Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 241-244
DOI: 10.22060/mej.2019.16086.6267

Designing Optimum Multi-Domain System by Integrating Bond Graph and Genetic Programming

B. Bahrami Joo, A. Jamali*, N. Nariman Zadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: Integrated modeling of multi-domain physical systems requires a common language. One of the methods which has been used to do so is called the bond graph. The bond graph provides a common and core language for describing basic elements and connections across different fields by using its elements, bonds and junctions. Also, by using genetic programming as an evolutionary method, an initial model can be evolved into a final model. The initial model of a system in a bond graph called Embryo and must have input, output and basic elements of the desired model. By defining a series of operational functions in genetic programming, an embryo model evolves and a final model obtained in one objective and multi-objective approaches. The current research presents an optimized design tool by the integration of a bond graph and a Pareto multi-objective genetic programming for guiding automated topology synthesis. In order to evaluate the performance of the proposed method, obtained results were first compared to the 20-sim software and then two models of electric filter and a mass, spring and damper system compared to the reference.

Review History:

Received: Apr. 06, 2019
Revised: Aug. 13, 2019
Accepted: Sep. 02, 2019
Available Online: Sep. 15, 2019

Keywords:

Bond graph
Genetic programming
Embryo
Multi-objective
Pareto

1. INTRODUCTION

Modeling of multi-domain systems needs a common language. The bond graph is one of the methods which had been used widely last years for modeling of the different type of systems. Bond graph introduced by Karnopp and Rosenberg in 1968 [1]. Some researchers used this method for modeling mechatronic systems. Louzazni et al. [2] used the single and double diode models to represent an equivalent circuit of the photovoltaic generator and obtain its model via a bond graph modeling method. In order to create an explore multi-domain design space, Genetic Programming (GP) can be used. GP first proposed by Koza in 1992 [3]. Jamali et al. [4] used the multi-objective genetic programming method for modelling of a complex non-linear process. Rosenberg et al. [5] present an automated procedure that can explore the mechatronic design space by integrating bond graph and genetic programming. Samarkoon et al. [6] use the one-objective approach of integrating bond graph and genetic programming for designing electrical filters, a mass, spring and damper system and an industrial fish processing machine.

In this research, a two-step optimization approach for integrating bond graph and genetic programming presented. Also, multi-objective Pareto design concept applied to the proposed method to design new topologies with both lowest complexity and lowest absolute error.

2. INTEGRATING BOND GRAPH AND GENETIC PROGRAMMING

In order to integrate a genetic programming approach with a bond graph, an embryo model is needed. The embryo is an initial model which must include input, output and basic elements of the desired system. It has modifiable sites on the elements or junctions. These modifiable sites can be evolved by using pre-defined functions such as Add-Element, Insert-Junction, Add-Num and End. These functions used for creating a GP tree based on the bond graph method. An example of a random GP tree is shown in Fig. 1. By applying this tree to modifiable sites on the embryo model, an evolved system obtained and fitness value calculated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the mechanical domain, a Mass, Spring and Damper (MSD) system is considered for a given transfer function [6]. The embryo model used for the mentioned system is shown in Fig. 2. It has a modifiable site on 0-Junction which is shown with a dashed-line circle. Input force to the system is applied to mass m_1 and output considered as the vertical velocity of mass m_2.

Transfer function of desired mass, spring, and damper system is [6],

$$H(s) = \frac{4s + 40}{s^3 + 40s^2 + 400s} \tag{1}$$

*Corresponding author's email: ali.jamali@guilan.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 1. An example of a GP tree based on bond graph

Fig. 2. Embryo model for a MSD system

Fig. 3. The evolved MSD system in single-objective approach

Fig. 4. Comparison of absolute error for the present study MSC system and reference model [6] in one-objective approach

Table 1. Objective functions of chosen design points in multi-objective topology design approach

Design point	Absolute error	Depth of the tree
A	7.4566×10^{-8}	7
B	7.4566×10^{-8}	5
C	0.003894	3

Two approaches for calculating fitness has been considered in this article. First, in a single objective approach, the absolute error between the system model obtained by the present approach and desired transfer function calculated and the best candidates extracted. The bond graph model of the evolved MSC system is shown in Fig. 3. It can be seen that five *R* elements and a *C* element added to the embryo model. Since the presented method focused on designing new system topologies, newly added elements might not be optimized in terms of value. So, a second step optimization on new elements must be done by using a genetic algorithm. After optimizing the best optimum design point, it can be seen that absolute error decreases significantly which is shown in Fig. 4. In this graph, a comparison between the best individual, optimized best individual and reference model is shown.

In the second part, a two-objective approach of the proposed method is investigated. It should be noted that if the depth of the tree increases, the system becomes more complex. Therefore, it is recommended to decrease the number of depths to obtain a system with lower complexity. For this reason, in this section in addition to absolute error, the depth of the tree is also considered as the objective function. By considering the mentioned objective functions and embryo model, a Pareto front of non-dominate design points for the MSC system obtained. Three optimal design points *A*, *B* and *C* are chosen from the best front and its objective function values are given in Table 1. The GP tree of design point B is shown in Fig. 5.

Fig. 5. GP tree of design point *B*

4. CONCLUSIONS

This paper presented two approaches to the design evolution of a system by using integrating genetic programming and bond graph modeling methods. A mass, spring and damper system with a given transfer function considered as the desired system. In the first approach, after obtaining the best topology, values of newly added elements taken into a second step optimization and absolute error of frequency response decreased significantly. In the second approach, a multi-objective topology design presented by choosing the depth of the tree and absolute error as objective functions. The results of this approach also were obtained and the simplest possible system was achieved. The results of both approaches showed a lower absolute error in comparison to the reference model [6].

5. REFERENCES

[1] D.C. Karnopp, R.C. Rosenberg, Analysis and Simulation of Multiport Systems, MIT Press, Massachusetts, 1968.

[2] M. Louzazni, A. Khouya, K. Amechnoue, M. Mussuta, R. Herbazi, Bond Graph Modelling of Different Equivalent Models of Photovoltaic Cell, Procedia Manufacturing, 32 (2019) 802-809.

[3] J. Koza, Genetic programming, on the programming of computers by means of natural selection, 1992.

[4] A. Jamali, E. Khaleghi, I. Gholaminezhad, N. Nariman-zadeh, Modelling and prediction of complex non-linear processes by using Pareto multi-objective genetic programming, International Journal of Systems Science, 47(7) (2016) 1675-1688.

[5] R.C. Rosenberg, E.D. Goodman, S. Kisung, Some Key Issues in Using Bond Graphs and Genetic Programming for Mechatronic System Design, in: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2001.

[6] B.L. Samarakoon, L.B. Gamage, C. W. de Silva, Design evolution of engineering systems using bond graphs and genetic programming, Mechatronics, (2015). 71-83.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Bahrami Joo, A. Jamali, N. Nariman Zadeh, Designing Optimum Multi-Domain System by Integrating Bond Graph and Genetic Programming, Amirkabir J. Mech Eng., 53(2) (2021) 241-244.

DOI: 10.22060/mej.2019.16086.6267

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۲، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۰۱۵ تا ۱۰۳۸
DOI: 10.22060/mej.2019.16086.6267

طراحی بهینه چندهدفه انواع سیستم‌ها در دامنه‌های مختلف، به‌وسیله ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک

بهزاد بهرامی‌جو، علی جمالی*، نادر نریمان‌زاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

خلاصه: مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های فیزیکی در دامنه‌های مختلف، نیازمند یک زبان مشترک است. یکی از روش‌هایی که می‌توان به‌وسیله آن این کار را انجام داد، باندگراف نام دارد. این روش با استفاده از المان‌ها، باندها و اتصال‌های خود، ارتباط میان اجزای مختلف یک سیستم را تشریح می‌کند. همچنین می‌توان با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل اولیه یک سیستم را بر اساس نیاز از یک حالت اولیه به حالت نهایی مطلوب توسعه داد. با استفاده از ویژگی جستجوپذیری بالا و مدل‌سازی شماتیک روش باندگراف، می‌توان مدل اولیه سیستم در دامنه الکتریکی یا مکانیکی را بر اساس خروجی مورد نظر، به یک مدل باندگراف نهایی مدل‌سازی کرد. مدل اولیه یک سیستم در روش باندگراف، امبریو نام دارد و بایستی دارای ورودی، خروجی و المان‌های اصلی یک سیستم باشد. با تعریف مجموعه‌ای از توابع عملیاتی در برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل امبریو توسعه داده می‌شود و مدل نهایی باندگراف در دو حالت تک‌هدفه و چندهدفه پارتویی به‌دست می‌آید. این پژوهش با ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک، ابزار طراحی مناسبی جهت توسعه یک مدل را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. به منظور بررسی عملکرد روش ارائه شده جهت مدل‌سازی با باندگراف، ابتدا نتایج آن با نرم‌افزار ۲۰-سیم مقایسه شده و سپس به‌وسیله آن، دو مدل فیلتر الکتریکی و یک مدل سیستم جرم، فنر و میراگر طراحی می‌گردد و نتایج با مرجع مقایسه می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴

کلمات کلیدی:
باندگراف
برنامه‌ریزی
ژنتیک
امبریو
چندهدفه
پارتو

۱- مقدمه

مدل کردن سیستم‌های چند دامنه، نیازمند یک زبان مشترک است که بتواند با یک قالب مشخص از عهده مدل‌سازی آن برآید. یکی از بهترین روش‌هایی که می‌تواند انواع سیستم‌ها را در دامنه‌های مختلف مدل کند، باندگراف نام دارد. باندگراف یک زبان مشترک و جامع برای توصیف المان‌های پایه‌ای یک سیستم است و ارتباط میان دامنه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

