیده سطح محفظه احتراق است که احتمال جمع شدن مخلوطی قابل انفجار و خطرناک را در حین شروع به کار موتور به وجود می‌آورد. علاوه بر آن، در فرایند خنک‌کاری نیز اختلالاتی ایجاد می‌کند. مضاف بر اینکه عموماً بازده این چنین رزوناتورهایی محدود است [۱].

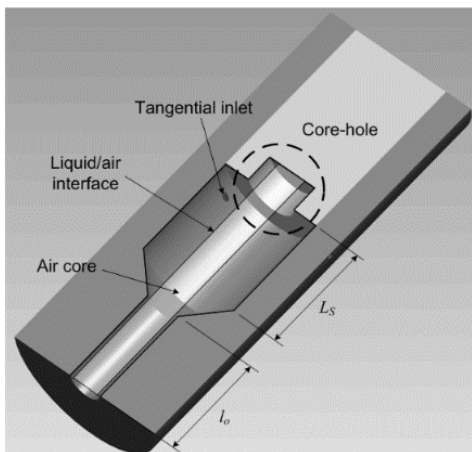
با تحلیل مشخصات موتورهای موشکی سوخت مایع مشخص می‌شود که عدم وجود حفره‌های اکوستیکی یکی از مشخصات عمومی آنهاست؛ در حالی که حاشیه پایداری وسیعی را حتی در فشارهای عملکردی بالای محفظه احتراق دارا می‌باشند. در واقع، علاوه بر ابزارهای دیگری چون بافل‌های خنک‌کاری شده، انژکتورهای مناسب و جز این‌ها، با استفاده از انژکتورهایی که به لحاظ اکوستیکی تطبیق شده‌اند و حفره‌های درونی آنها به مثابه رزوناتورهای اکوستیکی عمل می‌کنند، این پایداری حاصل می‌گردد. در انژکتورهای گاز - مایع محفظه احتراق اصلی، استفاده از طبقه بیرونی متشکل از انژکتورهای چرخشی، با سوراخ سرتاسری در پشت آن، که با یک لوله دارای ورودی باریک‌شونده، به سیال گازی متصل شده است، به همراه محفظه چرخشی انژکتور، یک رزوناتور اکوستیکی را تشکیل می‌دهند که در موتورهای نوینی چون آر. دی. ۱۷۰^۱ و ان. کی. ۳۳^۲ و مشتقات آنها (که همگی با سوخت کروسین و اکسند اکسیژن مایع کار می‌کنند) استفاده شده‌اند. در موتورهای با ترکیب هیدروژن و اکسیژن مایع (نظیر آر. دی. ۵۷^۳)، که به انژکتورهای گازی خارجی با طبقه چرخشی هم‌محور اکسیژن مایع تجهیز شده‌اند، چندین ردیف از کانال‌های مماسی و محفظه چرخشی نسبتاً طویل برای ایفای نقش به‌عنوان رزوناتور یک‌چهارم موجی به کار گرفته شده‌اند. در واقع، رزوناتورهای یک‌چهارم موجی لوله‌هایی هستند که از یک طرف به مجرای اصلی متصل و از سوی دیگر مسدودند. این رزوناتورها عموماً در سیستم‌های ورودی هوا و به‌منظور کاهش تشدید مورد

استفاده قرار می‌گیرند و همان‌طور که نامشان نیز برمی‌آید، فرکانس تشدید اصلی آن یک‌چهارم فرکانس موج حامل در مجرای اصلی می‌باشد [۱]. اگر محفظه چرخشی طول کافی نداشته باشد، بخش دیگری به آن اضافه می‌شود. نسخه تجربی این انژکتور دارای حفره‌های کوچک اضافی برای گاز و نیز دیواره‌های سوراخ دار است، که با یک حفره به پشت طبقه انژکتور چرخشی متصل می‌شود و به همراه محفظه چرخشی، ترکیبی از رزوناتورهای هلمهولتز و اکوستیکی را به وجود می‌آورد. انژکتورهای حفره‌پشتی با طول افزایش‌یافته محفظه چرخشی، در سال ۱۹۷۲ م در شوروی سابق ثبت شده‌اند.

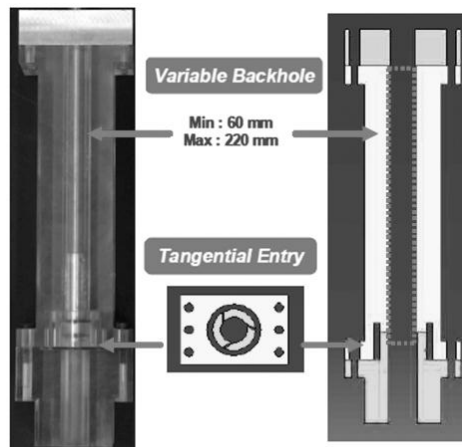
از منظر فنی، اصطلاح انژکتور حفره‌پشتی در واقع یک بخش اضافی خالی است که در پشت ورودی‌های مماسی انژکتور قرار گرفته است. علاوه بر قابلیت رزوناتور اکوستیکی بودن آنها، انژکتورهای حفره‌پشتی شرایط تشدید برای امواج سطحی پخش‌شونده در امتداد جریان چرخشی فراهم می‌نمایند. اثر بعدی آنها، کاهش شدید پاسخ دبی جرمی مایع از پالس‌های درون محفظه احتراق و نیز خط تغذیه پیشران‌ها، در فرکانس‌های خاص می‌باشد. به هر حال، مشخصه‌های هیدرولیکی و اکوستیکی انژکتورهای حفره‌پشتی هنوز کاملاً شناخته شده نیست. کمبود اطلاعات منتشرشده، عامل اصلی انجام مطالعات تجربی فراوانی روی مدل‌های انژکتورهای حفره‌پشتی، در بازه گسترده‌ای از شرایط عملکردی و پارامترهای طراحی شده است. به‌منظور بررسی آثار تغییر طول حفره‌پشتی، مدل انژکتور مورد استفاده دارای طول متغیر می‌باشد. در شکل ۱ نمایی شماتیک از این انژکتور نمایش داده شده است. در مرجع [۱] آزمایشات اکوستیکی روی یک مدل محفظه به‌همراه مدل یک انژکتور حفره‌پشتی انجام شده است تا بدین‌وسیله امکان کنترل ناپایداری‌های اکوستیکی فرکانس بالا بررسی شود. بررسی‌های کمی و کیفی با اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و ضرایب میرایی انجام شده است. در شکل ۳ نیز نمایی شماتیک از یک انژکتور چرخشی حفره‌پشتی

