Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 10, No. 3, pp. 71-84, 2026

E- ISSN: 2676-4253

https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.3.6

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir

Original Research Paper

Conceptual Design of a Submerged Nozzle for a Motor with an External Nozzle

Masoud Mohammadi*, Mohammad Vaghefi Aryan, and Shidvash Vakilipour

School of Aerospace Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 07 November 2025
Revised 24 May 2026
Acceptet 25 May 2026
Available Online 23 September 2026

Keywords:

Submerged nozzle
Grain
Conceptual design
Submerging ratio
Total impulse

ABSTRACT

The design of a submerged nozzle or the conversion of an external nozzle into a submerged one is a common solution for optimal space utilization in motors facing volume or length constraints. In a submerged nozzle configuration, the nozzle inlet duct, throat, and a portion of the exit duct can be recessed inside the combustion chamber. Designing a submerged nozzle is more complex than an external nozzle because, structurally, the submerged section must withstand not only the forces on the internal surfaces but also the external pressure force. For this reason, there is also a possibility of increased engine weight due to the use of a submerged nozzle. This paper focuses on the conceptual design of a submerged nozzle with the aim of converting the external nozzle of a specified engine into a submerged one. Five designs based on submersion ratios from 15% to 75% were selected, and for each, a table of longitudinal, weight, and performance estimates was extracted for two states: a fixed body and a body with extended length. Evaluation of these designs shows that submersion ratios of 60% and 75% cause a significant loss in total impulse, which requires an increase in engine length in the grain and body sections to compensate. The optimal design is achievable in the 30% to 45% submersion ratio range since it results in a suitable length reduction, and the associated weight increase and total impulse loss are minimal.

* Corresponding Author's E-mail: mas.mohammadi@ut.ac.ir

How to Cite this Article:
M. Mohammadi, M. Vaghefi Aryan, and Sh. Vakilipour, "Conceptual design of a submerged nozzle for a motor with an external nozzle," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 71-84, 2026, (in Persian), https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.3.6.

COPYRIGHTS
© 2026 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

فناوری در مهندسی هوافضا

سال ۱۴۰۵، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۷۱-۸۴

https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.3.6

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir

شاپای الکترونیکی: ۴۲۵۳-۲۶۷۶

مقاله پژوهشی

طراحی مفهومی یک شیپوره مغروق برای یک موتور با شیپوره بیرونی

مسعود محمدی[۱*]، محمد واقفی‌آریان [۲]، و شیدوش وکیلی‌پور[۳]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۶ آبان ۱۴۰۴

بازنگری ۰۳ خرداد ۱۴۰۵

پذیرش ۰۴ خرداد ۱۴۰۵

اولین انتشار ۰۱ مهر ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

شیپوره مغروق

گرین

طراحی مفهومی

نسبت مغروق‌سازی

ضربه کل

چکیده

طراحی شیپوره مغروق یا تبدیل یک شیپوره بیرونی به شیپوره مغروق راه‌کاری رایج برای استفاده بهینه از فضا در موتورهایی است که با محدودیت حجمی یا طولی روبه‌رو هستند. در پیکره‌بندی شیپوره مغروق، مجرای ورودی شیپوره، گلوگاه و بخشی از مجرای خروجی می‌تواند به داخل محفظه احتراق فرو رود. طراحی شیپوره مغروق پیچیده‌تر از شیپوره بیرونی است، زیرا اولاً هر دو سطح دورنی و بیرونی بخش مغروق در معرض گازهای داغ قرار دارند، ثانیاً بخش مغروق از نظر سازه‌ای باید علاوه بر نیروهای وارد بر سطوح داخلی، نیروی فشار خارجی را نیز تحمل کند. به همین دلیل نیز احتمال افزایش وزن موتور در اثر استفاده از شیپوره مغروق وجود دارد. در این مقاله، موضوع طراحی مفهومی شیپوره مغروق با هدف تبدیل شیپوره بیرونی یک موتور مشخص به شیپوره مغروق مورد توجه قرار گرفته است. پنج طرح براساس نسبت مغروق‌سازی ۱۵ تا ۷۵ درصد انتخاب و برای هر یک جدول تخمین‌های طولی، وزنی و عملکردی در دو حالت بدنه ثابت و بدنه با طول افزوده استخراج شده است. ارزیابی این طرح‌ها نشان می‌دهد که نسبت مغروق‌سازی ۶۰ و ۷۵ درصد باعث افت قابل توجه ضربه کل می‌شود که برای جبران آن باید طول موتور در بخش گرین و بدنه افزایش یابد. با مقایسه پنج طرح و مزایا و معایب آن‌ها، به نظر می‌رسد طرح بهینه در نسبت مغروق‌سازی ۳۰ تا ۴۵ درصد قابل دسترسی است؛ زیرا با کاهش مناسب طول، افزایش وزن و افت ضربه کل حاصل از آن کم است.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mas.mohammadi@ut.ac.ir

How to Cite this Article:

M. Mohammadi, M. Vaghefi Aryan, and Sh. Vakilipour, "Conceptual design of a submerged nozzle for a motor with an external nozzle," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 71-84, 2026, (in Persian), https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.3.6.

COPYRIGHTS

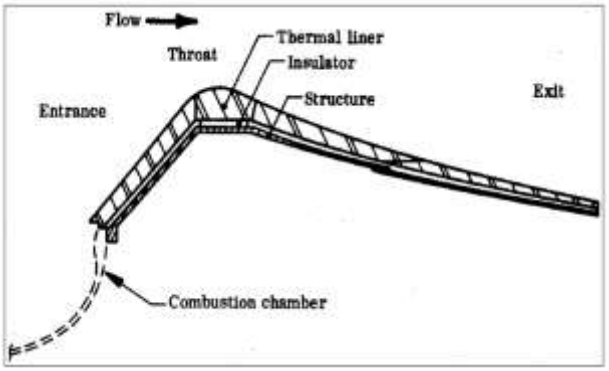
© 2026 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

علائم و اختصارات

مساحت کل مقطع	A_g
مساحت بخش ستاره‌ای	A_{star}
طول عدسی سمت شیپوره	L_{clsrA}
طول عدسی سر بدنه	L_{clsrH}
طول بخش استوانه‌ای بدنه	L_{cyl}
طول کل گرین	L_g
طول کل شیپوره	L_{nz}
طول کل بخش مغروق	L_{sm}
طول مغروق در گرین	L_{smg}
فاصله طولی تا گرین	dL_{sm}
فاصله شعاعی تا گرین	dR_{sm}
قطر استوانه	D
مدول کشسانی پوسته	E
درصد مغروق‌سازی	f_{sm}
نسبت حجمی جرم از دست رفته به حجم گرین	f_{Vsmg}
جرم عایق	M_i
جرم پوسته فلزی	M_s
فشار کمانش	P_{GL}
شعاع داخلی بدنه	R_{cc}
حداقل شعاع داخلی گرین	R_{gi}
شعاع دهانه ورودی شیپوره	R_{nzi}
شعاع دهانه خروجی شیپوره	R_{nzo}
شعاع گلوگاه شیپوره	R_{nzt}
شعاع مغروق در گرین	R_{smg}
شعاع محلی مقطع نازل	R_x
ضریب اطمینان	$S.F$
ضخامت مقطع نازل یا بدنه	t
ضخامت عایق در هر موقعیت طولی شیپوره	t_{ix}
ضخامت پوسته فلزی در طول شیپوره	t_{sx}
حجم بخش استوانه‌ای بدنه	V_{cyl}
حجم اشغال‌شده از گرین	V_{smg}
موقعیت طولی دهانه ورودی شیپوره	x_i
موقعیت طولی دهانه خروجی شیپوره	x_e
علائم لاتین	
نسبت پوآسون	ν
چگالی	ρ

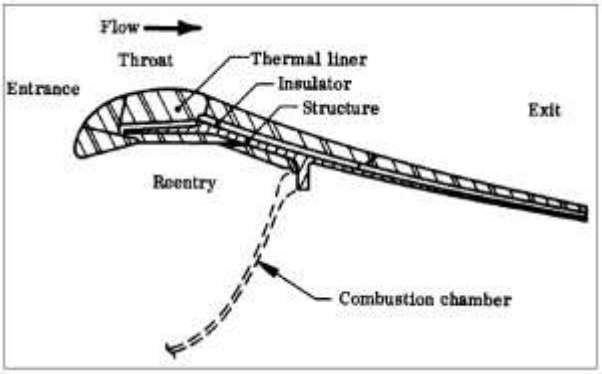
۱. مقدمه

موتور سوخت جامد یکی از رایج‌ترین انواع وسایل پیشرانشی است که با داشتن کمترین قطعات متحرک و عملکردی نسبتاً ساده، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای هوافضایی، محسوب می‌شود. قطعات اصلی این موتور شامل بدنه، گرین (سوخت)، نازل و آتشزنه است. با سوزش سوخت و تبدیل شدن آن به گاز، جریانی ایجاد می‌شود که از فضای میانی سوخت به‌سمت شیپوره هدایت می‌شود. شیپوره یا نازل که اغلب به شکل همگرا–واگرا طراحی و ساخته می‌شود، وظیفه تبدیل انرژی حرارتی سوخت به انرژی جنبشی و ایجاد نیروی رانش (تراست) را بر عهده دارد. شیپوره‌ها در شکل ساده، اغلب شامل بدنه فلزی، جاذب‌های حرارتی، عایق‌های حرارتی و سپر شعله هستند. شکل ۲ پیکره‌بندی دو نوع شیپوره بیرونی و مغروق را نشان می‌دهد. در پیکره‌بندی مغروق، مجرای ورودی شیپوره، گلوگاه و بخشی یا کل مجرای خروجی به داخل محفظه احتراق فرو می‌رود. در جایی‌که محدودیت حجمی یا طولی وجود داشته باشد، شیپوره مغروق از فضا به‌طور بهینه‌تری استفاده می‌کند [۱]. طراحی مغروق پیچیده‌تر از شیپوره بیرونی است، زیرا اولاً هر دو سطح دورنی و بیرونی بخش مغروق در معرض گازهای داغ قرار دارند، ثانیاً بخش مغروق از نظر سازه‌ای باید علاوه بر نیروهای وارد بر سطوح داخلی، نیروی فشار خارجی را نیز تحمل کند.



