

بررسی عملکرد سیستم سوخت رسانی پمپ بدون پیستون

مهدی معدن‌دار ارانی^۱، احد عابدینی^۲

سازمان صنایع هوا فضا
ahad_abedini@yahoo.com

چکیده

در موشک‌های سوخت مایع تأمین فشار لازم برای محفظه احتراق مسئله اساسی در طراحی سیستم سوخت رسانی می باشد. فشار ورودی بهینه و ثابت در سیستم سوخت رسانی به شیوه های معمول تغذیه فشاری و توربوپمپ امکان پذیر است. اما در این پژوهش در کنار معرفی سیستمهای فوق، سیستم پمپ بدون پیستون به عنوان راهکار جدید در سوخت رسانی معرفی و مورد مقایسه با سیستمهای معمول قرار گرفته است. این پمپ مشکلات موجود در تغذیه فشاری و توربوپمپی را حل کرده است. این سیستم وزن زیاد سیستم های تغذیه فشاری و همچنین هزینه و پیچیدگی بالای سیستمهای توربوپمپی را ندارد. این سیستم جهت جایگزینی در سیستمهای توربوپمپی پیشنهاد مناسبی می باشد و تراست به وزن قابل ملاحظه ای را ایجاد می کند و نیازی به گازژنراتور، توربین و استحکام بالای مخازن ندارد. در نهایت نتایج در غالب جدول مقایسه ای برای سه نوع سیستم سوخت رسانی آورده شده است که میتواند راهنمای مناسبی در انتخاب نوع سیستم سوخت رسانی باشد.

واژه‌های کلیدی: پمپ بدون پیستون - تغذیه توربوپمپی - تغذیه فشاری

1- مقدمه

فشار ورودی بهینه و ثابت در سیستم سوخت رسانی یکی از پارامترهای مهم در طراحی موشک می باشد. سیستم هایی که در این جهت مورد استفاده قرار می گیرند به 2 دسته کلی تقسیم میشوند که شامل سیستم تغذیه فشاری و سیستم تغذیه توربوپمپی می باشد که در ادامه هر یک مفصل تشریح خواهد شد. سیستم های تغذیه فشاری که تا سال 1939 به طور گسترده مورد استفاده قرار می گرفت دارای قابلیت تأمین فشار محفظه تا سقف 25 بار می باشند. برای رسیدن به برد و تراست بیشتر این فشار جوابگو نبوده و افزایش بیشتر فشار توسط این سیستم منجر به افزایش مضاعف وزن مخازن می شد که مقرون به صرفه نیست. لذا بحث استفاده از سیستم های توربوپمپی مطرح گردید. اولین نوع سیستم توربوپمپی در سال 1934 توسط Goddard تست شد در سال 1950 فشار محفظه با استفاده از سیستم های توربوپمپی تا 63 بار افزایش یافت. اگر چه سیستم های توربوپمپی امروزه به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند ولی این سیستم ها دارای هزینه تولید و پیچیدگی زیادی هستند. به عنوان یکی از جدیدترین ایده های جایگزین که امروزه مطرح می باشد استفاده از سیستم پمپ بدون پیستون می باشد که در اینجا عملکرد آن به طور مفصل مورد بررسی قرار می گیرد [7].

1- کارشناس ارشد مکانیک

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک

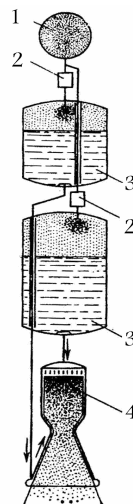
2- سیستم تغذیه فشاری

در این سیستم فشار محفظه احتراق توسط باک تأمین می شود به طوری که در سیستم تغذیه فشاری همواره فشار باک های سوخت و اکسید بیش از فشار محفظه احتراق است. شکل عمومی این سیستم در شکل 1 مشاهده می گردد. تحت فشار بودن باک دو مشکل اساسی به دنبال دارد:

- ا- از آنجایی که نمی توان فشار باک ها را از حد معینی بالاتر برد فشار محفظه احتراق محدود می شود و از مرز مشخصی بزرگ تر نخواهد گردید. این مسأله از یک سو سطح تراست قابل دستیابی در موتور را کاهش می دهد و از سوی دیگر با توجه به لزوم انتخاب فشار پایین تر برای محفظه، طراحی محفظه با ابعاد بزرگتر را به دنبال خواهد داشت.
- ب- بالا بودن سطح فشار باک ها ضخامت دیواره و به تبع آن جرم باک ها را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. مسائل فوق گستره کاربرد سیستم های تغذیه فشاری را به سیستم های پیشرانی که مقادیر تراست موتور آنها نسبتاً کوچک هستند منحصر می کند.

