

مدلسازی اثر کویتی بر تضعیف مودهای مخرب محفظه احتراق موتور سوخت مایع

علی‌رضا رضانی^۱

پژوهشکده شهید یزدانی

Ramezani_a@alum.sharif.edu

چکیده

در این پژوهش، مدلی برای بررسی اثر کویتی بر تضعیف مودهای مخرب محفظه احتراق موتور سوخت مایع ارائه شده است. مدل حاکم بر کویتی مدل یکپارچه‌ای است که با استفاده از معادله حاکم بر نوسانات گاز درون آن توسعه داده شده است و به معادله مشخصه محفظه که در پژوهش‌های گذشته بدست آمده، اضافه شده است. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که کویتی‌های حول صفحه انژکتور در صورت طراحی مناسب می‌تواند جهت تضعیف و حذف مودهای مخرب بکار رود. کویتی ضمن کاهش فرکانس مود نوسانی مخرب، دامنه اثر آن را نیز کاهش می‌دهد. ترکیب این دو کارکرد می‌تواند به حذف مود مخرب از محفظه احتراق منجر شود. همچنین نکته قابل توجه این است که کویتی که برای حذف مود خاصی طراحی می‌شود فقط برای همان مود موثر است و برای مودهای دیگر کارایی ندارد. ضریب جذب، فاکتور افت توان اکوستیکی و محدوده فرکانسی موثر کویتی، پارامترهایی می‌باشند که محاسبه آنها اطلاعات ارزشمندی را برای طراحی بهینه کویتی‌ها و تعیین تعداد و چیدمان آنها در اختیار طراحان می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: موتور سوخت مایع - مدلسازی - کویتی ربع موج - ضریب جذب - فاکتور افت توان

۱- مقدمه

در مراحل طراحی و توسعه موتورهای موشکی سوخت مایع و پرتابگرهای فضایی، مشکل عمده‌ای که وجود دارد احتمال وقوع ناپایداری احتراق فرکانس بالا در محفظه احتراق می‌باشد که می‌تواند منجر به انهدام موتور و یا آسیب رساندن به آن گردد به‌طوری‌که در نهایت، عملکرد موشک را تحت شعاع قرار می‌دهد و مأموریت آن را با شکست مواجه می‌کند. ناپایداری احتراق فرکانس بالا حاصل همگیری فرآیند احتراق با خصوصیات اکوستیکی محفظه است. بسته به شرایط عملکردی و چگونگی طراحی محفظه، این امکان وجود دارد که به‌صورت هم‌زمان چندین مود اکوستیکی تحریک شده باشد که این مساله کنترل ناپایداری احتراق را با مشکل مواجه می‌کند. یکی از روشهای مرسوم برای حذف یا تضعیف مودهای اکوستیکی تحریک شده، استفاده از جاذب‌های اکوستیکی مانند محفظه یا کویتی ربع موج (Quarter wave Cavity)، تشدیدکننده هلمهولتز (Helmholtz Resonator)، لاینر (Liner) و تیغه (Baffle) می‌باشد [۱] که می‌تواند در صورت طراحی مناسب، نقش موثری در تضعیف یا حذف مودهای اکوستیکی تحریک شده محفظه احتراق ایفاء کند.

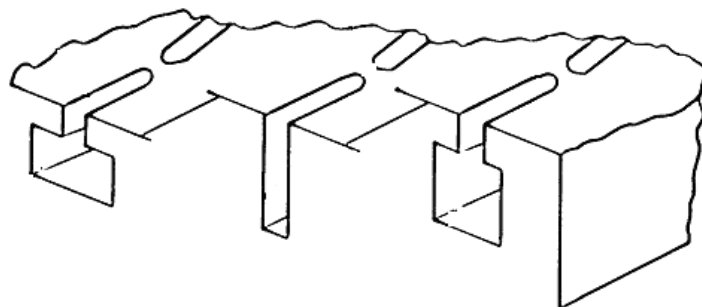
نمونه‌ای از تشدیدکننده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. محل بکارگیری آنها در موتورهای سوخت مایع مطابق شکل ۲ معمولاً حول صفحه انژکتور می‌باشد که بهترین مکان برای استهلاک مودهای عرضی می‌باشد زیرا عوامل غیرخطی ناشی از همگیری امواج اکوستیکی با نوسانات سرعت و فشار در این ناحیه وجود دارد. همچنین آرایه‌ای از آنها روی جداره داخلی موتور بکار گرفته می‌شود که معمولاً به عنوان لاینر شناخته می‌شود. نوع خاصی از تشدیدکننده‌ها، کویتی ربع موج می‌باشد که مانند یک شیار باریک حول صفحه انژکتور تعبیه می‌شود.