شکل ۱– نمونه یک شیپوره بیرونی.

Fig. 1. A typical external nozzle.



شکل ۲– یک نمونه شیپوره مغروق.

Fig. 2. A typical submerged nozzle.

الزامات و قیود طراحی شیپوره از دو راه تحلیل پیشرانش و سامانه پرنده یا صلاحدید و تشخیص طراح تعیین می‌شود. الزامات حاصل از

تحلیل سامانه مبتنی بر وزن تخمینی شیپوره، عملکرد و محدوده‌های هندسی آن است. یکی از این قیود، طول و وزن شیپوره و سهم آن از کل موتور است. در شیپوره‌های مغروق، معمولاً وزن و فضای خالی به حداقل می‌رسد. با این‌حال، این شیپوره‌ها محدودیت‌های جدی هم دارند که از آن جمله می‌توان به افزایش ملاحظات سازه‌ای و حرارتی برای تحمل فشار و دمای بالا، افزایش نوسانات فشار ناشی از ایجاد گردابه در اطراف بخش مغروق، و کاهش ضربه ویژه موتور در اثر ایجاد حفره در اطراف شیپوره به موارد زیر اشاره کرد. به‌طور معمول، مغروق کردن شیپوره به اندازه ۱۰٪ تا ۱۵٪ طول محفظه احتراق باعث افت یک درصدی ایمپالس ویژه می‌شود. با این‌حال، شیپوره‌های مغروق به‌دلیل قابلیت مکانیزم کنترل رانش و کاهش طول موتور در بسیاری از موتورهای سوخت جامد ترجیح داده می‌شوند.

سالمی و پلوچ (۱۹۶۷) [۲] در یکی از نخستین مطالعات شیپوره مغروق به بررسی استفاده از این طرح برای کنترل بردار رانش پرداختند. هدف از این تحقیق که به‌صورت تجربی انجام شد، اصلاح طراحی مقطع ورودی شیپوره ۲۶۰اینچ شاتل فضایی به‌لحاظ سازه‌ای و بررسی مقطع تخت یا شیب‌دار گرین در سمت شیپوره بود. ضمن آنکه اصلاحاتی در الگوی جریان اطراف شیپوره و کاهش عدد ماخ در محفظه انجام شد.

کوردیگ و فولر (۱۹۶۷) [۳] در یکی از نخستین مطالعات تجربی به تحلیل ابعادی تاثیر نفوذ شیپوره بر عملکرد موتور پرداختند و درصد افت تجربی ضربه ویژه‌ی موتور را با اعداد بی‌بعد مرتبط ساختند. ضریب افت مغروق کردن شیپوره، به‌عنوان یک تابع از عدد رینولدز بر اساس طول مشخصه‌ای برابر با طول شیپوره مغروق ارائه شد. آن‌ها افت ضربه ویژه را به‌صورت تابعی از شش عدد بی‌بعد پیشنهاد دادند.

جاناردن و زین (۱۹۷۶) [۴] به مطالعه تأثیر شیپوره مغروق بر پایداری موتور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود حفره باعث اضافه‌شدن دو جمله به معادله مدل میرایی ناپایداری‌ها می‌شود. جمله اول باعث کاهش میرایی و جمله دوم، سبب افزایش میرایی شیپوره می‌شود. با این‌حال، با در نظر گرفتن مقیاس بزرگی این دو جمله، می‌توان دید که جمله اول بزرگ‌تر از جمله دوم است. بنابراین، وجود جریان حفره معکوس موجب کاهش میرایی شیپوره و درنتیجه، کاهش پایداری موتور می‌شود.

بوراس (۱۹۸۴) [۵] به مدل‌سازی رسوبات سرباره در موتور سوخت جامد شاتل فضایی با شیپوره مغروق پرداخت. سوزش سوخت آلومینیوم‌دار در موتورهای سوخت جامد باعث ایجاد قطرات مایع اکسید آلومینیوم روی سطح سوخت می‌شود. با جداشدن این ذرات از سطح و برخورد آن‌ها با ذرات دیگر، توده‌های بزرگتری ایجاد می‌شود. درصد قابل توجهی از این ذرات و توده‌های بزرگ به‌دلیل سنگین بودن و دنبال نکردن خط سیر جریان روی سطوح داخلی موتور انباشته و به‌صورت سرباره درمی‌آید.

فریمن و همکاران (۱۹۸۷) [۶] جریان دوبعدی و سه‌بعدی موتور شاتل فضایی را برای ارزیابی اثرات آکوستیکی گردابه‌های تولید شده در بخش مغروق شیپوره به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های دوبعدی نشان می‌دهد که وجود بخش مغروق شیپوره باعث ایجاد گردابه‌ها و ریزش آن‌ها به‌سمت پایین‌دست می‌شود. این گردابه‌ها می‌تواند منبع فعالیت آکوستیکی گزارش شده برای این موتور باشد. در شبیه‌سازی سه‌بعدی، نتایج نشان از وجود جریان ناپایا در زیر دماغه ورودی شیپوره و در نزدیکی محل اتصال شیپوره به بدنه داشت.

ماداهوشی و همکاران (۱۹۸۹) [۷] از معادلات RANS با مدل آشفتگی k-ε برای شبیه‌سازی دوبعدی موتور سوخت جامد شاتل فضایی با شیپوره مغروق استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های آن‌ها براساس شرایط تزریق ذرات Al2O3 از سطح گرین و مرز ورودی انجام و اثرات آن‌ها بر تجمع ذرات در حفره و تغییرات میدان جریان فاز گازی مقایسه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که در سرعت تزریق بالا (حدود ۲۵٪ سرعت محلی گازها)، تفاوت‌هایی در کانتورهای ناحیه شیپوره وجود دارد که در اثر وجود فاز ذرات رخ می‌دهد و حدود ۳٪/۳ از جرم کل ذرات در حفره محبوس می‌شود. این موضوع باعث افزایش وزن بی‌اثر سامانه می‌شود.

تامپسون و همکارن (۱۹۹۵) [۸] در یک مطالعه تجربی، از سرعت‌سنج لیزری برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های میانگین و لحظه‌ای سرعت در شیپوره مغروق استفاده کردند. آن‌ها دریافتند، جریان سیالی که به‌سمت شیپوره حرکت می‌کند، مانند جریان انقباض ناگهانی است، با این تفاوت که یک ناحیه گردابه‌ای بزرگ اطراف شیپوره را احاطه کرده است. در محدوده لایه برشی این گردابه و هسته آن، نرخ تولید آشفتگی و نوسانات آن افزایش می‌یابد. بلافاصله در بالادست شیپوره، این تولید آشفتگی در اثر شتاب‌گیری هسته جریان به داخل نازل جبران کاهش می‌یابد. ولی توسعه جریان دیواره در داخل نازل به‌شدت متفاوت از شیپوره ساده است.

چانگ (۲۰۰۲) [۹] جریان ناپایای داخل موتور تایتان IVB با شیپوره مغروق را به‌صورت عددی مطالعه کرد. از آنجا که شیپوره مغروق اغلب در موتورهایی با کنترل بردار رانش کاربرد دارند، حل پایا تنها زمانی کاربرد دارد که وضعیت شیپوره نسبت به محور موتور ثابت باشد. ولی با تغییر زاویه شیپوره، طبیعی است که تغییرات زمانی در میدان جریان هم حاصل می‌شود. این تغییرات با حل ناپایا قابل تحلیل است. نتایج آن‌ها نشان داد که تا پیش از رسیدن جریان به محدوده شیپوره مغروق، تغییرات چگالی و فشار تقریباً یکنواخت است و اختلاف

چندانی هم بین دیواره و خط مرکزی موتور دیده نمی‌شوند. اما در محدوده شیپوره این یکنواختی کمتر و اختلاف بین دیواره و خط مرکزی چشم‌گیرتر می‌شود.