تدابیری که برای بهبود عملکرد این سیستم ها اندیشیده شده عبارت است از:

- ا- استفاده از مؤلفه های سوخت و اکسید کننده ای که دارای چگالی بالایی هستند.
- ب- ساختن باک از مواد کامپوزیتی دارای استحکام بالا.

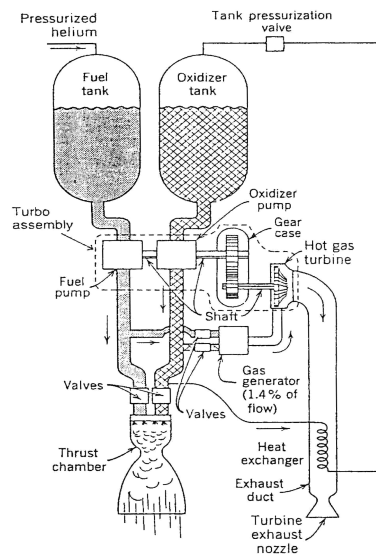


شکل 1) سیستم تغذیه فشاری

1- مخزن هوای فشرده 2- فشار شکن ها 3- مخازن سوخت و اکسید 4- محفظه

3- سیستم تغذیه توربوپمپی

در این سیستم ها فشار محفظه توسط پمپ ها تأمین می شود. باک ها تنها به منظور تأمین حداقل فشار ورودی پمپ ها و دوری کردن از محدوده ی کواپتاسیون آنها تحت یک فشار جزئی قرار می گیرند. بنابراین در این حالت از سیستم دمش باک ها تنها به عنوان یک ساختار کمکی استفاده می شود و ماموریت اصلی تغذیه به عهده پمپ ها است. شکل عمومی و ساده شده چنین سیستمی در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2) سیستم تغذیه توربوپمپی

در سیستم پیشران نوع توربوپمپی معمولاً فشار باک ها از 0/4 MP فراتر نمی رود. طبیعتاً ضخامت دیواره چنین باک هایی کم است و وزن سازه باک نسبت به تغذیه فشاری کمتر خواهد شد. در این حالت با توجه به این که فشار باک ها مستقل از فشار محفظه احتراق است فشار محفظه احتراق را می توان بزرگ انتخاب کرد. بالا بودن سطح فشار محفظه موجب کاهش شدید ابعاد محفظه می گردد؛ به طوری که سیستم پیشران توربوپمپی نسبت به سیستم های تغذیه فشاری از جرم ویژه بسیار کمتری برخوردارند. از سوی دیگر بالا بودن سطح فشار محفظه در سیستم توربوپمپی افزایش ایمپالس ویژه موتور را به دنبال دارد اما به دلیل وجود مجموعه توربوپمپ در سیستم توربوپمپی، مدار و ساختار کلی آنها پیچیده تر می شود. این امر باعث می شود جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر در این سیستم ها زمان و امکانات زیادی صرف گردد. بر همین اساس قیمت تمام شده طراحی و تولید یک سیستم توربوپمپی و همچنین قابلیت اطمینان آن بالا است. [2]

4- سیستم تغذیه پمپ بدون پیستون

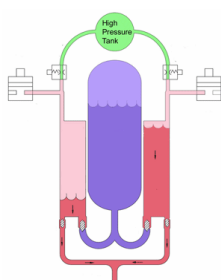
توربوپمپ ها در حال حاضر به طور گسترده در صنایع هوا-فضا مورد استفاده قرار می گیرد. پمپ بدون پیستون به عنوان راهکار جدید در سیستم سوخت رسانی بسیار ساده تر و ارزانتر از سیستم توربوپمپی می باشد. کلاً ساختار پمپ بسیار ساده می باشد. در این سیستم ها به جای اینکه کل مخزن مانند سیستم های تغذیه فشاری تحت فشار 20-70 bar قرار گیرد مخزن اصلی فقط تحت فشار 1-4 bar قرار گرفته و به محفظه های جانبی پمپ تخلیه می گردد و سپس محفظه های جانبی پمپ تحت فشار قرار می گیرد تا پیشران تحت فشار به موتور تحویل گردد. موقعی که یک محفظه جانبی پمپ در حل پر شدن می باشد از یک محفظه جانبی دیگر کمکی برای تأمین فشار پیشران استفاده می گردد. این نوع پمپ که مد های خرابی و خیمی ندارد می تواند برای مینیمم کردن اندازه سازه در مخازن نصب گردد و همچنین نیازی به استفاده از مواد فرایندهای گران قیمت ندارد. با انتخاب درست موادی که پمپ از آن ساخته می شود قابلیت سازگاری با انواع پیشران های موشک را دارا می باشد. پمپ می تواند به صورت آبی تا زمانیکه مخزن کاملاً تخلیه گردد شروع به کار کند بدون اینکه نیازی به زمان راه اندازی داشته باشد. این پمپ تحت تأثیر کلویتاسیون حتی در سرعت های بالا قرار نمی گیرد. سادگی و هزینه کم ساخت پمپ، این اجازه را می دهد که بتوان در سیستم های سه پیشرانه نیز مورد استفاده قرار داد. [3]