۱- کارشناس ارشد پیش‌رانش، دانشگاه صنعتی شریف

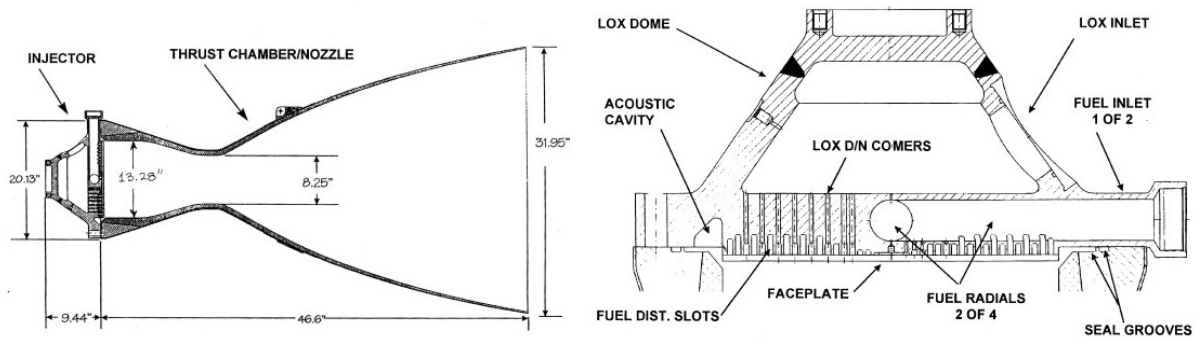
تئوری تشدیدکننده‌ها اولین بار توسط هلمهولتز در سال ۱۸۶۰ ارائه شده و در ادامه توسط ریلی در سال ۱۸۷۱ توسعه داده شد [۱]. با توجه به کاربرد گسترده آن به‌خصوص در تضعیف و استهلاک نوسانات صوتی، اغلب مراجع آکوستیکی به کلیات آن پرداخته‌اند [۲]. با توجه به کاربرد موفق تشدیدکننده‌ها در استهلاک نوسانات صوتی، از آنها برای استهلاک ناپایداری‌های صوتی و احتراقی در موتورهای هوازی در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ استفاده شد که نتایج قابل قبولی داشت. نتایج موفقیت‌آمیز استفاده از تشدیدکننده‌ها در موتورهای هوازی، باعث بکارگیری آنها در موتورهای سوخت مایع شد. این ابزار در موتورهای مختلفی مانند LM Ascent، RS-14، XRL و SSME کاربرد موفقی داشته است [۱]. در مراجع [۱] و [۳] اطلاعات مفیدی از تشدیدکننده‌ها به‌همراه نتایج کاربردی و مدلسازی عملکردی آنها ارائه شده است. مجموعه مطالعات تحلیلی و تجربی گسترده‌ای توسط ابرگ (Oberger) برای توسعه تکنولوژی استفاده از تشدیدکننده‌ها در موتورهای سوخت مایع انجام شد [۴]. تانگ (Tang) و سیرینگانو (Sirignano) با توسعه تحلیلی مدل غیر خطی حاکم بر رفتار تشدیدکننده‌ها به مقایسه رفتار کویتی ربع موج و تشدیدکننده هلمهولتز پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که کویتی ربع موج کارایی بیشتری در استهلاک نوسانات نسبت به تشدیدکننده هلمهولتز دارد ولی در مقابل محدوده فرکانسی کمتری را پوشش می‌دهد [۵-۶]. میچل (Mitchell) نیز با استفاده از معادلات حاکم بر محفظه و تشدیدکننده‌ها، کارایی تشدیدکننده‌ها را بر استهلاک نوسانات در محفظه احتراق موتور مایع بررسی کرده است [۷]. لانگل (Langel) و همکاران در بررسی پایداری احتراق یکی از موتورهای آریان ۵ (Ariane 5)، اثر بکارگیری تشدیدکننده‌ها را بر استهلاک مودهای ناپایدار موتور بررسی کردند [۸] و بر همین اساس لودین (Laudien) و همکاران نکات ارزشمندی برای طراحی تشدیدکننده‌ها ارائه کرده‌اند [۹]. کریستنسن (Christensen) و نسمن (Nesman) با استفاده از مدلسازی عددی، روند طراحی تشدیدکننده‌ای را برای استهلاک نوسانات موتور فست‌ترک (Fastrac) ارائه کرده‌اند [۱۰]. اسوالد (Oschwald) و همکاران به‌صورت تحلیلی، عددی و تجربی به بررسی اثر وجود یک کویتی بر فرکانس رزونانس و نرخ استهلاک نوسانات یک محفظه استوانه‌ای پرداخته‌اند [۱۱].

امروزه با توجه به تاریخچه کاربرد موفق چند دهه‌ای تشدیدکننده‌ها، آنها به عنوان یک ابزار استاندارد برای تضعیف یا استهلاک مودهای مخرب در موتورهای سوخت مایع و توربین‌های گازی به‌شمار می‌روند. گرچه زمان زیادی از ارائه تئوری تشدیدکننده‌ها و کاربرد آنها می‌گذرد ولی به دلیل ملاحظات موجود، داده‌ها و اطلاعات قابل توجهی از کاربرد آنها در موتورهای سوخت مایع وجود ندارد و اطلاعات موجود جهت استفاده در طراحی محفظه‌ها از انسجام لازم برخوردار نیستند.

هدف از پژوهش حاضر، توسعه نرم‌افزاری جهت بررسی کمی و کیفی اثر کویتی‌ها بر استهلاک مودها یا فرکانسهای مخرب محفظه احتراق می‌باشد. به همین منظور مدل حاکم بر رفتار کویتی‌ها به مدلی که در کارهای قبلی جهت تعیین مرز پایداری محفظه احتراق توسعه داده شده بود اضافه شده است. سپس با استفاده از کد نرم‌افزاری ایجاد شده، اثر کویتی بر مودهای مخرب بررسی و عملکرد آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج با اطلاعات موجود در مراجع مقایسه می‌شود. با استفاده از نتایج حاصل و بررسی آنها، نکات قابل توجه جهت طراحی محفظه پایدار بیان می‌شود.



شکل ۱- انواع کویتی‌ها، هلمهولتز رزوناتور و کویتی ربع موج (رزوناتور میانی) [۳]



شکل ۲- محل رزوناتور در موتور سوخت مایع (برای نمونه موتور Fastrac) [۹]

۲- مدلسازی

برای مدلسازی اثر کویتی لازم است که ابتدا محفظه احتراق مدل شود و سپس مدل حاکم بر رفتار کویتی به عنوان شرط مرزی به معادلات محفظه اعمال گردد. برای تعیین مودهای آکوستیکی تحریک شده محفظه، معادلات غیرلزج نوسانی حاکم بر محفظه با تئوری احتراق کروکو (Crocco) ترکیب شده و معادله مشخصه (Characteristic Equation) حاکم بر نوسانات محفظه بدست آمده است. این معادله مشخصه از دو معادله دیگر به عنوان شرط مرزی در ناحیه ورودی نازل و صفحه انژکتور استفاده می‌کند. برای شرط مرزی در صفحه انژکتور از معادلات حاکم بر کویتی استفاده شده است. مدلسازی محفظه در پژوهشهای گذشته انجام شده و در مقالاتی ارائه شده است [۱۲-۱۳]. در این مقاله، کلیاتی از مدلسازی محفظه ارائه می‌گردد تا چگونگی اعمال شرط مرزی کویتی به معادلات محفظه مشخص گردد. در ادامه معادلات حاکم بر کویتی ارائه می‌شود. برای مدلسازی کویتی، رزیستانس و راکتانس آن با توجه به مشابهت مدل آن با سیستم مکانیکی جرم، فنر و جاذب یا سیستم الکتریکی خازن و مقاومت بر حسب پارامترهای هندسی و خواص گاز درون آن مدل شده است. سپس ادمیتانس کویتی در شرط مرزی صفحه انژکتور محفظه احتراق اعمال شده و از این طریق اثر آن بر آستانه پایداری محفظه احتراق بررسی شده است. مدلسازی شامل دو بخش است. بخش اول مربوط به محفظه و بخش دوم مربوط به کویتی است. در هر قسمت فرضیات کلی و نحوه استنتاج معادلات اساسی حاکم بیان می‌شود.

