



طراحی بهینه جانمایی برای اجزای یک سامانه کنترلی فضایی با استفاده از روش بهینه‌سازی گرایانی

مازیار شفافائی^{1*}، پرویز محمدزاده²، عباس الکاکی بهجتی³، سعید عباسی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
 2- استادیار، مهندسی بهینه‌سازی، دانشگاه تهران، تهران
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران
 * mshafae@ut.ac.ir.143951374

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 05 شهریور 1393
 پذیرش: 23 شهریور 1393
 ارائه در سایت: 17 آبان 1393

کلید واژگان:

سامانه کنترلی فضایی
 مرکز جرم
 بهینه‌سازی
 روش‌های گرایانی
 الگوریتم برنامه‌ریزی مرتبه دوم متوالی

چکیده

در این مقاله مدل‌سازی جانمایی اجزا و بهینه‌سازی آن بررسی می‌شود. یک سامانه کنترلی فضایی به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شده است. اکثر کارهای تحقیقاتی انجام شده در این حوزه، الگوریتم‌های طراحی را به‌صورت اجزای ثابت در طول زمان در نظر گرفته‌اند. در این مقاله رویکرد جدیدی بر مبنای جرم متغیر اجزا مطرح شده است که در آن تابع هدف کمینه کردن دامنه تغییرات مرکز جرم در مدت کارکرد سامانه می‌باشد. برای انجام جانمایی از دو روش تعامل انسان و کامپیوتر و روش مبتنی بر بهینه‌سازی استفاده شده است. در فاز مدل‌سازی، مشخصات تمامی اجزای سامانه به‌دست آمده‌اند. سپس چیدمان‌ها و جانمایی‌های متفاوتی برای اجزا در نظر گرفته شده است. برای هر مدل تغییرات مرکز جرم در فضای سه‌بعدی به‌دست آمده است. سپس مناسب‌ترین جانمایی از لحاظ دامنه تغییرات مرکز جرم طراحی شده است. در گام بعدی، مدل ریاضی سامانه مورد مطالعه به‌دست آمده است. مدل ریاضی دربردارنده تابع هدف، قیود، متغیرها و پارامترها می‌باشد. این مدل ریاضی اصلی‌ترین نقش را در انتخاب روش بهینه‌سازی ایفا می‌کند. بر مبنای مدل ریاضی و فضای طراحی، روش بهینه‌سازی مبتنی بر محاسبه گرادیان تابع هدف استفاده شده است. با پیاده‌سازی این الگوریتم، جانمایی بهینه ارائه شده و نتایج روش بهینه‌سازی و روش تعامل انسان و کامپیوتر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج بیانگر این واقعیت است که تکنیک بهینه‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند نتایج مسئله جانمایی را بهبود بخشد. در پایان نیز روش مورد استفاده و نتایج به‌دست آمده در این مقاله با نتایج ارائه شده در مقالات مشابه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و اعتبار سنجی شده‌اند. مقایسه نتایج نشان‌دهنده کارایی بالاتر و دقت بیشتر روش پیشنهادی در این مقاله در حل مسئله جانمایی می‌باشد.

Optimal layout design for a space control system modules using a gradient-based method

Maziar Shafaei^{1*}, Parviz Mohammadzadeh¹, Abbas Elkaie Behjatie¹, Saied Abbasi¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 143951374, Tehran, Iran, mshafae@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 27 August 2014
 Accepted 14 September 2014
 Available Online 08 November 2014

Keywords:
 Space control system
 Mass center
 Optimization
 Gradient methods
 SQP Algorithm

ABSTRACT

This paper focuses on layout modeling and optimization for a space control system. Majority of recent research works consider design components as constant elements over time. A new approach based on variable mass components is proposed in this paper for which the objective function is to minimize mass center variation (MCV) range over time. The proposed approach consists of Human-computer interaction (HCI) and Optimization methods to perform the layout. In the modeling phase, using defined inputs, all system components are determined. Then different configurations and layouts for subsystems are modeled and MCV over time in three dimensional space is calculated for each model. Following this, according to permissible range for mass center changes, the most appropriate layout in terms of MCV amplitude is achieved. In the next step, mathematical model of achieved layout is defined. Mathematical model includes objective function, constraints, variables and parameters, play an important role in choosing appropriate optimization method. Based on mathematical model and design space, a gradient optimization method is selected. By applying this algorithm, optimum layout is proposed. Results of optimization and HCI design are compared. Comparison of the results shows that the optimization technique can significantly improve the results of the layout problem. At last, the results have analyzed and validated with similar research works. The results comparison show more efficiency and accuracy for the proposed method.

1- مقدمه

کنترل وضعیت و موقعیت در ماهواره‌ها، سامانه‌های حامل و سفینه‌های فضایی می‌پردازد. این سامانه از اغتشاشات رول، یاو و پیچ با ایجاد گشتاور یک سامانه کنترلی فضایی با استفاده از تراسترها (موتورهای کم‌پیشران) به

Please cite this article using:

M. Shafaei, P. Mohammadzadeh, A. Elkaie Behjatie, S. Abbasi, Optimal layout design for a space control system modules using a gradient-based method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 272-282, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همکاران [12]، با استفاده از روش‌های گرادینانی به کمینه کردن چگالی جانمایی پرداخته‌اند. آن‌ها با اینکار به مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تجربی و بهینه‌سازی پرداخته‌اند که سرعت همگرایی و دقت الگوریتم بهینه‌سازی بسیار قابل توجه بوده است [14].

در تمامی این پژوهش‌ها، اجزا به عنوان المان‌های ثابت در نظر گرفته شده‌اند، اما در کاربردهای فضایی، جرم برخی از المان‌ها در طول زمان در حال تغییر است. در این حالت، مسئله جانمایی تبدیل به یک مسئله پیچیده طراحی خواهد شد و فضای طراحی مبدل به یک فضای چند بعدی با پارامترهای متغیر خواهد شد که نیاز به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی را کاملاً محسوس کرده است.

2- شرح مسئله

در این مقاله با در نظر گرفتن تغییرات مرکز جرم، جانمایی اجزا انجام شده است و با استفاده از روش برنامه‌ریزی متوالی درجه دوم⁴، جانمایی بهینه ارائه شده است. این روش برای اولین بار توسط ویلسون [15] ارائه شد. روش برنامه‌ریزی متوالی درجه دوم یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در حل مسائل مهندسی مقید می‌باشد.

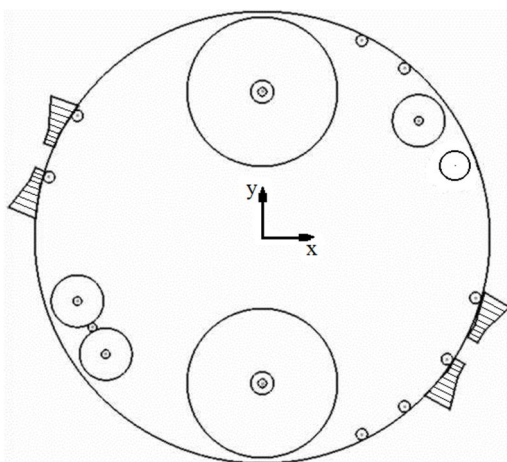
برای کاهش پیچیدگی‌های مسئله، تمام المان‌ها می‌توانند به صورت دایره‌ای (مسئله جانمایی دایره وزن‌دار⁵) یا به صورت مستطیلی (مسئله جانمایی مستطیل وزن‌دار⁶) تعریف شوند [13]. روش‌های جستجوی ابتکاری نتایج خوبی را در مسئله دایره وزن‌دار از خود نشان می‌دهند اما زمانی که در مسئله مستطیل وزن‌دار و یا مسائل پیچیده‌تر در فضای سه‌بعدی از این روش‌ها استفاده می‌شود، عملکرد آن‌ها به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [5,6]. این امر ناشی از این حقیقت می‌باشد که در مسئله مستطیل وزن‌دار، جانمایی مناسب نه تنها به محل قرارگیری هر جزء وابسته است، بلکه به موقعیت زاویه‌ای آن‌ها نیز مربوط است. در مسئله پیش رو با توجه به نوع اجزای موجود در سامانه، می‌توان تمامی آن‌ها را به صورت دایره‌ای فرض کرد. علاوه بر نوع و شکل المان‌های موجود، قیدهای فضای طراحی نیز از

اهمیت بالایی برخوردار هستند. این قیدها عبارت‌اند از:

(1) فضای داخلی در دسترس سیستم

(2) عدم تداخل بین المان‌ها

قیدهای ذکر شده همگی غیرخطی می‌باشند.



شکل 1 نمای دوبعدی از اجزای جانمایی در یک سامانه کنترلی فضایی

جولوگیری می‌کند. این اغتشاشات ناشی از فاکتورهای داخلی و محیطی می‌باشند و سامانه را از وضعیت مطلوب آن خارج می‌کنند. برای کنترل یک سامانه فضایی، وضعیت و موقعیت آن باید به صورت پیوسته به الگوریتم‌های کنترلی ارسال شود. این اطلاعات به محرک‌ها برای کنترل میزان نیروهای پیش‌رانشی و گشتاورها ارسال می‌شود. یکی از پارامترهای اصلی تأثیرگذار در تغییر وضعیت سامانه، تغییرات مرکز جرم می‌باشد که در نتیجه مصرف پیش‌رانها به وجود می‌آید. با انتخاب چیدمان مناسب و انجام جانمایی بهینه برای اجزای سامانه، می‌توان میزان این تغییرات را کمینه کرد یا به سمت مدنظر سوق داد.