5- بررسی عملکرد پمپ بدون پیستون

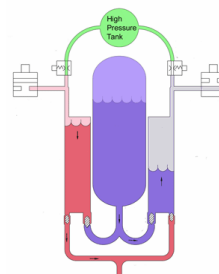
در این طراحی از دو محفظه برای پمپ کردن استفاده می شود که هر کدام به صورت متناوب پر شده و فشار گذاری می شود. بدین ترتیب که در ابتدا هر دو محفظه پر می باشد، یک محفظه فشار گذاری می شود و سیال از این محفظه به موتور تحویل داده می شود، هنگامی که سطح سطح سیال در این محفظه پایین می آید محفظه دیگر فشار گذاری می شود، در یک بازه زمانی کوتاه، سیال از دو طرف تأمین می شود تا اینکه جریان محفظه دیگر تثبیت شود سپس گاز های موجود در محفظه اول تقریباً تخلیه شده و دوباره پر می گردد در نهایت این سیکل تکرار می شود. فرایند فوق منجر به یک دبی و فشار دائمی می گردد. یک مدل آزمایشگاهی از آن در شکل 3 و اصول عملکردی پمپ در شکل 4 نشان داده شده است [1]



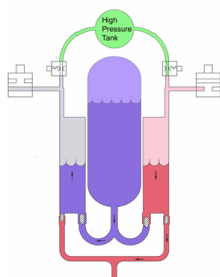
شکل 3) مدل آزمایشگاهی پمپ بدون پیستون



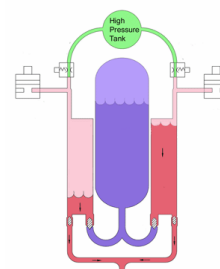
انتهای مرحله اول: محفظه سمت چپ تقریباً خالی
محفظه سمت راست در حال پر شدن



مرحله اول: محفظه سمت چپ در حال تخلیه
محفظه سمت راست تقریباً خالی



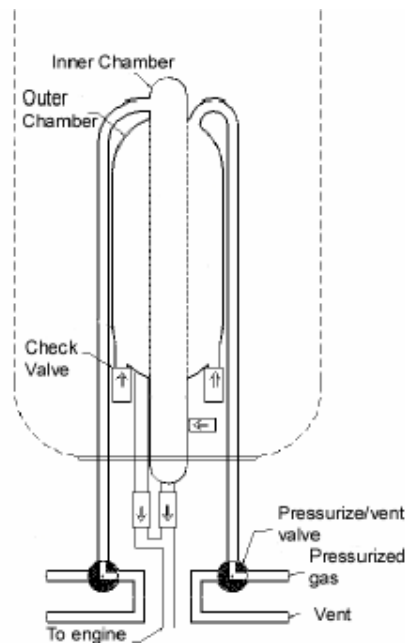
مرحله سوم: محفظه چپ در حال پر شدن
محفظه سمت راست در حال خالی شدن



مرحله دوم: محفظه چپ در حال خالی شدن
محفظه سمت راست نیز در حال خالی شدن

شکل 4) اصول عملکردی پمپ بدون پیستون

طرح بهینه پمپ در شکل 5 نشان داده شده است. به جای دو محفظه پمپ مشابه، از یک محفظه اصلی که در بیشتر اوقات تأمین کننده کننده پیشران می باشد و یک محفظه کمکی که در بقیه زمان ها پیشران را تأمین می کند استفاده می کند. محفظه اصلی در داخل مخزن جاسازی شده و از طریق یک سری شیرهای یک طرفه به سرعت پر می شود و بدین ترتیب می توان اندازه محفظه کمکی را تا مرز یک چهارم محفظه اصلی کوچک کرد. با توجه به این که طرح بهینه از یک محفظه کمکی و یک محفظه اصلی به جای دو محفظه مشابه استفاده می کند، دارای وزن کمتری نسبت به طرح اولیه می باشد.