۲-۱- مدلسازی محفظه

محفظه سه‌بعدی تقارن محوری با سطح مقطع استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود. از فرض شعله متمرکز برای مکانی که در آن آزادسازی انرژی انجام می‌شود، استفاده می‌گردد. مکان تشکیل شعله، پیشانی شعله نامیده می‌شود و طبق تعریف مکانی است که قطرات پیشران به صورت آبی شروع به سوزش و آزادسازی انرژی می‌کنند. فاصله زمانی میان تزریق پیشران به محفظه تا لحظه آزادسازی انرژی را زمان تاخیر کل می‌نامند. در محدوده زمانی مذکور، فرآیندهای متعددی مانند تزریق، ریزسازی اختلاط، تبخیر و واکنش اتفاق می‌افتد. برای تعیین پاسخ محفظه، با توجه به هندسه موتور، معادلات حاکم برای گاز ایده‌ال و غیرلزج شامل پیوستگی، بقای ممنتوم و انرژی با فرض آیزنتروپیک بودن جریان در مختصات استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \nabla^* (\rho^* \bar{u}^*) = 0 \quad (1)$$

$$\rho^* \left(\frac{\partial \bar{u}^*}{\partial t^*} + \bar{u}^* \cdot \nabla^* \bar{u}^* \right) + \nabla^* p^* = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dp^*}{p^*} = \gamma \frac{d\rho^*}{\rho^*} \quad (3)$$

سیس متغیرهای ترمودینامیکی مانند فشار و جرم حجمی، به مقادیر متوسط و نوسانی تفکیک شده و با مقادیر متوسطشان در شرایط پایا بی بعد می گردند. مقادیر متوسط متغیرها، ثابت بوده و فرض می شود که در نواحی بالا دست و پایین دست شعله یکنواخت هستند. نوسانات در همه جهت ها متغیر بوده و تابعی از زمان می باشند. سرعت به دو مؤلفه متوسط و نوسانی تفکیک شده و بی بعد می گردد. فرض می شود مؤلفه متوسط سرعت، فقط در جهت محوری وجود دارد و به صورت گسسته در مقطع احتراق از مقدار صفر در ناحیه بالا دست شعله به مقدار متوسط آن در پایین دست شعله می رسد. مؤلفه نوسانی سرعت در همه جهت ها وجود دارد و متغیری از زمان محسوب می شود. تمام مؤلفه های نوسانی آنقدر کوچک فرض می شوند که از حاصل ضرب آنها صرف نظر می شود. بدین ترتیب معادلات پیوستگی و مومنتوم حاصل خطی می شوند. نوسانات خطی می تواند به صورت توابع سینوسی در نظر گرفته شود. با توجه به فیزیک موجود در محفظه، میدان جریان نوسانات، غیرچرخشی فرض می شود. با استفاده از این فرض، نوسانات سرعت به صورت تابعی از گرادیان تابع پتانسیل سرعت مطابق رابطه ذیل تعریف می گردد.

$$\vec{u}' = \nabla \phi \quad (4)$$

از ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم حاصل با رابطه ساده شده آیزونتروپیک انرژی، معادله مشخصه ای برای تابع پتانسیل سرعت به دست می آید.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \nabla^2 \phi + \vec{u} \cdot [\nabla(\vec{u} \cdot \nabla \phi)] + 2\vec{u} \cdot \frac{\partial \nabla \phi}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

تابع پتانسیل موجود در معادله مشخصه با استفاده از رابطه (۶) به دو قسمت مکانی و زمانی تفکیک می گردد.

$$s = \lambda + i\omega \quad \phi = \phi_0 e^{st} \quad (6)$$

که ϕ_0 دامنه اولیه، λ نرخ تغییر دامنه نوسان و ω سرعت زاویه ای نوسانات است. بدین ترتیب رابطه (۵) بدین صورت بازنویسی می شود.

$$s^2 \phi_0 - \nabla^2 \phi_0 + \vec{u} \cdot [\nabla(\vec{u} \cdot \nabla \phi_0)] + 2\vec{u} \cdot s \nabla \phi_0 = 0 \quad (7)$$

با استفاده از روش جداسازی متغیرها، معادله مشخصه تابع پتانسیل سرعت به سه معادله دیفرانسیل معمولی درجه دوم تفکیک می شود. با استفاده از شرایط مرزی دیواره ها و فرض تقارن محوری بودن محفظه معادلات مربوط به موده های مماسی و شعاعی حل می شوند. حل عمومی مسأله، با حل معادله محوری، با در نظر گرفتن شرایط مرزی در صفحه انژکتور و نازل بدست می آید. معادله محوری پتانسیل سرعت بصورت ذیل است که در آن ϕ_x نوسانات پتانسیل سرعت در جهت محوری می باشد.

$$(1 - \bar{u}^2) \phi_x'' - 2\bar{u}s \phi_x' - (s^2 + S_{mn}^2) \phi_x = 0 \quad (8)$$

که در آن S_{mn} فرکانس مرتبط با ترکیب های مختلف موده های مماسی و شعاعی است و در جدول اولی ارائه شده است [۱]. حل معادله محوری بصورت ذیل است.

$$\phi_x = C_1 \exp(r_1 x) + C_2 \exp(r_2 x) \quad (9)$$

$$r_{1,2} = \frac{\bar{u}s \pm \sqrt{s^2 + (1 - \bar{u}^2) S_{mn}^2}}{1 - \bar{u}^2}$$

معادله شماره (۹) و حل عمومی آن در هر دو ناحیه پیش و پس از شعله حاکم بوده و شرایط مرزی هر ناحیه تعیین کننده ضرایب نامعین باقی مانده و نهایتاً کامل شدن حل خواهد بود. هدف از حل این معادلات بدست آوردن ادمیتانس نوسانات یا نسبت نوسانات سرعت به نوسانات فشار است. معادله ادمیتانس با این تعریف به صورت ذیل بدست می آید.

$$Y = - \frac{r_1 \exp(r_1 x) + \frac{C_2}{C_1} r_2 \exp(r_2 x)}{\gamma \left(s \exp(r_1 x) + s \frac{C_2}{C_1} \exp(r_2 x) + \bar{u} r_1 \exp(r_1 x) + \bar{u} \frac{C_2}{C_1} r_2 \exp(r_2 x) \right)} \quad (10)$$

معادله (۱۰) برای هر ناحیه با توجه به فرضیات و شرایط مرزی خاص آن ناحیه نهایی خواهد شد. مقدار ادمیتانس برای ناحیه اول، Y_I ، با احتساب سرعت صفر برای سرعت میانگین گاز و ادمیتانس ψ_p برای شرط مرزی صفحه انژکتور تعیین می‌شود.

$$Y_I \Big|_{x=x_p} = \frac{\left(\frac{\alpha}{\gamma s} \right)^2 (e^{\alpha x_p} - e^{-\alpha x_p}) - \psi_p \left(\frac{\alpha}{\gamma s} \right) (e^{\alpha x_p} + e^{-\alpha x_p})}{\psi_p (e^{\alpha x_p} - e^{-\alpha x_p}) - \left(\frac{\alpha}{\gamma s} \right) (e^{\alpha x_p} + e^{-\alpha x_p})} \quad (11)$$