روش باندگراف اولین بار در سال ۱۹۶۸ توسط کارنوپ و روزنبرگ [۱] معرفی شد. این روش برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی مختلف به‌کار می‌رود و دارای مزایایی همانند سادگی، عمومیت، یکپارچگی و ارائه صریح است [۲]. تاکنون محققان مختلفی از این روش به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی انواع سیستم‌ها استفاده کرده‌اند. شجاعی بارجویی و همکاران [۳] با استفاده از روش مدل‌سازی باندگراف، یک مدل‌سازی دینامیکی از سیستم اسکلت خارجی[1] ارائه دادند که در آن موتور الکتریکی جریان مستقیم[2]، جعبه‌دنده متغیر، سنسور گشتاور و اندام انسان مدل‌سازی شده بود. هدف اصلی مقاله آن‌ها این بود که مزایای روش باندگراف را برای مدل‌سازی و درک بهتر دینامیک اسکلت خارجی نشان دهند. در تحقیق دیگر سمدار و همکاران [۴] در مقاله خود با استفاده از روش باندگراف یک سیلندر موتور متصل به یک فلایویل اینرسی-متغیر را مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند تا عملکرد دینامیکی آن را بررسی کنند. ژنگ و همکاران [۵] نیز با استفاده از روش باندگراف یک مدل از پیل سوختی اکسید جامد[3]

1 Exoskeleton
2 Direct Current (DC)
3 Solid Oxide Fuel Cell

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.jamali@guilan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

ارائه کردند که در آن فرآیندهای انتقال، واکنش‌های الکتروشیمیایی و شیمیایی شبیه‌سازی و ارزیابی شد. مدل آن‌ها به‌دلیل استفاده از این روش مدل‌سازی، به‌راحتی قادر است تا تبادل انرژی و جریان را بین بخش‌های مختلف فیزیکی سیستم نشان دهد. ربات‌های پادار در مقایسه با ربات‌های چرخ‌دار می‌توانند به‌راحتی به هر سمتی حرکت کنند. علاوه‌برآن ربات‌های پادار تماس مداوم با زمین ندارند و در نتیجه به‌راحتی می‌توانند از موانع عبور کنند. سوهارو و همکاران [۶] در مقاله خود مکانیزم یک ربات چهارپای پایدار را به‌وسیله باندگراف مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردند که قادر است انواع پیاده‌روی‌ها را انجام دهد. آن‌ها پس از مدل‌سازی، نتایج به‌دست آمده برای انواع حرکت روبات را به‌منظور بررسی بهبود مصرف انرژی مورد مقایسه قرار دادند. لوزانی و همکاران [۷] در مقاله‌ای یک مدل‌سازی دینامیکی از ژنراتور فتوولتائیک را به‌وسیله روش باندگراف ارائه کردند. بدین منظور آن‌ها یک مدار معادل از ژنراتور فتوولتائیک را با دو مدل تک و دو دیوده ارائه دادند. آن‌ها مدل ریاضی را هم با اعمال المان‌های باندگراف و قوانین آن استخراج کردند و در انتها نتایج شبیه‌سازی را با مدل تجربی مقایسه کرده و مشابهت نتایج را ارائه کردند.

اکثر سیستم‌های کنترلی دارای بخش‌های مختلف مهندسی هستند. بخش‌هایی که آن سیستم‌ها را به سیستم مکاترونیکی تبدیل می‌کند. این نوع سیستم‌ها علاوه بر بخش مکانیکی، می‌توانند بخش‌هایی مانند الکتریکی، هیدرولیکی و یا گرمایی هم داشته باشند. باندگراف ساختار معماری یک سیستم را نشان می‌دهد، بدین معنی که یک ترکیب آزاد از باندها و اتصال‌ها می‌توانند به محل‌های مختلف مدل اضافه شود و یک مدل جدید با یک توپولوژی جدید را بسازد. این ویژگی رشد نامحدود باندگراف، قابلیت جستجو در بازه گسترده‌ای از توپولوژی‌ها را در زمینه طراحی و بهینه‌سازی، فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، استفاده از باندگراف در طراحی سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی می‌تواند باعث ایجاد ابزارهای بهینه‌سازی شود که نه تنها گسترش‌پذیری سیستم را محدود نمی‌کند، بلکه توپولوژی مدل را هم بهینه می‌کند. برای جستجو در انواع توپولوژی می‌توان از روش برنامه‌ریزی ژنتیک[1] استفاده کرد و انعطاف‌پذیری گرافیکی باندگراف و قابلیت جستجوی وسیع برنامه‌ریزی ژنتیک، می‌تواند عامل تاثیرگذاری در ادغام این دو روش قدرتمند با یکدیگر باشد. عمل ادغام، با ایجاد یک نگاشت بین این دو روش انجام می‌گیرد. دو المان اصلی این نگاشت، مدل امبریو و توابع عملیاتی است که طراحی آن‌ها به عهده کاربر است و در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

بخش دیگری که در طراحی یک سیستم می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، نحوه مدل‌سازی و چینش اجزای سیستم در کنار یکدیگر است. به‌طوری‌که سیستم مورد نظر با حداقل هزینه مصرفی، بهترین پاسخ‌های مورد نیاز کاربر را به خروجی بدهد. در این مقاله با ادغام دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک و باندگراف، روش مدل‌سازی‌ای ارائه می‌شود که بتواند بنا به نیاز کاربر، سیستمی ایجاد کند که در بخش‌های مختلف فعالیت کرده و توپولوژی مناسب را هم به‌دست آورد.

روش برنامه‌ریزی ژنتیک یک روش تکاملی برای ایجاد فرآیند یک مدل است. این روش اولین‌بار در سال ۱۹۹۲ توسط کوزا[2] معرفی شد. کوزا تاکنون از برنامه‌ریزی ژنتیک برای طراحی مدارهای الکتریکی مختلف شامل چندین فیلتر پایین‌گذر و کنترلر استفاده کرده است [۱۲-۸]. او همچنین در مقاله‌های خود به خوبی از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای طراحی مصنوعی خودکار توپولوژی و بهینه کردن انواع گوناگون کنترلرها در پلتفرم‌های موازی بهره گرفته است [۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴]. جمالی و همکاران [۱۵] یک مدل‌سازی از سیستم‌های غیرخطی پیچیده را با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک چندهدفه ارائه دادند. آن‌ها در این مقاله، دو سری داده‌های ورودی و خروجی یک مدل ریاضی غیرخطی و یک سری داده فرآیند برش انفجاری را بررسی کردند. از کارکردهای دیگر برنامه‌ریزی ژنتیک می‌توان به زمینه پیش‌بینی میزان انرژی مصرفی اشاره کرد. طهماسبی و گندمی [۱۶]، با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، عملکرد انرژی را در ساختمان‌های مسکونی فرمول‌بندی کردند. آن‌ها در مقاله خود با استفاده از این روش، معادله‌ای طراحی کردند که بتواند بارهای سرمایشی و گرمایشی موجود در ساختمان را پیش‌بینی کنند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که برنامه‌ریزی ژنتیک چندهدفه ابزاری مناسب برای تولید یک مدل جامد از سیستم‌های غیرخطی پیچیده با توانایی حل مسائل داده‌های عظیم توسط الگوریتم موازی است.

کارکرد جزیره‌ای[3] یک مساله مهم بین ابزارهای توزیع انرژی و صاحبان تولید پراکنده انرژی[4] است، چرا که می‌تواند باعث به‌خطر افتادن امنیت کارگران و مصرف‌کنندگان شود و به تجهیزات

1 Genetic Programming

2 Koza
3 Islanding
4 Distributed generation

سیستم‌های توزیع نیرو آسیب جدی وارد کند. بنابراین زمانی که جزیره‌ای شدن شبکه برق پیش آید، یک سیستم توزیع پراکنده بایستی قطع شود. در همین راستا پدرینو و همکاران [۱۷] در مقاله‌ای با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک چندژنه، مجموعه‌ای از روابط ریاضی و توابع منطقی به‌دست آوردند که بتواند جزیره‌ای شدن شبکه برق را به درستی شناسایی و دسته‌بندی کند. در نهایت نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش ارائه شده در جداسازی وقایع جزیره‌ای شدن از اغتشاشات به‌خوبی عمل می‌کند.

از اولین افرادی که به ادغام این دو روش با یکدیگر پرداختند، به روزنبرگ و همکاران [۱۸] می‌توان اشاره کرد که در سال ۲۰۰۱ در مقاله‌ای به برخی نکات مهم در طراحی سیستم‌های مکاترونیکی توسط دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک و باندگراف اشاره کردند و این ادغام این دو روش را مورد بررسی قرار دادند. یک سال بعد، گودمن و همکاران [۱۹] با ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک، روشی را برای طراحی خودکار سیستم‌های چند دامنه مکاترونیکی ارائه دادند. آن‌ها روش پیشنهادی خود را بر روی دو مسئله طراحی پیاده‌سازی کردند. مسئله اول که مستقل از دامنه است، به جای‌دهی مقادیر ویژه و یافتن آن‌ها توسط روش پیشنهادی مربوط می‌شود. قسمت دیگر، یک مسئله در دامنه الکتریکی است که در آن طراحی فیلتر آنالوگ به منظور رسیدن به بازدهی مشخص در طول یک بازه فرکانسی مشخص، هدف تحقیق بود.