شکل 5 طرح بهینه پمپ

6- استخراج مدل جرمی

پس از شناخت ساختار سیستم سوخت رسانی پمپ بدون پیستون اکنون جهت دسترسی به میزان کاهش جرم ناشی از این مدل در مقایسه با مدل تغذیه فشاری به استخراج مدل جرمی می پردازیم:

مدل پمپ بدون پیستون همچنان از شکل های بالا مشخص است شامل محفظه و شیرهای پنوماتیکی می باشد. چنانچه مخزن را به صورت کروی در نظر بگیریم وزن مخزن تحت فشار را می توان به صورت تابعی از حجم، فشار و مقاومت ویژه ماده سازنده آن بدست آورد. با توجه به اینکه محفظه ها پر و خالی می شوند حجم مورد نیاز محفظه اصلی پمپ طبق رابطه (1) بدست می آید:

$$V_c = QT_{cycle} \quad (1)$$

به دست می آید که در آن Q دبی پیشران و T_{cycle} زمان سیکل پمپ می باشد. محاسباتی که در زیر می آید برای محفظه های کروی می باشد. محفظه های استوانه ای سنگین تر هستند.

قطر محفظه کروی با استفاده از رابطه زیر داده می شود:

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{6V_c}{\pi}} \quad (2)$$

ضخامت مورد نیاز برای مخزن کروی با توجه به بیشترین ماکزیمم قابل تحمل با استفاده از رابطه Roark داده می شود:

$$t = \frac{P_f D_c}{4\sigma_c} \quad (3)$$

که در آن فشار سوخت و σ_c تنش مجاز می باشد. جرم محفظه M_c با استفاده از ضخامت t با استفاده از رابطه 4:

$$M_c = t\pi D_c^2 \rho_c \quad (4)$$

یا

$$M_c = \frac{P_f}{4\sigma_c} \pi D_c^3 \rho_c \quad (5)$$

به خاطر اینکه سائز محفظه تابعی از دبی سیال می باشد می توانیم جرم محفظه را به صورت تابعی از دبی و به صورت زیر به دست آوریم:

$$M_c = \frac{P_f}{4\sigma_c} \pi \left(\frac{6QT_{cycle}}{\pi} \right) \rho \quad (6)$$

یا

$$M_c = 1.5 \frac{P_f}{\sigma_c} QT_{cycle} \rho \quad (7)$$

به منظور محاسبه نسبت تراست به وزن نیاز به تعیین پمپ مورد نیاز برای پیشران و تراست داده شده هستیم. با انجام روند مشابهی و با در نظر گرفتن سیستم توربوپمپی مدل جرمی برای سیستم توربوپمپی با معادله زیر مشخص می گردد [8]

$$M_p = a.n_p^b.N^c.H_p^d \quad (8)$$

که در آن:

M_p : وزن پمپ

a, b, c, d : ضرایب تجربی که با توجه به تکنولوژی ساختی تعیین می گردد

n_p : دبی عبوری از پمپ

H_p : فشار تخلیه پمپ

N : دور پمپ

چنانچه رابطه 7 با 8 مقایسه گردد می توان همخوانی در روابط را مشاهده نمود و این مسئله صحت مدل پیشنهادی را تایید می کند.

تراست T با استفاده از معادله مومنتوم برای حالت انبساط ایدا آل با استفاده از رابطه (9) داده می شود.

$$T = Q\rho_f gI_{sp} \quad (9)$$

که در آن ρ_f چگالی میانگین پیشران، g شتاب گرانش، I_{sp} ایمپالس ویژه پیشران تحت فشار می باشد.

با احتساب جرم شیر آلات و سیستم بهینه می توان تراست به وزن پمپ سیستم بدون پیستون را به صورت زیر مدل نمود:

$$\frac{T}{W} = \frac{0.43\rho_f gI_{sp}}{P_f \frac{T_{cycle}}{\sigma_c} \rho_c} \quad (10)$$

این معادله برای سیستم های تک پیشران یا چند پیشران قابل استفاده می باشد.