ادمیتانس ناحیه دوم با در نظر گرفتن ادمیتانس نازل به عنوان شرط مرزی به صورت ذیل بدست می‌آید.

$$Y_{II} \Big|_{x=-x_q} = - \frac{r_1 e^{-r_1 x_q} + \frac{C_2}{C_1} r_2 e^{-r_2 x_q}}{\gamma \left(s e^{-r_1 x_q} + s \frac{C_2}{C_1} e^{-r_2 x_q} + \bar{u} r_1 e^{-r_1 x_q} + \bar{u} \frac{C_2}{C_1} r_2 e^{-r_2 x_q} \right)} \quad (12)$$

که در آن نسبت C_2/C_1 بصورت ذیل است.

$$\frac{C_2}{C_1} = - \frac{\gamma s \psi_q + \gamma \bar{u} r_1 \psi_q + r_1}{\gamma s \psi_q + \gamma \bar{u} r_2 \psi_q + r_2} \quad (13)$$

در روابط بالا، x_p فاصله صفحه انژکتور تا شعله و x_q فاصله شعله تا ورودی نازل است. شعله همانطور که قبلاً بیان شده بصورت متمرکز در نظر گرفته شده است. از رابطه پیوستگی برای ارتباط حل نواحی بالا دست و پایین دست شعله و بدست آوردن تابع پاسخ محفظه نسبت به نوسانات نرخ سوزش استفاده می‌شود.

$$Y_b = \frac{1}{\bar{u}} \left(u'_{II} - \frac{\bar{\rho}_I a_I}{\bar{\rho}_{II} a_{II}} u'_I \right) + \frac{1}{\gamma} \quad (14)$$

در نهایت، از رابطه (۱۴) و تابع پاسخ احتراق ارائه شده توسط کروکو، ضریب وابستگی n و تأخیر زمانی حساس τ بدست می‌آید.

$$\begin{cases} n = \frac{Y_r^2 + Y_i^2}{2Y_r} \\ \tau = \frac{1}{\omega} \left[k\pi \pm \arccos \left(1 - \frac{Y_r}{n} \right) \right] \end{cases} \quad (15)$$

اندیس r معرف قسمت حقیقی ادمیتانس و i معرف قسمت مجازی می‌باشد. با حل و تحلیل نمودارهای حاصل می‌توان مرز پایداری را مشخص کرد.

۲-۲- مدلسازی کویتی

کویتی ربع موج مانند یک لوله یک سر باز و یک سر بسته می‌باشد که همانند شیاری حول صفحه انژکتور قرار می‌گیرد. اگر ابعاد مختلف کویتی در برابر طول موج نوسانات کوچک باشد، می‌توان نشان داد که معادله نوسانی گاز در داخل کویتی مانند معادله حاکم بر سیستم جرم، فنر و ضربه‌گیر می‌باشد. تحت این شرایط، گاز در داخل کویتی همانند یک توده واحد مانند جرم در سیستم مکانیکی جرم، فنر و ضربه‌گیر در نظر گرفته می‌شود. گاز داخل کویتی تحت نوسانات فشاری محفظه منبسط و منقبض می‌شود. این حرکت نوسانی از شرایط حاکم بر کویتی مانند دما و افت‌های موجود تأثیر می‌پذیرد. معادله نوسانی گاز حاکم بر کویتی می‌تواند همانند سیستم مدار الکتریکی مقاومت، سلف و خازن مدلسازی شود که این سیستم نیز معادل

سیستم مکانیکی جرم، فنر و ضربه گیر می باشد. برای مطالعه اثر استهلاک کویتی بر نوسانات اکوستیکی محفظه، امپدانس (Z) آن مدل می شود. با مدلسازی امپدانس، ادمیتانس کویتی بدست می آید. بطور کلی در سیستمهای مورد اشاره فوق، امپدانس یک کمیت مختلط است که از دو بخش اصلی تشکیل می گردد. بخش حقیقی آن، مقاومت (R) و بخش موهومی، راکتانس یا مقاومت القایی (X) نامیده می شود.

$$Z = R + i X \quad (16)$$

کمیت مقاومت گویای توان تضعیف دامنه نوسانات است و به پارامترهایی چون شکل اریفیس ورودی و خصوصیات گاز درون کویتی وابسته است. راکتانس کویتی مجموع اثر ظرفیت (Capacitance) و اثر القایی (Inductance) کویتی می باشد و به خصوصیات گاز درون کویتی و همچنین طول موثر یا اکوستیکی آن بستگی دارد. خصوصیات گاز درون کویتی، بطور عمده تابعی از دمای گاز درون آن می باشد. محاسبه دمای گاز درون کویتی به دلیل اثر پیچیدگی های موجود در فرآیندهای احتراق و مشخص نبودن اثر خنک کاری محفظه بر دمای گاز درون کویتی، بسیار مشکل می باشد. بدین دلایل در فرآیند طراحی، دمای گاز درون کویتی از انجام تست های مقیاس کوچک برای شرایط کاربردی مشخص اندازه گیری می شود [۸]. روابط مختلفی برای محاسبه مقاومت و راکتانس بخصوص برای محاسبه مقاومت ارائه شده است که البته تفاوت عمده ای در کمیت ندارند. از جمله دلایل موثر برای این امر می توان به تنوع اشکال طراحی شده برای کویتی ها، پیچیدگی ذاتی و عملیاتی اندازه گیری و دقت تجهیزات اندازه گیری اشاره کرد. برای مدلسازی حاضر از روابط ذیل که حدود دقت آن توسط روابط تجربی تایید شده است برای محاسبه مقاومت و مقاومت القایی استفاده می شود [۹].

$$R = 4(1 + l/d) \sqrt{\pi \mu p f} \quad (17)$$

$$X = -\rho_c c_c \cot(2\pi(l_{eff}/c_c)f) \quad (18)$$

با محاسبه امپدانس، ادمیتانس کویتی که عکس آن است، بدست می آید. ادمیتانس بدست آمده برای کویتی به جای شرط مرزی ψ_p در معادله ۱۱ اعمال می شود.

نرم افزاری ایجاد شده که قابلیت تعیین مرز پایداری و تعیین فرکانس رزونانس محفظه را با در نظر گرفتن اثر مجموعه ای از کویتی ها دارد. از این نرم افزار می توان برای محاسبات اولیه پایداری سازی یک محفظه احتراق ناپایدار با استفاده از طراحی مناسب مجموعه ای از کویتی حول صفحه انژکتور استفاده کرد. البته باید تمهیدات مختلفی برای بهینه سازی مدل بکار رفته برای کویتی و اطمینان از صحت ورودی های حل مساله مانند دمای کویتی اندیشید.