پانین و سورژیکوف (۲۰۰۲) [۱۰] به مطالعه تجربی و عددی دینامیک گاز و انتقال حرارت در دو نوع شیپوره مغروق ثابت و متحرک پرداختند. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از دو واقعیت مهم بود. نخست آن‌که ضریب انتقال حرارت در سطح خارجی شیپوره مغروق در عمل مستقل از شعاع محفظه احتراق است؛ دوم، شکل‌گیری گردابه‌ها و شکست پی‌درپی خطوط جریان در ناحیه مغروق و انتقال آن‌ها به‌صورت تصادفی الگوی مهمی از جریان است که بر مشخصات انتقال حرارتی نیز مؤثر است.

آنتونی و همکاران (۲۰۰۲) [۱۱] تأثیر حفره شیپوره مغروق بر رزونانس موتور سوخت جامد بزرگ (مثل بوسترهای آریان-۵) را مطالعه و یک مدل نظری برای آن پیشنهاد کردند. در این تحقیق از نتایج تست‌های گاز سرد برای مطالعه اندرکنش گردابه-شیپوره استفاده شده که امکان استخراج ضربه تراست در موتورهای سوخت جامد را فراهم می‌کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که هرچه حفره شیپوره مغروق بزرگتر می‌شود، اندازه نوسانات نیز به‌صورت خطی بزرگ‌تر می‌شود. آنتونی و همکاران (۲۰۰۳) [۱۲] در تکمیل تحقیقات خود روی تأثیر حفره شیپوره مغروق بر رزونانس موتور سوخت جامد بزرگ، به شبیه‌سازی عددی پدیده کوپلینگ جریان-آکوستیک، به‌ویژه اثر حجم حفره بر ضربه‌های فشار پرداختند.

کورتوپاسی و همکاران (۲۰۰۸) [۱۳] اثر فرسایشی جریان در شیپوره مغروق را در یک موتور سوخت جامد بررسی کردند. براساس شبیه‌سازی عددی آن‌ها، بیشترین دبی جرمی قطرات آلومینیوم مایع حدود $10\ kg/s\text{-}m^2$ در ناحیه مخروط دماغه شیپوره بود. دبی‌های جرمی بیشتر در بخش مغروق شیپوره محاسبه و دلیل آن به اثر ذرات بزرگ‌تر با اینرسی بیشتر مرتبط شد. این ذرات بزرگ نمی‌توانند خط جریان محصولات احتراق را دنبال کنند و از شیپوره خارج شوند. کورتوپاسی و همکاران (۲۰۰۹) [۱۴] در تکمیل تحقیقات خود برای درک عمیق‌تر از فرآیندهای فرسایش شیپوره مغروق، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی جریان داخلی موتور را با در نظر گرفتن قطرات اکسید آلومینیوم مایع ادامه دادند.

استلا و پاگلیا (۲۰۰۹) [۱۵] موضوع نوسانات فشار در موتورهای سوخت جامد با شیپوره مغروق را به‌صورت عددی مطالعه کردند. بیشترین توجه آن‌ها معطوف به تأثیر حفره حاصل از شیپوره مغروق بر کوپلینگ جریان-آکوستیک و نوسانات فشار حاصل از آن بود. نتایج آن‌ها نشان داد که شیپوره بدون حفره (غیرمغروق) کمترین نوسانات فشار و شیپوره با بیشترین نسبت مغروق‌سازی بیشترین نوسانات را دارد. به‌علاوه، ارتباط تقریباً خطی بین بیشترین مود تحریک و حجم حفره وجود دارد.

کاوالینی و همکاران (۲۰۰۹) [۱۶] موضوع کوپلینگ آیروآکوستیک را در موتوری با گرین فینوسیل بررسی کردند. مدل شبه یک‌بعدی آنها شامل «تحلیل جریان شبه یک‌بعدی»، «تحلیل هندسی گرین» و «مدل شبه یک‌بعدی صوتی گردابه» بود. علاوه بر این، به‌دلیل شکل‌گیری گردابه در ناحیه شیپوره مغروق، آنها مدل شبه یک‌بعدی دیگری نیز برای این بخش توسعه دادند. این مدل به طور موفقیت‌آمیز برای تعیین مشخصات نوسانی فشار ناشی از خیزش گردابه زاویه‌ای و کوپلینگ آیروآکوستیکی موتور P80 SRM، اولین مرحله از پرتابگر وِگا، استفاده شده است.

ریس و همکاران (۲۰۱۸) [۱۷] رفتار اینسرت گرافیکی شیپوره و جایگزینی احتمالی آن با کامپوزیت کربن تقویت شده با الیاف کربن را موتوری با شیپوره مغروق مطالعه کردند. پس از هر تست، لایه رسوبی تشکیل شده در دو بخش همگرا و واگرای شیپوره با استفاده از آنالیز اشعه ایکس و اسکن میکروسکوپ الکترونی تجزیه و تحلیل شد. نتایج تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد که در این لایه‌های رسوبی، آلومینیوم و کربن وجود دارد. همچنین، به‌دلیل غلظت غیرمنتظره‌ی ماده لایه پوششی تشکیل شده، در خروجی مخروطی و گلوگاه اثر خوردگی مشاهده نشد.

محمدی و همکاران (۱۴۰۲) [۱۸, ۱۹] روند طراحی مفهومی موتور سوخت جامد با تمرکز بر پیکره‌بندی سه‌بعدی گرین را ارائه کردند. آن‌ها این روند طراحی را برای یک مسئله مشخص با قیود طول و وزن و قطر ارزیابی کردند. در این مسیر، ابتدا براساس فشار محفظه احتراق و پیکره‌بندی گرین ۲۳ طرح ممکن برای دو قطر مجاز کجاز بدنه استخراج و. سپس، براساس قیود وزنی، ابعادی و عملکردی (مثل سوزش فرسایشی و فرسایش گلوگاه شیپوره) طرح‌های ممکن انتخاب شدند. در نهایت نیز از سه طرح در محدوده‌ی الزامات سیستمی و عملکردی، با فرض فرسایش گلوگاه، یک طرح را به‌عنوان طرح بهینه پیشنهاد دادند.

در این پژوهش تبدیل شیپوره بیرونی به شیپوره مغروق برای یک موتور مفروض بررسی و امکان‌سنجی می‌شود. هدف از این امکان‌سنجی یافتن محدوده‌ای از میزان مغروق‌سازی است که در آن ضمن کاهش طول موتور، میزان افت‌های ناشی از کاهش احتمالی حجم گرین و نیز افزایش وزن به‌دلیل ملاحظات سازه‌ای در شرایط بهینه‌ای قرار گیرد. در این مسیر، شکل هندسی اجزای موتور، از جمله شیپوره آن تا حد امکان بدون تغییر باقی می‌ماند. اگرچه، افزایش ضخامت پوسته و وزن شیپوره برای بالا بردن مقاومت سازه‌ای و حرارتی اجتناب‌ناپذیر است.

۲. روابط حاکم بر طراحی موتور با شیپوره مغروق

برای بازطراحی موتور سوخت جامد و تبدیل شیپوره بیرونی آن به شیپوره مغروق لازم است ابتدا روند کلی و مراحل طراحی مفهومی آن مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، از روابط و روند طراحی معرفی شده در مرجع [۱۸] استفاده شده است. در این بخش ابتدا فرضیات حاکم بر بازطراحی موتور با شیپوره مغروق مرور می‌شود. سپس محاسبات هندسی و نحوه تخمین ضخامت شیپوره (پوسته و عایق و لاینر) و وزن کل ارائه می‌شود.

فرضیات حاکم بر طراحی

در این مسئله فرض بر آنست که موتور موجود با شیپوره بیرونی و طراحی آن از جنبه‌ها مختلف مورد تایید است. با توجه به الزامات سیستمی مربوط به طول موتور، طراحی براساس شیپوره مغروق اصلاح می‌شود. با در نظر گرفتن این فرض، ملاحظات زیر در بازطراحی مفهومی موتور مورد نظر با شیپوره مغروق در نظر گرفته شده است:

گرین: گرین فعلی این موتور از نوع استوانه‌ای با مقطع ستاره‌ای محدب است. مغروق شدن شیپوره می‌تواند موجب اشغال بخشی از حجم در نظر گرفته شده برای گرین و درنتیجه، کاهش وزن گرین شود. ممکن است برای جبران وزن کاسته شده از گرین و نیز دستیابی به نمودار سطح سوزش مطلوب، پیکره گرین نیاز به بازطراحی داشته باشد.

