کد مقاله: CCI2105

دومین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه 1386 - مشهد- دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

انجمن احتراق ایران

ارائه‌ی روشی نوین برای طراحی محفظه‌احتراق موتور سوخت مایع و آزمایش تجربی آن

محمد جواد منتظری[1]، اسماعیل ولی‌زاده[2]

سازمان هوا فضا ـ تهران ـ صندوق پستی 381-16535

Email: montazzeri@yahoo.com

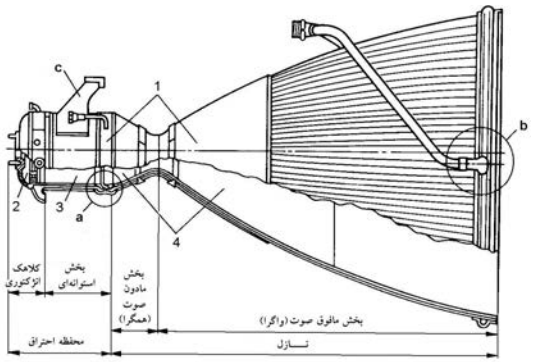
چکیده

با گردآوری روش‌های گوناگونی که برای طراحی محفظه‌ی موتورهای سوخت مایع موشکی (موسم) در مراجع مختلف ارائه شده است و زدودن کاستی‌های آن‌ها، روندی نو بر مبنای «طراحی چندپارامتری به روش تکرار» و با دیدگاه سامانه‌گرایانه بیان شده است و با استفاده از آن دو محفظه‌احتراق متفاوت طراحی گردیده که یکی تا مرحله‌ی تست‌های سرد و دیگری تا مرحله‌ی تست گرم پیش رفته است. نتایج حاصل از تست‌های سرد و گرم قابل قبول بودند و نشان از درستی و مهندسی بودن روش پیشنهادی دارند.

واژه‌های کلیدی: طراحی، محفظه‌احتراق، موتور سوخت مایع موشکی (موسم)، تست گرم

1- مقدمه

شکل معمول محفظه‌ی موتور سوخت مایع موشکی (موسم)، صفحه‌انژکتوری تخت (flat injector face)، محفظه‌ای استوانه‌ای و نازلی از نوع لاوال است (شکل 1). تعداد پارامترهای موثر در طراحی چنین محفظه‌هایی، بسیار زیاد است و گاه این پارامترها با یکدیگر در تناقض و تضاد هستند و بهینه‌سازیِ یکی به خارج از محدوده شدنِ دیگری می‌انجامد. از این رو طراحی یک ساختار چندپارامتری (multi-parameter) ـ مانند محفظه‌ی موسم ـ ناگزیر روندی «تکراری» و «رفت و برگشتی» (iterative) دارد؛ اما به دلایل گوناگونی، در هیچ یک از منابع در دسترس، به این روش پرداخته نشده است.



شکل 1. محفظه‌احتراق معمول در موسم [1]

1 و 2- کارشناس ارشد هوافضا ـ موتورهای اجسام پرنده

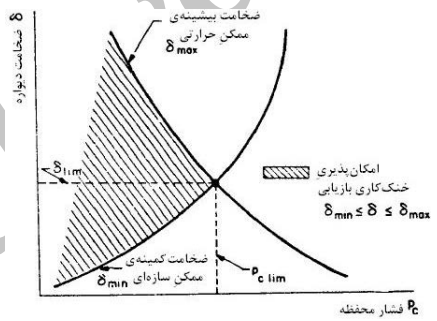
Archive of SID

www.SID.ir

از سوی دیگر پارامترهای سیستمی موسم و گاه خودِ موشک، بر طراحی محفظه، اثر می‌گذارد و این امر طراحی این مجموعه را بسیار دردسرساز و پیچیده می‌نماید. در این مقاله سعی شده است با بررسی روش‌های اشاره شده در منابع در دسترس و گردآوری پارامترهای دخیل در محاسبه و طراحی محفظه و همچنین در نظر گرفتن اثرات آن‌ها بر یکدیگر، روندی نو در طراحی محفظه بر مبنای «طراحی چندپارامتری به روش تکرار» با دیدگاه سامانه‌گرایانه، ارائه گردد. بر اساس این روند و با توجه به نیاز تعریف‌شده، در دو بازه‌ی زمانی، دو محفظه‌ی متفاوت، طراحی، تولید و تست گردید. یکی از محفظه‌ها تا مرحله‌ی تست سرد و دیگری تا تست گرمِ پایانی، پیشرفت داشت که نتایج قابل قبولی به همراه داشته است و می‌تواند مویدی برای روش طراحی پیشنهادی باشد.