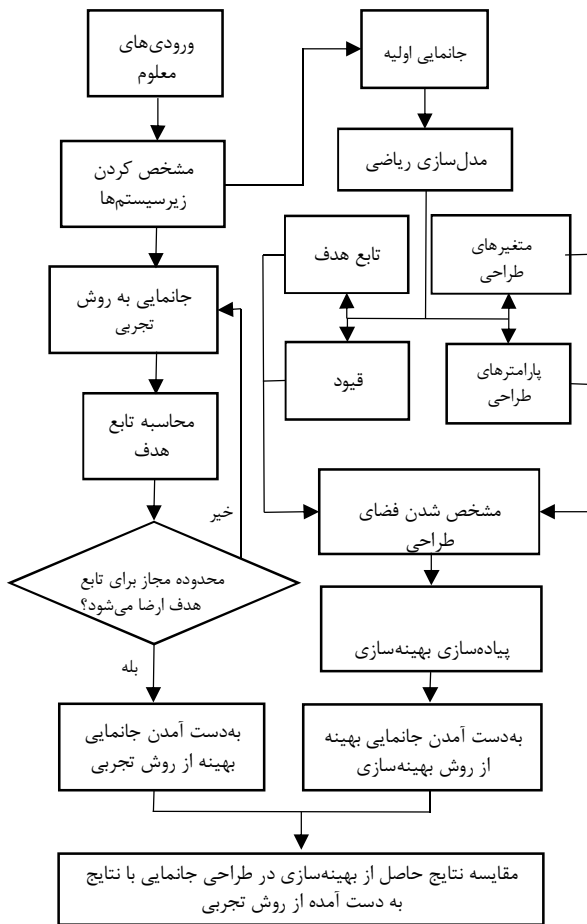
امروزه طراحی جانمایی به عنوان یک مسئله فراگیر در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی مطرح می‌باشد. برای نمونه می‌توان به مسئله جانمایی در مزرعه‌های بادی و یا کارخانه‌های صنعتی اشاره کرد. در مزرعه‌های بادی، جانمایی بهینه توربین‌های بادی در فضای مزرعه به منظور کمینه کردن اثر ویک¹ و افزایش تولید توان، مطرح می‌باشد [1]. کارخانه‌ها نیز با هدف کاهش هزینه و زمان تولید و مونتاژ قطعات با مسئله جانمایی درگیر می‌باشند [2]. در حوزه‌های مهندسی مکانیک و هوافضا نیز مسئله جانمایی در بخش‌های مختلف مورد توجه می‌باشد. به عنوان مثال صفحات فلزی به کار رفته در قطعات هوافضایی و صنایع اتمبیل‌سازی بسیار پرکاربرد می‌باشند. قابلیت تغییر شکل‌پذیری این صفحات سبب خطاهای ابعادی جدی در کاربردهای عملی خواهد شد. انتخاب محل بهینه قیود هندسی و فیکسچرها در راستای ایجاد حمایت لازم و جولوگیری از تغییر شکل‌های ناخواسته بسیار مؤثر خواهد بود [3].

در مسئله بهینه‌سازی جانمایی²، بازده طراحی بر مبنای جانمایی المان‌ها مطرح می‌باشد (در فضای دو بعدی و سه‌بعدی). مسئله بهینه‌سازی جانمایی برای اولین بار به منظور کاهش هزینه و همچنین بهبود عملکرد در سامانه‌های حامل و ماهواره‌ها توسط تنگ و همکاران [4] مطرح شد. زیرا طراحی و جانمایی از تکنیک‌های کلیدی در بهبود عملکرد سامانه می‌باشد. در واقع جانمایی اجزای سامانه موقعیت مرکز جرم و میزان تغییرات آنرا مشخص می‌کند. به همین منظور در این مقاله به بحث نحوه انجام مناسب‌ترین جانمایی می‌پردازیم، به طوری که موقعیت مرکز جرم در ابتدای کارکرد سامانه و همچنین موقعیت لحظه‌ای مرکز جرم در طول انجام مأموریت تا حد ممکن بر مرکز تعادل سامانه نزدیک‌تر باشد. برای کمینه کردن تغییرات موقعیت مرکز جرم، روش‌های سنتی مانند تعامل انسان و کامپیوتر³ (روش تجربی) و همچنین روش‌های نوینی مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی موجود می‌باشند.

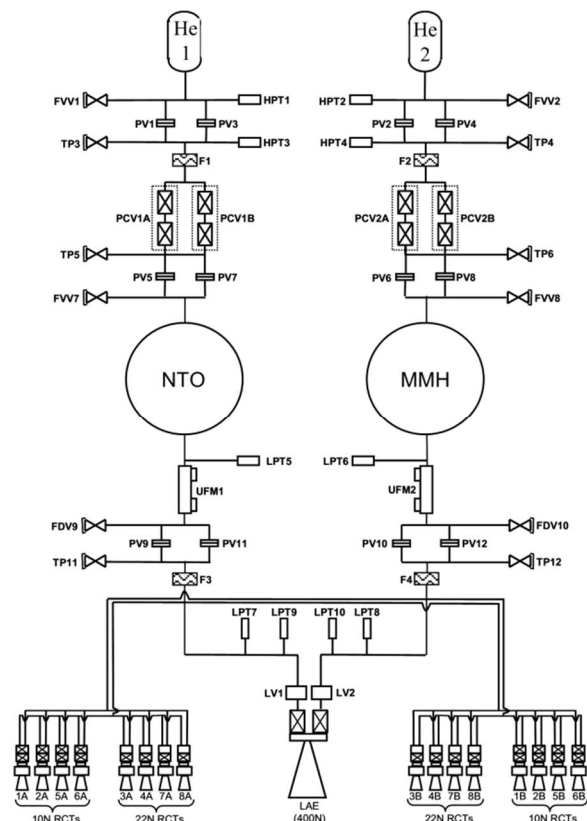
طرح جانمایی کلی برای یک سامانه توسط کیگن و همکارانش مطرح شده است که در آن مباحثی همچون کمینه کردن فاصله مرکز ثقل نسبت به مبدأ مختصات مرجع، هزینه چیدمان، چگالی جانمایی، هزینه مسیریابی و بهبود عملکرد مطرح می‌باشد [5]. یکی از بارزترین زمینه‌های موجود در طراحی جانمایی، محاسبه مرکز ثقل می‌باشد. تمرکز در این بحث بیش‌تر بر طراحی جانمایی در ماهواره‌ها بوده است. اکثر مقاله‌های منتشر شده در این حوزه، با نگاه افزایش بالانس و پایداری [4-10]، رفع قیدهای کنترل وضعیت مانند ممان اینرسی [11,12]، کاهش شعاع فضای جانمایی و کاهش ناپایداری با کمک روش‌های چند موضوعی [8,9,13]، به مسئله جانمایی پرداخته‌اند. در مقاله‌های اخیر، روش‌های جستجوی ابتکاری برای بهینه کردن تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقابل الگوریتم‌های ابتکاری، وانگ و

4- Sequential Quadratic Programming (SQP)
5- Weighted-Circle Layout Problem (WCL)
6- Weighted-Rectangle Layout Problem (WRL)

1- Wake
2- Layout Optimization Problem (LOP)
3- Human and Computer Interaction



شکل 2 فرآیند جانمایی با روش‌های تجربی و بهینه‌سازی



شکل 3 یک نمونه مدار پنوموهیدرولیکی برای سامانه پیش‌رانشی دو مؤلفه‌ای [17]

شکل 1 نمایانگر یک نمای دو بعدی از اجزای جانمایی می‌باشد. در این شکل بزرگ‌ترین دایره نمایانگر مرزهای فضای طراحی می‌باشد. مبدأ مختصات مرجع منطبق بر مرکز هندسی می‌باشد. دو دایره بزرگ بعدی، مخازن نگهداری پیش‌رانش‌ها هستند و سه دایره کوچک‌تر نشان‌دهنده مخازن نگهداری ماده تأمین‌کننده فشار در مدار تغذیه می‌باشند. در نهایت کوچک‌ترین دایره معرف رگلاتور بوده که سنگین‌ترین جز پس از مخازن و سیال موجود در آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این اجزایی که خارج از فضای طراحی قرار گرفته‌اند نشان‌دهنده تراست‌ها می‌باشند.

3- طراحی جانمایی

روند حل مسئله جانمایی در شکل 2 نشان داده شده است. طراحی یک مدل مناسب بر مبنای رویکردهای تجربی و روش‌های تئوری در مهندسی گام اصلی در حل مسئله و به‌دست آوردن پاسخ بهینه می‌باشد. به منظور تعریف پیکره‌بندی سامانه، مشخصات اولیه سامانه مانند تعداد مخازن، حجم هر یک، نوع اتصالات و تعداد آن‌ها و غیره باید مشخص شوند. تمامی نیازمندی‌های عملکردی سیستم در مدت عمر کاری سامانه، برای به‌دست آوردن مشخصات اولیه سامانه باید در نظر گرفته شوند.

در این مسئله ورودی‌های معلوم شامل تراست و ایمپالس هر تراستر، نسبت دبی جرم پیش‌رانش‌ها، زمان کارکرد موتور و ضریب ایمنی برای فشار قابل تحمل در مخازن، می‌باشند. با مقادیر معلوم تراست و ایمپالس، دبی جرمی کل با استفاده از معادلات (1) و (2) به‌دست خواهد آمد [16]:

$$I_s = \frac{T}{\dot{m}_t} \quad (1)$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{ox} + \dot{m}_f \quad (2)$$

در معادلات 1 و 2 به ترتیب بیانگر ایمپالس، تراست، دبی جرمی کل و دبی جرم پیش‌رانش‌ها می‌باشند. فشار و حجم مورد نیاز برای بالشتک گاز دمشی به کمک مقادیر معلوم فشار محفظه احتراق و افت فشار در مسیر مخازن تا موتور محاسبه می‌شوند. پس از مشخص شدن جرم و حجم مورد نیاز برای پیش‌رانش‌ها و مخازن فشارگذاری، جرم و ابعاد المان‌های مدار پنوموهیدرولیکی شامل شیرهای کنترلی، رگلاتورها، اتصالات و تراست‌ها باید نهایی شود [17,18].