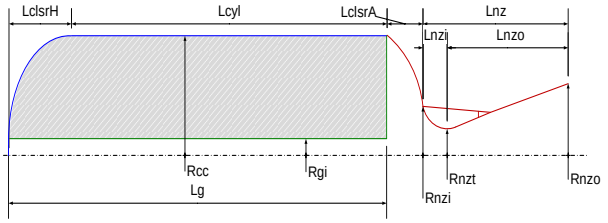
بدنه: از آنجا که هدف از طراحی، کاهش طول موتور با حفظ حداکثری عملکرد موتور (به‌ویژه تراست و فشار موتور) است، مغروق شدن شیپوره تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر طراحی بدنه، به‌ویژه در بخش استوانه‌ای آن، نخواهد داشت. با این‌حال، چون فرو رفتن شیپوره در بدنه باعث اشغال بخشی از حجم موتور و کاهش حجم گرین می‌شود، در برخی از طرح‌ها نیاز به افزایش طول بدنه است. البته به‌دلیل ثابت بودن فشار کاری موتور، این افزایش احتمالی طول بدنه تأثیری بر طراحی آن نخواهد داشت. با توجه به ملاحظات ذکر شده برای بدنه، نیازی به بازطراحی این بخش در فرآیند طراحی مفهومی شیپوره مغروق نیست. از این‌رو، برای موتور موجود، بخش بدنه از فرآیند بازطراحی خارج شده و اطلاعات زیر از بدنه موجود برای بدنه موتور با شیپوره مغروق نیز قابل استفاده خواهد بود:

- ضخامت بدنه در بخش استوانه‌ای (شامل پوسته فلزی، عایق و لاینر)
- جنس بدنه در بخش استوانه‌ای (به‌ویژه چگالی)
- قطر داخلی بدنه در بخش استوانه‌ای

شیپوره: ملاحظات مربوط به توزیع فشار بیرونی و داخلی بخش مغروق می‌تواند باعث اصلاح بخش فلزی پوسته شیپوره موجود (به لحاظ ضخامت و پروفیل) شود. از اصلاح احتمالی پروفیل شیپوره در بخش ورودی (همگرا) صرف‌نظر می‌شود.

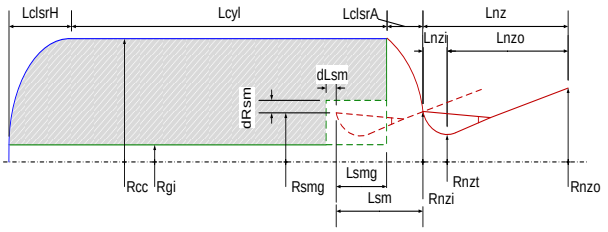
محاسبات هندسی طراحی شیپوره مغروق

برای بازطراحی و تبدیل موتوری با شیپوره بیرونی به شیپوره مغروق، ابتدا لازم است پارامترهای هندسی طراحی آن‌ها تعریف شوند. شکل ۳ و شکل ۴ مدل ساده‌ای از موتور با شیپوره بیرونی و مغروق را نشان می‌دهد.



شکل ۳– طرح ساده‌شده از مدل هندسی موتور فعلی با شیپوره بیرونی.

Fig. 3. Simplified geometrical model of the motor with external nozzle.



شکل ۴– طرح ساده‌شده از مدل هندسی موتور با شیپوره بیرونی و مغروق.

Fig. 4. Simplified geometrical model of the motor with internal and submerged nozzle.

تعیین طول بخش مغروق شیپوره

مجموعه محاسبات هندسی طراحی شیپوره مغروق را می‌توان با تعیین درصد مغروق‌سازی (f_{sm}) انجام داد. طول بخش مغروق شامل دو پارامتر طول کل مغروق‌شده در بدنه و طول بخش مغروق در گرین می‌شود. طول کل بخش مغروق در بدنه با استفاده از نسبت مغروق‌سازی و با رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲]:

$$L_{sm} = f_{sm} L_{nz} \qquad (۱)$$

که در آن، f_{sm} نسبت مغروق‌سازی شیپوره است. طول بخش مغروق در گرین نیز از اختلاف طول کل بخش مغروق و عدسی به‌دست می‌آید:

$$L_{smg} = L_{sm} - L_{clsrA} \qquad (۲)$$

تخمین نسبت جرم از دست رفته گرین

مغروق‌سازی شیپوره به‌طور طبیعی می‌تواند موجب اشغال بخشی از فضای گرین و کاستن از جرم گرین شود. حجم اشغال‌شده از گرین (V_{smg}) به‌معنای جرم از دست رفته گرین است. میزان جرم از دست رفته را می‌توان به‌صورت نسبت حجمی آن به حجم گرین نیز محاسبه کرد. چنانچه این نسبت عدد بزرگی باشد (مثلاً بیش از ۵ درصد)، باید تمهیدی برای جبران آن اندیشیده شود. این نسبت برای گرینی با طول بخش استوانه‌ای زیاد، با رابطه زیر قابل تخمین است [۲]:

$$f_{Vsmg} = V_{smg} / V_{cyl} \qquad (۳)$$

که در آن V_{cyl} حجم بخش استوانه‌ای بدنه است.

تخمین افزایش طول احتمالی بدنه

چنانچه نسبت جرم از دست رفته گرین قابل توجه باشد، دو راه‌کار برای جبران آن وجود خواهد داشت: (۱) اصلاح سطح مقطع یا پیکره گرین؛ (۲) افزایش طول گرین. راه‌کار اول معمولاً وابسته به درصد پرشوندگی موتور است. چنانچه حجم مغروق‌سازی بخش گرین زیاد و درصد پرشوندگی موتور نیز زیاد باشد، امکان جبران کل جرم از دست رفته از طریق این راه‌کار محدود می‌شود و باید از راه‌کار دوم استفاده کرد. این افزایش طول گرین که با افزایش طول بدنه همراه است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{cyl,smg} = V_{smg} / A_g \qquad (۴)$$

که در آن، A_g سطح مقطع کامل گرین در بخش استوانه‌ای است.

محاسبات سازه‌ای طراحی شیپوره مغروق:

مجموعه محاسبات سازه‌ای طراحی شیپوره مغروق را می‌توان در قالب گام‌های زیر و براساس اطلاعات عملکردی و هندسیِ به‌دست آمده از مراحل قبل انجام داد.

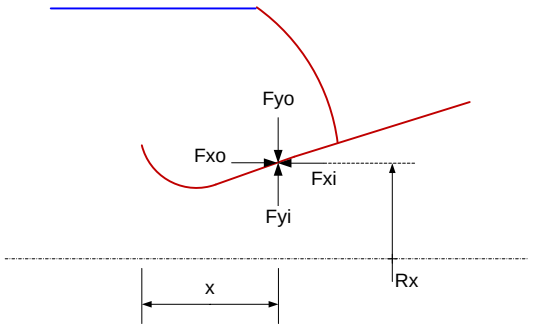
تعیین ضخامت پوسته فلزی شیپوره

چنانکه پیش‌تر گفته شد، شیپوره بیرونی تنها در معرض توزیع فشارها و نیروهای داخلی است. با این‌حال، در شیپوره مغروق، علاوه بر توزیع فشار داخلی، توزیع فشار و نیروهای خارجی نیز در بخش مغروق شیپوره وجود دارد که باید در طراحی سازه لحاظ شود. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، در هر نقطه از طول شیپوره دو بردار نیروی داخلی و خارجی اعمال می‌شود. مؤلفه x این نیروها مجموع نیروهایی طولی اعمال‌شده روی شیپوره است که از سمت خروجی شیپوره تا نقطه x با هم جمع می‌شوند. مؤلفه y نیز نیروی حاصل از فشار استاتیک وارد بر شیپوره است.

ضخامت پوسته در هر موقعیت طولی از شیپوره را می‌توان با توجه به تنش‌های وارد بر سازه شیپوره به‌دست آورد. ضخامت متناسب با تنش‌های چهارگانه طولی، کمانشی، برشی و محیطی را می‌توان براساس نیروها و فشارهای وارد بر شیپوره مطابق روابط مقاله [۱۸] به‌دست آورد. تنها تنش باقیمانده که مربوط به بخش مغروق است، تنش کمانشی ناشی از توزیع فشار بیرونی روی استوانه است. برای یک استوانه جدارنازک، ضخامت لازم با توزیع فشار بیرونی P از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۰, ۲۱]:

$$t = S.F.\left(P\frac{1-n^2}{E}\right)^{\frac{5}{11}} D \qquad (۵)$$

که P_{GL} فشار کمانش، E: مدول کشسانی پوسته، ν نسبت پوآسون، t ضخامت استوانه، D قطر استوانه و $S.F$ ضریب اطمینان است.



شکل ۵– نیروهای وارد بر شیپوره مغروق.

Fig. 5. Forced acting on the nozzle.

تعیین ضخامت عایق و لاینر شیپوره

ضخامت عایق و لاینر برحسب توزیع سرعت و دما انجام می‌شود. توزیع سرعت و دما در داخل شیپوره تا حد زیادی به شیپوره بیرونی شباهت دارد و از این‌رو، در مرحله طراحی مفهومی استفاده از همان ضخامت عایق و لاینر منطقی به نظر می‌رسد. سطح بیرونی شیپوره نیز که بخش حفره مغروق را تشکیل می‌دهد، در عمل، بخشی از دیواره محفظه احتراق است. در ناحیه حفره سرعت‌های جریان بسیار کم (عدد ماخ کمتر از ۰/۱) و دمای جریان نیز برابر با دمای احتراق سوخت است. از این‌رو، همان تمهیداتی که برای عایق و لاینر بدنه محفظه، به‌ویژه عدسی شیپوره، دیده شده با اطمینان بالایی روی سطح بیرونی شیپوره نیز قابل اعمال است.