نمایش داده شده است. سیستم‌های اکوستیکی مشابه سیستم‌های جرم و فنر می‌باشند که در آنها صوت، اغتشاشات فشاری و سرعتی و جز این‌ها را در یک محیط الاستیک انتشار می‌دهند. لذا اگر محفظه احتراق و انژکتور

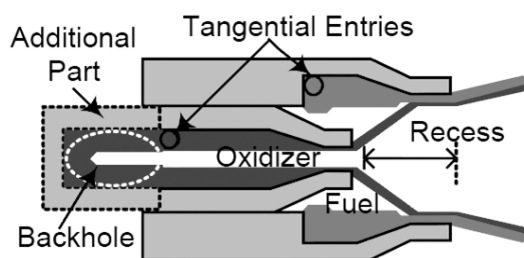
به صورت مدل‌های پارامتری فرض شوند (مطابق شکل ۴)، می‌توان آنها را به صورت سیستم جرم و فنر ملاحظه کرد. پس یک سیستم تک‌جزئی انژکتور - محفظه به یک سیستم دو درجه آزادی ساده می‌شود (شکل ۵).



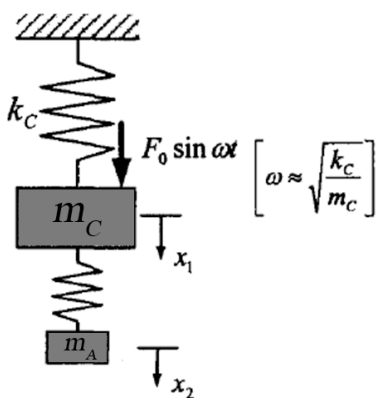
شکل ۳. نمایی از حفره پشت محفظه چرخش انژکتور [۲]



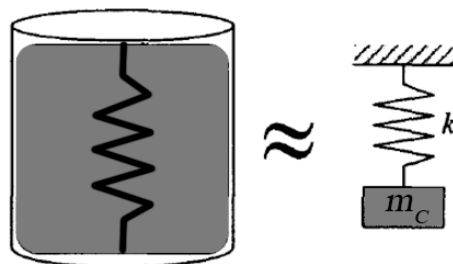
شکل ۱. مدل انژکتور حفره‌پشتی [۳]



شکل ۲. نمایی شماتیک از یک انژکتور چرخشی حفره‌پشتی [۲]



شکل ۵. مدل جسم آزاد ساده‌شده سیستم انژکتور و محفظه [۱]



شکل ۴. محفظه احتراق به‌عنوان یک سیستم جرم و فنر [۱]

بافل‌ها و یا وجود یک نازل طولانی و یا یک صفحه‌انژکتور منحنی) نیز نمی‌تواند این شناسه‌اکوستیکی را از بین ببرد. آزمایشات اکوستیکی با استفاده از مدل‌ها نشان می‌دهند که هندسه‌ محفظه احتراق و نازل از جنبه نظری به صورت یک سیستم بسته / بسته رفتار می‌کند؛ هرچند در واقعیت نازل بسته نیست [۲].

به منظور تحلیل رفتار امواج اکوستیکی محفظه احتراق، به حل معادلات کامل سه بعدی پیوستگی و مومنتوم نیاز است. اما معادلات موج به دست آمده با تعدادی از فرضیات معقول و منطقی، برای مدل کردن امواج اکوستیکی درون محفظه احتراق عملی می‌باشند. فرم کلی معادله موج به صورت ۳ است [۱]:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (3)$$

از جمله این فرضیات این است که جریان متوسط در نظر گرفته نشده است؛ زیرا فرض بر این است که دامنه نوسانات فشار، بسیار پایین می‌باشند. همچنین فرض شده است که تمام حرکات گاز در حفره به صورت آیزنتروپیک انجام می‌پذیرد و همچنین اغتشاشات خواص سیال (فشار، چگالی و سرعت) بسیار کوچک می‌باشند. فرکانس تشدید حفره استوانه‌ای برابر است با:

$$f_{lmn} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{lm}^2}{R_c^2} + \frac{l^2 \pi^2}{L_c^2} \right)} \quad (4)$$

$$l, m, n = 0, 1, 2, \dots$$

به طوری که در این رابطه c سرعت آیزنتروپیک صوت در یک گاز مغشوش نشده است و زیرنویس‌های سه گانه l و m و n نشانگر شماره‌های موج‌اند.