2- پیشینه‌ی پژوهشی

در منابع مختلف، روش‌های گوناگونی برای طراحی محفظه‌های معمولِ اشاره شده در بند 1، ارائه شده است که هر یک مزایا و معایبی دارد. در این‌جا به برخی از این موارد اشاره‌ای کوتاه می‌گردد. ج. پ. ساتن، بر مبنای تئوری‌های حاکم بر محفظه، روش‌هایی بسیار ساده برای محاسبه‌ی انژکتورهای مایع از نوع جت برخوردی (imping-stream-type)، محاسبه‌ی حجم محفظه‌احتراق و ابعاد اصلی آن ارائه کرده است که در آن، مواردی چون معیارهای ناپایداری، استحکام سازه و بهینه‌بودن احتراق درنظر گرفته نشده است [2]. هازل و هانگ، با ارائه‌ی فهرست متنوعی از پارامترهای موثر در طراحی محفظه، برای آن‌ها روابط و مقادیر نمونه‌ی تجربی، ارائه کرده‌اند [3]. گرچه هازل، گروه بیش‌تری از پارامترهای محفظه را پوشش داده است اما، باز هم از ارائه‌ی روند پلکانی و تکرارِ محاسبه و طراحیِ محفظه بازمانده است و اثر مباحث سازه را بر طراحی در نظر نگرفته است. در مجموع ساتن و هازل از ارائه‌ی روشی که محفظه را به عنوان یک سامانه ببینند و تعامل آن را با مجموعه‌ی موتور در نظر بگیرد، ناتوان است اما در محاسبه‌ی برخی از اجزا، دیدگاه‌های خوبی ارائه می‌کند.



شکل 2. محدوده‌ی امکان‌پذیر برای ضخامت دیواره‌ی محفظه‌های لوله‌ای بر مبنای معیار سازه و خنک‌کاری [4]

ای. مایر نیز سعی کرده است با ارائه‌ی روندی تکراری، طراحی ضخامت دیواره‌ی محفظه‌های لوله‌ای (tube wall combustion) را به دو پارامتر خنک‌کاری (cooling) و سازه منوط کند [4]. مقالاتی از این دست ـ که در آن به طراحی در فرایند تکرارِی برخی اجزای محفظه پرداخته شده است ـ کم نیست؛ اما باز هم دیدگاه کلان‌نگر در طراحی، ارائه نشده است. شایان ذکر است، بیش‌تر مقالات ارائه شده در محفظه، در زمینه‌ی تئوری و محاسبه‌ی محفظه است و درصد کم‌تری از مقالات به موضوع طراحی در محفظه پرداخته‌اند.

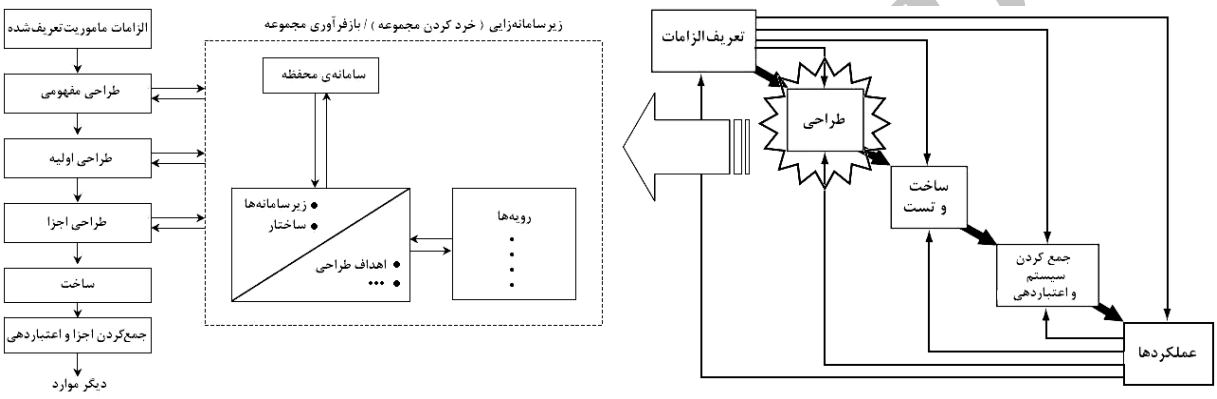
Archive of SID

www.SID.ir

3- فرایند طراحی محفظه

3-1- شناخت سامانه‌گرایانه‌ی محفظه

فرایند طراحی تا کاربری برای هر مجموعه‌ی پیچیده‌ی چندپارامتری ـ مانند محفظه ـ به صورت ساده در شکل 3 ارائه شده است. همان گونه که نمودار شکل 3.الف نشان می‌دهد، تمامی مراحل خلق یک محصول جدید از «تعریف الزامات» به صورت مستقیم و از نتایج عملکرد آن به صورت معکوس، متاثر می‌شود. در نمودار شکل 3 - الف، جعبه‌ی «تعریف الزامات» مشخص می‌کند که محصول نهایی چه کاری می‌خواهد بکند و راه بهتر برای انجام ماموریت چیست؟ از این رو در این بخش، الزامات عمومی، ماموریت، محدودیت‌ها، فلسفه‌ی طراحی و معیارها ذکر می‌گردد؛ بنابراین طبیعی است که در این بخش قیود مربوط به هزینه (در طراحی، ساخت، تست، کاربری)، قابلیت اطمینان (reliability) و مدت زمان لازم برای توسعه‌ی طرح بیان گردد. گاهی محدودیت‌های هندسی و محیط کاربریِ مجموعه نیز به موارد فوق اضافه می‌گردد.