بهبهانی و دسیلوا [۲۰-۲۲] با استفاده از ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک، طراحی یک مکانیزم قطع سر ماهی را بهبود بخشیدند. در سال ۲۰۱۵ ساماراکون و همکاران [۲۳] در مقاله خود سیستم صنعتی قطع سر ماهی را که قبلا توسط دسیلوا و همکاران طراحی شده بود، بهینه کردند. علاوه بر آن، آن‌ها در مقاله خود، عملکرد کد ارائه شده را روی دو فیلتر الکتریکی میان‌ناگذر و میان‌گذر و یک سیستم مکانیکی جرم، فنر و میراگر بررسی کردند.

طباطبایی و همکاران [۲۴] با استفاده از ادغام روش برنامه‌ریزی ژنتیک استنتاجی با باندگراف، روی طراحی بهینه یک دسته موتور هیدرولیکی کار کردند. آن‌ها در مقاله خود، بهبود عملکرد روش طراحی‌شده‌شان را در مقایسه با روش ادغام باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک مرسوم، نشان دادند.

نوآوری اصلی این مقاله در دو بخش جداگانه انجام می‌پذیرد. در مرحله اول، توپولوژی بهینه طراحی شده و مقادیر المان‌ها به‌صورت تقریبی تنظیم می‌گردند، اما از آن‌جا که این بخش از شبیه‌سازی روی طراحی توپولوژی تمرکز دارد، ممکن است مقادیر پارامترها به‌طور کامل بهینه و تنظیم نشوند. به‌همین جهت در انتهای مرحله اول شبیه‌سازی بخشی قرار داده می‌شود که ابتدا المان‌های بهترین سیستم به‌دست آمده را شناسایی کرده و سپس با بهینه کردن مقادیر آن‌ها در یک بهینه‌سازی ثانویه، میزان مطابقت پاسخ سیستم طراحی شده نهایی را با مدل مطلوب به حداکثر میزان خود برساند. مدت زمان شبیه‌سازی مرحله دوم در مقایسه با مرحله اول به‌مراتب کم‌تر بوده و کاربر می‌تواند دقت آن را بنا به نیاز خود کاهش یا افزایش دهد.

بخش دوم نوآوری مقاله مربوط به استفاده از مفهوم طراحی پارتویی در ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک می‌شود. در تحقیق‌های مرجع، طراحی با استفاده از ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک به‌صورت تک‌هدفه انجام گرفته است. مشکل این روش محدودیت کاربر در استخراج نتایج دلخواه است. نویسندگان در مرجع [۲۳] میزان پیچیدگی پاسخ را در محاسبه برازندگی لحاظ کرده‌اند تا پاسخ‌هایی نسبتا مطلوب با تعداد عمق نمودار درختی کم‌تر به‌دست آورند، اما از آن‌جا که کاربر نمی‌تواند مشخص کند تا کاهش پیچیدگی تا چه اندازه صورت گیرد، فرآیند شبیه‌سازی ممکن است پاسخ‌هایی با پیچیدگی کم و با خطایی زیاد تولید کند. در این تحقیق با استفاده از طراحی چندهدفه پارتویی و با در نظر گرفتن عمق نمودار درختی به‌عنوان تابع هدف دوم نتایجی به‌دست می‌آید که کاربر قادر باشد تا به‌راحتی بین میزان دقت و پیچیدگی پاسخ انتخاب انجام دهد.

۲- ادغام روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک

در این مقاله ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک از تحقیق‌هایی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته [۲۳-۲۰]، الهام گرفته شده است. در این بخش نحوه مدل‌سازی سیستم‌ها به روش باندگراف در نرم‌افزار متلب[1] و نحوه ادغام این روش با روش برنامه‌ریزی ژنتیک توضیح داده می‌شود و توابع عملیاتی مربوط به تشکیل ساختار درختی نمودار باندگراف ارائه می‌گردد.

۲-۱- مدل‌سازی سیستم دینامیکی به‌وسیله باندگراف

به منظور طراحی یک سیستم به‌وسیله روش باندگراف از نرم‌افزار

1 MATLAB

Fig. 1. Presenting a system with bond graph method

شکل ۱: مدل نمایش یک سیستم به‌وسیله روش باندگراف

متلب کمک گرفته می‌شود. برای انجام این کار، هر مدل باندگراف توسط دو ماتریس شناسه تعریف می‌شود. در شکل ۱ یک نمودار باندگراف از یک سیستم تصادفی نشان داده شده است.

همان‌طور که ذکر شد، می‌توان برای این نمودار، دو ماتریس شناسه تعریف کرد. در روابط (۱) و (۲)، ماتریس‌های X و Y به عنوان ماتریس‌های شناسه نمودار باندگراف شکل ۱ شناخته می‌شوند.

$$X=\begin{bmatrix} 1J0 & 1 & 0 & I1 & 0 & Se & 1 \\ 0J0 & 0 & 0 & 0 & C1 & 0 & 0 \\ 1J1 & 1 & 0 & I2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$Y=\begin{bmatrix} b1 & 1J0 & 0J0 & 0 & 0 \\ b2 & 0J0 & 1J1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

ماتریس X، مشخصات اتصال‌ها و المان‌های متصل شده به آن‌ها را مشخص می‌کند. به‌صورتی که ستون اول و دوم به ترتیب نمایان‌گر نام و نوع اتصال‌ها، ستون سوم الی پنجم، به ترتیب نمایان‌گر وجود یا عدم وجود المان‌های مقاومت (R)، سلف (I) و خازن (C) و در نهایت ستون ششم و هفتم، نام و نوع ورودی سیستم را مشخص می‌کند. همچنین ماتریس Y مشخصات باندهای بین اتصال‌ها و نوع آن‌ها را تعیین می‌کند. ستون اول این ماتریس نام باند و ستون دوم و سوم هم اتصال‌هایی که باند مذکور آن‌ها را به یکدیگر وصل کرده است، مشخص می‌کند. ستون چهارم و پنجم هم مدل و مقدار عددی (درصورت وجود) باند را تعیین می‌کند. در صورتی که نوع باند از نوع TF باشد، مقدار ستون چهارم برابر ۱ و در صورتی‌که نوع باند از نوع GY باشد مقدار ستون چهارم به عدد ۲ تغییر پیدا می‌کند. باندهای TF و GY بین جریان‌ها و ولتاژهای المان‌های مختلف سیستم، یک رابطه خطی با ضریب مشخص ایجاد می‌کنند.

برنامه نوشته شده در متلب با دریافت ماتریس‌های شناسه که نمایانگر مدل باندگراف سیستم هستند، معادله‌های دینامیکی مساله را تشکیل داده و براساس متغیرهای حالت سیستم، ماتریس A را بر اساس رابطه (۳) تشکیل می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، هر اتصال بسته به نوعی که دارد، یک متغیر اختیار می‌کند. به‌نحوی که اتصال نوع یک[1] متغیر جریان (i) و اتصال نوع صفر[2] متغیر ولتاژ (v) اختیار خواهد کرد. با توجه به اتصال‌ها و المان‌های موجود در نمودار باندگراف شکل ۱، ماتریس A رابطه (۳) به شکل رابطه (۴) نوشته می‌شود.

$$Ax=0 \quad (۳)$$

$$A=\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$A=\begin{bmatrix} v_{I_1} & i_{C_1} & v_{I_2} & \dot{i}_1 & \dot{v}_1 & \dot{i}_2 & i_1 & v_1 & i_2 & S_e \end{bmatrix}' \quad (۵)$$

1 1-Junction
2 0-Junction

جدول ۱: پارامترهای نمونه نمودار باندگراف شکل ۱

Table 1. Parameters of the example bond graph model in Fig. 1

پارامتر	مقدار
$I1$	۱۰
$I2$	۱۰۰
$C1$	۰/۰۰۱

Fig. 2. Time response of *I*1 voltage for bond graph model of Fig. 1

شکل ۲: پاسخ زمانی ولتاژ المان I1 نمودار باندگراف شکل ۱

Fig. 3. Time response of *I*1 voltage obtained from 20-sim software for bond graph model of Fig. 1

شکل ۳: پاسخ زمانی ولتاژ المان I1 بدست آمده از نرم‌افزار ۲۰-سیم مربوط به نمودار باندگراف شکل ۱

Fig. 4. An example of the embryo bond graph model

شکل ۴: نمونه نمودار باندگراف امبریو

Fig. 5. An example of GP tree of the Add-Element function (Add-I)

شکل ۵: نمونه نمودار درختی مربوط به تابع Add-Element (در اینجا Add-I)

جدول ۲: کدهای مربوط به توابع عملیاتی ادغام باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک

Table 2. Construction functions codes for integrating bond graph and genetic programming

تابع عملکردی	کد
Add-R	[۱,۱]
Add-I	[۱,۲]
Add-C	[۱,۳]
Insert-0J	[۲,۰]
Insert-1J	[۲,۱]
Add-Numerical	[۳,۰]
End	[۴,۰]

Fig. 6. Evolved bond graph of Fig. 4 model

شکل ۶: نمودار باندگراف توسعه‌یافته شکل ۴

به منظور ایجاد معادلات فضای حالت، فرم گوس-جردن ماتریس A استخراج می‌گردد که در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$A_{sorted}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&1&1&-1\\0&1&0&0&0&0&-1&0&1&0\\0&0&1&0&0&0&0&-1&0&0\\0&0&0&1&0&0&0&1/I_1&0&-1/I_1\\0&0&0&0&1&0&-1/C_1&0&1/C_1&0\\0&0&0&0&0&1&0&-1/I_2&0&0\end{bmatrix} \quad (۶)$$

حال با استفاده از فرم مرتب‌شده ماتریس A، کد برنامه قادر خواهد بود تا خروجی مورد نیاز کاربر را استخراج کرده و نمودار آن را رسم کند. مقادیر المان‌های این سیستم در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که این مقادیر کاملا تصادفی بوده و صرفا به‌منظور مقایسه خروجی کد متلب با نرم‌افزار ۲۰-سیم[1] انتخاب شده‌اند.