تخمین وزن شیپوره: با توجه به جنس مواد انتخاب‌شده برای شیپوره و توزیع ضخامت آن‌ها در طول شیپوره، وزن آن‌ها را نیز با استفاده از رابطه زیر می‌توان به‌دست آورد:

$$M_s = r_s \int_{x_i}^{x_e} 2pR_x t_{sx} dx \quad \text{(۶) جرم پوسته فلزی:}$$

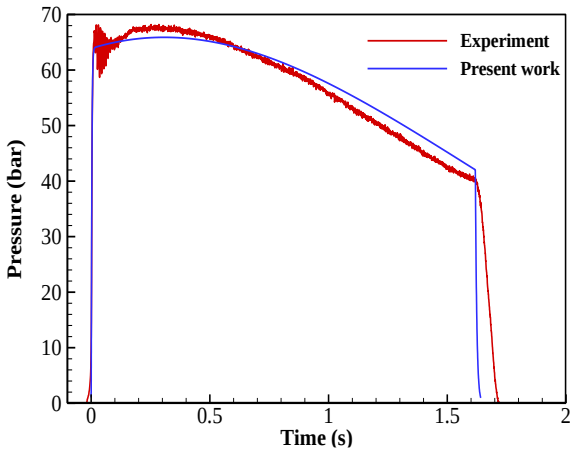
$$M_l = r_l \int_{x_i}^{x_e} 2pR_x t_{lx} dx \quad \text{(۷) جرم لاینر:}$$

$$M_i = r_i \int_{x_i}^{x_e} 2pR_x t_{ix} dx \quad \text{(۸) جرم عایق:}$$

که در آن‌ها، M_s جرم پوسته فلزی، t_{sx} ضخامت پوسته فلزی در طول شیپوره، M_l جرم لاینر، t_{lx} ضخامت لاینر در طول شیپوره، M_i جرم عایق، t_{ix} ضخامت عایق در هر موقعیت طولی شیپوره و x_i و x_e موقعیت طولی دهانه ورودی و خروجی شیپوره است.

۳. اعتبارسنجی

اعتبارسنجی تحلیل جریان برای موتوری با مقطع دایره انجام شده است که علاوه بر سطح درونی، دو سر آن نیز می‌سوزد. طول گرین ۱۸۰ mm، قطر داخلی آن ۴۰ mm و قطر بیرونی آن ۱۰۰ mm است. فطر گلوگاه شیپوره نیز ۱۹ mm است. شکل ۶ تغییرات فشار محفظه در طول سوزش گرین را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، تطابق بسیار خوبی (میانگین اختلاف نسبی ۷ درصد) بین نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با نتایج تجربی دیده می‌شود.



شکل ۶– تغییرات فشار موتور با زمان در طول مدت عملکرد یک موتور درون‌سوز، پس‌سوز و ته‌سوز و مقایسه با نتایج تجربی.

Fig. 6. Temporal changes of motor pressure during the operation of grain with internal, aft-end, and back-end burning faces and comparison with experimental results.

۴. طرح‌های مورد نظر

مشخصات علملکردی موتور با شیپوره بیرونی در جدول ۱ آمده است. در این بخش به بازطراحی این موتور برای شیپوره مغروق در فشار طراحی ۸۰ bar پرداخته می‌شود. شکل ۷ مدل ساده شده‌ای از شیپوره بیرونی و مغروق را نشان می‌دهد. طبق این شکل، شیپوره از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول، فاصله سطح گرین تا ابتدای اینسرت با علامت $L_{nz,clsr}$ که در واقع همان عدسی بدنه در سمت شیپوره است. بخش دوم، موقعیت لبه ورودی اینسرت تا انتهای نازل که با علامت $L_{nz,cd}$ مشخص شده است. طول مغروق‌سازی شیپوره، L_{sm}، براساس میزان تورفتگی لبه اینسرت نسبت به موقعیت اولیه سنجیده می‌شود. برای بازطراحی موتور با شیپوره مغروق، پنج طرح براساس نسبت‌های مغروق‌سازی ۱۵ تا ۷۵ درصد در دو حالت زیر در نظر گرفته شده است:

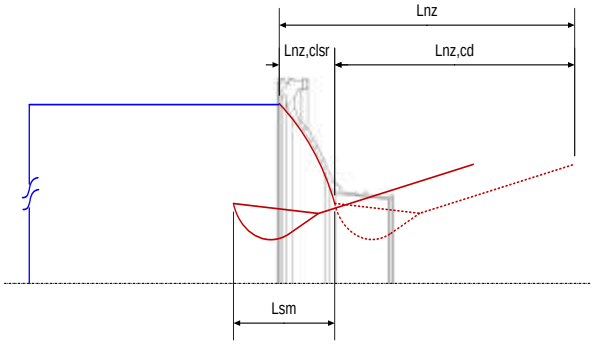
۱) ثابت نگه داشتن طول بدنه و چشم‌پوشی از افت تراست؛
۲) افزایش طول بدنه (گرین) برای جبران جرم بخش مغروق.

خلاصه نتایج تحلیل هندسی، وزنی و عملکردی پنج طرح مورد نظر در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱– مشخصات عملکردی موتور فعلی با شیپوره بیرونی.

Table 1. Performance characteristics of the current motor with external nozzle.

Parameter	Unit	value
Total impulse	KN.s	578
Averge thrust	KN	105
Burning time	Sec	5.5
Case inner diameter (grain outer diameter)	mm	435
Motor length	mm	1390
Motor mass	Kg	250



شکل ۷– پارامترهای مؤثر در تعریف میزان مغروق‌سازی.

Fig. 7. Parameters affecting on the amount of submerging.

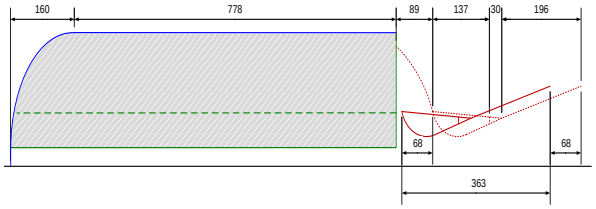
جدول ۲- خلاصه نتایج طرح‌های مفهومی سناریوهای ۱ تا ۵.

Table 2. Summary of the results of the conceptual design of scenarios 1 to 5.

	Parameter	Unit	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 5
submerging	f_{sm}	%	15%	30%	45%	60%	75%
	$f_{sm,cd}$	%	19%	37%	56%	75%	93%
Grain geometrical parameters	L_{sm}	mm	68	136	203	271	339
	$L_{sm,g}$	mm	0	47	114	182	250
	$L_{sm,g}+dL_{sm}$	mm	4	72	139	207	275
	$A_{sm,g}$	dm^2	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49
	$V_{sm,g}$	dm^3	0.133	2.50	4.87	7.24	9.61
Without increasing the case length	$f_{Vsm,g}$	%	0.1%	1.6%	3.2%	4.8%	6.3%
	$dL_{sm,m}$	mm	68	136	203	271	339
	$(f_{sm,m})$	(%)	(15)	(30)	(45)	(60)	(75)
	$dM_{sm,nz}$	kg	0.90	1.90	3.3	4.7	6.8
	T	kN	121.2	118.8	117.7	114.9	110.0
	(f_{dT})	(%)	(0.0)	(2.0)	(2.9)	(5.2)	(10.0)
With increasing the case length	$dL_{sm,cc}$	mm	0	14	28	41	54
	$dL_{sm,m}$	mm	69	121	176	230	285
	$(f_{sm,m})$	(%)	(15)	(27)	(39)	(51)	(65)
	$dM_{sm,cc}$	kg	0	1.7	3.4	5.0	6.7
	dM_{sm}	kg	0.90	3.6	6.7	9.7	13.5
	T	kN	121.2	121.2	121.2	121.2	121.2

طرح ۱: شیپوره ۱۵٪ مغروق

در طرح اول با نسبت مغروق‌سازی ۱۵ درصد f_{sm} = حدود ۶۸ mm از طول کل موتور را کاهش می‌دهد؛ لبه ورودی شیپوره در فاصله‌ای حدود ۲۰ mm از سطح گرین قرار دارد و بنابراین، حجمی از فضای گرین را اشغال نمی‌کند؛ از این‌رو، نیازی به افزایش طول بدنه ندارد. وزن اضافه‌شده به شیپوره در بخش مغروق حدود ۰/۹ kg است که ۰/۶ kg آن مربوط به تقویت سازه فلزی و ۰/۳ kg آن مربوط به عایق و لاینر سطح بیرونی است.

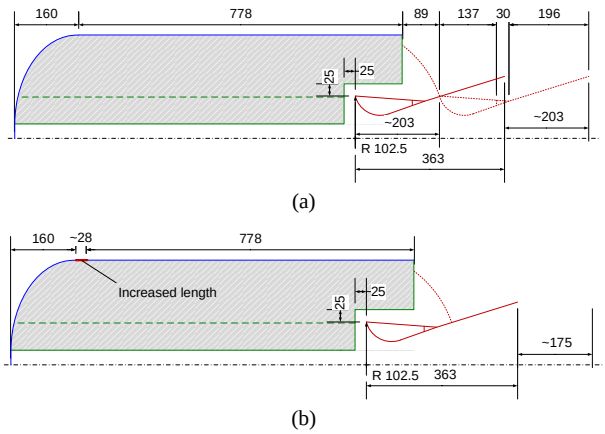


شکل ۸- طرح مفهومی ۱؛ موتور با شیپوره ۱۵ درصد مغروق (ابعاد: mm).

Fig. 8. The concept design 1; motor with 15% submerged nozzle (units: mm).