ترتیب قرارگیری المان‌های مدار پنوموهیدرولیکی همانند شکل 3 می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مخازن پیش‌رانش‌ها به‌صورت کروی در نظر گرفته شده‌اند. اما با توجه به محدودیت‌های هندسی و عملکردی موجود، مخازن استوانه‌ای یا چنبر نیز از گزینه‌های پیش روی طراحان می‌باشند.

3-1- محاسبه مرکز جرم

زیرسیستم‌ها به دو بخش تقسیم‌بندی شده‌اند. بخش اول اجزایی می‌باشند که با گذشت زمان در حال تغییر هستند و بخش دوم اجزای ثابت می‌باشند. برای اجزای ثابت، مرکز جرم با استفاده از روش‌های تجربی و یا مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزارهای طراحی به‌دست می‌آید. اما برای المان‌های متغیر با زمان، محاسبات تحلیلی برای به‌دست آوردن مرکز جرم مورد نیاز است. روابط مرکز جرم برای هر جز مطابق با شکل آن‌ها (کروی، استوانه‌ای و چنبر) متفاوت خواهد بود.

یک مخزن کروی در شکل 4-الف نمایش داده شده است. ارتفاع اولیه سیال در z_1 قرار داشته و حجم فوقانی آن به وسیله بالشتک گاز دمشی اشغال شده است.

$$Z_{cg} = \frac{R^2 \frac{Z^2}{2} - \frac{Z^4}{4} - \frac{R^4}{4}}{R^2 Z - \frac{Z^3}{3} + \frac{2}{3} R^3} \quad (6)$$

شکل 5 نشانگر یک مخزن استوانه‌ای می‌باشد. برای قسمت‌های کروی فوقانی و تحتانی، محاسبات مرکز جرم همانند محاسبات انجام شده برای مخازن کروی می‌باشد. تنها تفاوت در بازه انتگرال‌گیری خواهد بود. برای بخش میانی استوانه‌ای شکل مخزن، المان انتگرال‌گیری یک دیسک با شعاع ثابت r و ضخامت dz می‌باشد. با انتگرال‌گیری و بسط المان مذکور در طول فضای اشغال شده به وسیله سیال، تغییرات ارتفاع نسبت به زمان به دست خواهد آمد. روند فرمول‌سازی برای یک مخزن استوانه‌ای همانند مخازن کروی است که در سه بخش انجام می‌شود:

بخش اول: فرمول‌سازی مسئله برای نیم‌کره فوقانی (روابط (7) تا (9))

$$\dot{V} t = \pi \left[R^2 Z - \frac{Z^3}{3} \right] + c_2 \quad (7)$$

$$Z = A_2 + B_2 t + C_2 t^2 + D_2 t^3 + E_2 t^4 + F_2 t^5 \quad (8)$$

$$Z_{cg} = \frac{R^2 \frac{Z^2}{2} - \frac{Z^4}{4} - \frac{R^4}{4}}{R^2 Z - \frac{Z^3}{3} + \frac{2}{3} R^3} + \frac{h}{2} \quad (9)$$

بخش دوم: فرمول‌سازی مسئله برای بخش میانی (روابط (10) و (11))

$$\dot{V} t = \pi R^2 Z + c_3 \quad (10)$$

$$Z_{cg} = \frac{Z - \frac{h}{2}}{2} \quad (11)$$

بخش سوم: فرمول‌سازی مسئله برای نیم‌کره تحتانی (روابط (12) و (14))

$$\dot{V} t = \pi \left[R^2 Z - \frac{Z^3}{3} \right] + c_4 \quad (12)$$

$$Z = A_3 + B_3 t + C_3 t^2 + D_3 t^3 + E_3 t^4 + F_3 t^5 \quad (13)$$

$$Z_{cg} = \frac{R^2 \frac{Z^2}{2} - \frac{Z^4}{4} - \frac{R^4}{4}}{R^2 Z - \frac{Z^3}{3} + \frac{2}{3} R^3} - \frac{h}{2} \quad (14)$$

برای به دست آوردن تغییرات مرکز جرم در کل مخزن استوانه‌ای از معادله (15) استفاده می‌شود:

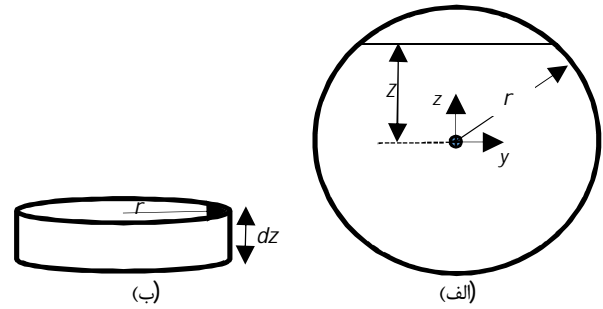
$$Z_{cg} = \frac{\sum m_i Z_{cg_i}}{\sum m_i} \quad (15)$$

در معادله (15)، m_i بیانگر جرم سیال در هر قسمت و Z_{cg_i} مرکز جرم هر قسمت و Z_{cg} مرکز جرم مجموعه هر سه قسمت می‌باشد. در مخازن استوانه‌ای m_i و Z_{cg_i} بسته به زمان مصرف سیال می‌توانند ثابت یا متغیر باشند. اشاره به این نکته ضروری است که میزان سیال و ابعاد مخازن مشخص‌کننده المان انتگرال‌گیری می‌باشند. بنابراین شاخص انتگرال‌گیری (i) با گذشت زمان تغییر خواهد کرد.

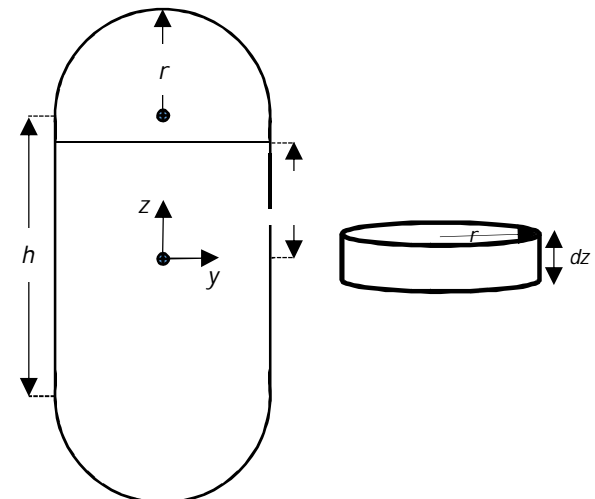
سرانجام مرکز جرم مخازن چنبر با در نظر گرفتن یک چنبر به صورت معادل با یک استوانه به شعاع R و ارتفاع $2\pi R_m$ تخمین زده خواهد شد. شعاع R_m متوسط چنبر می‌باشد. با اینفرض چنبر به صورت شکل 6 در خواهد آمد. روند فرمول‌سازی مسئله برای مخازن چنبر مطابق روابط (16) تا (18) می‌باشد:

$$\dot{V} t = 4\pi R_m \left[\frac{R^2}{2} \arcsin\left(\frac{Z}{R}\right) + 0.5 Z \sqrt{R^2 - Z^2} \right] + c_5 \quad (16)$$

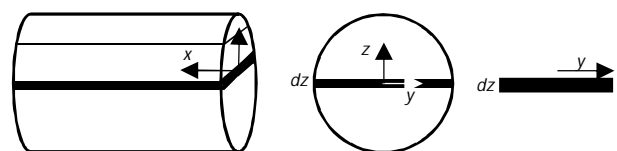
$$Z = A_4 + B_4 t + C_4 t^2 + D_4 t^3 + E_4 t^4 + F_4 t^5 \quad (17)$$



شکل 4 یک المان دیسک شکل برای محاسبه ارتفاع و مرکز جرم با زمان برای مخزن کروی، انتخاب شده است.



شکل 5 یک المان دیسک شکل برای محاسبه ارتفاع و تغییرات مرکز جرم با زمان برای مخزن استوانه‌ای، انتخاب شده است.



شکل 6 انتخاب یک المان مستطیلی شکل برای محاسبه ارتفاع و تغییرات مرکز جرم با زمان برای مخازن چنبر.

در هر لحظه از کارکرد سامانه، یک المان مانند شکل 4-ب انتخاب شده است. رابطه بین زمان و ارتفاع لحظه‌ای سیال را می‌توان به صورت رابطه (3) بیان کرد:

$$\dot{V} t = \pi \left[R^2 Z - \frac{Z^3}{3} \right] + c_1 \quad (3)$$

\dot{V} ، Z و R به ترتیب نرخ تخلیه، ارتفاع سیال، شعاع مخزن و زمان می‌باشند. c_1 یک مقدار ثابت است که با کمک مقادیر اولیه به دست می‌آید. برای به دست آوردن مرکز جرم به معادله‌ای نیاز است که بتواند Z را در هر لحظه به دست آورد. بنابراین معادله (4) به دست آمده است:

$$Z = A_1 + B_1 t + C_1 t^2 + D_1 t^3 + E_1 t^4 + F_1 t^5 \quad (4)$$

A_1 تا F_1 مقادیر ثابت می‌باشند.