الف) ب)

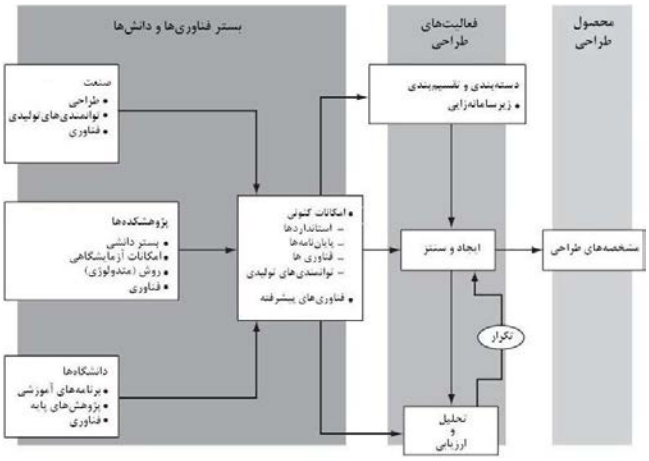
شکل 3. فرایند عمومی طراحی برای مجموعه‌های چندپارامتری (الف)؛ ساختار عمومی طراحی محفظه (ب) [با الهام 5 [1]]

مراحل دیگری که پس از مرحله‌ی «تعریف الزامات» آمده است، نیاز به توضیح چندانی ندارند. بخشی از چرخه‌ی ایجاد محصول مورد نظر ما (محفظه‌ی موسم)، مرحله‌ی طراحی است. در شکل 3 - ب رویکرد و مراحل کلی طراحی، که برای هر محصولی می‌تواند کاربرد داشته باشد، نمایش داده شده است.

اما برای انجام مراحل طراحی نیاز به بسترهای دانشی و فناوری است و با کسب آن‌ها از صنعت، پژوهشکده‌ها و دانشگاه‌ها، می‌توان طراحی را آغاز نمود به بیان دیگر بایستی توانمندی‌ها و ظرفیت‌ها در شروع طراحی مورد ارزیابی قرار گیرد، این بخش موضوع کار ما نیست و صرفا برای گم نشدن حلقه‌های زنجیره‌ی فرایند طراحی به آن اشاره می‌شود (شکل 4). پس از این مرحله، فعالیت‌های طراحی آغاز می‌گردد (ستون میانی در شکل 4) و در آن سه بخش اساسی گنجانده شده است، زیرسامانه‌زایی (compartmentalization)، ایجاد و سنتز، تحلیل و ارزیابی (analysis and assess)؛ که جزء جدایی‌ناپذیر آن تکرار است. در ادامه این سه مرحله را برای طراحی محفظه موتورهای سوخت مایع، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

[1] توضیح آن‌که در منبع [5] چنین نمودارهایی برای زیرسامانه‌های موشک به صورت کلی ارائه شده است و ما این نمودارها را برای «محفظه‌احتراق» بازطراحی کرده‌ایم.

Archive
www.SID.ir



شکل 4. اثر زیرساخت‌ها بر طراحی [5]

3-2- زیرسامانه‌زایی در طراحی محفظه

بهترین راه برای ساده کردن و همه‌جانبه‌نگری در طراحی یک مجموعه‌ی پیچیده‌ی چندپارامتری، شناخت مجموعه و تقسیم کردن آن به زیرمجموعه‌ها یا زیرسامانه‌های آن است؛ این عمل را زیرسامانه‌زایی می‌نامیم. در این راه رویکردهای متفاوتی را می‌توان پیش گرفت؛ مثلا می‌توان مجموعه را بر اساس «عملکرد» به زیرسامانه‌هایی که عملکردهای متفاوت ـ اما مکمل ـ دارند، تقسیم نمود و یا اساس را بر روش «مونتاژ» بنا نهاد. این که بر چه مبنایی، زیرسامانه‌زایی صورت گیرد، بستگی به ویژگی‌های سامانه‌ی اولیه دارد و برای آن نمی‌توان فرمول واحدی ارائه کرد.