اگر فرکانس انژکتور حفره‌پشتی مدل دقیقاً با سیستم اصلی تنظیم شود، ممکن است به عنوان جاذب اکوستیکی عمل کند. در این مقاله، مدل انژکتور چرخشی به صورت یک رزوناتور یک‌چهارم موجی ملاحظه شده است؛ البته با این فرض که حفره هوای استوانه‌ای با استفاده از پیشران مایع، درون محفظه چرخش انژکتور تشکیل شود (مطابق شکل

باید توجه داشت که زیرنویس‌های C و A به ترتیب معرف محفظه و سیستم متصل (یعنی انژکتور) می‌باشند. همچنین نیروی محرک خارجی به صورت $F_0 \sin(\omega t)$ مدل می‌شود که در آن ω فرکانس زاویه‌ای نیروی محرک می‌باشد. در این مقاله، نیروی محرک منبع صوتی از یک بلندگو است. با حل معادلات حاکم این سیستم، دامنه m_c به صورت ۱ به دست می‌آید:

$$X_1 = \frac{F_0(k_A - m\omega^2)}{(k_c + k_A - m_c\omega^2)(k_A - m_A\omega^2) - k_2^2} \quad (1)$$

پاسخ معادله دارای دو قله تشدید است که می‌تواند از این واقعیت که این سیستم دو درجه آزادی است، توجیه شود. فرکانس‌های تشدید یا به عبارت دیگر فرکانس‌های ویژه این سیستم با معادل صفر قرار دادن بخش موهومی امیدانس در محل جرم ۱ قابل محاسبه هستند. در رابطه ۲، Z_1 معرف امیدانس در محل جرم ۱ است.

$$\text{Im}(Z_1(m)) = 0 \quad (2)$$

مشاهده می‌شود که وقتی فرکانس سیستم ضمیمه شده به محفظه (منظور همان انژکتور) با فرکانس تحریک تطابق پیدا می‌کند، مقدار دامنه‌ها عبارت‌اند از [۱]:

$$X_1 = 0$$

$$X_2 = \frac{-F_0}{k_A}$$

لذا نیروی اعمال شده بر m_A برابر می‌شود با:

$$k_A X_2 = \omega^2 m_A X_2 = -F_0$$

بنابراین سیستم ضمیمه شده شامل m_A و k_A همان میزان از نیروی خارجی را در جهت عکس به سیستم اصلی m_c و k_c اعمال می‌کند؛ لذا ارتعاشات در فرکانس محرک، صرف‌نظر از دامنه m_A حذف می‌گردند.

۳. تخمین فرکانس تشدید

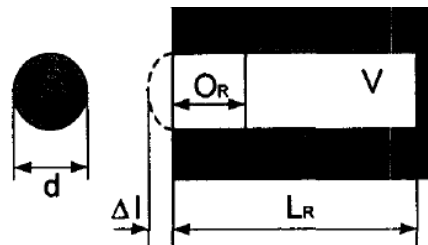
نوسانات فشار و سرعت در طی ناپایداری‌های محفظه فرکانس بالا را می‌توان با مودهای اکوستیکی نرمال حفره‌های استوانه‌ای، به خوبی شناسایی کرد. حتی انحراف زیاد شکل محفظه از حالت استوانه‌ای (ناشی از وجود

۶. فرکانس تشدید رزوناتور یک‌چهارم موجی برابر است با [۱]:

$$f_{Q0} = \frac{c}{4(L_R + \Delta l)} \quad (5)$$

به‌طوری‌که در این رابطه Δl تصحیح جرمی است که اجازه می‌دهد که جرم هوا از هوای بیرون اوریفیس جدا نشود. برای انتهای لوله باز فلنج‌نشده، این مقدار برابر با $0.3d$ می‌باشد. به‌منظور کارکرد مؤثر انژکتورهای مدل به‌عنوان جاذب اکوستیکی، طول انژکتور باید به‌گونه‌ای طراحی شود که تشدید در همان فرکانس محفظه مدل به‌وجود آید. لذا طول انژکتور از معادله فرکانس تشدید به‌دست می‌آید.

$$L_{inj} = \frac{c}{4f_0} - \Delta l \quad (6)$$

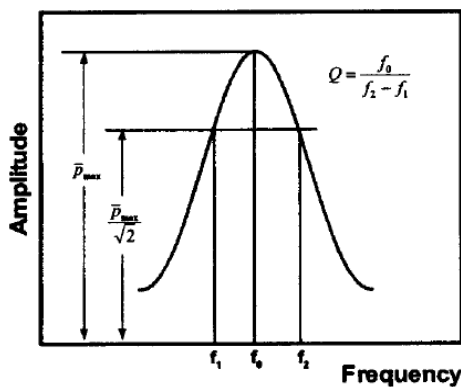


شکل ۶. رزوناتور یک‌چهارم موجی [۱]

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (7)$$

به‌طوری‌که در این رابطه f_0 فرکانس تشدید بوده و f_1 و f_2 فرکانس‌های بالا و پایین از f_0 هستند که پاسخ توانی آنها نصف پاسخ توانی در فرکانس تشدید است. یک منحنی پاسخ متداول، که اندازه‌های مورد نیاز برای محاسبه Q را نشان می‌دهد، در شکل ۷ نمایش داده شده است. برای سازگاری با نرخ میرایی α/f_0 ، فاکتور میرایی η به‌صورت عکس Q تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (8)$$



شکل ۷. منحنی متداول پاسخ محفظه [۱]

همان‌گونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، نرخ میرایی α نرخ است که در آن، میرایی دامنه‌ها بعد از عملکرد منبع تحریک، به‌صورت ناگهانی تحریک محفظه را متوقف می‌سازد. اگر حفره به‌عنوان یک پارامتر سیستم، با تلفات خطی نوسان کند، فشار حفره مطابق با قانون زیر میرا می‌شود [۱]:

$$p_t = p_{\max} e^{-\alpha t} \sin 2\pi f_0 t \quad (9)$$

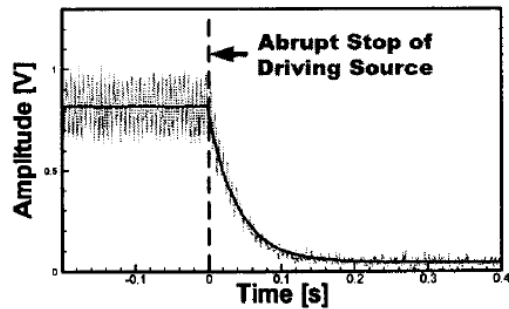
به‌طوری‌که در این رابطه p_t دامنه فشار اکوستیکی در هر لحظه و p_{\max} دامنه قبل از قطع منبع تحریک در لحظه صفر است.