سیستم تغذیه فشاری به دلیل مخازن فشار بالا دارای وزن نسبتاً زیاد است درحالیکه درسیستمهای پمپی مخازن تحت فشار پایین بوده و دارای وزن کمتری می باشند. اگر فرض کنید که هر دو سیستم از گاز فشار بالای مشابه استفاده می کنند. وزن کاهش یافته سیستم پمپی می تواند با استفاده از فشار سوخت و زمان سوختن محاسبه شود. توجه کنید که پمپ شامل محفظه هایی است همان فشار مخازن سیستم های تغذیه فشاری را تحمل می کنند. اما پمپ بسیار کوچکتر و سبکتر از

سیستم تغذیه فشاری می باشد در حالی که حجم مخازن یکی می باشد. وزن مخازن فشار متناسب با حجم و فشار داخل آن می باشد. فشار بالاتر نیاز به ضخامت بیشتر و دیواره های سنگین دارد.
مسلم است که:

- حجم محفظه پمپ برابر با دبی ضربدر زمان یک سیکل
- حجم مخزن برابر با دبی ضربدر زمان سوختن

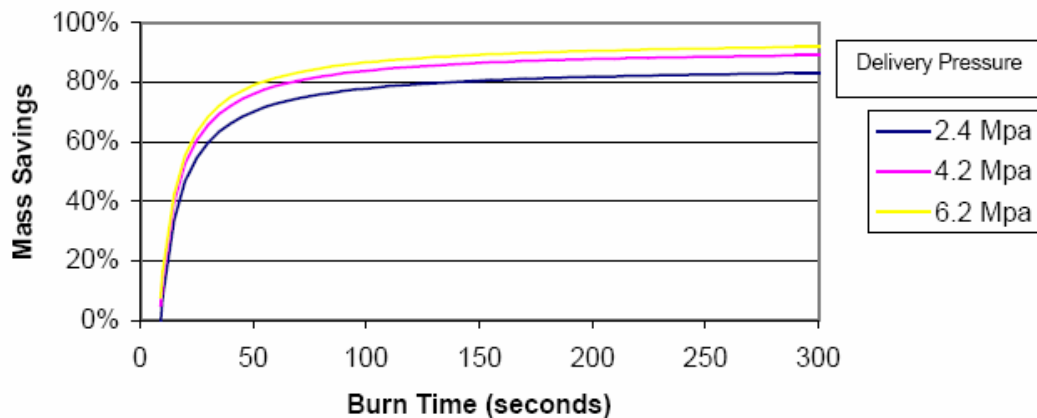
بنابراین نسبت حجم محفظه (جرم) پمپ به حجم مخزن برابر با زمان سیکل به زمان سوختن می باشد. لذا می توانیم جرم پمپ را برای یک حجم و فشار داده به صورت تابعی از جرم مخزن برای یک سیستم تغذیه فشاری معادل به دست بیاوریم.

علاوه بر این وزن مخزن با فشار سوخت متناسب است بنابراین زمانیکه یک سیستم تغذیه فشار را با پمپ جایگزین می کنیم جرم مخزن پمپ برابر با فشار سوخت تقسیم بر فشار مخزن ضربدر جرم مخزن فشار .
بنابراین می توانیم نسبت وزن سیستم تغذیه پمپی به وزن سیستم تغذیه فشار را به صورت زیر حساب کنیم:

$$\frac{M_{Pumpsys}}{M_{Pressure_fed}} = 1.56 \frac{T_{cycle}}{T_{burn}} + \frac{P_{tank}}{P_{fuel}} \quad (11)$$