با در نظر گرفتن ورودی پله واحد (Se=۱)، مقدار پاسخ زمانی خروجی ولتاژ المان I۱ در شکل ۲ نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار ورودی در صورتی که از نوع Se باشد، در دامنه الکتریکی، معادل ولتاژ و در دامنه مکانیکی معادل نیرو است. همچنین مدت زمان شبیه‌سازی پنج ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

به منظور بررسی عملکرد صحیح خروجی گرفته شده از کد متلب، مدل شکل ۲ در نرم‌افزار تحلیل دینامیکی ۲۰-سیم مدل‌سازی می‌شود. ۲۰-سیم ابزاری است که به‌وسیله مدل‌سازی شماتیک می‌توان انواع سیستم‌های دینامیکی را در آن مدل‌سازی کرد. پس از اعمال مشخصات سیستم شکل ۱ در این نرم‌افزار، خروجی ولتاژ المان I۱ گرفته می‌شود که نمودار پاسخ زمانی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، این نمودار با نمودار شکل ۲ که از کد طراحی شده این تحقیق به‌دست آمده است، مطابقت کامل دارد.

۲-۲- ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، از روش برنامه‌ریزی ژنتیک می‌توان برای طراحی توپولوژی سیستم‌ها استفاده کرد. در این مقاله نحوه توسعه یک مدل باندگراف با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، توضیح داده می‌شود. همانند مسائل عمومی برنامه‌ریزی ژنتیک، این روش هم نیازمند یک مدل مرجع است که سیستم براساس آن از یک حالت اولیه توسعه پیدا کند. مدل اولیه باندگراف، امبریو نامیده می‌شود. امبریو باید ورودی، خروجی و برخی از المان‌های اصلی سیستم نهایی را داشته باشد. شکل ۴ یک نمونه مدل امبریو را نشان می‌دهد. برای توسعه یک مدل امبریو، به باند یا اتصال قابل تغییر نیاز است. به‌منظور توسعه این مدل، روی باند متصل به المان I، یک باند بخش قابل تغییر قرار داده شده است. باند قابل تغییر با مربع خط‌چین و در صورت نیاز اتصال قابل تغییر با دایره خط‌چین نشان داده می‌شود.

روی باند قابل تغییر، یک اتصال و روی اتصال قابل تغییر، یک المان می‌توان قرار داد. یک نمونه از نمودار درختی طراحی شده توسط روش برنامه‌ریزی ژنتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

این نمودار درختی روی یک باند قابل‌تغییر اعمال می‌شود. نمودارهای درختی شامل توابع عملیاتی مشخصی هستند که هرکدام وظیفه مشخصی به عهده دارند. تابع Add-Element، وظیفه اضافه کردن یک المان به اتصال، تابع Insert-Junction وظیفه افزودن

1 20-sim

جدول ۳: پارامترهای اولیه فرآیند ادغام باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک
Table 3. Initial parameters for integrating bond graph and genetic programming process

پارامترهای طراحی	مقدار
جمعیت اولیه	۸۰
تعداد نسل	۱۶۰
عمق درخت اولیه	۹
حداکثر عمق مجاز	۱۳
درصد احتمال جهش	۰/۲
درصد احتمال تقاطع	۰/۸
درصد احتمال افزودن المان R	۰/۳۳
درصد احتمال افزودن المان I	۰/۳۳
درصد احتمال افزودن المان C	۰/۳۴
درصد درخت‌های با عمق کامل	۴۰
درصد جمعیت بدون تغییر	۴۰

اتصال با نوع مشخص و تابع End وظیفه بستن شاخه درخت را به عهده دارند. هر تابع Add-Element می‌تواند حداکثر دو زیرشاخه داشته باشد. بر این اساس ممکن است زیرشاخه آن تنها یک بخش محاسباتی Add-Num یا علاوه بر آن یک زیرشاخه دیگر تحت عنوان Insert-Junction هم داشته باشد. بخش محاسباتی Add-Num مقدار المان شاخه اصلی مربوطه را تعیین می‌کند. به همین ترتیب، تابع عملیاتی Insert-Junction هم ممکن است تا حداکثر دو زیرشاخه را اختیار کند. اگر این تابع یک زیرشاخه داشته باشد، آن زیرشاخه End و در صورتی‌که زیرشاخه دیگری هم داشته باشد، آن زیرشاخه Add-Element خواهد بود. حال پس از توضیح راجع به نحوه عملکرد نمودار درختی مربوط به ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک، نحوه اعمال این نمودار درختی، به مدل امبریوی باندگراف و بخش قابل تغییر مربوطه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با اعمال نمودار درختی شکل ۵ به مدل امبریوی شکل ۴، مدل توسعه‌یافته شکل ۶ به‌دست آمده است.

به منظور شناساندن توابع عملیاتی به برنامه طراحی شده در متلب، برای هرکدام از آن‌ها یک کد بایستی در نظر گرفته شود. این کدها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند

پس از ایجاد هر نمودار درختی، مرحله به مرحله این توابع به نمودار باندگراف امبریو اعمال می‌شوند و در نهایت سیستم توسعه‌یافته نهایی را شکل می‌دهند. پس از تشکیل جمعیت اولیه، همانند روش برنامه‌ریزی ژنتیک مرسوم، عملیات‌های برش[1] و جهش[2] روی جمعیت‌ها اعمال می‌شود تا پراکندگی هر نسل افزایش پیدا کند. همچنین برخی از جمعیت تولید شده در هر نسل به‌صورت دست نخورده باقی می‌ماند و به نسل بعدی منتقل می‌شود. دلیل انجام این کار این است که اگر این جمعیت‌های جدید تولید شده، پاسخ احتمالی خوبی را در خود جای داده باشند، بدون تغییر به نسل‌های بعدی منتقل شوند. در زمان اعمال عملگر برش، بایستی توجه داشت که نوع تابع عملیاتی دو خانه‌ای که قرار است با یکدیگر عوض شوند، یکی باشد. برای مثال، اولا یک تابع Add-Element از درخت اول حتما باید با یک تابع Add-Element از درخت دوم عوض شود. دوما ترجیح داده می‌شود که نوع المان‌ها هم با یکدیگر یکسان باشند؛ به عنوان مثال، تابع Add-R درخت اول با تابع Add-R از درخت دوم عوض شود. دلیل اهمیت این موضوع این است که در برخی مسائل، دامنه تغییرات مقدار یک المان نوع R ممکن است تفاوت چشمگیری با یک المان نوع C داشته باشد.

به‌منظور انجام شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از پارامترهای اولیه بایستی درنظر گرفته شود. به عنوان مثال، درصد احتمال ایجاد المان‌های R، I و C و حداکثر عمق مجاز درخت در برنامه بایستی مشخص شود تا

1 Crossover
2 Mutation

Fig. 7: Embryo model of band pass filter [23]: a) Electrical circuit, b) Bond graph presentation

شکل ۷: مدل امبریوی فیلتر میان‌گذر [۳۲]: الف) مدار الکتریکی، ب) نمودار باندگراف

جدول ۴: پارامترهای به‌دست آمده از فیلتر میان‌گذر قبل و بعد بهینه‌سازی

Table 4. Values of obtained elements for designed band pass filter before and after optimization

پارامترهای طراحی	قبل از بهینه‌سازی	پس از بهینه‌سازی
$C1$	۱/۴۳۳×۱۰$^{-۷}$	۱/۴۳۳×۱۰$^{-۷}$
$I1$	۷/۹۰۸×۱۰$^{-۳}$	۷/۸۴۷×۱۰$^{-۳}$
$I2$	۳/۶۸۴×۱۰$^{-۳}$	۳/۶۳۱×۱۰$^{-۳}$
$I3$	۵/۰۱۱×۱۰$^{-۳}$	۴/۵۹۳×۱۰$^{-۳}$
$I4$	۳/۰۱۹×۱۰$^{-۳}$	۳/۰۲۰×۱۰$^{-۳}$
$C2$	۱/۲۳۱×۱۰$^{-۷}$	۱/۱۵۷×۱۰$^{-۷}$

طراحی بر مبنای آن‌ها انجام گیرد. پارامترهای اولیه طراحی در جدول ۳ نشان داده شده است.

در این مقاله اختلاف خطای بین پاسخ فرکانسی تابع تبدیل به‌دست آمده در این مقاله و مدل مرجع [۲۳] به‌عنوان تابع هدف اصلی درنظر گرفته می‌شود. خطای دو پاسخ فرکانسی بدین صورت اندازه‌گیری می‌شود که ابتدا بازه فرکانسی مورد نظر در بستر لگاریتمی، به n واحد مشخص تقسیم می‌گردد و سپس اختلاف پاسخ‌های فرکانسی سیستم به‌دست آمده و سیستم مطلوب در هر واحد، به صورت قدرمطلق با یکدیگر جمع می‌شوند [۲۳]. رابطه (۷) نحوه محاسبه تابع هدف مساله را نشان می‌دهد.

$$E = \sum_{i=1}^{i=n} \left| H_{act}(\omega(i)) - H_{des}(\omega(i)) \right| \qquad (۷)$$

به‌صورتی‌که $H_{act}(\omega(i))$ مقدار پاسخ فرکانسی خروجی مساله در فرکانس iام و $H_{des}(\omega(i))$ مقدار پاسخ فرکانسی مطلوب در فرکانس iام است.