به‌منظور نشان دادن ملاحظات نظری، الگوی پاشش و پاسخ‌های اکوستیکی اندازه‌گیری شده‌اند. در شکل ۹ نمایی شماتیک از ابزار تجربی برای انجام این آزمایشات

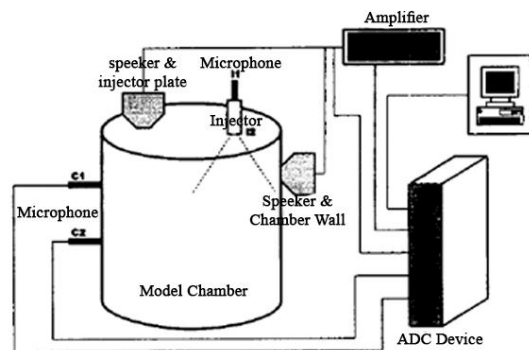
۴. رویکرد تجربی

مفیدترین روش اندازه‌گیری پاسخ یک میدان اکوستیکی در یک سیستم خاص، استفاده از ضریب میرایی اکوستیکی است. در این مقاله، هم روش پهنای‌باند و هم روش اندازه‌گیری نرخ اضمحلال، برای ارزیابی فاکتورهای میرایی مدل‌های محفظه و انژکتور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اگر میرایی محفظه برای یک مود خاص کم باشد، منحنی پاسخ یک بیشینه خواهد داشت، اما سریعاً در فرکانس‌های بالاتر و پایین‌تر از فرکانس تشدید کاهش می‌یابد. اگر میزان میرایی مود زیاد باشد، قله پاسخ کمتر بوده و منحنی گسترده‌تر می‌شود. این رفتار پیشنهاد می‌دهد تا از فاکتور پهنای باند و یا فاکتور کیفیت، به‌عنوان ابزاری جهت اندازه‌گیری میرایی استفاده گردد. این فاکتور را می‌توان برحسب پهنای باند نیمه‌توان نوشت.

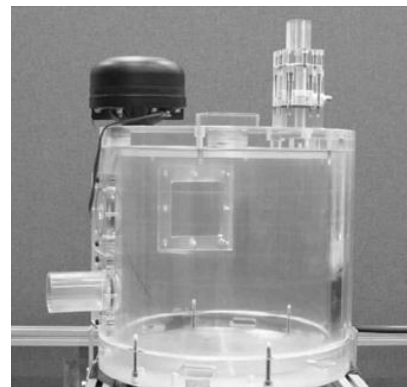
اکوستیکی نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز معرف یک مدل محفظه برای انجام آزمایش هاست.



شکل ۸ اندازه گیری نرخ میرایی [۱]



شکل ۹. تجهیزات آزمایشگاهی تست های اکوستیکی [۱]



شکل ۱۰. مدلی از یک محفظه [۳]

۵. تجهیزات آزمایشگاهی

برای داشتن مدل های محفظه و انژکتور در ابعاد واقعی، ابتدا ابعاد محفظه احتراق محاسبه می شوند. خصوصاً محفظه احتراق مدل به گونه ای طراحی شده که شکل یک حفره استوانه ای را داشته باشد تا فرکانس های تشدید به سادگی و

با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه شوند. محفظه مدل از جنس مواد شفاف ساخته شده است تا افزایش درون محفظه به خوبی قابل رؤیت و تصویربرداری باشد. مشخصات محفظه مدل در جدول ۱ ارائه شده اند [۱].

جدول ۱. مشخصات محفظه مدل [۱]

قطر داخلی	۲۷۰ میلی متر
قطر خارجی	۳۲۰ میلی متر
ارتفاع داخلی	۲۵۰ میلی متر
ارتفاع خارجی	۳۰۵ میلی متر
ضخامت دیواره	۲۵ میلی متر

انژکتور حفره پستی مدل با استفاده از رابطه استخراج شده در بخش قبلی طراحی شده است. در بین مودهای اکوستیکی تخمین زده شده مربوط به محفظه احتراق مدل، خصوصاً مودهای 1T و 1L1T به عنوان هدف اصلی برای جذب توسط انژکتور مدل در نظر گرفته شده اند. شعاع انژکتور مدل برابر با ۱۵ میلی متر است و طول آن مطابق با جدول ۲ تغییر می کند. انژکتورهای مدل نیز از جنس مواد شفاف ساخته شده اند.

جدول ۲. مشخصات انژکتورهای حفره پستی مدل [۱]

طول انژکتور (میلی متر)	V_B/V_{VC}	فرکانس طراحی	مود هدف
۸۰	۰	۱۰۱۶/۸۶	1L1T
۱۰۰	۰/۲۵	۸۰۷/۷۵۶	-
۱۰۹	۰/۳۶۲۵	۷۴۴/۷۴۵	-
۱۱۲	۰/۴	۷۲۵/۷۸۱	-
۱۲۰	۱/۵	۶۷۹/۹۲۱	1T

سیستم پالسی برای انجام آزمایشات اکوستیکی مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم از برد کنترل، پالس

3560C و نرم‌افزار فرانت‌اند لب‌شات^۴ تشکیل شده است. برد کنترل دو واحد خروجی برای ایجاد منبع تحریک صوتی و نیز چهار واحد ورودی برای اندازه‌گیری فشار اکوستیکی تشکیل شده است. سیگنال‌های نوفه تصادفی برای امپلی‌فایر تولید می‌شود تا بلندگو محفظه احتراق را تحریک کند. تمام سیگنال‌های اکوستیکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند تا پاسخ‌های فرکانسی و یا پاسخ‌های زمانی با پالس لب‌شات نشان داده شوند. شرایط آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده‌اند [۱].