مقدار مرکز جرم در هر لحظه از رابطه‌ی (5) و پس از جاگذاری مقدار Z به دست می‌آید (رابطه 6):

$$Z_{cg} = \frac{\int z dz}{\int dz} \quad (5)$$

الف به ترتیب برای مخازن کروی، استوانه‌ای و چنبر قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت و نتایج حاصل از شکل‌های 7-الف، 8-الف و 9-الف نشان می‌دهد، بهترین جانمایی زمانی به‌دست می‌آید که اجزا سامانه تا جای ممکن به‌صورت متقارن نسبت به یکدیگر قرار داده شوند. از سوی دیگر این مقاله با اجزایی با وزن‌های متفاوت سروکار دارد. بنابراین باید یک مصالحه بین تقارن جرمی و تقارن مکانی برقرار شود.

پس از رسیدن به بهترین جانمایی، دامنه تغییرات مرکز جرم (R_{cg}) با استفاده از روابط تحلیلی در طول زمان کار کرد، در صفحه $x-y$ به کمک معادله (20) محاسبه می‌شود:

$$R_{cg} = \sqrt{X_{cg}^2 + Y_{cg}^2} \quad (20)$$

نتایج این محاسبات در جدول 1 آورده شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد، با استفاده از روش تجربی، در صورت استفاده از مخازن چنبر کم‌ترین دامنه تغییرات مرکز جرم به‌دست خواهد آمد. مخازن کروی و استوانه‌ای به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. همانند محاسبات انجام شده در صفحه $x-y$ ، مقادیر تغییرات مرکز جرم در راستای Z نیز محاسبه شده‌اند که نتایج آن در جدول 2 نشان داده شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد محدوده تغییرات در جهت Z برای مخازن چنبر کوچک‌تر از مخازن کروی می‌باشد. مخازن کروی و استوانه‌ای به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.

جدول 1 تغییرات مرکز جرم با زمان $(R_{cg}(cm))$ برای جانمایی به روش تجربی

زمان (s)	نوع مخازن		
	چنبر	استوانه	کره
0	0/604	8/423	9/668
10	0/638	8/055	9/319
20	0/677	7/646	8/926
30	0/720	7/190	8/478
40	0/769	6/677	7/965
50	0/826	6/096	7/370
60	0/892	5/437	6/675
70	0/969	4/683	5/855
80	1/060	3/822	4/884
90	1/171	2/862	3/756
100	1/307	1/934	2/622
110	1/480	1/794	2/537

جدول 2 تغییرات مرکز جرم با زمان $(Z_{cg}(cm))$ برای جانمایی به روش تجربی

زمان (s)	نوع مخازن		
	چنبر	استوانه	کره
0	0/692	-2/893	1/998
10	0/240	-4/201	1/151
20	-0/174	-5/347	0/390
30	-0/541	-6/295	-0/326
40	-0/846	-7/009	-0/942
50	-1/073	-7/441	-1/432
60	-1/189	-7/530	-1/811
70	-1/150	-7/193	-1/995
80	-0/897	-6/320	-1/891
90	-0/325	-4/756	-1/427
100	0/637	-2/288	-0/304
110	1/783	-1/563	1/995

$$Z_{cg} = \frac{-\frac{1}{3}(R^2 - Z^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{R^2}{2} \arcsin\left(\frac{Z}{R}\right) + \frac{Z}{2} \sqrt{R^2 - Z^2} + \pi \frac{R^2}{4}} \quad (18)$$

2-2- محاسبات مرکز جرم برای سامانه کنترلی به‌صورت یکپارچه

پس از محاسبه مرکز جرم هر یک از اجزا، با استفاده از معادله (19) مرکز جرم سامانه کنترلی به‌دست می‌آید:

$$Y_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Y_{cg_i}}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad X_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_{cg_i}}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad Z_{cg} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Z_{cg_i}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (19)$$

در معادله (19)، n تعداد اجزا، شامل تراسترها، مخازن، پیش‌رانه‌ها، شیرهای کنترلی و غیره می‌باشد.

برای ادامه محاسبات از اتصالات و شیرآلات به دو دلیل اصلی در مدار

سامانه صرف‌نظر شده است:

(1) امکان جانمایی متقارن برای اتصالات و شیرآلات

(2) جرم قابل چشم‌پوشی نسبت به سایر اجزا

جانمایی متقارن اتصالات و شیرآلات، مرکز جرم این مجموعه از المان‌ها

را به سمت مبدأ مختصات سوق خواهد داد. علاوه بر آن، سهم جرمی مجموعه اتصالات و شیرآلات، در مقایسه با جرم کل سامانه کمتر از ده درصد می‌باشد، بنابراین تأثیر آن‌ها بر روی موقعیت مرکز جرم کل سامانه قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همان‌طور که در معادله 19 نشان داده شده است، موقعیت اجزا سامانه به‌طور مستقیم بر روی مرکز جرم مؤثر است که آن نیز به نوبه خود بر روی عملکرد سیستم مؤثر می‌باشد. بنابراین طراحی بهینه جانمایی در یک سامانه کنترلی یک تکنیک کلیدی برای بهبود عملکرد کل سامانه است.

با توجه به نکات اخیر طراحی جانمایی را می‌توان به دو روش انجام داد:

(1) تعامل انسان و کامپیوتر

(2) پیاده‌سازی روش‌های بهینه‌سازی

3-3- تعامل انسان و کامپیوتر (طراحی بر مبنای تکرار)

روش تعامل انسان و کامپیوتر (روش تجربی) مبتنی بر تجربه، سعی و خطا و عملیات مهندسی می‌باشد. این تجربیات در قالب فرمول‌های ریاضی بیان نشده‌اند و مبتنی بر تجربیات شخصی می‌باشند. در این روش جانمایی اجزای سامانه با در نظر گرفتن تمامی قیود طراحی به‌طور مستقیم توسط کاربر، به‌دست آمده است. سپس تابع هدف محاسبه می‌شود. اگر جانمایی انجام شده نتواند هدف مدنظر را برآورده کند، مراحل فوق تا رسیدن به طرح قابل قبول تکرار خواهند شد. در طراحی به روش تکرار، ابتدا یک طرح اولیه ایجاد می‌شود. پس از ارزیابی تابع هدف و قیود، طرح اولیه اصلاح شده و این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد که در نهایت طرح مطلوب که تمامی قیود طراحی را نیز ارضا می‌کند، به‌دست آید.

برای انجام جانمایی برای مسئله مطرح در این مقاله، در گام اول محدوده قابل قبول برای تغییرات مرکز جرم محاسبه می‌شود. سپس جانمایی به نحوی ایجاد خواهد شد که محدوده تغییرات مرکز جرم به‌دست آمده از حد مجاز تجاوز نکند. اگر مقادیر به‌دست آمده از جانمایی اجزا نتواند محدوده‌های مدنظر را برآورده کند، جانمایی بر طبق روند نشان داده شده در شکل 2، اصلاح خواهد شد. با توجه به شکل مخازن و به منظور دست یافتن به بهترین پاسخ‌ها، طرح‌های متعددی از جانمایی، مورد بررسی قرار گرفت تا در نهایت بهترین موقعیت هر جز به‌دست آمد. نتایج این بررسی در شکل‌های 7-الف، 8-الف و 9-

3-4- بهینه‌سازی

اولین گام در مدل‌سازی ریاضی تعریف متغیرهای طراحی، حد بالا و پایین آن‌ها (معادلات 21-23) و پارامترهای طراحی است که در جدول 7 نشان داده شده‌اند. روند محاسبه محدوده متغیرها به شکل رابطه (21) می‌باشد:

$$X_{L_i} \leq X_i \leq X_{U_i} \quad (21)$$

در این معادله X_{U_i} و X_{L_i} حد پایین و بالا برای i امین متغیر طراحی می‌باشند که به وسیله روابط (22) و (23) محاسبه شده‌اند:

$$X_{U_i} = R_C - c_5 - (r_i + t_i) \quad (22)$$

$$X_{L_i} = -(R_C - c_5 - (r_i + t_i)) \quad (23)$$

در معادله اخیر R_C ، بیانگر شعاع فضای داخلی در دسترس برای طراحی جانمایی و c_5 حداقل فاصله مجاز بین اجزا و فضای داخلی می‌باشد (به دلیل محدودیت‌های ارتعاشی)، r_i و t_i شعاع و ضخامت جز i ام می‌باشند.

از آنجا که متغیرهای طراحی، مختصات اجزا می‌باشند به دلیل تقارن فضای طراحی، حد پایین متغیرهای طراحی برابر حد بالای آن‌ها می‌باشد با علامت منفی.