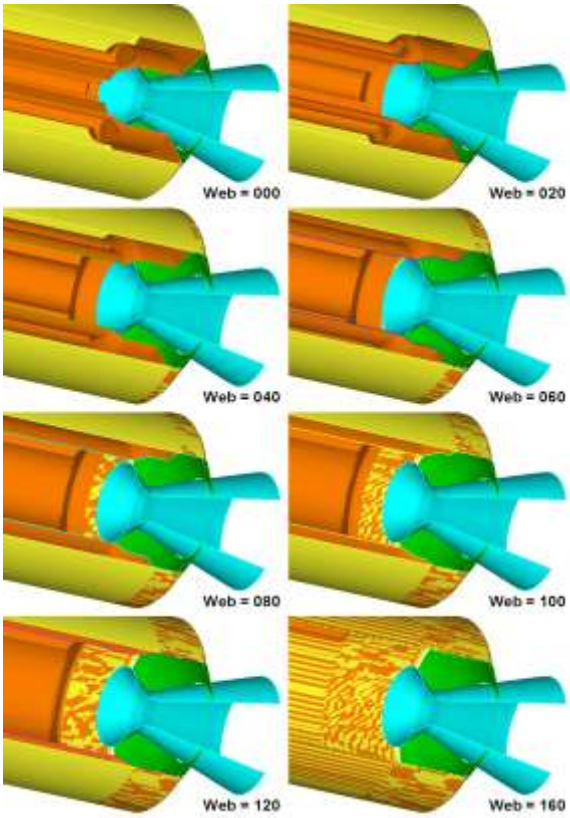
طرح ۲: شیپوره ۳۰ درصد مغروق

در طرح دوم، نسبت مغروق‌سازی ۳۰ درصد f_{sm} = است که فضایی کمتر از ۱/۶ درصد از کل حجم گرین اشغال می‌شود؛ با توجه به نسبت پرشوندگی حدود ۹۰ درصد موتور، جبران این جرم از طریق اصلاح مقطع یا پیکره گرین تا حد زیادی عملی است. چنانچه از طرح طول بدنه ثابت استفاده شود، طول کل موتور حدود ۱۳۶ mm کاهش و وزن شیپوره حدود ۱/۹ kg افزایش می‌یابد. چنانچه نیاز باشد جرم گرینِ از دست رفته با افزایش طول بدنه جبران شود، کافیست حدود ۱۵ mm به‌طول گرین (بدنه موتور) افزوده شود که در این‌حالت، میزان خالص کاهش طول موتور ۱۲۱ mm و وزن اضافه‌شده به آن در نتیجه افزایش طول بدنه حدود ۱/۷ kg است.



شکل ۹- طرح مفهومی ۳؛ موتور با شیپوره ۴۵ درصد مغروق (ابعاد: mm). (الف) بدون افزایش طول بدنه، (ب) با افزایش طول بدنه.

Fig. 9. The concept design 3; motor with 45% submerged nozzle (units: mm). (a) without increasing the case length, (b) with increasing the case length.



شکل ۱۰– تغییرات حفره شیپوره مغروق در زمان پسروی برای طرح ۳.

Fig. 9. Changes in the submerged nozzle cavity during grain burn-back for design 3.

طرح ۳: شیپوره ۴۵ درصد مغروق

در طرح سوم، نسبت مغروق‌سازی ۴۵ درصد f_{sm} = است. این طرح حدود ۳/۲ درصد از کل حجم گرین را اشغال می‌کند؛ شکل ۹، هندسه طرح سوم را دو حالت بدون تغییر طول و با تغییر طول نشان می‌دهد. تغییرات حفره مغروق نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر عملکرد موتور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نسبت پرشوندگی حدود ۹۰ درصد، جبران ۳/۲ درصد کاهش جرم از طریق اصلاح مقطع یا پیکره گرین تا حد زیادی عملی است. با پذیرش این افت، حدود mm ۲۰۳ از طول کل موتور کم و kg ۳/۳ به وزن آن افزوده می‌شود. چنانچه نیاز باشد جرم گرینِ از دست رفته با افزایش طول بدنه جبران شود، طول بدنه mm ۲۸ افزایش خواهد بافت. درنتیجه، کاهش خالص طول موتور mm ۱۷۵ و وزن اضافه‌شده در اثر افزایش طول بدنه kg ۳/۴ است.

طرح ۴: شیپوره ۶۰ درصد مغروق

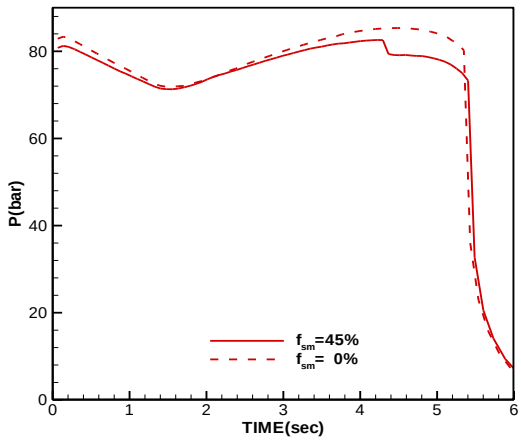
در طرح چهارم با نسبت مغروق‌سازی ۴۵ درصد f_{sm} =، لبه ورودی شیپوره حدود mm ۱۸۲ به‌داخل گرین نفوذ و ۴/۸ درصد از کل حجم گرین را اشغال می‌کند؛ با توجه به نسبت پرشوندگی حدود ۹۰ درصد موتور، جبران کامل این کاهش جرم از طریق اصلاح مقطع یا پیکره گرین عملی به نظر نمی‌رسد و برای جبران آن باید حدود mm ۴۱ به‌طول موتور افزوده شود. بدین‌ترتیب، میزان خالص کاهش طول موتور نزدیک به mm ۲۳۰، معادل ۵۱ درصد طول کل شیپوره است. در این طرح، وزن اضافه شده به شیپوره در بخش مغروق kg ۴/۷ و در بدنه kg ۵/۰ است.

طرح ۵: شیپوره ۷۵ درصد مغروق

در طرح پنجم، نسبت مغروق‌سازی ۴۵ درصد f_{sm} = است. لبه ورودی شیپوره mm ۲۵۰ به‌داخل گرین نفوذ می‌کند و با احتساب حاشیه mm ۲۵ بین سطح شیپوره و سطح گرین، فضایی حدود ۶/۳ درصد از کل حجم گرین اشغال می‌شود؛ برای جبران این کاهش جرم افزایش طول بدنه به اندازه mm ۵۴ ضروری است. در نتیجه، میزان خالص کاهش طول موتور حدود mm ۲۸۵، معادل ۶۳ درصد طول کل شیپوره است. وزن اضافه‌شده به شیپوره در بخش مغروق و بدنه به ترتیب حدود kg ۶/۸ و kg ۶/۷ است.

تحلیل جریان داخل موتور

داده‌های حاصل از تحلیل هندسی گرین (شامل سطح سوزش و حجم محفظه خالی) مبتنی بر روش ارائه‌شده در مرجع [۲۲] به‌همراه اطلاعات مربوط به سوخت و گازهای حاصل از احتراق در نرم‌افزار تحلیل جریان وارد و نمودارهای مربوط به فشار داخلی محفظه، نرخ سوزش و تراست موتور استخراج شده است. شکل ۱۱ نمونه‌ای از این نتایج را برای طرح سوم (مغروق‌سازی ۴۵ درصد) نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، نمودار فشار با افت کمی در حدود ۳ درصد به نمودار شیپوره بیرونی نزدیک است. این افت در طرح اول حدود صفر و در طرح پنجم به حدود ۱۰ درصد می‌رسد. نکته قابل توجه در این نمودارها، افت پله‌ای محدود در نواحی $t = 4.2$ s است که به‌دلیل پایان ناگهانی سطح سوزش برش خورده در سمت شیپوره مغروق است. چنانچه این افت زیاد باشد، باید برای رفع یا کاهش آن چاره‌اندیشی شود.



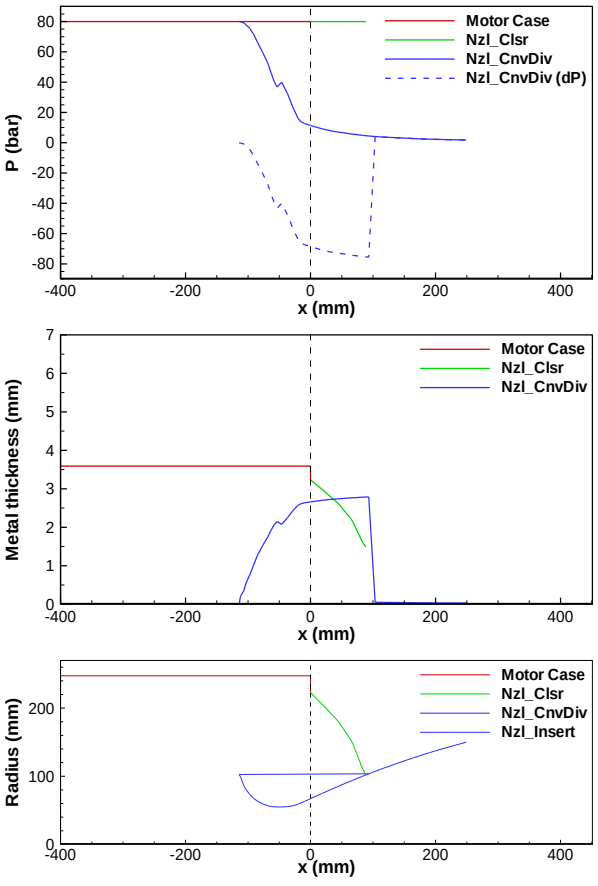
شکل ۱۱– نمودار فشار طرح مفهومی ۳: موتور با شیپوره ۴۵ درصد مغروق.