جدول ۳. شرایط انجام آزمایش‌ها [۱]

(سیال شبیه‌ساز: آب با دبی ۶۷/۱ گرم بر ثانیه)

پارامتر اندازه‌گیری	مشخصات افشانه	پاسخ فرکانسی
افت فشار (مگاپاسکال)	۰/۱ تا ۰/۸	۰/۶
طول انژکتور (میلی‌متر)	۰/۹، ۱/۰، ۱/۰۹، ۱/۱۲	۸۰، ۸۱، ۸۲، ۸۳، ۱۰۰، ۱۰۹، ۱۱۲، ۱۱۸، ۱۱۹، ۱۲۰

پیچیده‌ای را از خود به نمایش گذاشت. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ زاویه پاشش و طول شکست را برای ۵ نوع انژکتور حفره‌پستی مختلف نشان می‌دهد. همچنان که افت فشار افزایش می‌یابد، جریان پیشران، مومنتوم بیش‌تری پیدا می‌کند و مؤلفه چرخشی سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند که این نیز به نوبه خود، زاویه بزرگ‌تری را برای افشانه رقم می‌زند. همچنین شکست افشانه به لیگامنت‌ها سریع‌تر اتفاق می‌افتد. ضمناً با افزایش افت فشار و نیز مومنتوم، مؤلفه محوری جریان در اوریفیس انژکتور بزرگ‌تر می‌شود. در نتیجه، صرف‌نظر از اینکه شکست فوری فیلم مایع، رفتار غیرخطی طول شکست را نسبت به افت فشار را به‌وجود می‌آورد، موقعیت شکست به سمت پایین‌دست روانه می‌شود [۱]. همان‌گونه که در شکل ۱۱ نیز دیده می‌شود، در افت‌های فشاری معادل با ۰/۳ تا ۰/۵ مگاپاسکال، انژکتور درازتر، زاویه پاشش کوچک‌تری دارد. در مقادیر افت فشار بیش‌تر از ۰/۶ مگاپاسکال، ترتیب زوایای افشانه انژکتورهای مدل دارای حفره (یعنی برای Linj=80mm و Linj=100mm و Linj=109mm و Linj=112mm و Linj=120mm) برعکس می‌شود.

۶-۲. تنظیم انژکتور

انژکتورهای مدل حفره‌پستی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌صورت اختصاصی فرکانس مودهای 1T و 1L1T را تنظیم کنند. از اندازه‌گیری‌های اکوستیکی پاسخ فرکانسی محفظه احتراق، فرکانس‌های دقیق مودها به‌دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. فرکانس‌های نظری را می‌توان بر مبنای معادلات نظری به‌دست آورد. فرکانس‌های مورد انتظار در شرایط گاز داغ نیز در جدول ۴ فهرست شده‌اند. این فرکانس‌ها از نتایج تجربی و با استفاده از یک نسبت صوتی ۳/۲ ای درجه‌بندی و مقیاس‌بندی شده‌اند [۱]. اندازه‌گیری‌های اکوستیکی پاسخ فرکانسی انژکتورهای مدل نیز به‌منظور دستیابی به فرکانس‌های طبیعی دقیق انژکتورها، انجام شده است. شکل ۱۳ فرکانس

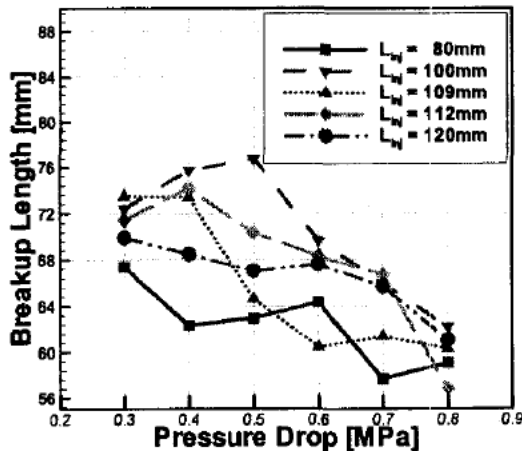
۶. ارائه نتایج و بررسی آنها

۶-۱. مشخصات افشانه

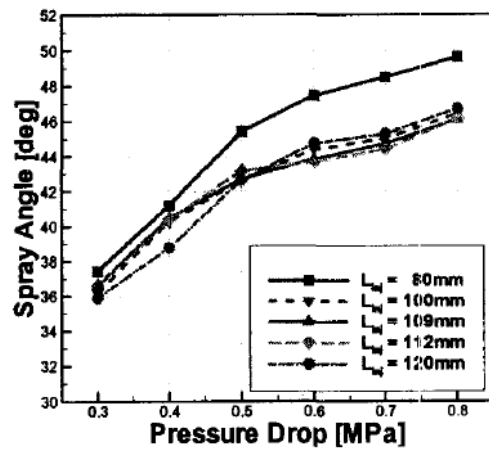
به‌منظور ارزیابی عملکرد انژکتورهای حفره‌پستی، الگوی افشانه برای افت‌های فشاری مختلف (از ۰/۱ تا ۰/۸ مگاپاسکال) مورد بررسی قرار گرفت. از مجموع این تصاویر، زاویه پاشش انژکتور و نیز طول‌های شکست هر انژکتور برای میزان افت فشار اندازه‌گیری شد. در افت فشارهای پایین‌تر (به نسبت)، از ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال، افشانه به حالت کاملاً توسعه‌یافته نرسیده بود و مود لاله‌گون به‌وجود آمده بود. در افت فشارهای بیشتر (بالا‌تر از ۰/۳ مگاپاسکال) الگوی افشانه حالت مخروطی به‌خود گرفت. لذا زاویه رأس افشانه و نیز طول شکست برای مقادیر افت فشار ۰/۳ مگاپاسکال و به بالا قابل اندازه‌گیری بود [۱]. مشخصه‌های افشانه با افزایش افت فشار، رفتار