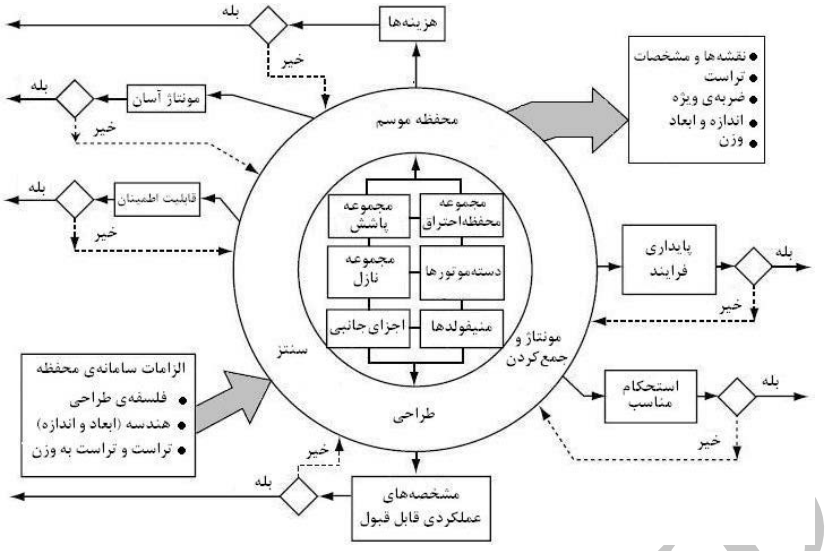
زیرسامانه‌زایی در محفظه‌ی موسم، بر اساس مونتاژ مجموعه صورت می‌گیرد و از قضا، زیرسامانه‌های ناشی از این رویکرد از نظر عملکردی نیز متفاوت و مکمل هستند. زیرسامانه‌هایی که در طراحی محفظه‌ی موسم بایستی در نظر گرفته شود شامل مجموعه‌ی پاشش (combustion head) و مجموعه‌ی بدنه است که دومی به نوبه‌ی خود شامل دو بخشِ مجموعه‌ی محفظه‌احتراق (combustion chamber) و مجموعه‌ی نازل می‌گردد. به مجموعه‌های فوق اجزای جانبی محفظه مانند؛ منیفولدها (یا کالکتورها)، دسته‌موتور و نیپل‌ها را نیز باید افزود، گرچه این اجزا تاثیر چندانی در طراحی محفظه به صورت یک سامانه ندارند.

3-3- سنتز، آنالیز و تکرار با ابزار «ایستگاه‌های طراحی»

در مرحله‌ی ایجاد و سنتز، بایستی محاسبات زیرسامانه‌های یادشده از دیدگاه احتراق، پاشش و سازه ـ با توجه به الزامات سامانه‌ی محفظه ـ صورت پذیرد. این الزامات را می‌توان به منزله‌ی «ایستگاه‌هایی» دانست که برای گذر از آن‌ها بایستی «ویژگیِ محفظه»[1] با یک یا چند قید یا الزام روبرو شود؛ اگر نتواند از این ایستگاه عبور کند، یا باید طرح تغییر کند و یا «قید یا الزام» آسان‌تر شود. در ادامه این روند، با ارزیابی هر بخش از محاسبات در ارتباط با دیگر بخش‌ها، در صورت نیاز عملیات تکرار بایستی انجام شود. با این وصف باید «ایستگاه‌های طراحی» در محفظه شناخته شود.

[1] attribute یا ویژگی، خصوصیتی است که می‌توان آن را با یک قید (constraint) یا الزام (requirment) بیان نمود.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل 5. چرخه‌ی فرایند طراحی محفظه‌ی موسم که در آن ایستگاه‌های طراحی نمایش داده شده است. [با الهام از 5]

تقریبا می‌توان گفت ایستگاه‌های موثر در فرایند طراحی محفظه، معادل همان ایستگاه‌هایی است که برای کل سامانه‌ی موتور قائل هستیم؛ از این رو تعداد این ایستگاه‌ها نسبت به دیگر اجزای موسم، بسیار بیش‌تر است. این ایستگاه‌ها عبارتند از؛ استحکام مناسب، قابلیت اطمینان، کاربری آسان، هزینه‌ها (ی تولید و تست)، پایداری فرایند، مشخصه‌های عملکردی قابل قبول (شکل 5). در پاسخ به پرسشی که درباره‌ی روش انتخاب این ایستگاه‌ها می‌شود، باید گفت این امر یکی از زیرکی‌های طراح است و اوست که می‌تواند با انتخاب مناسب ایستگاه‌ها، حجم عملیات طراحی را تا حد ممکن کاهش دهد. معمولا ایستگاه طراحی پارامترهایی است که دیگر پارامترهای سامانه را پوشش می‌دهد؛ به عبارت دیگر با خارج شدن از حلقه‌ی تکرار یک ایستگاه، چندین الزام از الزامات طراحی برآورده می‌شود.