Fig. 11. Pressure temporal change of design 3: motor with 45% submerged nozzle.

طراحی سازه شیپوره

برای طراحی سازه شیپوره نیاز به توزیع فشار، دما و سرعت در داخل و بیرون شیپوره است. اطلاعات دمایی و سرعت برای طراحی عایق و لاینر و اطلاعات فشاری برای طراحی سازه فلزی شیپوره به‌کار می‌رود.

عایق و لاینر: توزیع سرعت و دما در داخل شیپوره تا حد زیادی به شیپوره بیرونی شباهت دارد و از این‌رو، استفاده از همان ضخامت عایق و لاینر منطقی به‌نظر می‌رسد. سطح بیرونی نیز که بخش حفره مغروق را تشکیل می‌دهد، در عمل، بخشی از دیواره محفظه احتراق به‌حساب می‌آید. از این‌رو، همان تمهیداتی که برای عایق و لاینر بدنه محفظه، به‌ویژه عدسی شیپوره، دیده شده با اطمینان بالایی روی سطح بیرونی شیپوره نیز قابل اعمال است. درنتیجه، برای عایق و لاینر دیواره بیرونی شیپوره نیز از ضخامت ۵ mm استفاده می‌شود.



شکل ۱۲– نمودار توزیع فشار، ضخامت و شعاع شیپوره در طرح ۳.

Fig. 12. Pressure, nozzle thickness and radius in design 3.

سازه فلزی: برای طراحی سازه فلزی از توزیع فشار روی دیواره‌های داخلی و خارجی شیپوره استفاده می‌شود. شکل ۱۲ نمونه‌ای از توزیع فشار و ضخامت سازه در طرح سوم را نشان می‌دهد. بخش مغروق تحت تأثیر دو توزیع فشار داخلی و خارجی است. همان‌طور که دیده می‌شود، در بخش مغروق شیپوره غلبه با توزیع فشار بیرونی (فشار منفی) است که از صفر تا ۸۰ bar تغییر می‌کند. برای تعیین ضخامت سازه از رابطه (۵) در بخش مغروق استفاده می‌شود. در این محاسبات، علاوه بر ضریب اطمینان ۱/۵، یک ضریب ۱/۵ نیز برای بیشینه فشار در شرایط دما بالا لحاظ شده است. با درنظرگرفتن این توزیع فشار و جنس فولاد ۴۱۳۰، توزیع ضخامت لازم برای تحمل فشار نیز محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۵. ارزیابی نهایی سناریوهای طراحی

با توجه به آنچه در بخش‌های پیش برای طرح‌های پنج‌گانه به‌دست آمد، می‌توان به انتخاب محدوده طراحی بهینه پر داخت. مهم ترین پارامتر در بخش هندسی، طول مغروق و طول کاسته شده از موتور است. در بخش وزنی، میزان کاهش یا افزایش وزن اجزای موتور و کل موتور و در بخش عملکردی، تغییرات تراست میانگین و ضربه کل می‌باشد. شکل ۱۳ تغییرات پارامترهای فوق براساس نسبت مغروق‌سازی را نشان می‌دهد. در این نمودارها زیرنویس g مربوط به گرین، زیرنویس cc مربوط به بدنه و زیرنویس m مربوط به موتور است. دو زیرنویس ۱ و ۲ نیز به‌ترتیب بیانگر «بدون افزایش طول بدنه» و «با افزایش طول بدنه» است.

ارزیابی هندسی، وزنی و عملکردی

همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، تغییرات طول کل موتور در دو حالت بدون افزایش طول بدنه (dLsm,m1) و با افزایش طول بدنه (dLsm,m2)، به‌ویژه در نسبت‌های مغروق‌سازی زیر ۶۰ درصد، تقریباً با هم برابر است. از این رو مزیت قابل توجهی در این زمینه وجود ندارد؛ گرچه، حالت بدون تغییر بدنه ارجحیت دارد. این موضوع درباره تغییرات وزنی کاملاً متفاوت است. در حالت طول بدنه ثابت (dMm1)، با افزایش نسبت مغروق‌سازی جرم گرین کاهش و جرم شیپوره افزایش می‌یابد؛ اما به‌دلیل آن‌که جرم کاسته شده از گرین بیشتر از جرم افزوده شده به شیپوره است، روند کلی جرم موتور نیز رو به کاهش است. در صورت افزایش طول بدنه (dMm2)، به‌دلیل جبران جرم ازدست رفته گرین، جرم گرین ثابت می‌ماند؛ ولی جرم شیپوره و جرم بدنه افزایش می‌یابد. از این‌رو، با افزایش نسبت مغروق‌سازی جرم کل موتور نیز رو به افزایش است. با این توضیحات، حالت بدون افزایش طول بدنه ارجحیت دارد.

شکل ۱۳(پایین) میزان افت تراست میانگین (dF) و ضربه کل موتور (dI) با افزایش نسبت مغروق‌سازی را نشان می‌دهد. البته،

نرخ کاهش تراست میانگین تندتر از ضربه کل است. با این‌حال، تا نسبت مغروق‌سازی ۴۵ درصد، میزان افت تراست و ضربه کل کمتر از ۳ درصد است؛ اما افزایش بیشتر مغروق‌سازی باعث افت تا ۵ و ۱۰ درصد نیز می‌شود.

ارزیابی نمودار تراست–زمان

برای قضاوت بهتر در مورد عملکرد موتور، توجه به نمودار تراست–زمان نیز می‌تواند مفید باشد. مطابق شکل ۱۴، تا نسبت مغروق‌سازی ۴۵ درصد، روند تغییرات این نمودار بسیار به نمودار شیپوره بیرونی نزدیک است؛ ولی با افزایش نسبت مغروق‌سازی، با افت پله‌ای در $t > 4s$ مواجه می‌شود که می‌تواند اثر نامطلوب بر عملکرد سامانه بگذارد. ضمن آن‌که افت ضربه کل و تراست میانگین هم قابل چشم‌پوشی نیست. این افت به اندازه‌ای است که چاره‌ای جز افزایش طول بدنه باقی نمی‌گذارد. این افت به‌دلیل شکل هندسی گرین در بخش برش‌خورده توسط شیپوره مغروق است. از آنجا که گرین این موتور از درون‌سوز–کف‌سوز است، دو طول وب برای آن قابل تعریف است: وب اول مربوط به ضخامت شعاعی گرین و وب دوم مربوط به طول گرین است. درحالتی‌که گرین برش نخورده باشد، وب شعاعی بسیار کوچک‌تر از وب طولی است؛ از این رو با تغییر ناگهانی سطح سوزش مواجه نیست. اما وقتی گرین به دلیل وجود شیپوره مغروق برش می‌خورد، دو وب شعاعی و طولی ایجاد می‌شود:

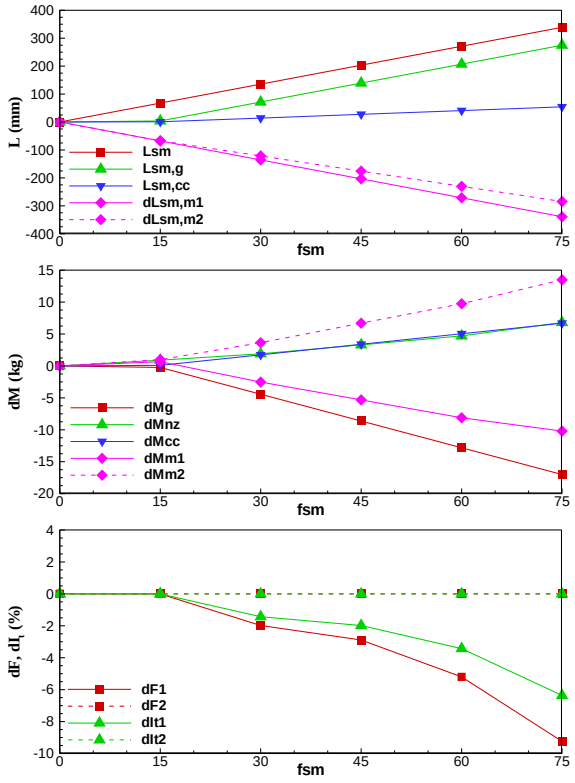
۱) وب شعاعی مربوط به بخش برش نخورده و برش خورد؛

۲) وب طول مربوط به‌طول کل گرین و طول پله بخش مغروق.