آمده از روابط نظری مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که از شکل ۱۴ نیز برمی‌آید، این انژکتورها در فرکانس‌های ۱۰۵۷ هرتز و ۷۳۱ هرتز تشدید دارند. لذا طول‌های موثر با استفاده از رابطه فرکانس تشدید محاسبه می‌شود.

تشدید انژکتورهای مدل $L_{inj}=80\text{mm}$ و $L_{inj}=120\text{mm}$ را در شرایط گاز سرد نشان می‌دهد. در جدول ۴، به منظور تخمین و بررسی صحت Δl پیشنهاد شده، فرکانس‌های تجربی انژکتورهای مدل با فرکانس‌های نظری به دست



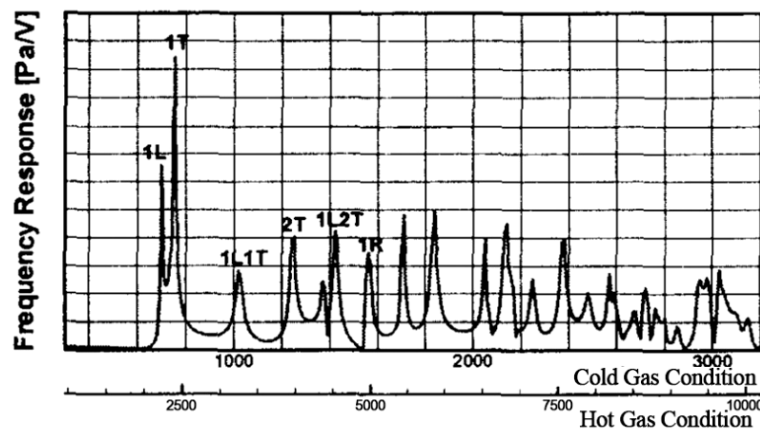
شکل ۱۲. طول شکست نسبت به افت فشار [۱]



شکل ۱۱. زاویه افشانه نسبت به افت فشار [۱]

جدول ۴. فرکانس‌های پاسخ مودهای اکوستیکی در محفظه احتراق مدل [۱]

مود	فرکانس نظری (هرتز)	فرکانس تجربی (هرتز)	انحراف (درصد)	فرکانس گاز داغ مورد انتظار
1L	۶۸۷/۴	۶۹۸/۵	۱/۵۹	۲۲۳۵/۲
1T	۷۴۵/۶	۷۵۲/۵	۰/۹۲	۲۴۰۰
1L1T	۱۰۱۴/۱	۱۰۲۴	۰/۹۷	۳۲۷۶/۸
2T	۱۲۳۵/۸	۱۲۴۵	۰/۷۴	۳۹۸۴
2L	۱۳۷۴	۱۳۷۶	۰/۱۵	۴۴۰۳/۲
1L2T	۱۴۱۴/۲	۱۴۲۴	۰/۶۹	۴۵۵۶/۸
1R	۱۵۵۱/۹	۱۵۵۲	۰/۰۱	۴۹۶۶/۴



شکل ۱۳. طیف فرکانسی اندازه‌گیری شده در محفظه احتراق مدل تحت شرایط گاز سرد [۱]

$$L' = \frac{c}{4f_0} \quad (10)$$

به طوری که در این رابطه طول مؤثر L' مجموع طول انژکتور و تصحیح جرمی Δl می باشد. مقدار Δl به گونه ای محاسبه شده است که برابر با 0.153 Rinj برای انژکتور 120 میلی متری و -0.355 Rinj برای انژکتور 120 میلی متری باشد. با تطبیق این تصحیحات جرمی، یک فرایند تنظیم فرکانس مودی خوب انجام شد. برای مود $1T$ ، انژکتور 119 میلی متری و برای مود $1L1T$ انژکتور 120 میلی متری تنظیم شدند [۱].

۷. روش پهنای باند

شکل ۱۵ پاسخ های فرکانسی محفظه احتراق مدل را که به انژکتور تنظیم شده برای مود $1T$ مجهز شده است، نشان می دهد که هیچ جریانی وجود ندارد. مشاهده می شود که دامنه برای محفظه بدون انژکتور، در فرکانس مود $1T$ برابر با $75/236 \text{ Pa/V}$ می باشد. بعد از سوار کردن انژکتورهای با طول های 118 میلی متر و 119 میلی متر و 120 میلی متر یکی پس از دیگری، دامنه آن فرکانس ها به مقادیر $24/302$ و $23/353$ و $23/137$ کاهش یافته و دامنه قله انتقال یافته به $27/716 \text{ Pa/V}$ و $28/107$ و $30/752$ می رسد. همچنین در هر مورد شکاف مود^۵ کوچکی نیز مشاهده می شود. هنگامی که مقادیر جریان پیشران در انژکتور، مقداری تغییر می کنند (که نتایج آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است) دامنه فرکانس مود $1T$ به مقادیر $13/948 \text{ Pa/V}$ و $12/841$ و $12/039$ کاهش می یابد و اختلاف دو تا مود به صورت واضح تری دیده می شوند. چون پاشش پیشران ها، انژکتور را تحریک کرده و یک نوفه دیگر را علاوه بر منبع صوتی اصلی تولید می کند، یکی از قله های شکافته شده بیش تر از حالت مورد بدون پاشش، رشد می کند. هر چند که بیشینه دامنه قله همچنان حداقل $35/9$ درصد کمتر از دامنه مود $1T$ می باشد [۱]. به صورت مشابه، پاسخ های فرکانسی محفظه احتراق مدل مجهز به انژکتور تنظیم شده برای مود $1L1T$ برای دو حالت با