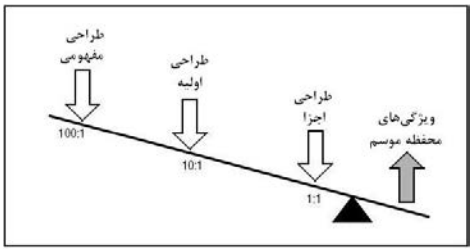
همان گونه که شکل 5 نشان می‌دهد، در هر ایستگاه طراحی ممکن است «پارامتر خروجی» و یا «الزام یا قید» نقض گردد و همین امر باعث بازگشت و تکرار محاسبات گردد. گاه لازم است به دلیل سخت بودن «الزام یا قیدِ طراحی» ، آن را آسان نمود تا از تکرارهای بسیار جلوگیری شود.

4- چرخه‌ی درونی طراحی محفظه

در چرخه‌ی درونی طراحی محفظه (شکل 5) نیز اجزای گوناگون محفظه، در اندرکنش با یکدیگر هستند و تنها هنگامی که این اندرکنش‌ها پایان یابد و هر یک از زیرسامانه‌ها، الزامات دیگر زیرسامانه‌ها را نقض نکند، نتایج به «ایستگاه‌ها» عرضه می‌شوند. با این وصف اکنون هنگامِ شناخت اندرکنشِ زیرسامانه‌های محفظه با یکدیگر است. اما با توجه به گستردگی موارد طراحی اجزا در محفظه‌ی موسم، در این‌جا تنها به دو مرحله‌ی طراحی مفهومی (conceptual design) و طراحی اولیه (preliminary design) اشاره می‌کنیم (به شکل 3.ب نگاه کنید) و نکته قابل توجه آن است که هنگامی که اندرکنش‌های زیرسامانه‌های محفظه در این دو بخش پایان پذیرد، دیگر مراحل طراحی تقریبا بدون مشکل ادامه خواهد یافت. این امر نشان می‌دهد که اثر این دو مرحله‌ی طراحی در نتیجه‌ی پایانی بسیار برجسته است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 6. اثر مراحل مختلف طراحی بر بالا بردن سطح ویژگی‌های محصول نهایی [با الهام از 5]

در شکل 6 به صورت نمادین این امر نمایش داده شده است؛ دیده می‌شود که اثر مرحله‌ی «طراحی اجزا» بر ویژگی‌های محصول نهایی (محفظه‌ی موسم)، ده برابر کمتر از «طراحی اولیه» و آن نیز به نوبه‌ی خود ده برابر کمتر از «طراحی مفهومی» می‌باشد. ما این اثر را در کار عملی طراحی خود به درستی مشاهده کردیم. به عنوان مثال اشتباه در انتخاب طرح اولیه‌ی خنک‌کاری کناردیواره‌ای (film cooling) در یکی از محفظه‌های مورد طراحی، موجب گردید پس از طراحی و ساخت، علاوه بر قابلیت اطمینان نامناسب، هزینه‌هایی اضافی جهت تغییر طرح اولیه، تحمیل شود.

هسته‌ی اصلی طراحی در شکل 5 و اندرکنش زیرسامانه‌های مختلف محفظه با یکدیگر را می‌توان در شکل 7 خلاصه نمود. لازم به ذکر است که برخی از مراحل ذکر شده در این چرخه نیز، خود دارای حلقه‌های تکرار است. اصلی‌ترین پارامترهای طراحی که در این چرخه محاسبه و کنترل می‌گردد عبارتند از: ضربه‌ی ویژه (spesific impulse)، دمای کنار دیواره در خنک‌کاری لایه‌ای، دمای ورود سیال خنک‌کن (coolant) به انژکتورها، قطر قطراتِ (droplet size) ناشی از انژکتورها، توزیع نسبت مولفه‌ها[1] و شدت پاشش[2] (intensity of atomazation). هر یک از این پارامترها، در جعبه‌ی مربوطه‌ی خود مورد کنترل قرار می‌گیرد.