جدول 5 پارامترهای طراحی

ردیف	توضیحات	نام پارامتر	واحد
1	شعاع مخزن سوخت کروی	$R_{f,Sph}$	cm
2	شعاع مخزن سوخت استوانه‌ای	$R_{f,Cyl}$	cm
3	ارتفاع مخزن سوخت استوانه‌ای	$h_{f,Cyl}$	cm
4	شعاع مخزن سوخت چنبر	$R_{f,Tor}$	cm
5	شعاع متوسط مخزن سوخت چنبر	$R_{m,f,Tor}$	cm
6	ضخامت مخزن سوخت کروی	$t_{f,sph}$	cm
7	ضخامت مخزن سوخت استوانه‌ای	$t_{f,cyl}$	cm
8	ضخامت مخزن سوخت چنبر	$t_{f,Tor}$	cm
9	شعاع مخزن اکسیدایزر کروی	$R_{Ox,Sph}$	cm
10	شعاع مخزن اکسیدایزر استوانه‌ای	$R_{Ox,Cyl}$	cm
11	ارتفاع مخزن اکسیدایزر استوانه‌ای	$h_{Ox,Cyl}$	cm
12	شعاع مخزن اکسیدایزر چنبر	$R_{Ox,Tor}$	cm
13	شعاع متوسط مخزن اکسیدایزر چنبر	$R_{m,Ox,Tor}$	cm
14	ضخامت مخزن اکسیدایزر کروی	$t_{Ox,sph}$	cm
15	ضخامت مخزن اکسیدایزر استوانه‌ای	$t_{Ox,cyl}$	cm
17	ضخامت مخزن اکسیدایزر چنبر	$t_{Ox,Tor}$	cm
18	شعاع مخزن تأمین فشار	R_{pt}	cm
19	ارتفاع مخزن تأمین فشار	h_{pt}	cm
20	ضخامت مخزن تأمین فشار	t_{pt}	cm
21	جرم مخزن سوخت	$m_{f,tank}$	kg
22	جرم مخزن اکسیدایزر	$m_{ox,tank}$	kg
23	جرم مخزن تأمین فشار 1	$m_{p,tank1}$	kg
24	جرم مخزن تأمین فشار 2	$m_{p,tank2}$	kg
25	جرم مخزن تأمین فشار 3	$m_{p,tank3}$	kg
26	جرم رگلاتور	m_{reg}	kg
27	جرم اولیه سوخت	$m_{0,f}$	kg
28	جرم اولیه اکسیدایزر	$m_{0,ox}$	kg
29	دبی حجمی سوخت	\dot{v}_f	$\frac{l}{s}$
30	دبی حجمی اکسیدایزر	\dot{v}_{ox}	$\frac{l}{s}$
31	چگالی سوخت	ρ_f	$\frac{gm^3}{gf}$
32	چگالی اکسیدایزر	ρ_{ox}	$\frac{gm^3}{cm^3}$
33	شعاع فضای جانمایی	R_c	cm
34	ارتفاع فضای جانمایی	h_c	cm

در سامانه‌های موجود با توجه به تعداد اجزا و تغییرات هر یک از آن‌ها در طول زمان و همچنین وجود قیودی که در برخی از نقاط با یکدیگر تداخل خواهند داشت، مسئله جانمایی به کمک روش تجربی، تبدیل به یک موضوع پیچیده در طراحی می‌شود. با توجه به جمع این موارد، روش مبتنی بر سعی و خطا، لزوماً نمی‌تواند به یک طرح بهینه منجر شود. بنابراین با پیاده‌سازی روش تجربی در بحث جانمایی، علاوه بر به دست آوردن پاسخی غیر بهینه، پیمودن مراحل طراحی خود فرآیندی وقت‌گیر خواهد بود. بنابراین طراحان به دنبال راه‌هایی برای کاهش هزینه و زمان برای رسیدن به اهداف فوق می‌باشند. به کارگیری روش‌های مبتنی بر منطق بهینه‌سازی یک استراتژی مؤثر در حل این گونه از مسائل می‌باشد.

بهینه‌سازی یک شاخه از ریاضیات کاربردی می‌باشد که هدف از آن یافتن مقادیر کمینه یا بیشینه یک تابع در ارتباط با قیدهای متفاوت بر روی متغیرهای طراحی است [19]. جداول 3 و 4 در بردارنده متغیرهای طراحی در صفحه $X-Y$ و در راستای Z برای مسئله پیش‌رو می‌باشند. بنابراین بهینه‌سازی را می‌توان یک‌بار در صفحه $X-Y$ و بار دیگر در راستای Z اجرا کرد.

علاوه بر این، پارامترهای طراحی در جدول 5 بیان شده‌اند.

به منظور تبدیل یک مسئله مهندسی به یک مسئله بهینه‌سازی، باید آن را در قالب یک مدل ریاضی بیان کرد.

3-4-1- مدل‌سازی ریاضی

در فرآیند بهینه‌سازی، به دست آوردن یک مدل ریاضی مناسب ضروری می‌باشد. در این مدل، تابع هدف، قیود، متغیرها و ثابت‌های طراحی تعریف می‌شوند. تعریف فضای طراحی به صورت یک فضای پیوسته یا گسسته یکی از مهم‌ترین نتایج بیان صحیح مسئله به صورت مدل ریاضی می‌باشد. این مدل ریاضی در انتخاب روش بهینه‌سازی مورد استفاده و فرآیند حل مسئله بسیار تأثیرگذار می‌باشد.

جدول 3 متغیرهای بهینه‌سازی در صفحه $X-Y$

ردیف	نام متغیر	شرح
1	x_1	مختصه X مخزن اکسیدایزر
2	x_2	مختصه Y مخزن اکسیدایزر
3	x_3	مختصه X مخزن سوخت
4	x_4	مختصه Y مخزن سوخت
5	x_5	مختصه X مخزن تأمین فشار 1
6	x_6	مختصه Y مخزن تأمین فشار 1
7	x_7	مختصه X مخزن تأمین فشار 2
8	x_8	مختصه Y مخزن تأمین فشار 2
9	x_9	مختصه X مخزن تأمین فشار 3
10	x_{10}	مختصه Y مخزن تأمین فشار 3
11	x_{11}	مختصه X رگلاتور
12	x_{12}	مختصه Y رگلاتور

جدول 4 متغیرهای بهینه‌سازی در صفحه Z

ردیف	نام متغیر	شرح
1	x_1	مختصه Z مخزن اکسیدایزر
2	x_2	مختصه Z مخزن سوخت
3	x_3	مختصه Z مخزن تأمین فشار 1
4	x_4	مختصه Z مخزن تأمین فشار 2
5	x_5	مختصه Z مخزن تأمین فشار 3
6	x_6	مختصه Z رگلاتور

محدوده متغیرها در راستای Z با قید عدم بیرون افتادگی تمام یا بخشی از آن‌ها از فضای طراحی تعریف می‌شود. اگر از مخازن چنبر استفاده شود به دلیل شکل خاص آن‌ها، امکان تغییر جانمایی آن‌ها در صفحه $X-Y$ وجود نخواهد داشت. بنابراین حد پایین و بالای آن‌ها برابر بوده و در مبدأ مختصات قرار دارد.

گام بعدی در فرآیند بهینه‌سازی، تعریف محدودیت‌های فضای طراحی می‌باشد. این محدودیت‌ها تحت قیود مساوی و نامساوی تعریف می‌شوند. تابع هدف و قیود به شکل رابطه (24) تعریف می‌شوند:

هدف و قیود به شکل رابطه (24) تعریف می‌شوند:

$$\min |f(x)| = |x_{cg}i + y_{cg}j + z_{cg}k| \quad (24)$$

مطابق با شکل مخازن، دو حالت برای تعریف قیدها وجود خواهد داشت: (1) مخازن به شکل کروی یا استوانه‌ای باشند که از روابط (25) تا (27) استفاده می‌شود:

$$g_1(x) = x_i^2 + y_i^2 \leq (R_c - (r_i + t_i + c_6))^2 \quad (25)$$

$$g_2(x) = x_i^2 + y_i^2 \geq (R_c - c_7)^2 \quad (26)$$

$$g_3(x) = ((r_i + t_i) + (r_j + t_j) + c_6)^2 \leq (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 \quad (27)$$

(2) مخازن پیش‌رانه به شکل چنبر بوده و مخازن گاز دمشی به شکل کروی یا استوانه‌ای باشند (رابطه (28)):

$$g_4(x) = ((R_i + t_i) - (r_j + t_j) - c_6)^2 \geq (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 \quad (28)$$

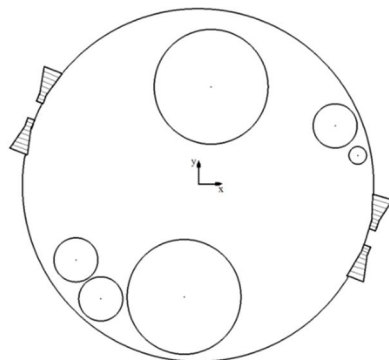
3-4-2- روش بهینه‌سازی

همان‌طور که جداول 3 و 4 و تعریف قیود و تابع هدف نشان می‌دهند، فضای طراحی یک محیط پیوسته می‌باشد. بنابراین مقادیر مشتق برای آن موجود خواهد بود. بر طبق این ویژگی و قیدهای غیرخطی موجود، بهترین تکنیک بهینه‌سازی برای این مسئله روش برنامه‌ریزی متوالی درجه دوم می‌باشد.

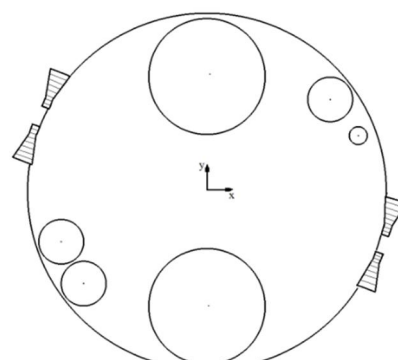
در این روش روند جستجو به صورت خطی می‌باشد. با شروع از یک نقطه x_0 در فضای جستجو و حرکت در یک راستا به میزان معین، نقاط بعدی به عنوان جواب بهتر به دست می‌آیند و در نهایت بهترین جواب، x^* پیشنهاد می‌شود. این روش، اساس کار بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی چند متغیره نیز می‌باشد. اگر x_k جواب یافته شده در مرحله k ام باشد، جواب مرحله k بعدی به صورت رابطه (29) به دست می‌آید [20]:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d_k \quad (29)$$

در رابطه (29)، α_k یک اسکالر می‌باشد، $(\alpha_k \in (0,1])$ ، و در هر تکرار مقدار آن تغییر می‌کند و d_k برداری هم بعد با x_k می‌باشد. d_k جهت حرکت و $\alpha_k d_k$ میزان حرکت را مشخص می‌کند.