بدیهی‌است که در حالت برش خورد، وب‌های شعاعی و طولی کوچک‌تر از حالت اولیه است. ضمن آن‌که با افزایش نسبت مغروق‌سازی، وب طولی بخش مغروق از وب شعاعی آن بزرگتر می‌شود. بنابراین، ابتدا وب شعاعی پایان می‌یابد و سپس وب طولی. به‌همین دلیل، وقتی وب شعاعی بخش مغروق تمام می‌شود، به‌طور ناگهانی سطح سوزش آن از بین می‌رود؛ در حالی‌که وب شعاعی بخش برش‌نخورده باقی مانده است و سوزش گرین همچنان ادامه دارد. برای حذف این پله لازم است پیکره گرین و نحوه سوزش سطوح آن بازطراحی شود که با توجه به محدودیت‌های هندسی موتور و بدنه الزاماً به نتیجه نخواهد رسید.

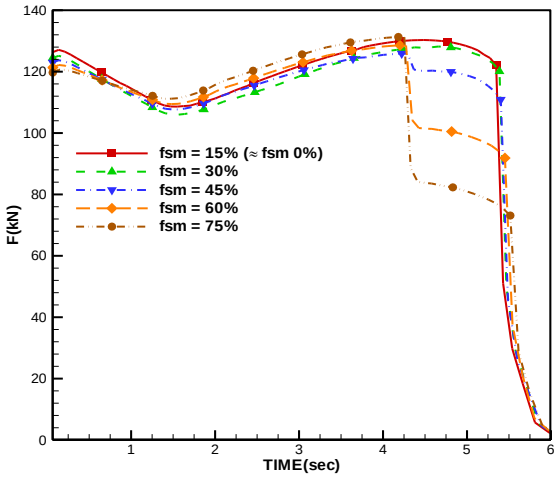
طرح بهینه پیشنهادی

با توجه به آنچه در ارزیابی پارامترهای طراحی با تغییرات نسبت مغروق‌سازی گفته شد، به‌نظر می‌رسد محدوده مغروق‌سازی ۴۵–۳۰ درصد محدوده بهینه‌ای برای طراحی شیپوره مغروق خواهد بود. بدیهی است که انتخاب نسبت بهینه در این محدوده نیازمند ارزیابی‌های بیشتر در مرحله طراحی اولیه است.



شکل ۱۳– تغییرات پارامترهای طراحی براساس نسبت مغروق‌سازی. بالا: طول کل مغروق، طول مغروق در گرین و کاهش طول موتور؛ وسط: جرم گرین، شیپوره، بدنه و کل موتور؛ پایین: تغییرات تراست و ضربه کل.

Fig. 13. Design parameter changes based on the submerging ratio. Top: Total submerged length, submerged length in the grain and motor length reduction; Middle: Motor grain, nozzle, case and total mass; Bottom: Thrust and total impulse changes.



شکل ۱۴– تغییرات نمودار تراست–زمان در طرح‌های پنج‌گانه.

Fig. 14. Changes in the trust-time diagram in the five selected designs.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تبدیل یک شیپوره بیرونی به شیپوره مغروق مورد بررسی قرار گرفت. طراحی شیپوره مغروق پیچیده‌تر از شیپوره بیرونی است، زیرا اولاً هر دو سطح دورنی و بیرونی بخش مغروق در معرض گازهای داغ قرار دارند، ثانیاً بخش مغروق از نظر سازه‌ای باید علاوه بر نیروهای وارد بر سطوح داخلی، نیروی فشار خارجی را نیز تحمیل کند. به‌همین دلیل، احتمال افزایش وزن موتور در اثر استفاده از شیپوره مغروق نیز وجود دارد. پنج طرح براساس نسبت مغروق‌سازی ۱۵ تا ۷۵ درصد انتخاب و برای هر یک جدول تخمین‌های طولی، وزنی و عملکردی در دو حالت بدنه ثابت و بدنه با طول افزوده استخراج شد. ارزیابی طرح‌های مذکور نشان داد که نسبت مغروق‌سازی ۶۰ و ۷۵ درصد باعث افت قابل توجه ضربه کل می‌شود که برای جبران آن باید طول موتور در بخش گرین و بدنه افزایش یابد. با مقایسه پنج طرح و مزایا و معایب آن‌ها، به‌نظر می‌رسد به‌دلیل افت قابل چشم‌پوشی ضربه کل، کاهش طول قابل قبول و افزایش وزن کم، طرح بهینه در نسبت مغروق‌سازی ۳۰ تا ۴۵ درصد قابل دسترسی باشد. انتخاب نسبت بهینه در این محدوده در طراحی اولیه مشخص می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.

مراجع

[1] R. A. Ellis and R. B. Keller Jr, "Solid rocket motor nozzles," NASA, Washington, D.C., Tech. Rep. SP-8115, 1975.

[2] R. Salmi and J. Pelouc, "Investigation of a submerged nozzle for solid rockets," in *2nd Solid Propulsion Conference*, Anaheim, CA, USA. 1967, https://doi.org/10.2514/6.1967-1520.

[3] J. W. Kordig and G. H. Fuller, "Correlation of nozzle submergence losses in solid rocket motors," *AIAA Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 175-177, 1967, https://doi.org/10.2514/3.3933.

[4] B. A. Janardan and B. T. Zinn, "Effect of nozzle submergence upon stability of solid rockets," *AIAA Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 109-111, 1976, https://doi.org/10.2514/3.7062.

[5] S. Boraas, "Modeling slag deposition in the space shuttle solid rocket motor," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 21, no. 1, pp. 47-54, 1984, https://doi.org/10.2514/3.8606.

[6] J. A. Freeman, J. S. Chan, J. E. Murph, and K. E. Xiques, "High performance solid rocket motor (SRM) submerged nozzle/combustion cavity flowfield assessment," NASA, Huntsville, AL., Contractor Rep. CR-179307, 1987.

[7] R. Madabhushi, J. Sabnis, F. DE Jong, and H. Gibeling, "Navier-stokes analysis of aft dome flow field in solid rocket motorswith submerged nozzle," in *25th Joint Propulsion Conference*, Monterey, CA, USA. 1989, https://doi.org/10.2514/6.1989-2780.

[8] B. E. Thompson, O. Bouchery, and K. Lowney, "Flow through a submerged nozzle," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 32, no. 6, pp. 986-992, 1995, https://doi.org/10.2514/3.26719.

[9] I.-S. Chang, "Unsteady-state rocket nozzle flows," in *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, Indiana, 2002, https://doi.org/10.2514/6.2002-3884.

[10] S. Panin and S. Surzhikov, "Experimantal and numerical study of convective heat transfer in submerged nozzle," in *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV, USA. 2002, https://doi.org/10.2514/6.2002-659.

[11] J. Anthoine, J. M. Buchlin, and A. Hirschberg, "Effect of nozzle cavity on resonance in large SRM: theoretical modeling," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 18, no. 2, pp. 304-311, 2002, https://doi.org/10.2514/2.5935.

[12] J. Anthoine, J. M. Buchlin, and J. F. Guery, "Effect of nozzle cavity on resonance in large SRM: numerical simulations," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 19, no. 3, pp. 374-384, 2003, https://doi.org/10.2514/2.6141.

[13] A. Cortopassi, E. Boyer, R. Acharya, and K. Kuo, "Design of a solid rocket motor for characterization of submerged nozzle erosion," in *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Hartford, CT. 2008, https://doi.org/10.2514/6.2008-4889.

[14] A. Cortopassi, E. Boyer, and K. Kuo, "Update: A subscale solid rocket motor for characterization of submerged nozzle erosion," in *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Denver, Colorado, 2009, https://doi.org/10.2514/6.2009-5172.

[15] F. Stella and F. Paglia, "Pressure oscillations in solid rocket motors: Effect of nozzle cavity," *Erotecnica Missili E Spazio*, vol. 88, no. 1/2, pp. 31-41, 2009, (in Italian), https://hdl.handle.net/11573/485550

[16] E. Cavallini, B. Favini, and A. Neri, "Q1D modelling of Vortex-driven pressure oscillations in Aft-Finocyl SRMs with submerged nozzle cavity," in *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Orlando, FL. 2015, https://doi.org/10.2514/6.2015-3975.

[17] R. I. Reis, W. K. Shimote, and L. C. Pardini, "Anomalous behavior of a solid rocket motor nozzle insert during static firing test," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 8,

no. 4, pp. 483-490, 2016, https://doi.org/10.5028/jatm.v8i4.663.

[18] M. Mohammadi, M. Ahmadian, and M. Vakili, "Development of a conceptual design algorithm for solid rocket motor based on Grain's conceptual design: Methodology," in *22nd International Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran: 2024, https://civilica.com/doc/2058696.

[19] M. Mohammadi, M. Vakili, and M. Ahmadian, "Development of a conceptual design algorithm for solid rocket motor based on Grain's conceptual design: Implementation," in *22nd International Conference of Iranian Aerospace Society, Tehran, Iran,* Tehran, Iran. 2024. https://civilica.com/doc/2058697.

[20] D. Vasilikis and S. A. Karamanos, "Buckling design of confined steel cylinders under external pressure," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 133, no. 1, 2010, https://doi.org/10.1115/1.4002540.

[21] V. I. Feodos′ev, *Selected Problems and Questions in Strength of Materials*. Mir Publishers, 1977, Paper 429,

[22] M. Mohammadi, "Three-dimensional grain regression analysis using the pseudo-two-dimensional cross-section method," in *22 nd International Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 2024, https://civilica.com/doc/2058710.