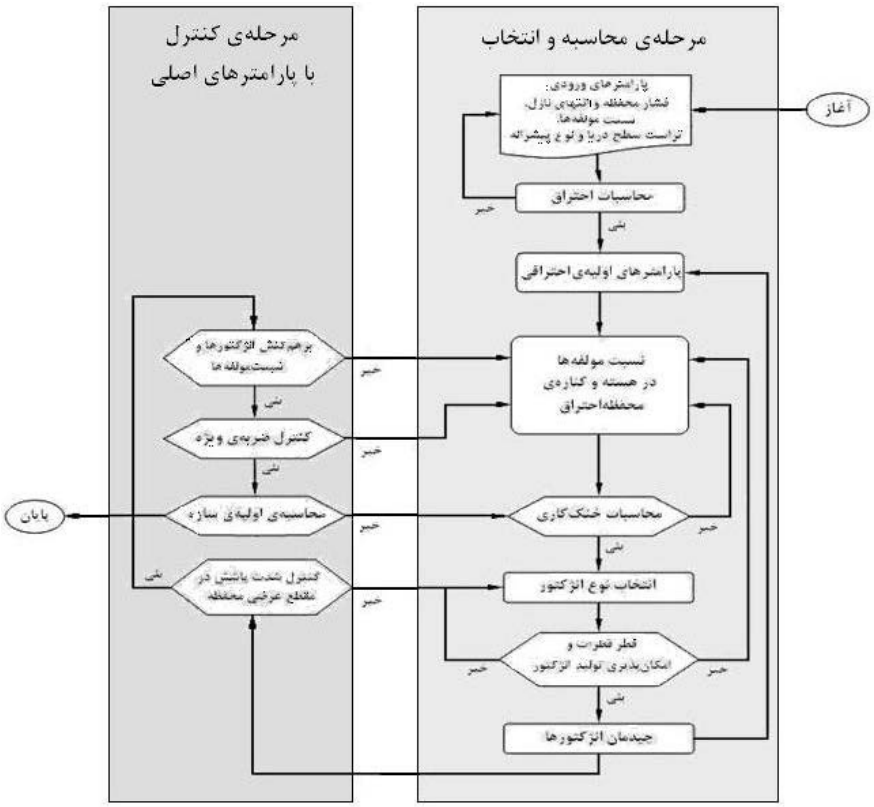
گرچه پارامترهای دیگری را چون ثابت آدیاباتیک گاز، ترکیب محصولات احتراق، دمای محفظه، دمای ورود پیشرانه به انژکتورها، ضریب اطمینان‌های سازه‌ای و مواردی از این دست نیز در همین چرخه محاسبه و کنترل می‌شوند ولی با برآورده شدن «الزامات و یا قیدهایِ» پارامترهای اصلی یادشده، تمامی دیگر پارامترها نیز در محدوده‌های مجاز قرار می‌گیرند.

Archive of SID

[1] نسبت مولفه‌ها در محفظه عبارتست از نسبت دبی جرمی مولفه‌ی اکسیدکننده به دبی جرمی مولفه‌ی سوخت [1].

[2] دبی جرمی گذرنده از واحد سطح محفظه در مقطع عرضیِ آن که گاه بر فشار مطلق محفظه نیز تقسیم می‌گردد.

www.SID.ir



شکل 7. چرخه‌ی درونی طراحی مفهومی و اولیه‌ی محفظه‌ی موسم

شکل 7 نشان می‌دهد، چرخه‌ی درونی طراحی محفظه را می‌توان به دو مرحله‌ی اساسی تقسیم نمود. مرحله‌ی «محاسبه و انتخاب» و مرحله‌ی «کنترل پارامترهای اصلی». این دسته‌بندیِ کارکردی، موجب می‌شود در صورت نیاز به کدنویسی این بخش از چرخه‌ی طراحی، این امر آسان‌تر گردد. نکته‌ی دیگری که از نمودار شکل 7، قابل درک است، این است که یکی از محاسبه‌های اساسی در محفظه‌ی موسم، محاسبه‌ی «نسبت مولفه‌ها در هسته و کناره‌ی دیواره‌ی محفظه‌احتراق» است (جعبه‌ی بزرگِ میانه‌ی مرحله‌ی محاسبه و انتخاب). این پارامتر چنان تاثیری بر طراحی مجموعه دارد که انتخاب و محاسبه‌ی نادرست آن، موجب می‌شود تمامیِ ایستگاه‌های طراحی به چرخه‌ی درونی برگشت کنند (به شکل 5 نگاه کنید).

نکته‌ی شایان ذکر دیگر درباره‌ی این چرخه، «تعاملی بودنِ» آن با شخص طراح است و نمی‌توان آن را به صورت کدی مستقل جهت طراحی محفظه‌ی موسم، برنامه‌نویسی نمود چراکه در بسیاری از مراحل، نیاز است طراح، طرح مناسب را خود انتخاب کند و محاسبات بر اساس آن ادامه یابد. این امر نشان می‌دهد، اجرای رایانه‌ای این چرخه، به بانک اطلاعاتی قوی نیازمند است.