پس از استخراج بهترین پاسخ، باید به این نکته توجه داشت که سیستم نهایی به‌دست آمده از نظر کد طراحی شده، دارای بهترین توپولوژی است، اما ممکن است مقادیر المان‌های آن در بهینه‌ترین مقدار خود قرار نداشته باشند. بر همین اساس، پس از اتمام مراحل شبیه‌سازی، یک برنامه کمکی اجرا می‌شود و المان‌های توسعه یافته بهترین پاسخ را شناسایی کرده و مقادیر آن‌ها را وارد یک مرحله بهینه‌سازی جدید می‌کند. بر این اساس، مرحله دوم بهینه‌سازی پس از شناسایی المان‌ها، آن‌ها را به عنوان متغیر طراحی در نظر می‌گیرد و حد بالا و پایین آن‌ها را تعیین می‌کند. سپس با اجرای الگوریتم ژنتیک مرسوم، یک بهینه‌سازی روی بهترین پاسخ اجرا می‌شود

Fig. 8. GP tree of best individual in band pass filter design with depth of 13 in single objective approach

شکل ۸: نمودار درختی بهترین جمعیت فیلتر میان‌گذر با عمق درخت ۱۳ در طراحی تک‌هدفه

Fig. 9. Evolved band pass filter model in single objective approach: a) Electrical circuit, b) Bond graph presentation

شکل ۹: فیلتر میان‌گذر توسعه‌یافته طراحی تک‌هدفه: الف) مدار الکتریکی، ب) نمودار باندگراف

Fig. 10. Band pass filter: a) Frequency response of desired system, b) Comparison of absolute error for present study system and reference model [23] in one-objectisve approach

شکل ۱۰: سیستم فیلتر میان‌گذر: الف) پاسخ فرکانسی سیستم مطلوب، ب) مقایسه خطای مطلق پاسخ فرکانسی سیستم‌های تحقیق حاضر و سیستم تحقیق مرجع [۲۳] در حالت تک‌هدفه

جدول ۵: مقادیر تابع هدف فیلترهای میان‌گذر تحقیق حاضر و تحقیق مرجع [۲۳]

Table 5. Objective function values of band pass filter for present study and reference model [23]

سیستم	مقدار
فیلتر میان‌گذر ساده	۰/۱۶۵۳
فیلتر میان‌گذر بهینه‌شده	۰/۰۰۱۱۳
فیلتر میان‌گذر مرجع [23]	۲۷/۳۴۱

تا با تنظیم پارامترهای بهترین توپولوژی، پاسخ جمعیت نهایی در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار گیرد.

۳- مورد تحقیق

در این تحقیق چند نمونه از مسائل رایج از دامنه‌های الکتریکی و مکانیکی در ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۳-دامنه الکتریکی

فیلترهای الکتریکی همواره نقش مهمی در مسائل الکتریکی و کنترلی داشته‌اند. در این تحقیق دو فیلتر میان‌ناگذر و میان‌گذر مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با مدل پیشنهاد شده در مرجع [۲۳] مقایسه می‌شود.

۳-۳-۱- فیلتر الکتریکی میان‌گذر

تاکنون تحقیق‌های بسیاری در زمینه طراحی انواع فیلتر الکتریکی صورت گرفته است. در اولین مورد تحقیق، نحوه طراحی یک فیلتر میان‌گذر به‌وسیله ادغام دو روش باندگراف و برنامه‌ریزی ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با مرجع [۲۳] مقایسه می‌شود. در یک مجموعه، وظیفه فیلتر میان‌گذر، عبور محدوده خاصی از فرکانس است. این فیلتر دارای یک باندگذر در بازه فرکانسی ۵×۱۰^{۴} الی $۱۰^{۵}$ است و طراحی آن بر اساس نمونه مرجع فیلتر میان‌گذر مرتبه دو باترورث[1] [۲۳] انجام می‌پذیرد. پاسخ فرکانسی در بازه فرکانسی ۱۰

1 Second Order Butterworth Filter

Fig. 11. Pareto front of designing band pass filter in two-objective approach

شکل ۱۱: نمودار پارتوی طراحی چندهدفه فیلتر میان‌گذر

جدول ۶: مقایسه مقادیر توابع هدف سه نقطه طراحی A، B و C فیلتر میان‌گذر در طراحی دوهدفه

Table 6. Objective functions values of band pass filter for design points *A*, *B* and *C* in two-objective approach

نقطه طراحی	مقدار خطا	عمق درخت
نقطه *A*	۰/۱۶۵۳	۹
نقطه *B*	۰/۱۶۵۳	۷
نقطه *C*	۱/۴۹۲	۶

الی 10^6 رادیان بر ثانیه و با ۱۰۰۰ عدد نمونه استخراج می‌گردد. تابع تبدیل سیستم مطلوب که مطابق با مرجع مقاله [۲۳] انتخاب شده، در رابطه (۸) نوشته شده است. مدل امبریو برای طراحی این فیلتر در شکل ۷ به صورت مدار الکتریکی و نمودار باندگراف نشان داده شده است. این مدل دارای یک مقاومت ۱۵۱ اهمی است. هدف مساله، توسعه مدل امبریو به نحوی است که پاسخ فرکانسی تابع تبدیل نسبت ولتاژ مقاومت مذکور به ولتاژ ورودی با تابع تبدیل رابطه (۸) برابر شود.

$$H_{bp_des}(s) = \frac{5\times10^4 s}{s^2 + 5\times10^4 s + 5\times10^9} \qquad (۸)$$

• طراحی فیلتر الکتریکی میان‌گذر به‌صورت تک‌هدفه

به منظور طراحی فیلتر میان‌گذر، ابتدا در بخش اول، طراحی به‌صورت تک‌هدفه و بر اساس تابع هدف مقدار خطای بین پاسخ فرکانسی مدل مطلوب و مدل طراحی شده انجام می‌گیرد. پس از انجام شبیه‌سازی و گذشت تعداد نسل مشخص، پاسخ بهینه استخراج می‌شود و فیلتر میان‌گذر جدید به‌دست می‌آید. نمودار درختی این جمعیت در شکل ۸ نشان داده شده است. عمق این نمودار درختی برابر ۱۳ است. همچنین پارامترهای پاسخ نهایی وارد مرحله بهینه‌سازی می‌شوند و مقادیر قبل و بعد بهینه‌سازی آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین رابطه تابع هدف فیلتر میان‌گذر مرجع [۲۳] و

Fig. 12. GP tree of designed point *B* for designing band pass filter in two-objective approach

شکل ۱۲: نمودار درختی نقطه طراحی B طراحی دوهدفه فیلتر میان‌گذر در طراحی دوهدفه

جدول ۷: پارامترهای به‌دست آمده از فیلتر میان‌گذر در نقطه طراحی B مربوط به طراحی دوهدفه

Table 7. Values of obtained elements for design point *B* of band pass filter in two-objective function approach

پارامتر	مقدار عددی
$C1$	$۱/۴۳۳\times۱۰^{-۷}$
$I1$	$۳/۰۱۹۸\times۱۰^{-۳}$
$C2$	$۱/۲۳۱\times۱۰^{-۷}$

Fig. 13. Evolved band pass filter model for design point *B* of two-objective approach: a) Electrical circuit, b) Bond graph presentation

شکل ۱۳: مدل توسعه یافته فیلتر میان‌گذر بر اساس نقطه طراحی B در طراحی دوهدفه: الف) مدار الکتریکی، ب) نمودار باندگراف

سیستم میان‌گذر به دست آمده از این تحقیق در رابطه‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

$$H_{bp_ref}(s)=\frac{4.951\times10^{4}s}{s^{2}+4.951\times10^{4}s+4.945\times10^{9}} \quad (۹)$$

$$H_{bp_opt}(s)=\frac{4.999999\times10^{4}s}{s^{2}+5\times10^{4}s+5.000012\times10^{9}} \quad (۱۰)$$

مشاهده می‌شود که تابع تبدیل فیلتر میان‌گذر به‌دست آمده از این تحقیق، تطابق بیشتری با تابع تبدیل مدل مطلوب (رابطه (۸)) دارد.

با اعمال بهترین پاسخ به نمودار امبریو، فیلتر میان‌گذر توسعه‌یافته نهایی به‌دست می‌آید. نمودار باندگراف و مدار الکتریکی فیلتر میان‌گذر توسعه‌یافته نهایی در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰، مقایسه پاسخ زمانی فیلترهای طراحی شده در این مقاله را نسبت به مدل مرجع و مدل مطلوب می‌توان مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، سیستم طراحی شده اولیه این مقاله در مقایسه با مدل مقاله [۲۳] از مطابقت بیشتری با مدل مطلوب برخوردار است. علاوه بر آن، سیستم بهینه شده پاسخ به‌دست آمده هم نسبت به مدل طراحی شده اولیه و همچنین نسبت به مدل مرجع، پاسخ بهتری را نشان می‌دهد. در جدول ۵ نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با یکدیگر و با مدل مرجع [۲۳] مقایسه می‌شوند.