۳- تحلیل نتایج

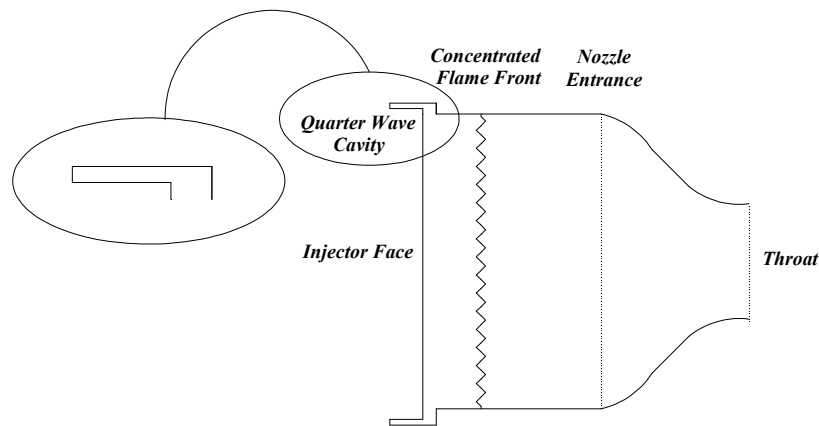
برای بررسی اثر کویتی بر حذف مود و فرکانس ناپایدار محفظه، نتایج برای موتوری با سوخت کروسین و اکسیدکننده اکسیژن ارائه شده است. مشخصات و شماتیک موتور به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ آمده است. برای محاسبه خواص احتراقی از نرم افزار CEA استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و عملکردی محفظه مورد بررسی و کویتی تعبیه شده در آن

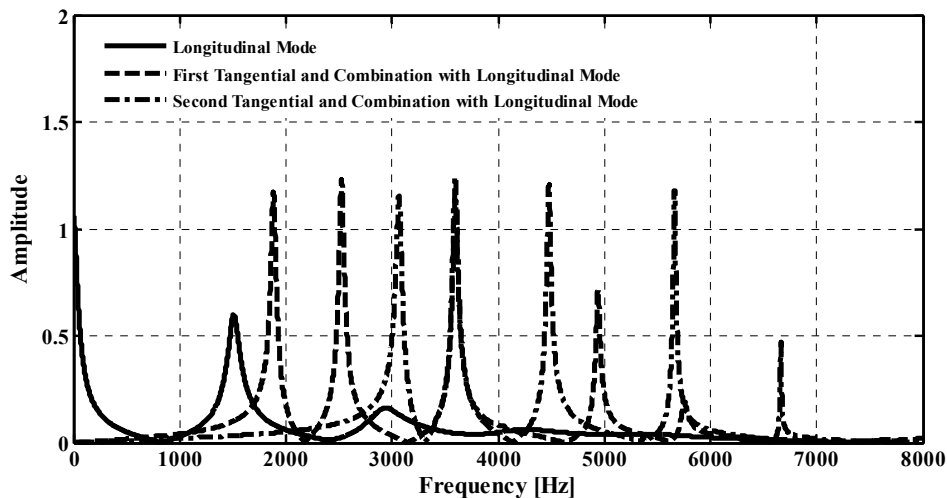
ورودی های عملکردی (برای اجرای CEA)		ابعاد هندسی محفظه احتراق	
۱۰۰/۴۷۵	فشار محفظه، [Bar]	۰/۳۰۵	طول محفظه، [m]
۳/۳۱۵	نسبت اختلاط، [-]	۰/۱۹	شعاع محفظه، [m]
۳۰۰	دمای ورودی سوخت، [K]	۰/۰۶۳۴	شعاع گلوگاه نازل، [m]
۹۰	دمای ورودی اکسیدکننده، [k]	۴۵	زاویه همگرایی نازل، [Degree]
خصوصیات گاز درون کویتی		مشخصات هندسی کویتی	
۱۳۸/۷۵	سرعت صوت، [m/s]	۰/۱۱	طول کویتی، [m]
۱/۲۳۴	جرم حجمی، [Kg/m ³]	۰/۰۴	عرض کویتی، [m]

۰/۰۰۲۲	لزجت، $[Kg/m-s]$	۰/۰۰۷	سطح مقطع، $[m^2]$
--------	------------------	-------	-------------------

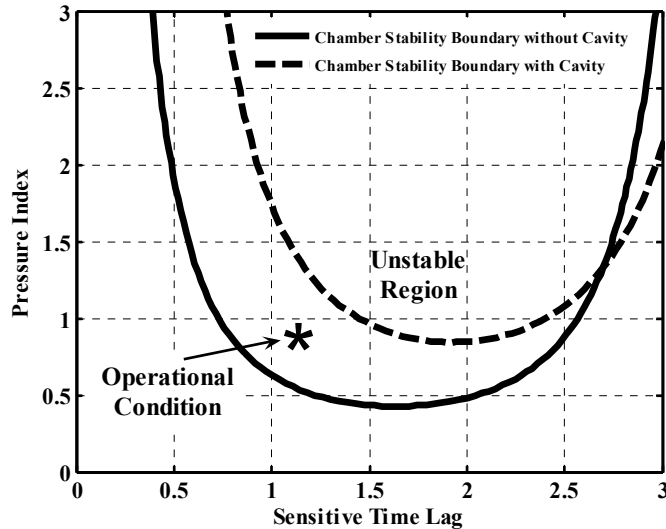
شکل ۴، مودهای مخرب و فرکانسهای مرتبط محفظه مورد بررسی را نشان می‌دهد که توسط نرم‌افزار پیش بینی شده است. این مودها شامل مودهای طولی و هارمونیهای آن، مود مماسی اول و ترکیب آن با مودهای طولی مربوطه و مود مماسی دوم و ترکیب آن با مودهای طولی مربوطه را نشان می‌دهد. همانور که از شکل مشخص است مودهای مماسی به نسبت مودهای طولی مخرب‌تر می‌باشند و باید برای استهلاک آنها از جاذب‌های آکوستیکی بهره گرفت. همچنین شکل، گویای وجود فرکانسهای مخرب فراوان در محفظه است که استهلاک همزمان آنها را با مشکل مواجه می‌کند. به همین دلیل در موتورها در بعضی از شرایط از ترکیبی از جاذب‌های مختلف استفاده می‌کنند. شکل ۵ مرز پایداری مود اول مماسی را برای موتور مذکور بدون وجود کویتی و با آن بر حسب شاخص حساسیت فشار (n) و زمان تاخیر حساس (τ) نشان می‌دهد. شاخص حساسیت فشار نشان‌دهنده میزان حساسیت نوسانات به فشار است. زمان تاخیر حساس، قسمت حساس به فشار، زمان تاخیر کل است. نواحی داخل مرزها، ناحیه ناپایدار می‌باشد. همانطور که از نمودار مشخص است، مقدار کمینه حساسیت محفظه به نوسانات فشار افزایش یافته است به عبارتی ناحیه پایداری محفظه افزایش یافته و محفظه پایدارتر شده است. شکل شماره ۶، تاثیر فرکانسی وجود کویتی را بر فرکانس تشدید محفظه نشان می‌دهد. فرکانس تشدید محفظه در شرایط موجود برای مود اول مماسی حدود 1880 Hz است که با وجود کویتی به حدود 1700 Hz کاهش یافته است. توجه کنید که افزایش ضریب حساسیت به فشار نیز نشان‌دهنده پایدارتر شدن محفظه است.