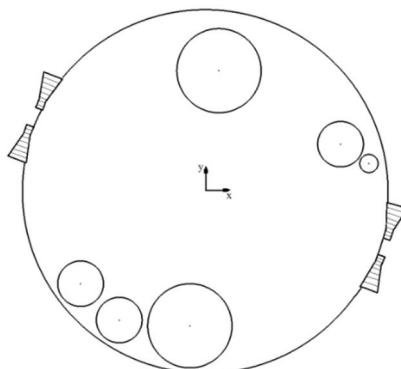


(ب) جانمایی به روش بهینه‌سازی

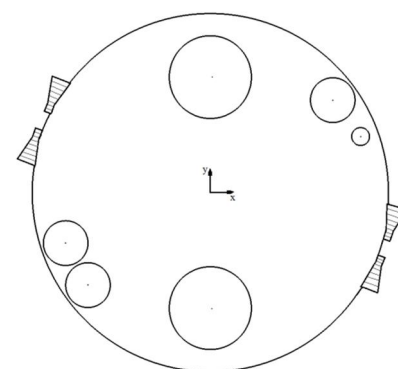


(الف) جانمایی به روش تجربی

شکل 7 جانمایی سامانه کنترلی فضایی در صورت استفاده از مخازن کروی برای نگهداری پیش‌رانه‌ها

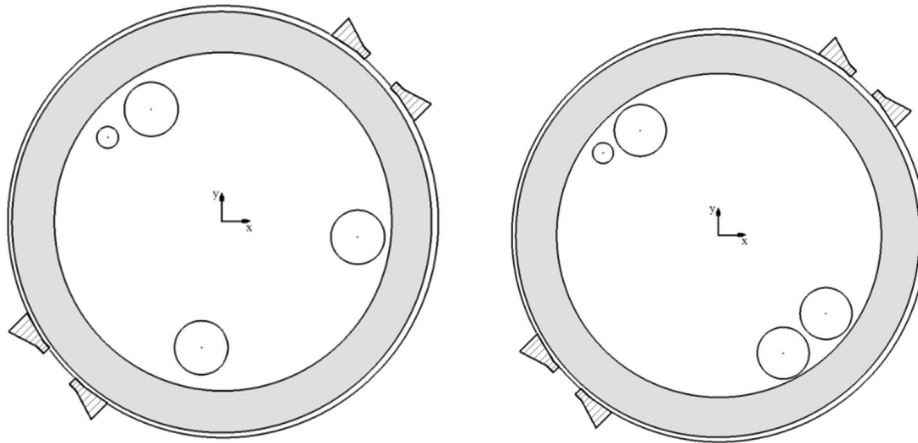


(ب) جانمایی به روش بهینه‌سازی



(الف) جانمایی به روش تجربی

شکل 8 جانمایی سامانه کنترلی فضایی در صورت استفاده از مخازن استوانه‌ای برای نگهداری پیش‌رانه‌ها



شکل 9 جانمایی سامانه کنترلی فضایی در صورت استفاده از مخازن چنبر برای نگهداری پیش‌رانها (قسمت‌های توپر مخازن چنبر می‌باشند). (الف) جانمایی به روش تجربی (ب) جانمایی به روش بهینه‌سازی

جدول 6 مختصات اجزا در صورت استفاده از روش‌های تجربی و بهینه‌سازی در صفحه $x-y$

متغیر	مخازن چنبر		مخازن استوانه‌ای		مخازن کروی	
	مختصات المان‌ها	جانمایی بهینه	مختصات المان‌ها	جانمایی بهینه	مختصات المان‌ها	جانمایی تجربی
x_1	0	0	6/04	0	5/956	0
x_2	0	0	53/15	51/59	44/6	51/59
x_3	0	0	-6/72	0	6/37	0
x_4	0	0	-59/12	51/59	50/6	51/59
x_5	-26/76	-30/47	59/26	55	62/47	55
x_6	41/61	-40/67	20/82	41/31	26/85	41/31
x_7	50/09	41/35	-37/68	-55	-44/36	-55
x_8	-5/72	-30/25	-56/59	41/31	-51/53	41/31
x_9	-8/12	24/86	-54/55	-65	-55/68	-65
x_{10}	46/69	45/57	-40/59	22/54	-33/84	22/55
x_{11}	42/95	-44/85	71/64	67/5	72/75	67/5
x_{12}	31/20	31/91	12/29	25/05	13/49	25/05

جدول 7 مختصات اجزا در صورت استفاده از روش‌های تجربی و بهینه‌سازی در راستای z

متغیر	مخازن چنبر		مخازن استوانه‌ای		مخازن کروی	
	مختصات المان‌ها	جانمایی بهینه	مختصات المان‌ها	جانمایی تجربی	مختصات المان‌ها	جانمایی تجربی
x_1	20/58	0	0	0	13	0
x_2	-31/85	0	0	0	-6/76	0
x_3	-0/007	0	9	0	-1/73	0
x_4	-0/007	0	9	0	-1/73	0
x_5	-0/007	0	9	0	-1/73	0
x_6	-0/002	0	30	0	-0/62	0

3-5- بررسی و اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده

با توجه به مقالات ارائه شده در مبحث طراحی جانمایی، هیچ مثال کاملاً مشابهی در مسئله جانمایی المان‌های وزن‌دار که در آن جرم اجزای جانمایی متغیر با زمان باشد، مشاهده نشد. از سوی دیگر در مسائل با المان‌های ثابت در طول زمان، با توجه به گستردگی مسائل جانمایی تابع هدف‌های مورد نظر بسیار متفاوت می‌باشند. علاوه بر نوع تابع هدف، قیدهای موجود ناشی از الزامات ارتعاشی و چیدمان داخلی مختص به مثال مورد بررسی در این مقاله می‌باشند. بنابراین صحت‌گذاری نتایج به‌دست آمده با نتایج مقالات منتشر

یکی از مهم‌ترین مزایایی که این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد سرعت همگرایی و دقت بالای آن می‌باشد. شکل‌های 7، 8 و 9 نشان‌گر موقعیت هر جز قبل و بعد از پیاده‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد. پس از پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی، بهترین جانمایی اجزا به‌دست آمده است که نتایج آن در جداول 6 و 7 و شکل‌های 7-ب و 8-ب و 9-ب نشان داده شده‌اند. جداول 6 و 7 نشانگر موقعیت هر جز قبل و بعد از پیاده‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد. جداول 8 و 9 بیانگر تغییرات مرکز جرم در هر لحظه از زمان کارکرد سامانه، در صفحه $x-y$ و در راستای z می‌باشند.

مثال 1:

یک مثال پرکاربرد از مسئله جانمایی، جانمایی اجزا در ماهواره‌ها می‌باشد [21] که پیشینه مهندسی آن به طراحی جانمایی اجزای ماهواره در [22] بازمی‌گردد. همانند اجزای نشان داده شده در شکل 10، [23]، جانمایی اجزای ماهواره در بخش‌های فوقانی و تحتانی یک یا چند صفحه عمود بر راستای Z دستگاه مختصات ماهواره، انجام می‌شود.

در این قسمت قصد بر آن است تا جانمایی 9 المان را بر روی قسمت فوقانی یک صفحه در فضای داخلی ماهواره انجام شود. شعاع صفحه (فضای جانمایی) برابر $R=250\text{mm}$ می‌باشد. هر یک از المان‌های جانمایی با زیروند i متمایز شده‌اند و مشخصات آن‌ها در جدول 10 ارائه شده است.

هدف یافتن مختصات هر یک از اجزا به شکل $X=(x_i, y_i)$ به نحوی است که مرکز جرم سیستم تا جای ممکن به مرکز مبدأ مختصات در فضای داخلی ماهواره نزدیک باشد. علاوه بر این هیچ تداخلی مابین هر دو جز مستقل با یکدیگر و همچنین هر جز با مرزهای محیط جانمایی، نباید به وجود آید. مدل‌سازی ریاضی مسئله اخیر همانند روش ارائه شده در بخش (3-4-1) در این مقاله می‌باشد.

با به‌کارگیری الگوریتم SQP به عنوان بهینه‌ساز، هر یک از اجزا در مکان بهینه خود قرار گرفته‌اند. در ابتدا یک جانمایی ابتدایی به عنوان حدس اولیه به الگوریتم SQP معرفی شده است. سپس با پیمایش نقطه به نقطه فضای طراحی، جانمایی بهینه ارائه شده است که نتایج آن در شکل 11 و جدول 11 قابل مشاهده است. با بررسی شکل 11 مشخص است که روش ارائه شده در این مقاله در حل مسئله جانمایی بسیار توانمند می‌باشد. از طرفی مقایسه مقادیر نتایج، مبین کارایی بهتر و دقت بیشتر روش ارائه شده در این مقاله در حل مسئله جانمایی می‌باشد. روش مورد استفاده در این مقاله مقدار تابع هدف را به میزان $99/89$ درصد نسبت به مرجع [23] کاهش داده است. در واقع مقدار به‌دست آمده برای مرکز جرم $(R=\sqrt{x^2+y^2})$ از $R=2/83$ در مرجع [23] به $R=0/003$ در این مقاله کاهش یافته است.

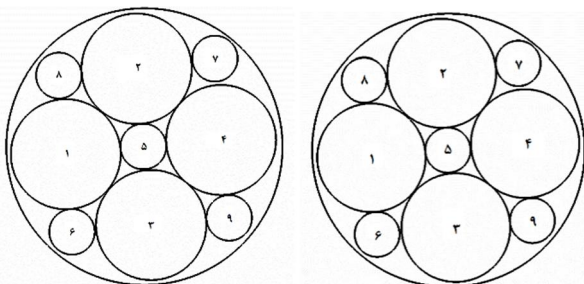
مقادیر بهینه مختصات اجزا با روش به کار گرفته شده در مرجع [23] و همچنین روش به کار گرفته شده در این مقاله در جدول 11 ارائه شده است.