- طراحی فیلتر الکتریکی میان‌گذر به‌صورت دوهدفه

همانطور که در بخش تک‌هدفه مشاهده شد، بهترین پاسخ استخراج شده، دارای عمق درخت ۱۳ بود. در مسائل مربوط به استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، مطلوب است که پاسخ نهایی علاوه بر مطابقت مناسب با مدل مرجع، از پیچیدگی کمتری برخوردار باشد. در ادغام این روش با باندگراف هم این قضیه صادق است و در طراحی فیلتر میان‌گذر ترجیح داده می‌شود که از المان‌های کمتری در سیستم نهایی استفاده گردد. در مدل نهایی ارائه شده توسط طراحی تک‌هدفه، تعداد ۶ المان به مدل امبریو اضافه شد، به همین دلیل در این بخش سعی می‌شود تا با در نظر گرفتن عمق درخت به عنوان تابع هدف دوم، تا جای ممکن سیستم نهایی ساده‌تر شود.

در طراحی دوهدفه این مساله، تمامی پارامترها همانند قبل در نظر گرفته می‌شود، با این تفاوت که در این بخش از مفهوم نقاط غیر برتر پارتویی استفاده می‌گردد. پس از انجام شبیه‌سازی، یک نمودار پارتو حاوی سه نقطه غیر برتر به‌دست می‌آید که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سه نقطه موجود در این نمودار به ترتیب نقاط A، B و C نام‌گذاری می‌شوند. هرکدام از این نقاط، نمودار درختی مختص خود را دارا هستند.

در جدول ۶ مقادیر توابع هدف این سه نقطه نشان داده می‌شود. همانطور که مشخص است خطای نقاط A و B مشابه مقدار خطای طراحی تک‌هدفه شده است، با این تفاوت که مقدار عمق درخت آن‌ها به ترتیب برابر ۹ و ۷ شده است. همچنین نقطه C هم با عمق درخت ۶، خطایی معادل ۱/۴۹۲ را دارا است.

در این نمودار، نقطه طراحی B به عنوان نقطه مصالحه طراحی انتخاب شده و مقادیر المان‌های آن در جدول ۷ و نمودار درختی آن در شکل ۱۲ نشان داده می‌شود.

در نمودار درختی شکل ۱۲، نشان داده شده است که سه المان به مدار فیلتر میان‌گذر اضافه می‌شود. این سه المان از آن‌جا که با اتصال‌های نوع-۱ به یکدیگر وصل شده‌اند، باید با هم به‌صورت سری نصب شوند. مدل بهینه مرجع [۲۳] با اضافه کردن دو المان دارای تابع هدف به مقدار برازندگی ۲۷/۳۴۱ است. مدل نقطه طراحی B به‌دست آمده در این مقاله، با اضافه شدن سه المان، مقدار برازندگی معادل ۰/۱۶۵۳ می‌شود. با این‌که مدل طراحی شده در این مقاله یک المان نسبت به مدل مرجع بیشتر دارد، اما با توجه به کاهش چشم‌گیر مقدار خطا، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

پس از اعمال این نمودار درختی، مدل امبریوی فیلتر میان‌گذر توسعه پیدا می‌کند و مدل نهایی آن در شکل ۱۳ نشان داده می‌شود.

۳-۳-۲- فیلتر الکتریکی میان‌ناگذر

مساله بعدی در دامنه الکتریکی، طراحی یک فیلتر میان‌ناگذر با فرکانس توقف بین 5×10^{4} الی 10^{5} است [۲۳]. این فیلتر دقیقا برعکس فیلتر میان‌گذر عمل می‌کند و با عبور اکثر فرکانس‌ها، محدوده خاصی را تضعیف می‌کند. رابطه تابع تبدیل این فیلتر در رابطه (۱۱) نشان داده شده است [۲۳].

$$H_{bs_des}(s)=\frac{s^{2}+5\times10^{9}}{s^{2}+5\times10^{4}s+5\times10^{9}} \quad (۱۱)$$

Fig. 14. Embryo model of band stop filter [23]: a) Electrical circuit, b) bond graph presentation

شکل ۱۴: مدل امبریوی فیلتر میان‌ناگذر [۲۳] : الف) مدار الکتریکی، ب) نمودار باندگراف

جدول ۸: پارامترهای به‌دست آمده از فیلتر میان‌ناگذر قبل و بعد بهینه‌سازی

Table 8. Values of obtained elements for designed band stop filter before and after optimization

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی	پس از بهینه‌سازی
$I1$	۲/۰۰۰۷×۱۰$^{-۳}$	۲×۱۰$^{-۳}$
$C1$	۹/۹۹۳۸×۱۰$^{-۸}$	۱۰×۱۰$^{-۸}$

Fig. 15. GP tree of best individual in band stop filter design

شکل ۱۵: نمودار درختی بهترین پاسخ فیلتر میان‌ناگذر

Fig. 16. Evolved band stop filter model: a) Electrical circuit, b) Bond graph presentation

شکل ۱۶: مدل توسعه یافته فیلتر الکتریکی میان‌ناگذر، الف) مدار الکتریکی، ب) نمودار باندگراف

این نوع فیلتر در فرکانس قطع خود، دارای یک فرکانس فرورفتگی[1] است. به‌همین دلیل در نزدیکی این فرکانس، تعداد نمونه‌های فرکانسی باید افزایش پیدا کند. بر این اساس، بازه فرکانسی در بخش اول با تعداد ۱۰۰۰ نمونه در بازه فرکانسی ۱۰^{۲} الی ۱۰^{۴} در بخش دوم با تعداد ۲۰ هزار نمونه در بازه ۱۰^{۴} الی ۲×۱۰^{۵} و در بخش آخر با تعداد ۱۰۰۰ عدد نمونه در بازه ۲×۱۰^{۵} الی ۱۰^{۷} قرار می‌گیرد. مدل امبریوی این فیلتر، دو مقاومت با مقادیر ۱۰۰ و ۱۰۰۰۰۰۰ مگا اهم خواهد داشت که در شکل ۱۴، نمودار باندگراف و مدار الکتریکی آن نشان داده می‌شود. در این مدل، خروجی سیستم از ولتاژ مقاومت دوم گرفته می‌شود.

پس از انجام عملیات شبیه‌سازی، بهترین پاسخ استخراج می‌گردد که در شکل ۱۵، نمودار درختی آن نشان داده می‌شود. با اعمال این نمودار درختی به مدل امبریو، نمودار باندگراف و مدار الکتریکی فیلتر میان‌ناگذر توسعه‌یافته به‌دست می‌آید که در شکل ۱۶ نشان داده می‌شود.

همانند مساله قبل پس از به‌دست آوردن بهترین توپولوژی، المان‌های اضافه شده در نمودار درختی نهایی شناسایی می‌شوند و

1 Notch Frequency

Fig. 17. Band stop filter: a) Frequency response of desired system, b) Comparison of absolute error for present study system and reference model [23] in one-objective approach

شکل ۱۷: سیستم فیلتر میان‌ناگذر: الف) پاسخ فرکانسی سیستم مطلوب، ب) مقایسه خطای مطلق پاسخ فرکانسی سیستم‌های تحقیق حاضر و سیستم تحقیق مرجع [۲۳] در حالت تک‌هدفه

جدول ۹: مقادیر تابع هدف فیلترهای میان‌ناگذر تحقیق حاضر و تحقیق مرجع [23]

Table 9. Objective function values of band stop filter for present study and reference model [23]

سیستم	مقدار
فیلتر میان‌ناگذر ساده	۲/۱۴۵۹
فیلتر میان‌ناگذر بهینه‌شده	۱/۳۵۶۴×۱۰$^{-۶}$
فیلتر میان‌ناگذر مرجع [23]	۵۵/۸۰۴

Fig. 18. Embryo model of MSC system [23]: a) Free diagram presentation, b) bond graph presentation

شکل ۱۸: مدل امبریوی سیستم جرم، فنر و میراگر [۲۳]: الف) نمودار جسم آزاد، ب) نمودار باندگراف

مقادیر آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه می‌گردند تا مقدار تابع هدف سیستم طراحی شده به حداقل مقدار خود نزدیک شود. در جدول ۸، مقادیر المان‌های بهترین پاسخ در دو حالت قبل و بعد بهینه‌سازی آورده شده‌اند.

حال در شکل ۱۷، نمودار پاسخ فرکانسی تابع تبدیل سیستم طراحی شده در این تحقیق در دو حالت اولیه و بهینه‌شده در مقایسه با مدل مرجع و مدل مطلوب نشان داده می‌شود.