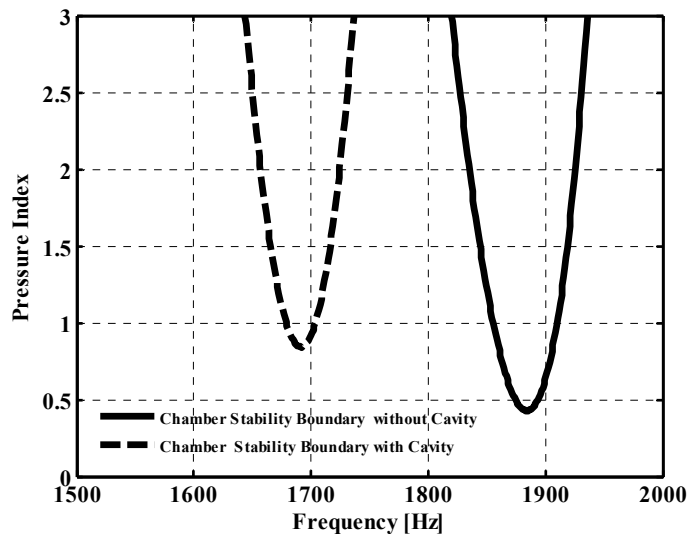
شکل ۳- شماتیک موتور مورد بررسی به همراه تعریف قسمتهای مختلف آن



شکل ۴- مودها و فرکانسهای نوسانی مخرب محفظه مورد بررسی



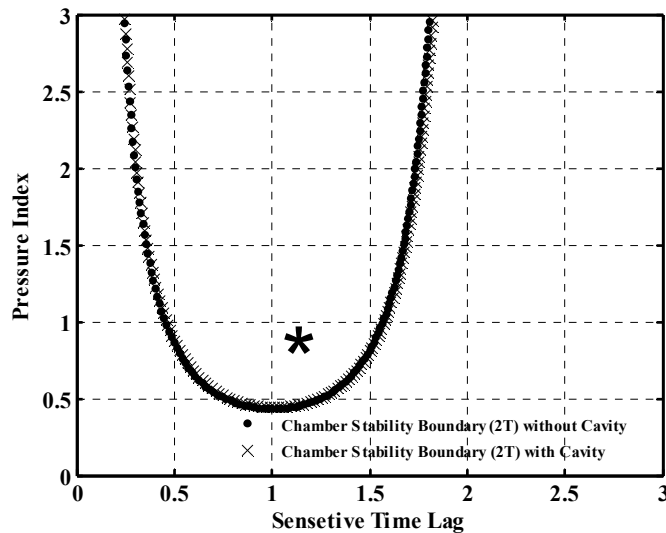
شکل ۵- اثر وجود کویتی بر مرز پایداری موتور مورد بررسی برای مود اول مماسی



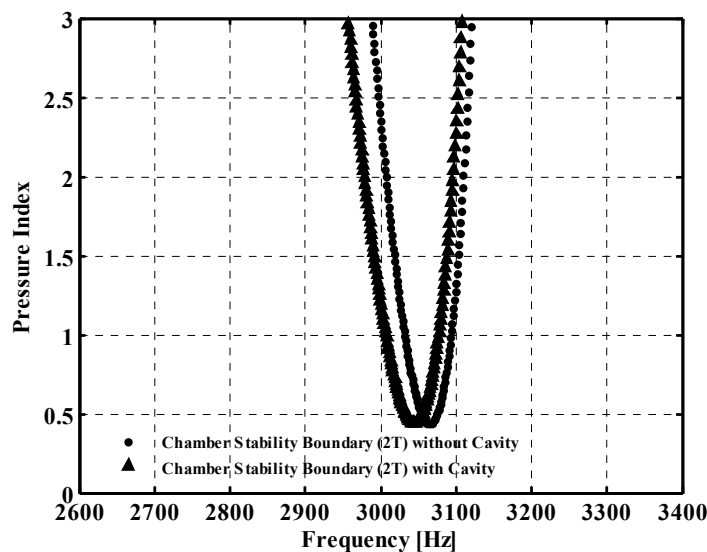
شکل ۶- اثر وجود کویتی بر فرکانس تشدید محفظه مورد بررسی برای مود اول مماسی

شکل ۷ مرز پایداری مود دوم مماسی را برای موتور مذکور بدون وجود کویتی و با آن بر حسب شاخص حساسیت فشار (n) و زمان تاخیر حساس (τ) نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است، مقدار کمینه حساسیت محفظه به نوسانات تغییر محسوسی نیافته است. به عبارتی ناحیه پایداری محفظه تغییر چندانی نکرده و کویتی با مشخصات مذکور که پیشتر مود اول مماسی را پایدارتر کرده بود بر مود دوم مماسی تأثیری نگذاشت. شکل شماره ۸، تأثیر فرکانسی وجود کویتی را بر فرکانس تشدید محفظه نشان می‌دهد. فرکانس تشدید محفظه در شرایط موجود برای مود دوم مماسی 3065 Hz است که با کمی تغییر به 3500 Hz کاهش یافته است. در مجموع کویتی با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ که برای تضعیف نوسانات مود اول مماسی طراحی شده بود، توانایی استهلاک مود دوم مماسی را ندارد.

طراحی اولیه کویتی ربع موج با توجه به شکل هندسی خاصی که دارد و مانند یک تیوب یک سر باز و یک سر بسته عمل می‌کند و خصوصیات سیال درون آن انجام می‌شود. فرکانس رزونانس چنین تیوبی با حل معادلات آکوستیکی داخل آن بصورت ذیل بدست می‌آید.