پاشش و بدون پاشش پیشران اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل های ۱۷ و ۱۸ به نمایش درآمده اند. دامنه در فرکانس مود $1L1T$ برابر با $28/485 \text{ Pa/V}$ است (هنگامی که انژکتور نصب نشده است). چهار مورد آزمایشی برای شرایطی که انژکتورهای مدل دارای طول های 80 و 81 و 82 و 83 میلی متر هستند، انجام شده است. نتایج حاکی از آن بود که دامنه فرکانس $1L1T$ انژکتورهای مدل، برای حالتی که پاشش وجود ندارد به $12/879 \text{ Pa/V}$ و $6/206$ و $8/580$ و $13/475$ کاهش یافته است و برای حالت پاشش پیشران به $19/767 \text{ Pa/V}$ و $15/734$ و $13/642$ و $18/30$ کاهش یافته است. شکاف مد برای تمام موارد فرکانسی مود $1L1T$ دیده شد [۱]. دامنه های قله های بزرگ ترمود شکافته شده در جدول ۶ ارائه شده اند. همچون مود $1T$ ، در اینجا نیز دامنه های قله های انتقال یافته، در شرایط بدون جریان کمتر از دامنه مود $1L1T$ اصلی می باشند. در حالت وجود جریان، تمام حالات با وجود انژکتور نشان می دهند که دامنه های قله های انتقال یافته کمتر از دامنه های اصلی هستند (به جز برای مورد با طول انژکتور برابر با 80 میلی متر). از نتایج می توان چنین برداشت کرد که طراحی انژکتور باید بهینه باشد تا بتواند بیشترین بازده را به عنوان جاذب اکوستیکی داشته باشد. فاکتور میرایی پاسخ محفظه از منحنی های پاسخ ارزیابی شده است که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. برای مودهای $1L$ و $1T$ و $1L1T$ محفظه مدل دارای فاکتورهای $0/959$ و $1/283$ و $2/082$ می باشد.

۸. نتیجه گیری

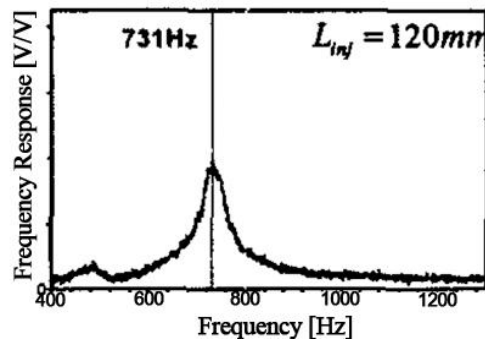
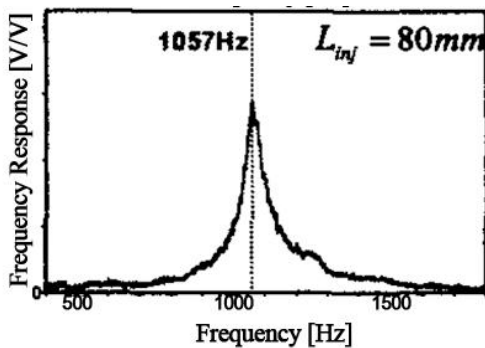
انژکتورهای مدل، دامنه قله را در فرکانس های ناپایدار هدف کاهش دادند و شکاف مودها همچنان که از نتایج نظری مورد انتظار بود، به وجود آمد. همچنین موقعیت شعاعی انژکتورهای مدل در صفحه انژکتور اندازه گیری شد و مشخص شد که در بازده میرایی بسیار مؤثر است. اگر انژکتور در مرکز صفحه انژکتور نصب شود، به سختی

مودهای مماسی خالص و ترکیب آنها را می‌کند. فاکتورهای میرایی برای پاسخ محفظه مدل اندازه‌گیری شد. بر مبنای این رویکرد از بین سه مود، مود 1L ناپایدارترین قله و مود 1LIT نیز پایدارترین آنها بود. نرخ‌های میرایی

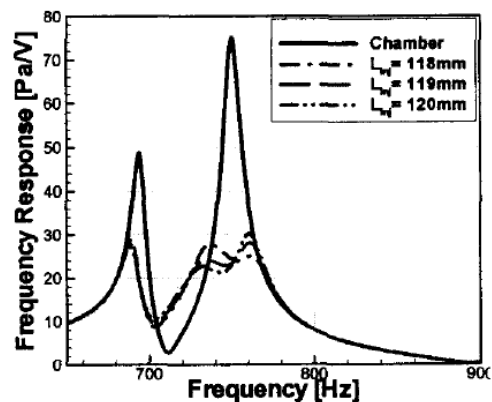
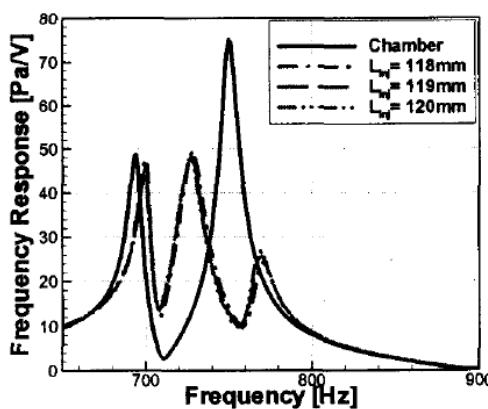
مدل محفظه با تجهیز به انژکتورهای مدل (در هر دو حالت بدون جریان و با جریان) افزایش یافت که حاکی از آن است که با طراحی صحیح انژکتور، می‌توان از وقوع ناپایداری‌های فرکانس بالای احتراق جلوگیری نمود [۱].