همانطور که مشخص است، سیستم طراحی شده در این مقاله، در

Fig. 19. GP tree of best individual in MSC system design with depth of 13 in single objective approach

شکل ۱۹: نمودار درختی بهترین پاسخ طراحی سیستم جرم، فنر و میراگر با عمق درخت ۱۳ در طراحی تک‌هدفه

جدول ۱۰: پارامترهای به‌دست آمده از بهترین پاسخ سیستم جرم، فنر و میراگر قبل و بعد بهینه‌سازی در طراحی تک‌هدفه

Table 10. Values of obtained elements for designed MSC system before and after optimization

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی	پس از بهینه‌سازی
$R1$	۱۱۸/۸۹۷۸	۱۲۴/۶۰۱۸
$R2$	۱۲۷/۶۲۷۹	۱۲۹/۸۰۰۵
$R3$	۱۱۶/۷۶۲۲	۱۱۶/۷۴۶۱
$R4$	۱۰۵/۲۳۵۴	۱۰۳/۵۲۷۱
$R5$	۱۰۰/۰۰۰۲	۱۰۰
$C1$	۰/۰۰۰۹۹۹۹	۰/۰۰۱۰

Fig. 20. Evolved model of MSC system in one objective approach: a) Free diagram presentation, b) Bond graph presentation

شکل ۲۰: پاسخ توسعه یافته سیستم جرم، فنر و میراگر در طراحی تک‌هدفه: الف) نمودار جسم آزاد، ب) نمودار باندگراف

Fig. 21. MSC system: a) Frequency response of desired system, b) Comparison of absolute error for present study system and reference model [23] in the one-objective approach

شکل ۲۱: سیستم جرم، فنر و میراگر: الف) پاسخ فرکانسی سیستم مطلوب، ب) مقایسه خطای مطلق پاسخ فرکانسی سیستم‌های تحقیق حاضر و سیستم تحقیق مرجع [۲۳] در حالت تک‌هدفه

جدول ۱۱: مقادیر تابع هدف سیستم جرم، فنر و میراگر تحقیق حاضر و تحقیق مرجع [23] در طراحی تک‌هدفه

Table 11. Objective function values of MSC system for present study and reference model [23] in the single-objective approach

سیستم	مقدار
سیستم جرم، فنر و میراگر ساده	۷/۴۵۶۶×۱۰$^{-۸}$
فیلتر جرم، فنر و میراگر بهینه‌شده	۱/۸۴۴×۱۰$^{-۱۶}$
فیلتر جرم، فنر و میراگر مرجع [23]	۱/۶۱۸۴×۱۰$^{-۴}$

Fig. 22. Pareto front of designing MSC system in the two-objective approach

شکل ۲۲: نمودار پارتوی طراحی چندهدفه سیستم جرم، فنر و میراگر

حالت اولیه و مخصوصا پس از بهینه‌سازی، خروجی بسیار بهتری را نسبت به مدل مرجع از خود نشان داده‌اند. در جدول ۹، مقادیر توابع هدف این دو مدل با مدل مرجع مقایسه شده‌اند.

با توجه به روابط (۱۲) و (۱۳)، مقایسه بین توابع تبدیل فیلتر میان‌ناگذر مقاله مرجع [۲۳] و تحقیق حاضر نشان می‌دهد که نتایج به‌دست آمده در این مقاله، تطابق بسیار بهتری با مدل مطلوب تابع تبدیل رابطه (۱۱) دارد.

$$H_{bs_ref}(s)=\frac{s^2+4.978\times10^9}{s^2+5.0633\times10^4 s+4.978\times10^9} \qquad (۱۲)$$

$$H_{bs_opt}(s)=\frac{s^2+4.9999\times10^9}{s^2+4.999\times10^4 s+4.9999\times10^9} \qquad (۱۳)$$

۳-۴-دامنه مکانیکی

پس از بررسی عملکرد روش ارائه شده در دامنه الکتریکی، عملکرد آن در دامنه مکانیکی هم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۴-۱- راحی سیستم جرم، فنر و میراگر

در بخش مکانیکی، به منظور بررسی عملکرد کد ادغام دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک و باندگراف، تابع تبدیل سرعت جرم m۲ بر اساس ورودی نیرو به جرم m۱ به‌عنوان مدل مطلوب در نظر گرفته می‌شود که در رابطه (۱۴) مشخص شده است [۲۳].

$$H_{msd_des}(s)=\frac{V(s)}{F(s)}=\frac{4\times s+40}{s^3+40\times s^2+400\times s} \qquad (۱۴)$$

- طراحی سیستم جرم، فنر و میراگر به‌صورت تک هدفه

مدل امبریوی سیستم جرم، فنر و میراگر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این مدل اولیه دارای دو جرم m۱=۵ kg و m۲=۵ kg است [۲۳] و نیروی وارده به جرم m۱ به عنوان ورودی سیستم و سرعت خطی جرم m۲ به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته می‌شود. هدف مساله، رسیدن به ترکیبی از فنر و میراگر است که پاسخ تابع تبدیل آن، با تابع تبدیل رابطه (۱۴) برابر شود.

نمودار درختی بهترین پاسخ در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این نمودار ۵ المان R و یک المان C به سیستم اضافه می‌کند که در دامنه مکانیکی، معادل ۵ المان میراگر و یک المان فنر خواهند بود. مقادیر این المان‌ها در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همانند بخش قبل، پارامترهای بهترین پاسخ این مساله هم توسط روش الگوریتم

Fig. 23. GP tree of designed point *B* for designing MSC system in the two-objective approach

شکل ۲۳: نمودار درختی نقطه طراحی B طراحی دوهدفه سیستم جرم، فنر و میراگر

جدول ۱۲: مقایسه مقادیر توابع هدف سه نقطه طراحی A، B و C سیستم جرم، فنر و میراگر

Table 12. Objective functions values of MSC system for design points *A*, *B* and *C* in the two-objective approach

نقطه طراحی	مقدار خطا	عمق درخت
نقطه *A*	۷/۴۵۶۶×۱۰$^{-۸}$	۷
نقطه *B*	۷/۴۵۶۶×۱۰$^{-۸}$	۵
نقطه *C*	۰/۰۰۳۸۹۴	۳

جدول ۱۳: پارامترهای به‌دست آمده سیستم جرم، فنر و میراگر در نقطه طراحی B در طراحی دوهدفه

Table 13. Values of obtained elements for design point *B* of MSC system in two-objective function approach

پارامتر	مقدار عددی
*R*1	۱۰۰/۰۰۰۲
*C*1	۰/۰۰۰۹۹۹۹۸

ژنتیک بهینه می‌شوند. بر اساس نمودار درختی پاسخ نهایی، مدل توسعه‌یافته سیستم در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

پس از اعمال نمودار درختی بهترین پاسخ و به‌دست آوردن مدل توسعه‌یافته، پاسخ فرکانسی تابع تبدیل آن رسم می‌شود. در شکل ۲۱ پاسخ فرکانسی این مدل نشان داده می‌شود. همانطور که مشخص است نمودار آن انطباق کامل با مدل مطلوب دارد. همچنین در جدول ۱۱ مقادیر توابع هدف مدل تحقیق حاضر و مدل مرجع با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین علاوه بر مقایسه پاسخ فرکانسی سیستم به‌دست آمده در این تحقیق با مدل مرجع و مدل مطلوب، تابع تبدیل سیستم بهینه‌شده به‌دست آمده از این مقاله هم در رابطه (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به رابطه (۱۵) که تابع تبدیل مقاله مرجع [۲۳] را نشان می‌دهد، مشخص است که تابع تبدیل به‌دست آمده در این تحقیق، تطابق بسیار بیشتری با مدل مرجع (رابطه (۱۴)) [۲۳] دارد.

Fig. 24. Evolved MSC system model for design point *B* of two-objective approach: a) Free diagram presentation, b) Bond graph presentation

شکل ۲۴: مدل توسعه‌یافته سیستم جرم، فنر و میراگر براساس نقطه طراحی B در طراحی دوهدفه: الف) نمودار جسم آزاد، ب) نمودار باندگراف

جدول ۱۴: مقایسه مقدار RMS نتایج به‌دست آمده از موارد تحقیق انجام شده با مدل‌های مرجع [23]

Table 14: Comparison of *RMS* values for results of this study and reference model [23]

فیلتر میان‌گذر		فیلتر میان‌ناگذر		سیستم جرم، فنر و میراگر	
نقطه طراحی *B*، با افزودن ۳ المان	مدل مرجع [23] با افزودن ۲ المان	طراحی تک‌هدفه با افزودن۲ المان	مدل مرجع [23] با افزودن ۲ المان	نقطه طراحی*B*، با افزودن ۲ المان	مدل مرجع [23] با افزودن ۲ المان
۳/۵۹۱×۱۰$^{-۶}$	۷/۲۲۵×۱۰$^{-۴}$	۱/۶۱۷×۱۰$^{-۴}$	۰/۰۰۳۵	۲/۷۴۸×۱۰$^{-۱۰}$	۶/۸۲۷×۱۰$^{-۷}$

$$H_{msd_ref}(s)=\frac{4.014\times s+38.0952}{s^3+40.14\times s^2+380.9\times s-1.353\times10^{-12}} \quad (۱۵)$$

$$H_{msd_ref}(s)=\frac{4.00\times s+40.00}{s^3+40.000\times s^2+400.000\times s-2.1477877\times10^{-13}} \quad (۱۶)$$

• طراحی سیستم جرم، فنر و میراگر به‌صورت دوهدفه

با توجه به این‌که حداکثر عمق مجاز سیستم در طراحی تک‌هدفه معادل عدد ۱۳ تعریف شده بود. روند طراحی از این حداکثر عمق درخت استفاده کرد و بهترین پاسخ با عمق ۱۳ ارائه شد. اما بهتر است به‌دلیل وجود المان‌ها و پیچیدگی زیاد سیستم، این عمق را کاهش داد. به همین منظور میزان عمق نمودار درختی به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی به‌صورت دوهدفه انجام می‌پذیرد. همانند بخش الکتریکی، در انتهای شبیه‌سازی یک نمودار پارتو به دست می‌آید که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود. از این نمودار سه نقطه A، B و C انتخاب می‌گردد و نتایج آن‌ها در جدول ۱۲ با یکدیگر مقایسه می‌شود.