مثال 2:

از آنجا که مسئله ارائه شده در مثال 1 و همچنین نمونه‌های موجود در مقالات مشابه، دارای المان‌های متغیر در طول زمان نمی‌باشند، به منظور اثبات کارآمدی روش ارائه شده در حل این گونه از مسائل، یک طرح ساده‌شده از مسئله مورد بحث در این مقاله با جواب معلوم بدیهی، در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول 10 شعاع و وزن هر یک از المان‌ها

i	r_i (mm)	m_i (kg)
1-4	207/11	42/89
5-9	85/79	7/36



شکل 11 نتایج طراحی بهینه ارائه شده در مرجع [23] (سمت چپ) و به‌دست آمده در این مقاله (سمت راست)

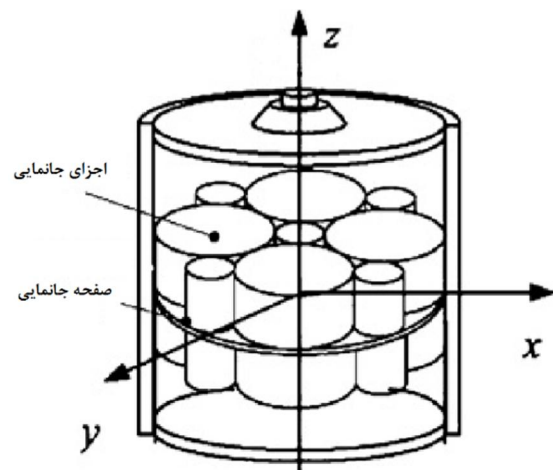
شده در این حوزه نیازمند برخی ساده‌سازی‌ها خواهد بود. از آنجا که ارزیابی روش پیشنهادی و اثبات کارایی آن، بسیار حائز اهمیت می‌باشد، در مثال 1 با استفاده از نتایج مقالات مشابه، به این کار خواهیم پرداخت. سپس با استفاده از مثال 2 که یک نمونه ساده‌شده از مسئله مورد نظر در این پژوهش و با جواب معلوم می‌باشد، کارایی روش در مورد این مقاله به اثبات می‌رسد.

جدول 8 تغییرات مرکز جرم با زمان ($R_{cg}(\text{cm})$) برای جانمایی بهینه

زمان (s)	چنبر	استوانه‌ای	کروی
0	0/0046	5/376	5/349
10	0/0049	4/924	4/981
20	0/0051	4/420	4/564
30	0/0055	3/856	4/084
40	0/0059	3/219	3/540
50	0/0063	2/495	2/900
60	0/0068	1/665	2/145
70	0/0074	0/703	1/242
80	0/0081	0/424	0/150
90	0/0089	1/764	1/241
100	0/0099	3/382	3/005
110	0/0113	5/376	5/349

جدول 9 تغییرات مرکز جرم با زمان ($Z_{cg}(\text{cm})$) برای جانمایی بهینه

زمان (s)	چنبر	استوانه‌ای	کروی
0	-1/378	-3/579	-2/613
10	-1/850	-4/926	-3/371
20	-2/269	-6/111	-4/030
30	-2/637	-7/105	-4/629
40	-2/938	-7/871	-5/111
50	-3/156	-8/362	-5/445
60	-3/261	-8/518	-5/640
70	-3/208	-8/260	-5/603
80	-2/934	-7/478	-5/229
90	-2/342	-6/026	-4/428
100	-1/356	-3/688	-2/873
110	-0/024	0	0



شکل 10 ساختار ساده‌شده از ماهواره مورد نظر [23] در مثال 1

روش تجربی کاهش یافته است.

بر طبق جدول 12، جابجایی مرکز جرم در راستای Z برای یک سامانه با مخازن کروی، بیانگر کاهش 29/4 درصدی در پاسخ‌ها می‌باشد. بهبود نتایج حاصل از بهینه‌سازی در راستای Z برای مخازن استوانه‌ای و چنبر چندان قابل اتکا نمی‌باشد. دلیل اصلی این امر محدودیت فضای طراحی در راستای Z می‌باشد.

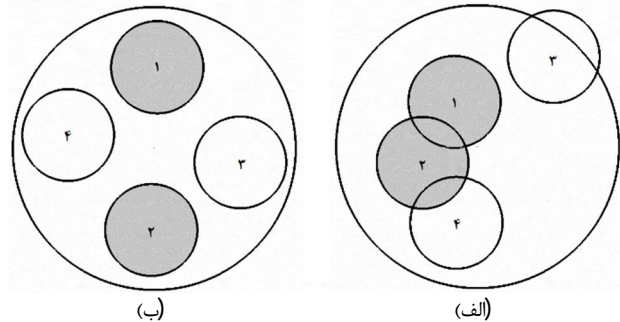
محدوده تغییرات مرکز جرم برای مدل بهینه کمتر می‌باشد که خود منجر به کاهش اغتشاشات در مدل بهینه می‌شود. بنابراین کارکرد سامانه فضایی بهبود خواهد یافت.

بر طبق شکل‌های 13 و 14، جانمایی بهینه پایدارتر می‌باشد. در نتیجه برای بازگشت به وضعیت مطلوب، مقدار کم‌تری از پیشران‌ها نیاز خواهد بود و مخازن پیشران‌های کوچک‌تری قابل استفاده می‌باشد. بنابراین سامانه سبک‌تر خواهد بود که خود منجر به استفاده از تراسترهای کوچک‌تر برای جلوگیری از اغتشاشات می‌شود.

شکل 13 نشان‌گر این است که پس از پیاده‌سازی بهینه‌سازی، برای مخازن چنبر تغییرات مرکز جرم نزدیک به صفر خواهد بود. علاوه بر این مقایسه مخازن کروی و استوانه‌ای نشان می‌دهد که تغییرات ایجاد شده برای این مخازن بسیار نزدیک به هم می‌باشد. بنابراین در سامانه‌هایی با محدودیت‌های بالا، مخازن کروی به جای مخازن استوانه‌ای قابل استفاده خواهد بود بدون آنکه تغییر چندانی در مرکز جرم در صفحه X-Y ایجاد شود. شکل 14 نشان‌دهنده آن است که در شرایط بهینه، تغییرات مرکز جرم در راستای Z برای مخازن کروی و چنبر بسیار نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین برای پرهیز از پیچیدگی‌های موجود در ساخت و استفاده از مخازن چنبر، در صورت مواجهه با الزامات جدی در تغییرات مرکز جرم در راستای Z، مخازن کروی مناسب خواهند بود.

5- نتیجه‌گیری

اغلب پژوهش‌ها در زمینه مسئله جانمایی، به بررسی جانمایی در ماهواره‌ها پرداخته‌اند و هدف آن‌ها افزایش پایداری و کاهش ممان اینرسی و چگالی جانمایی بوده است. اکثر مقالات اجزای جانمایی را به صورت المان‌های ثابت در طول زمان در نظر گرفته‌اند. در این مقاله با یک رویکرد جدید به مسئله جانمایی نگاه شده است که آن را برای کاربرد در مسائل هوافضایی و به خصوص در بحث پیشران‌های سامانه‌های هوافضایی، قابل استفاده کرده است. در این رویکرد هدف نهایی کاهش دامنه تغییرات مرکز جرم بوده است. دو روش شامل تعامل انسان و کامپیوتر و همچنین روش بهینه‌سازی برای طراحی جانمایی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش تجربی، بر پایه تجربیات مهندسی و فرآیند سعی و خطا، جانمایی‌های متفاوتی طراحی شده است. در این جانمایی‌ها، هدف ارضای محدوده مجاز تغییرات مرکز جرم با در نظر گرفتن مصالحه بین تقارن مکانی و تقارن جرمی آن‌ها می‌باشد.



شکل 12 المان‌های جانمایی پیش از پیاده‌سازی بهینه‌سازی (الف) و پس از پیاده‌سازی بهینه‌سازی (ب)

جدول 11 نتایج طراحی بهینه ارائه شده در مرجع [23] و به دست آمده در این مقاله

مشخصات اجزای جانمایی	نتایج بهینه ارائه شده در مرجع [23]		نتایج بهینه به دست آمده در این مقاله	
	$x(mm)$	$y(mm)$	$x(mm)$	$y(mm)$
$r(mm)$	207/11	207/11	207/11	207/11
$m(kg)$	42/89	42/89	42/89	42/89
i				
1	-295/81	-27/9	-293/49	-27/79
2	-29/34	293/26	-25/67	293/51
3	25/33	-294/26	28/41	294/05
4	207/11	288/55	26/10	292/27
5	85/79	-4/08	1/32	-2/04
6	85/79	-272/26	271/62	-319/87
7	85/79	265/08	331/22	265/78
8	85/79	-321/85	267/53	-321/21
9	85/79	318/9	320/15	-267/31
		$2/83R=$		$0/003R=$