جدول ۵. فرکانس‌های پاسخ انژکتورهای مدل [۱]

$\Delta I / R_{inj}$	انحراف (درصد)	فرکانس تجربی	فرکانس طراحی (هرتز)	طول انژکتور (میلی‌متر)
۰/۱۵۳	۳/۸۰	۱۰۵۷	۱۰۱۶/۸۶	۸۰
-۰/۰۶۶	۶/۲۹	۸۶۲	۸۰۷/۷۵۶	۱۰۰
-۰/۲۶	۷/۰۸	۸۰۱/۵	۷۴۴/۷۴۵	۱۰۹
-۰/۲۸	۷	۷۸۰/۵	۷۲۵/۸۷۱	۱۱۲
-۰/۳۵۵	۶/۹۹	۷۳۱	۶۷۹/۹۲۱	۱۲۰



شکل ۱۴. پاسخ فرکانسی انژکتور مدل [۱]

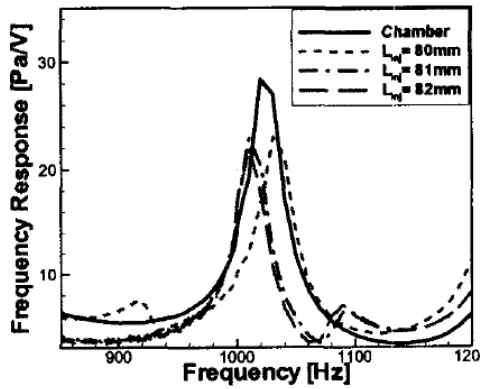


شکل ۱۶. پاسخ فرکانسی محفظه با انژکتورهای تنظیم شده

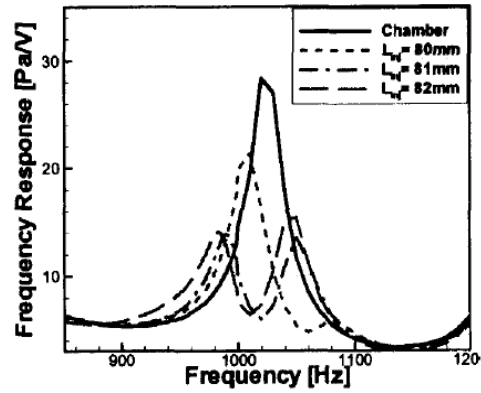
شکل ۱۵. پاسخ فرکانسی محفظه با انژکتورهای تنظیم شده

برای مود 1T (با جریان) [۱]

برای مود 1T (بدون جریان) [۱]



شکل ۱۸. پاسخ فرکانسی محفظه با انژکتورهای تنظیم شده برای مود IL1T (با جریان) [۱]



شکل ۱۷. پاسخ فرکانسی محفظه با انژکتورهای تنظیم شده برای مود IL1T (بدون جریان) [۱]

جدول ۶. دامنه انژکتورهای مدل در مود هدف و بیشینه مود جداشده [۱]

درصد کاهش قله دامنه	دامنه در قله انتقال یافته (Pa/V)		دامنه در فرکانس ناپایدار (Pa/V)		طول انژکتور (میلی‌متر)	مود هدف
	با جریان	بدون جریان	با جریان	بدون جریان		
۳۳/۷	۶۳/۱	۴۹/۸	۲۷/۷	۱۳/۹	۲۴/۳	IT
۳۵/۴	۲۶/۶	۴۸/۹	۲۸/۱	۱۲/۸	۲۳/۳	
۳۶/۸	۵۹/۷	۴۷/۵	۳۰/۲	۱۲	۲۳/۱	
۲۰/۷	۲۹/۳	۲۴/۷	۲۲	۱۹/۷	۱۲/۹	IL1T
۲۰/۵	۵۵/۶	۲۴/۸	۱۳/۸	۱۵/۷	۶/۲	
۲۳/۸	۴۶/۷	۲۳/۷	۱۶/۶	۱۳/۶	۸/۶	

جدول ۷. پاسخ فرکانسی محفظه مدل و فاکتورهای میرایی محاسبه شده در تشدید [۱]

IL1T	IT	IL	مود
۱۰۲۵	۷۵۲/۵	۶۹۹	فرکانس قله
۰/۰۸۲	۱/۲۸۳	۰/۹۵۹	η

۵. مأخذ

- [1] Cha, E., D. Kim, B. S. Kim, Y. Yoon and V. Bazarov, "Analysis of swirl coaxial injector with backhole as an acoustic damper in liquid rocket engines," 41st AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, 2005.
- [2] Kim, B., D. Kim, E. Cha, Y. Yoon, Y. M. Han, H. S. Choi and V. G. Bazarov, "Effect of Swirl Injector with Variable Backhole on Acoustic Damping in Liquid Rocket Engine," 2006.

- [3] Kim, S., T. Khil, D. Kim and Y. Yoon, "Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector," *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, no. Meas. Sci. Technol. 20 (2009).

پی نوشت

-
1. RD-170
 2. NK-33
 3. RD-57
 4. Frontend Labshot
 5. mode-split