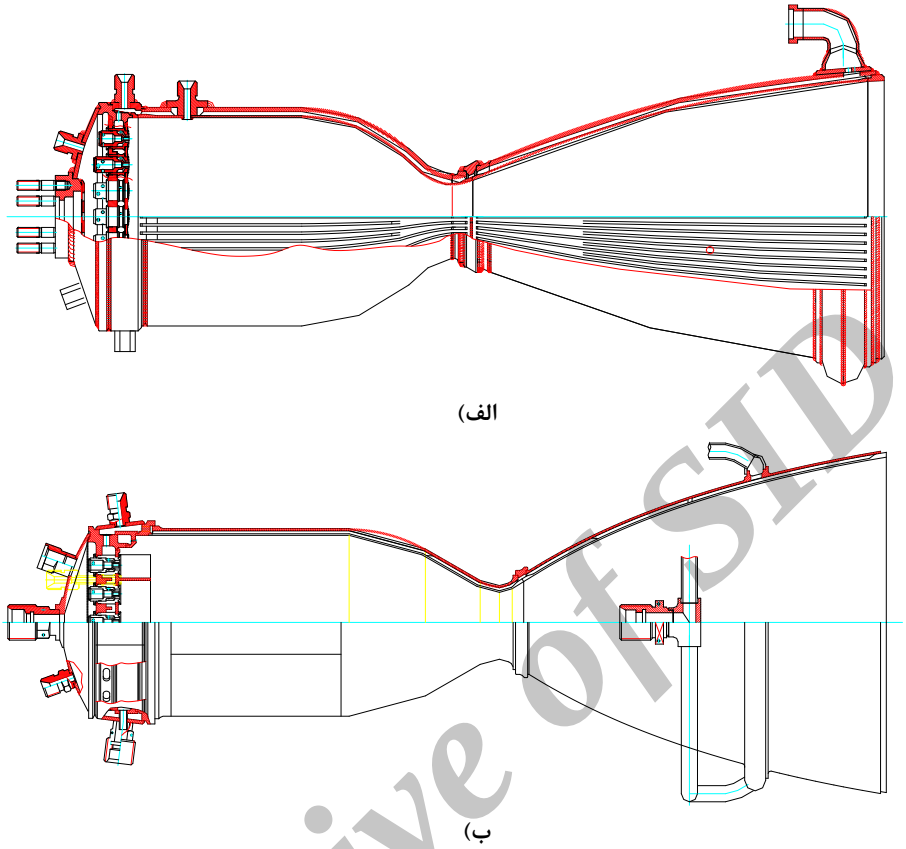
5- اعتباردهی روش نوین ارائه شده

همان گونه که پیش از این در مقدمه بیان شد، با روشی که در بالا آن را توضیح دادیم، دو محفظه‌ی موسم طراحی گردید که یکی از آن‌ها به مرحله‌ی تست گرم و دیگری به مرحله‌ی تست سرد رسید. شایان ذکر است در هنگام انجام مراحل طراحی این دو محفظه ـ به ویژه محفظه‌ی اول ـ دیدگاه درستی درباره‌ی روش یادشده وجود نداشت و به تجربه، چرخه‌ی طراحی به صورت فوق تکمیل گردید. این تجربیات در طراحی محفظه‌ی دوم به کار گرفته شد و به مرور چرخه کامل گردید. برخی مراحل تکمیلیِ ایجاد این چرخه نیز در هنگام مستندسازی آن، به دست آمد.

Archive of SID

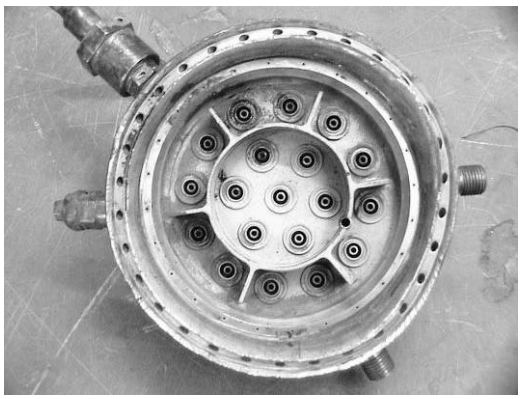
www.SID.ir

در شکل 8، ساختار ظاهری دو محفظه‌ای که با روش توصیفی در این مقاله، طراحی شده‌اند، نمایش داده شده است. این دو محفظه از نظر نوع پیشرانه (propellant)، فشار محفظه و دبی مولفه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند اما ماموریت هر دو یکی است.



شکل 8. محفظه‌هایی که با روش ارائه شده در این مقاله طراحی شده‌اند؛ الف - محفظه‌ی اول، ب - محفظه‌ی دوم

در شکل 9 بخشی از مجموعه‌ی سر محفظه دوم را که پس از تست گرم برای بررسی‌های فنی جداشده است، نمایش داده شده است و در شکل 10 نمودار فشار محفظه در طول کارکرد تست گرم محفظه (به صورت بی‌بعد) نمایش داده شده است.