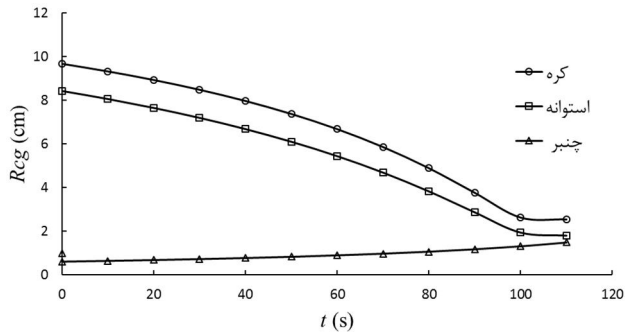
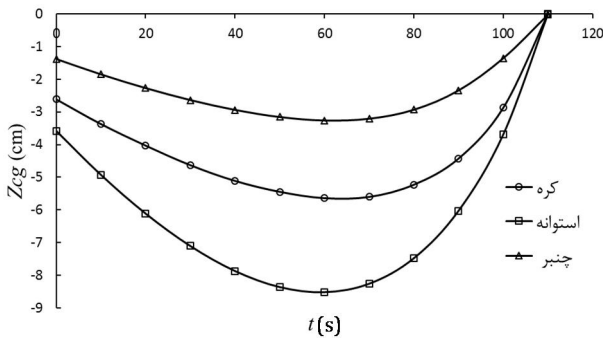
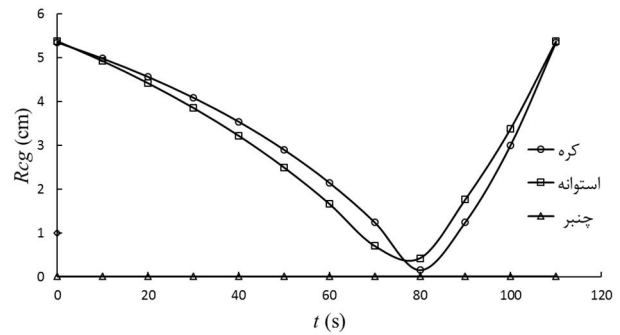
در این مثال چهار المان کروی در نظر گرفته شده است. دو المان کروی مانند مخازن مورد بحث در این مقاله دارای جرم متغیر در طول زمان (دایره‌های توپر) با نرخ تخلیه ثابت و دو المان کروی دارای جرم ثابت می‌باشند. در ابتدا المان‌های کروی به صورت نامتقارن جانمایی شده و قیود هندسی نیز نقض شده‌اند (شکل 12-الف). همان‌طور که در شکل 12-ب مشاهده می‌شود پس از پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی، نه تنها تابع هدف مسئله کمینه شده است (مرکز جرم در مبدأ مختصات فضای جانمایی قرار گرفته است)، بلکه تمامی قیود موجود مانند عدم تداخل المان‌های جانمایی نیز ارضا شده است.

4- بررسی و تحلیل نتایج

با بررسی نتایج به دست آمده، مزیت‌های روش بهینه‌سازی نسبت به روش تجربی به صورت زیر بیان می‌شود:
با بررسی جدول 12، می‌توان مشاهده کرد که جابجایی مرکز جرم در صفحه X-Y برای مخازن کروی، استوانه‌ای و چنبر با به کارگیری روش بهینه‌سازی به ترتیب 28/1 درصد، 21/2 درصد و 99/2 درصد، نسبت به

جدول 12 مقایسه نتایج حاصل از طراحی جانمایی به روش تجربی و بهینه‌سازی

نوع مخازن	مرکز جرم (cm)	مقادیر به دست آمده از روش تجربی	مقادیر به دست آمده از پیاده‌سازی بهینه‌سازی	میزان بهبود پاسخ‌ها
کروی	ΔR_{cg}	7/3560	5/2865	28/1%
	ΔZ_{cg}	5/6607	3/9970	29/4%
استوانه‌ای	ΔR_{cg}	6/7589	5/3264	21/2%
	ΔZ_{cg}	8/5198	7/5438	11/5%
چنبر	ΔR_{cg}	0/8758	0/0067	99/2%
	ΔZ_{cg}	3/2412	3/0001	7/4%

شکل 13 مقایسه تغییرات R_{cg} با زمان در جانمایی به روش‌های تجربی (چپ) و بهینه‌سازی (راست) برای پیکره‌بندی‌های مختلف مخازنشکل 14 مقایسه تغییرات Z_{cg} با زمان در جانمایی به روش‌های تجربی (چپ) و بهینه‌سازی (راست) برای پیکره‌بندی‌های مختلف مخازن

- [7] R.B. Xiao, Y.C. Xu, M. Amos, Two hybrid compaction algorithms for the layout optimization problem. *Bio Systems*, Vol. 90, No. 2, pp. 560-567, 2007.
- [8] Y. C. Xu, R. B. Xiao, M. Amos, Particle swarm algorithm for weighted rectangle placement, *Proceedings of the Third International Conference on Natural Computation (ICNC07)*, IEEE Press, pp. 728-732, 2007.
- [9] Y.C. Xu, R.B. Xiao, M. Amos, A novel genetic algorithm for the layout optimization problem, *Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC07)*, IEEE Press, pp. 3938-3942, 2007.
- [10] B. Zhang, H.F. Teng, Y.J. Shi, A layout optimization of satellite module using soft computing techniques. *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 507-521, 2008.
- [11] H. F. Teng, Y. Chen, Adual-system variable-grain cooperative coevolutionary algorithm, satellite-module layout design, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 14, No. 3, pp. 438-445, 2010.
- [12] Y. Wang, H. F. Teng, Knowledge fusion design method: satellite module layout, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 22, pp. 32-42, 2009.
- [13] Y.C. Xu, F.M. Dong, Y. Liu, R.B. Xiao, *Ant colony algorithm for the weighted item layout optimization problem*, 2010.
- [14] H. Wang, W. Huang, Q. Zhang, D. Xu, An improved algorithm for the packing of unequal circles within a larger containing circle. *European Journal of Operational Research*, Vol. 141, pp. 440-453, 2002.
- [15] R.B. Wilson, A simplicial algorithm for concave programming. PHD thesis, *Graduate School of Business Administration*, Harvard University, 1963.
- [16] G. Sutton, O. Biblarz, *Rocket propulsion elements*, 7th edition. New York: John Wiley & Sons, Chapter 2, 2001.
- [17] K.H. Lee, S.R. Lee. Comparative study of lunar mission requirements and onboard propulsion system performance, *Journal of Progress in Aerospace Science*, Vol. 47, pp. 480-493, 2011.
- [18] A. Devereaux, F. Cheuret, Development testing of a new bipropellant propulsion system for the GMP-T spacecraft, *Space Propulsion Conference*, pp. 1-4, 2010.
- [19] L. Liberti, Introduction to global optimization. *Ecole Polytechnique*, 2008.
- [20] J. Nocedal, Wright S. J. *Numerical Optimization, 2nd Edition*, Springer ScienceBusiness Media, LLC Press, 2006.
- [21] H. F. Teng, C. Che, Y. Chen, Y. S. Wang, Test problems of circles in circle packing with constraints and known the optimal solutions. *Optimization online [Online]*. Available: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2004/10/976.pdf, 2004.
- [22] H. F. Teng, S. L. Sun, D. Q. Liu, Y. Z. Li, Layout optimization for the objects located within a rotating vessel: A 3-D packing problem with behavioral constraints, *Computers and Operations Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 521-535, 2001.
- [23] H. F. Teng, Y. Chen, W. Zheng, Y. J. Shi, Q. H. Hu, A dual system variable-grain cooperative coevolutionary algorithm: satellite-module layout design, *IEEE transaction on evolutionary computation*, Vol. 14, no. 3, pp. 438-455, 2010.

از آنجا که در این روش طراح قادر به بررسی کل فضای طراحی نمی‌باشد، جانمایی به‌دست آمده لزوماً جانمایی بهینه نخواهد بود. بنابراین ضرورت بهینه‌سازی طراحی به شدت احساس می‌شود. در فرآیند بهینه‌سازی، پس از محاسبه مدل ریاضی و تعریف یک فضای طراحی پیوسته، یک روش گرادایانی مورد استفاده قرار گرفته است و بهترین طرح برای کمینه کردن دامنه تغییرات مرکز جرم ارائه شده است.

در این دو روش، مرکز جرم سامانه کنترلی در زمان کارکرد سامانه برای چیدمان‌های مختلف (مخازن کروی، استوانه‌ای و چنبر)، در صفحه $X-Y$ و در راستای Z محاسبه شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده بیانگر بهبود قابل ملاحظه خروجی‌ها با کمک روش بهینه‌سازی می‌باشد. علاوه بر این، نتایج حاصل از چیدمان‌های مختلف نشان‌گر این واقعیت می‌باشد که در سامانه‌هایی که کنترل وضعیت از اهمیت بالایی برخوردار است، استفاده از مخازن به شکل چنبر برای نگهداری پیش‌رانه‌ها در اولویت قرار خواهد داشت.

6- مراجع

- [1] P. Zhang, D. Romero, J. Beck, C. Amon, Solving wind farm layout optimization with mixed integer programs and constraint programs, *European Journal of Computational Optimization*, Vol. 2, No. 3, pp. 195-219, 2014.
- [2] B. John, J. James, R. Rengaraj, Analysis and optimization of plant layout using relative allocation of facilities technique, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, No. 8, 2013.
- [3] L. Xiong, R. Molino, M. Zoppi, Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 9-12, pp. 1305-1313 2013.
- [4] H. Teng, S. Sun, W. Ge, W. Zhong, Layout optimization for the dishes installed on a rotating table- the packing problem with equilibrium behavioral constraints, *Science in China (Series A)*, Vol. 37, pp. 1272-1279, 1994.
- [5] J. Cagan, K. Shimada, S. Yin, A survey of computational approaches to three-dimensional layout problems, *Computer Aided Design*, Vol. 34, pp. 129-137, 2000.
- [6] H. Teng, S. Sun, D. Liu, Y. Li, Layout optimization for the objects located within a rotating vessel - a three dimensional packing problem with behavioral constraints, *Computers & Operations Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 521-535, 2001.