شکل ۷- اثر وجود کویتی بر مرز پایداری موتور مورد بررسی برای مود دوم مماسی



شکل ۸- اثر وجود کویتی بر فرکانس رزونانس محفظه مورد بررسی برای مود دوم مماسی

$$f_{\text{Resonance}} = \frac{c_{\text{Cavity}}}{4l_{\text{Effective Cavity}}} \quad (19)$$

طول موثر کویتی باید طوری انتخاب شود تا بتواند با توجه به سرعت صوت درون آن، فرکانس رزونانس مورد نظر را ایجاد کند. مدهای مماسی برای محفظه مورد بررسی با شرایط جدول ۱، بسیار مخرب هستند. اصولاً مدهای مماسی مخربترین مود در موتورهای سوخت مایع می‌باشد. برای موتور مذکور که با سوخت کروسین مایع و اکسیدکننده اکسیژن مایع کار می‌کند، ضریب حساسیتی برابر با ۰/۷۵ و زمان تاخیر حساس برابر با ۰/۱۷ میلی‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر از نتایج موجود

در مرجع [۱۴] انتخاب شده است. این مقادیر در محدوده معتبر آنها می باشد و قابل اعتماد است [۱]، ضمن اینکه خطای این کمیت ها خللی در بحث موجود ایجاد نمی کند. این مقادیر برای تعیین تابع پاسخ احتراق یا شرایط عملکردی بکار رفته است. بکارگیری کویتی همانطور که از شکل ۵ مشخص است باعث شده است که موتور از حالت ناپایدار در مود مماسی اول خارج گردد. طول موثر کویتی برای این نوع از کویتی با توجه به مراجع موجود طوری طراحی شده است که بتواند فرکانس تشدید مود اول مماسی را که قابلیت ناپایداری دارد را کاهش داده و مود مخرب را مستهلک کند. چنانچه مودهای دیگری نیز ناپایدار تشخیص داده شوند، با ترکیبی از تشدیدکننده ها و همچنین بفل ها، مودهای مخرب را دمپ می کنند و موتور را از حالت ناپایدار خارج می کنند.

شکل ۹ امپدانس کویتی و مولفه های آن را نشان می دهد. مقاومت القایی یا راکتانس، مجموع اثر ظرفیت و اثر القایی کویتی می باشد که در فرکانس تشدید صفر می شود. در این فرکانس است که امپدانس کویتی به کمینه مقدار خود می رسد. به عبارتی در این فرکانس، مقدار امپدانس با مقدار مقاومت کویتی که بر استهلاک نوسانات موثر است برابر می شود. این حالت نقطه طراحی بهینه کویتی برای عملکرد موثر بر فرکانس مورد نظر است.

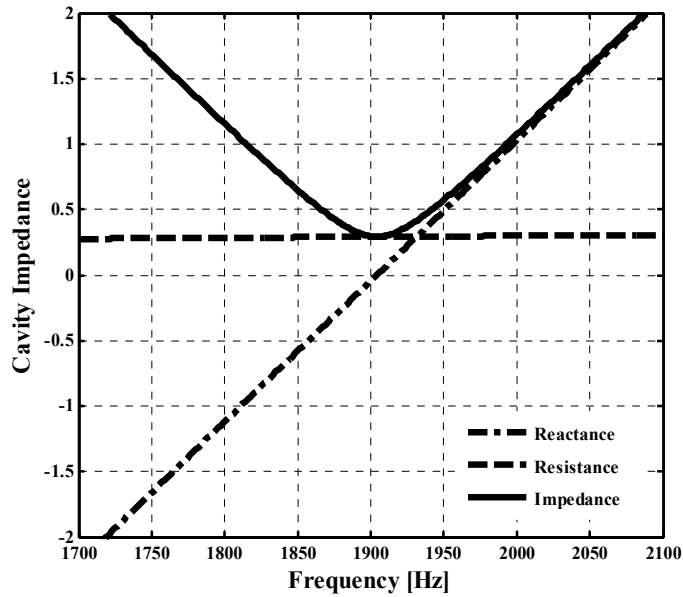
دو پارامتر مهمی که در طراحی چیدمان کویتی ها مورد استفاده قرار می گیرد ضریب جذب (Absorption Coefficient) و ضریب هدایت موثر (Conductance) یا فاکتور افت توان (Power loss factor) است که به صورت ذیل تعریف می شوند [۹].

$$\alpha = \frac{4R}{(1+R)^2 + X^2} \quad (20)$$

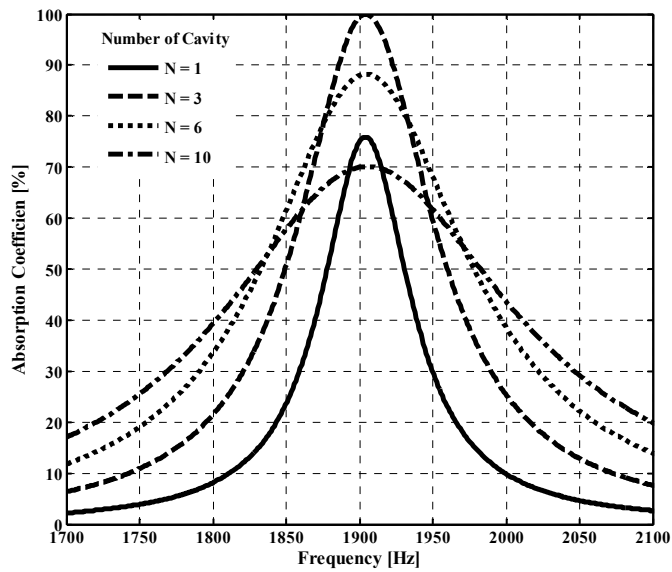
$$\zeta = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (21)$$

در عمل چیدمان و تعداد کویتی ها با استفاده از بهینه کردن ضریب جذب یا بیشینه کردن قسمت حقیقی ادمیتانس کویتی یا همان فاکتور افت توان انجام می شود. شرایطی که در آن ضریب جذب دیواره ای بهینه باشد یا به عبارتی ۱۰۰٪ شود، از آن دیواره هیچ شدت صوتی منعکس نمی شود. این بدین معنی است که تمام شدت صوت ارسالی را جذب می کند. افت توان آکوستیکی هر سطحی با نسبت فشار دینامیکی آن سطح متناسب است و این نسبت تناسب برابر با فاکتور افت توان است. به عبارتی هر چه این کمیت بیشتر باشد نوسانات آکوستیکی، بیشتر مستهلک می شوند.