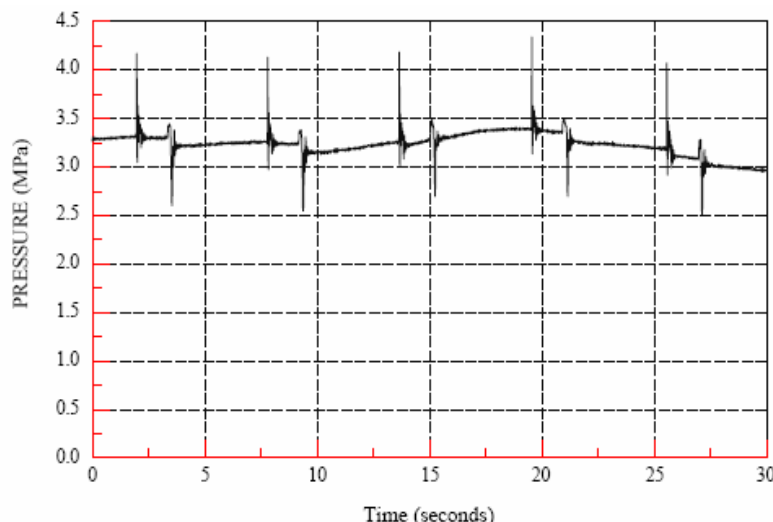
7- نتایج

در نمودار شکل 6 میزان جرم کاهش یافته پمپ بدون پیستونی نسبت به سیستم تغذیه فشاری در ازای زمان سوختن برای دو سیستم مشابه خاص نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان سوختن (افزایش زمان پرواز و افزایش میزان پیشران شارژی در مخازن) سیستم پمپ بدون پیستون توجه وزنی بسیار خوبی پیدا می کند.



شکل 6) میزان جرم کاهش یافته پمپ بدون پیستونی نسبت به سیستم تغذیه فشاری [4]

در این مدل از آب بادی 1.2 کیلوگرم بر ثانیه و فشار 3.2 مگاپاسکال استفاده شده است. زمان سیکل 6 ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنانکه از شکل 7 مشخص است از لحاظ پایداری در دبی که مسئله مهمی در سوخت رسانی میباشد نیز قابل اطمینان بوده و لذا فشار محفظه احتراق نیز پایدار خواهد بود.



شکل 7) فشار خروجی پمپ بدون پیستون [4]

8- جمع بندی

بررسی های صورت گرفته در این پژوهش ما را به جدول انتخاب نوع سیستم سوخت رسانی - جدول 1- رهنمون میسازد . این بررسی ها با مطالعه کاربری هر سه نوع سیستم تغذیه فشاری، توربوپمپی و پمپ بدون پیستون صورت گرفته است . پمپ بدون پیستون نشان داده است که جهت جایگزینی در سیستم های توربوپمپی پیشنهاد مناسبی می باشد و تراست به وزن قابل ملاحظه ای را ایجاد می نماید. پمپ بدون پیستون 10 برابر ارزاتر از سیستم توربوپمپی بوده، بدون اینکه نیازی به گاز ژنراتور و توربین داشته باشد باعث کاهش فوق العاده وزن سازه خشک می شود که این نیز تأثیر مستقیمی در افزایش برد و سرعت نهایی موشک خواهد داشت. همچنین پمپ بدون پیستون قابلیت اطمینان بالاتری نیز نسبت به سیستم های توربوپمپی دارد بدون اینکه مشکلاتی از قبیل خرابی بلبرینگ، رینگ و ارتعاش داشته باشد. بهینه سازی بیشتر این سیستم منجر به کاهش زمان سیکل و نسبت تراست به وزن بهتری شده است. [5,6]

نتایج مطالب بررسی شده در بالا برای هر سه نوع سیستم توسط مولفین به صورت خلاصه شده در زیر آمده است که میتواند راهنمای مناسبی در انتخاب نوع سیستم سوخت رسانی موشکهای سوخت مایع با توجه به برد مورد نیاز و تکنولوژی ساخت باشد.

جدول 1) مقایسه انواع سیستم ها

مشخصه / نوع سیستم	برد موشک	طراحی سازه ای	تراست به وزن	هزینه سیستم	پیچیدگی سیستم	فشار مورد نیاز مخازن	وزن مخازن	وزن سیستم تغذیه
سیستم توربوپمپی	1	***	2	1	1	3	3	1
سیستم پمپ بدون پیستون	2	**	1	2	2	3	3	2
سیستم تغذیه فشاری	3	*	3	3	3	1	1	2

1- خیلی زیاد 2- زیاد 3- کم
*** - خیلی مشکل ** - مشکل * - ساده

مراجع

- [1] http://www.llnl.gov/etr/pdfs/07_94.2.pdf
- [2] Godwin, Felix Exploring the Solar System Plenum press 1960
- [3] Sobey, Albert J. US patent 3,213,804
- [4] <http://www.rocketfuelpump.com>
- [5] Roark's formulas for stress and strain Warren C. Young McGraw-Hill, c1989
- [6] Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines (Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 147); 1992 Dieter K. Huzel, David H. Huang
- [7] George P. Sutton, History of Liquid Propellant Rocket Engines in the United States, Journal of propulsion and power, Vol19.No6,2003
- [8] Xiao-yan Tong, Generic Optimization of system parameters for Liquid rocket engine with gas generator cycle, AIAA2005-3743,