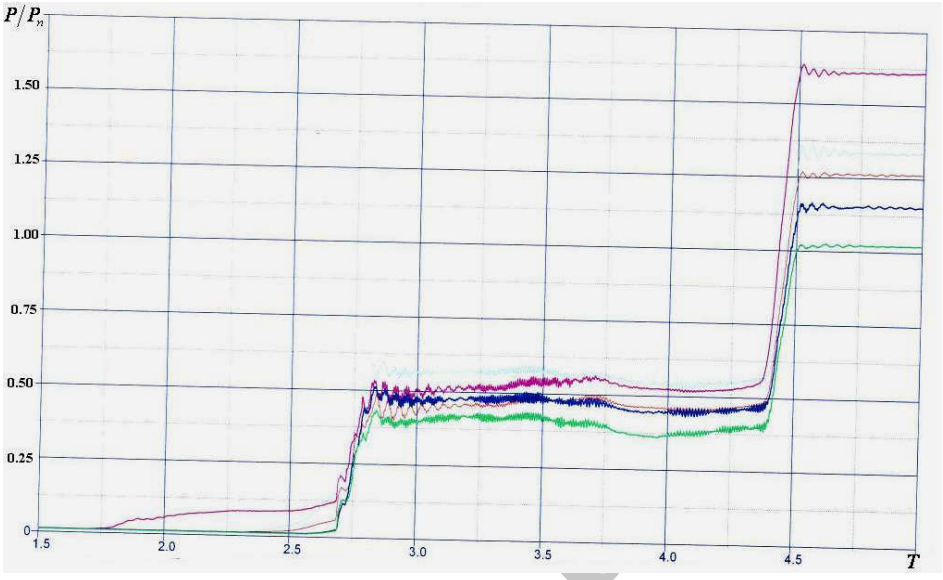
شکل 9. مجموعه‌ی سر (پاشش) محفظه‌ی دوم پس از تست گرم که برای بررسی‌های بیش‌تر جدا شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

بررسی پارامترهای ناشی از تست گرم محفظه‌ی دوم، نشان داد که محفظه توانسته تا حدود بسیار خوبی پارامترهای ورودی طراحی را پیگیری و تعقیب نماید و گستره‌ی خطای داده‌های حاصل از تست گرم (شکل 10) و داده‌هایی که بر اساس آن طراحی انجام گرفته بود، بیش از 5 درصد نبود. این امر را می‌توان تاییدی برای روش طراحی به‌کاررفته دانست.

از سوی دیگر تمامی تست‌های سرد، مجموعه‌ی محفظه‌ی اول، بر اساس پیش‌بینی‌های طراحی با موفقیت انجام شد که این می‌تواند مویدی برای روش طراحی به‌کارگرفته شده باشد.



شکل 10. فشار محفظه‌احتراق، پشت‌انژکتورها و مخازن پیشرانه در تست گرم محفظه‌ی دوم؛ محور عمودی «فشار تست به فشار نامی محفظه» و محور افقی زمان تغییریافته

6- نتیجه‌گیری

بررسی منابع گوناگون نشان می‌دهد روش طراحی محفظه موتور سوخت مایع (موسم) بدون تکرار و کنترل پارامترها و همچنین در نظر گرفتن «ایستگاه‌های طراحی» ارزش عملی ندارد. با تدوین روشی نو در طراحی محفظه موسم ـ به گونه‌ای که بتواند کلیه‌ی الزامات و محدودیت‌های طراحی و همچنین ایستگاه‌های طراحی را پشت سر بگذارد ـ دو محفظه با داده‌های ورودی متفاوت ـ اما ماموریت یکسان ـ طراحی گردید که پاسخ تست گرم محفظه‌ی دوم با پیش‌بینی‌های طراحی، حداکثر اختلاف 5 درصد را نشان می‌داد و نتایج تست سرد محفظه‌ی دوم مطابق با پیش‌بینی‌های طراحی بود؛ از این رو روش پیشنهادی در این مقاله برای طراحی محفظه‌ی موسم، «مهندسی» ارزیابی می‌شود و در عمل قابل استفاده است.

مراجع

1- جعفرقلی ع. ، رمش د. ، عبیات ج. ، منتظری م.ج. ، موتورهای سوخت مایع؛ ساختار و سازه، انتشارات صنایع هوافضا، 1385.
2- George P. Sutton, Rocket Propulsion Elements, An Introduction to the Engineering of Rockets, 7th ed., John Wiley, 2001.
3- D.K.Huzel, D.H.Huang, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA pub., 1992.
4- Summerfield M., Liquid Rockets and Propellants, A selection of technical papers based mainly on a symposium of the american rocket society held at the Ohio state university, Columbus, pp. 543-563, Mayer E., "Analysis of pressure feasibility limits in regenrative cooling combustion chambers for large-thrust rockets", 1960.
5- J.C. Blair, R.S. Ryan, L.A. Schutzenhofer, W.H. Humphries, Launch Vechicle Design Process: Charactrization, Technical Integration and Lessons Learned, NASA/TP-2001-210992, 2001.

Archive
www.SID.ir