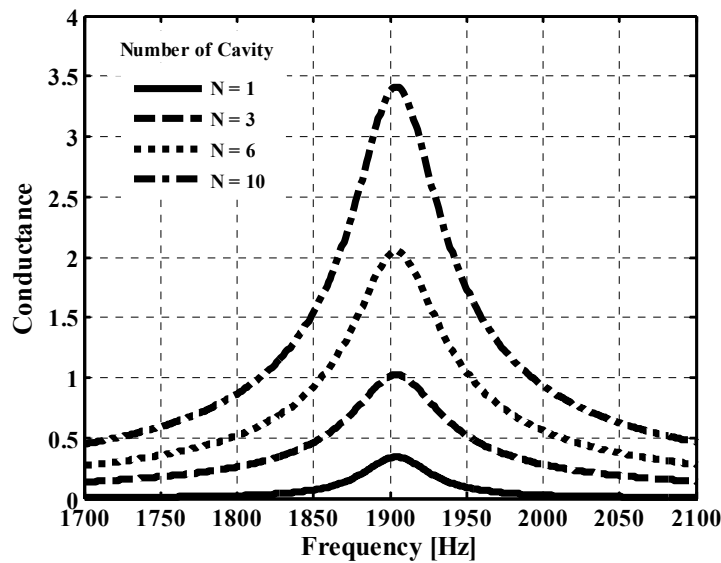
ضریب جذب برای تعداد مختلف کویتی ها حول صفحه انژکتور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است این مقدار به ازای تعداد مشخصی از کویتی ها بهینه می شود. برای یک کویتی، استهلاک زیر حالت بهینه (Underdamped) می باشد و برای سه کویتی این مقدار، مقدار بهینه (Optimal Damped) خود را بدست می آورد. برای تعداد بیشتر کویتی ها، مجدداً شرایط بیشتر از حالت بهینه (Overdamped) می شود.



شکل ۹- امیدانس کویتی و مولفه‌های آن



شکل ۱۰- ضریب جذب کویتی‌ها بر حسب تعداد آنها در محفظه



شکل ۱۱- فاکتور افت توان کویتی‌ها بر حسب تعداد آنها در محفظه

نکته‌ای که در شکل مذکور مشاهده می‌شود محدوده فرکانسی است که کویتی‌ها در حالت‌های مختلف پوشش می‌دهند. هر چه تعداد کویتی‌ها بیشتر می‌شود، محدوده فرکانسی که پوشش می‌دهند بیشتر می‌شود. این نکته با توجه به عدم قطعیت در تعیین دقیق فرکانس تشدید کویتی طراحی شده ناشی از عدم اطمینان از دمای گاز درون آن و به تبع آن، سرعت صوت و طول موثر آکوستیکی موثر بسیار حائز اهمیت است.

فاکتور افت توان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است هر چه تعداد کویتی‌ها افزایش می‌یابد فاکتور مذکور افزایش می‌یابد. طراحان برای استهلاک مودهای مخرب از ترکیبی از اطلاعات بالا، شامل ضریب جذب، محدوده فرکانسی و فاکتور افت توان و تعداد فرکانس‌های تشدید که باید مستهلاک شود و به تبع آن نوع کویتی که باید طراحی شود، استفاده می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نرم‌افزاری ایجاد شده که قابلیت تعیین مرز پایداری و تعیین فرکانس رزونانس محفظه را با در نظر گرفتن اثر مجموعه‌ای از کویتی‌ها دارد. از این نرم‌افزار می‌توان برای محاسبات اولیه پایدارسازی یک محفظه احتراق ناپایدار با استفاده از طراحی مناسب مجموعه‌ای از کویتی حول صفحه انژکتور استفاده کرد. البته باید تمهیدات مختلفی برای بهینه‌سازی مدل بکار رفته برای کویتی و اطمینان از صحت ورودی‌های حل مساله مانند دمای کویتی اندیشید. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که شکاف‌ها یا کویتی‌های حول صفحه انژکتور در صورت طراحی مناسب می‌تواند جهت تضعیف و حذف مودهای مخرب بکار رود. کویتی ضمن کاهش فرکانس مود نوسانی مخرب، دامنه اثر آن را نیز کاهش می‌دهد. ترکیب این دو کارکرد می‌تواند به حذف مود مخرب از محفظه احتراق منجر شود. همچنین نکته قابل توجه این است که کویتی که برای حذف مود خاصی طراحی می‌شود فقط برای همان مود موثر است و برای مودهای دیگر کارایی ندارد. ضریب جذب، فاکتور افت توان آکوستیکی و محدوده فرکانسی موثر کویتی، پارامترهایی می‌باشند که محاسبه آنها اطلاعات ارزشمندی را برای طراحی بهینه کویتی‌ها و تعیین تعداد و چیدمان آنها در اختیار طراحان می‌گذارد.

مراجع

- 1- Harrje, D.T. and Reardon, F.H., Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, NASA-SP-194, 1972.
- 2- Kinsler, L., et.al., Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc , Fourth Edition, 2000.
- 3- Anon, Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices, NASA SP-8113, 1974.
- 4- Oberg, C.L., "Combustion Stabilization with Acoustic Cavities," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 8, No. 12, 1971, pp. 1220-1225.
- 5- Tang, P. K., Sirignano, W. A., "Theoretical Studies of a Quarter Wave Tube," AIAA Paper 71-87, 1971.
- 6- Tang, P. K., Sirignano, W. A., "Theory of a Generalized Helmholtz Resonator," J. of Sound and Vibration, Vol. 26, No. 2, 1973, pp 247-262.
- 7- Mitchell, C.E., "Analytical Models for Combustion Instability," Liquid Rocket Engine Combustion Instability, edited by V. Yang, and W. Anderson Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, Washington, DC, 1995, pp. 403-430.
- 8- Langel, G., Laudien, E., Pongratz, R., Habiballah, M., Grand-Pernet, S., and Vingert, L., "Combustion Stability Characteristics of the Ariane 5 L7 Engine," 42nd Congress of the International Astronautical Federation, IAF-91-250, Oct. 1991.
- 9- Laudien, R. and et. al., "Experimental Procedures Aiding Design of Acoustic Cavities," Liquid Rocket Engine Combustion Instability, edited by V. Yang, and W. Anderson, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, Washington, DC, 1995, pp 377-398.
- 10- Christensen, E., Nesman T.E., "Fastrac Rocket Engine Combustion Chamber Acoustic Cavities," 10th Annual Symposium, NASA MARSHALL Space Flight Center, Huntsville, Alabama, 1989.
- 11- Oscheald, M. , et.al., "Resonance Frequencies and Damping of a Combustor Acoustically Coupled to an Absorber," J. of Propulsion and Power, Vol. 24, No. 3, 2008, pp. 524-533.
- ۱۲- رضانی، علیرضا، امانپور، حسن، "مدلسازی سه بعدی آکوستیکی نازل و محاسبه ادمیتانس آن در نوسانات فرکانس بالا،" هفتمین همایش سالانه انجمن هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰ بهمن الی ۲ اسفند ۱۳۸۶.
- ۱۳- رضانی، علیرضا، امانپور، حسن، "تعیین ناحیه پایداری فرکانس بالای محفظه احتراق موتور سوخت مایع،" هفتمین همایش سالانه انجمن هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰ بهمن الی ۲ اسفند ۱۳۸۶.
- 14- Schoenman, L., "Design , Fabrication , Test and Delivery of a High Pressure LOX/RP-1 Injector," Aerojet Liquid Rocket Company, NAS 8-33651, 1981.