در جدول ۱۲ مقادیر توابع هدف سه نقطه طراحی سیستم جرم، فنر و میراگر نشان داده می‌شود. همانند قبل، پاسخ بهینه سیستم تک‌هدفه در این نمودار هم به‌دست آمده است، اما مقادیر عمق نمودار درختی آن در نقاط طراحی A و B به ترتیب به اعداد ۷ و ۵ کاهش پیدا کرده است. در این نمودار، نقطه طراحی C با عمق درخت ۳ و با افزودن تنها یک المان، کمترین عمق درخت را دارا است.

با توجه به کمتر بودن عمق نمودار درختی نقطه طراحی B در مقایسه با نقطه A، این نقطه به عنوان نقطه مصالحه انتخاب می‌گردد و نمودار درختی آن در شکل ۲۳ و المان‌های آن در جدول ۱۳ نشان داده می‌شود.

مدل به‌دست آمده از نقطه طراحی B نسبت به مدل طراحی شده با رویکرد تک هدفه، از سادگی بسیار بیشتری برخوردار است و در عین حال عملکردی مشابه با آن دارد. در انتها پس از اعمال نمودار درختی نقطه طراحی B به مدل اولیه سیستم جرم، فنر و میراگر، مدل نهایی این سیستم استخراج می‌شود و در شکل ۲۴ نشان

داده می‌شود. در نتیجه در سیستم نهایی، سیستم به‌دست آمده نقطه طراحی B از نظر طراحی، پیچیدگی و هزینه، نسبت به سیستم شکل ۲۰، مطلوب‌تر است.

۳-۵- جمع‌بندی نتایج

به‌منظور جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده، در این بخش مقادیر RMS خطای پاسخ‌های موارد تحقیق با مدل مطلوب توسط رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد و مقادیر آن‌ها در جدول ۱۴ با مقادیر RMS مدل‌های مرجع [۲۳] مقایسه می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{(E(1))^2 + (E(2))^2 + \ldots + (E(n))^2}{n}} \qquad (۱۷)$$

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نحوه مدل‌سازی سیستم‌ها با روش باندگراف و نحوه ادغام روش باندگراف با روش برنامه‌ریزی ژنتیک مورد بررسی قرار گرفت. برای ادغام این دو روش، از توابع عملیاتی مشخصی استفاده شد تا نمودارهای درختی مناسب با نمودار باندگراف، تشکیل شود. با توجه به ویژگی باندگراف در مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی، طراحی سه نمونه از هر دو دامنه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری اصلی این پژوهش در استفاده از مفهوم طراحی پارتویی با محوریت توابع چندهدفه در ادغام این دو روش و استفاده از یک بهینه‌سازی مقادیر پارامتر در طراحی تک‌هدفه بوده است. سیستم‌های مورد تحلیل این مقاله، دو فیلتر الکتریکی میان‌گذر و میان‌ناگذر و یک سیستم مکانیکی جرم، فنر و میراگر بودند. با در نظر گرفتن یک مدل اولیه از سیستم‌های مذکور و معرفی یک مدل مطلوب از روش طراحی شده، مدل امبریوی باندگراف توسعه پیدا کرده و نتایج نهایی استخراج شد. پس از استخراج نتایج، پارامترهای طراحی نمودار درختی پاسخ نهایی، وارد مرحله دوم بهینه‌سازی شدند و با تنظیم مقادیر آن‌ها، بهترین پاسخ‌ها به بهینه‌ترین مقدار خود رسیدند. در نهایت، مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج مقاله مرجع نشان دادند که روش ارائه شده در این پژوهش، پاسخ‌هایی با تطابق بسیار بیشتری با مدل‌های مطلوب را در اختیار کاربر قرار می‌دهند. در بخش آخر تحقیق هم با در نظر گرفتن عمق نمودار درختی به‌عنوان تابع هدف دوم، پاسخ‌هایی بهینه با پیچیدگی کم و در عین حال با خطایی کمتر نسبت به مدل مرجع استخراج گردید.

مراجع

[1] D.C. Karnopp, R.C. Rosenberg, Analysis and Simulation of Multiport Systems, *MIT Press, M=assachusetts*, 1968.

[2] D.C. Karnopp, D.L. Margolis, R.C. Rosenberg, System Dynamics: A Unified Approach, 2nd Edition ed., *John Wiley & Sons*, New York, 1990.

[3] E.S. Barjuei, S. Toxiri, G.A. Medrano-Cerda, D.G. Caldwell, J. Ortiz, Bond Graph Modeling Of An Exoskeleton Actuator, 10*th Computer Science and Electronic Engineering* (*CEEC*), IEEE, (2018), pp. 106-101.

[4] S. Samaddar, P. Kushwaha, S. Ghoshal, Bond graph modelling and simulation of a variable inertia flywheel, *IOP Conference Series*: *Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2018), pp. 012206.

[5] D. Zhang, S. Mu, C. Chan, G.Y. Zhou, Optimization Control of SOFC Based on Bond Graph Model, *Energy Procedia*, 179-174 (2018) 152.

[6] G. Soharu, R. Singh, T. Bera, Bond Graph Modelling and Simulation of Planar Quadruple Robot with Different Gaits, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (13-1 (2019.

[7] M. Louzazni, A. Khouya, K. Amechnoue, M. Mussuta, R. Herbazi, Bond Graph Modelling of Different Equivalent Models of Photovoltaic Cell, *Procedia Manufacturing*, 32 809-802 (2019).

[8] J.R. Koza, F.H. Bennett, D. Andre, M.A. Keane, F. Dunlap, Automated synthesis of analog electrical circuits by means of genetic programming, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 128-109 (1997) (2)1.

[9] J.R. Koza, M.A. Keane, J. Yu, F.H. Bennett, W. Mydlowec, Automatic Creation of Human-Competitive Programs and Controllers by Means of Genetic Programming, *Genetic Programming and Evolvable Machines*, -121 (2000) (1)1 164.

[10] M.A. Keane, J. Yu, J.R. Koza, Automatic Synthesis of Both the Topology and Tuning of a Common

[18] R.C. Rosenberg, E.D. Goodman, S. Kisung, Some Key Issues in Using Bond Graphs and Genetic Programming for Mechatronic System Design, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2001.

[19] E.D. Goodman, K. Seo, R.C. Rosenberg, Z. Fan, J. Hu, B. Zhang, Automated Design Methodology for Mechatronic Systems Using Bond Graphs and Genetic Programming, *Proceedings* 2002 *NSF Design*, *Service and Manufacturing Grantees and Research Conference*, (221-206 (2002.

[20] S. Behbahani, C. W. de Silva, Automated Identification of a Mechatronic System Model Using Genetic Programming and Bond Graphs, *Journal of Dynamic Systems*, *Measurement*, *and Control*, 2013) 135).

[21] S. Behbahani, C. W. de Silva, Mechatronic Design Evolution Using Bond Graphs and Hybrid Genetic Algorithm With Genetic Programming, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 2013) (1)18).

[22] S. Behbahani, C. W. de Silva, Niching Genetic Scheme With Bond Graphs for Topology and Parameter Optimization of a Mechatronic System, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, (2014) (1)19 277-269.

[23] B.L. Samarakoon, L.B. Gamage, C. W. de Silva, Design evolution of engineering systems using bond graphs and genetic programming, *Mechatronics*, (2015).

[24] S.K. Tabatabaei, S. Behbahani, C. W. de Silva, Self-adjusting multidisciplinary design of hydraulic engine mount using bond graphs and inductive genetic programming, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (39-32 (2016.

Parameterized Controller for Two Families of Plants using Genetic Programming, *GECCO* 2000, (504-496 (2000.

[11] J.R. Koza, D. Andre, F.H. Bennett, M.A. Keane, Evolution using genetic programming of a low-distortion 96 Decibel operational amplifier, *Proceedings of the* 1997 *ACM Symposium on Applied Computing*, (216-207 (1997.

[12] J.R. Koza, F.H. Bennett=, D. Andre, M.A. Keane, Synthesis of topology and sizing of analog electrical circuits by means of genetic programming, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2)186 482-459 (2000).

[13] M.A. Keane, J.R. Koza, M.J. Streeter, Automatic synthesis using genetic programming of an improved general-purpose controller for industrially representative plants, *Evolvable Hardware*, *Proceedings. NASA/DoD Conference on*, 2002.

[14] J.R. Koza, M.A. Keane, M.J. Streeter, W. Mydlowec, J. Yu, G. Lanza, *Genetic Programming IV*: *Routine Human Competitive Machine Intelligence*, Kluwer Academic Publishers, 2003.

[15] A. Jamali, E. Khaleghi, I. Gholaminezhad, N. Nariman-zadeh, Modelling and prediction of complex non-linear processes by using Pareto multi-objective genetic programming, *International Journal of Systems Science*, 1688-1675 (2016) (7)47.

[16] A. Tahmassebi, A.H. Gandomi, Building energy consumption forecast using multi-objective genetic programming, *Measurement*, 171-164 (2018) 118.

[17] E.C. Pedrino, T. Yamada, T.R. Lunardi, J.C. de Melo Vieira Jr, Islanding detection of distributed generation by using multi-gene genetic programming based classifier, *Applied Soft Computing*, 215-206 (2019) 74.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

B. Bahrami Joo, A. Jamali, N. Nariman Zadeh, Designing Optimum Multi-Domain System by Integrating Bond Graph and Genetic Programming, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 1015-1038.

DOI: 10.22060/mej.2019.16086.6267

این صفحه عمداً خالی است