



Planning an Integrated Transportation System Using a Gravitational Search Algorithm Based on Fuzzy Mutant Controller

Alireza Hosseinzadeh Kashani¹, Seyed Ahmad Shayannia^{2*}, Mohammad Mehdi Movahedi³, Soheila Sardar⁴

(Received:2023.07.07 - Accepted:2023.10.11)

Abstract:

Gravitational search algorithm is a newly emerging meta-heuristic algorithm. In this algorithm, the gravitational force between answers can be calculated in two ways. In the first method, a response is selected from the local neighborhood space of the current response and the gravitational force between these two responses is calculated. In the second method, the gravitational force is calculated among all the neighboring responses in the neighborhood space of the current response and is not limited to a neighboring response. This algorithm has premature convergence in some optimization problems and gets stuck in the local optimum and does not make progress to find the optimal solution, which is one of the disadvantages of this algorithm. In the article, this problem was tested in the first step by comparing the two mentioned methods, and it was found that the first method has relative superiority in terms of the speed of reaching the response, in particular, the optimal response, and then by defining a heuristic mutation function, it uses a Fuzzy controller to control the jump rate. The proposed method has been evaluated on standard benchmark functions, including single-mode and multi-mode functions, and the results of evaluating these two methods have been compared with the standard gravitational search algorithm (GSA) and the gravitational particle population algorithm (GPS), the particle population optimization algorithm (PSO) and real genetic algorithm (RGA). The observed tests show that the presented method has better results than other compared algorithms.

Key Words: gravitational force algorithm, integrated combined transport, routing, multimodal transport, vehicles, VRP, MTP

1.Ph.D. candidate in Industrial Management, Department of Industrial Management, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2.Assistant Professor, Department of Industrial Management, Firoozkooh branch, Islamic Azad university, Firoozkooh, Iran

*. Corresponding author: SA.shayannia@iau.ac.ir

3.Associate Professor, Department of Industrial Management, Firoozkooh branch, Islamic Azad university, Firoozkooh, Iran

4.Assistant Professor, Department of Industrial Management, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

1. Introduction

The vehicle routing problem has long been a subject of extensive research. However, a review of the literature reveals that simultaneous constraints related to warehouse capacity, vehicle capacity, and route length have not been considered together. Considering these three constraints simultaneously brings the problem closer to reality.

In many logistics environments, the location routing problem helps managers to make decisions such as the location of facilities (distribution centers or warehouses), the allocation of customers to these facilities, and then the transportation plans to connect customers and facilities. In fact, the problems of location routing are defined in order to find the right place and number of facilities as well as distribution routes by means of vehicles. The main difference between routing positioning problem and traditional positioning problem is that in the first one, after determining the location of facilities, communication routes between customers and facilities are examined as a tour, but in the second one, it is assumed that there are direct routes between customers and facilities, which ultimately leads to an increase in distribution costs. So, unlike the traditional positioning method, in the routing positioning method, considering the tour, it simultaneously looks for the optimal places of facilities and also the optimal routes.

2. Literature Review

By reviewing the literature in this field, it was seen that until now, the limitations related to warehouse capacity, vehicle capacity, and route length have not been considered simultaneously, while considering these three limitations together brings the problem closer to reality. Rabbani, Sepehri and Zagerdi, in a research entitled “the problem of vehicle routing connected to multimodal transportation: an integrated approach”, designed and modeled a network consisting of vehicle routes and multimodal transportation routes for the first time. In another study, entitled "Analysis of the Role of Financial Factors in the Whiplash Effect in a Two-tier Supply Chain", Movahedi, Zulfaqari and Jolai, paid attention to the financial factors affecting the escalation of the whiplash

effect and quantified this effect. Moreover, by entering the financial factors in the obtained model, they examined the result carefully examined in two ways: first, investigating the time value of money in estimating the financial value of the demand met during p period; second, investigating changes in the monetary value of orders due to the waiting time for order delivery (L). Dera Mirki also investigated the effectiveness of this proposed algorithm by solving 11 VRP problems in a research titled "New Innovative Algorithm for Solving Vehicle Routing Problems".

3. Methodology

In this research, the goal of developing the gravitational force algorithm is to solve the problems of integrated and multi-purpose transportation systems, and in the real world, the effect of gravity on objects in a mutual way and the application of gravitational force to all objects in space is the main idea of this algorithm. Obviously, this force changes the speed of objects and pulls them towards larger objects, which in nature can be referred to the relationship between the earth, the moon, terrestrial objects and other celestial bodies. Gravitational force algorithm or GSA local search is a new algorithm which, as its name suggests, is a heuristic local search method. In addition, this algorithm belongs to the group of those methods that imitate some natural or physical processes (such as simulated cooling and genetic algorithm).

In the gravitational force algorithm, the search space is imagined as a galaxy, and the solutions in the search space are like the objects inside the galaxy. Each of these bodies creates a mutual force, which is obtained using Newton's law of gravity with a slight change for $F=(m-n)/r^2$ problems. Based on the formula, this force is equal to the difference between the value of the evaluation function of the candidate response and the current response divided by the radius of the neighborhood to the square of two. Since the high speed of the gravitational force algorithm is due to the local search, it is very important to create and select the neighborhood as well as to choose the correct conditions for the solutions to be neighbors in this algorithm. In addition to the high speed in

reaching the optimal response, the algorithm avoids reaching and staying in a local optimum due to the inherent properties of gravity.

4. Result

In this section, the results of the implementation of true genetic algorithm (RGA), particle population optimization algorithm (PSO), gravity particle population algorithm (GPS), standard gravity search algorithm (SGSA) and mutated gravity search algorithm (MUGSA) on 23 functions of the standard benchmark are presented in Tables 2,3 and 4.

Real Genetic Algorithm (RGA)

The true genetic algorithm is randomly generated with an initial population of 50 members in the search space. The dimensions of the problem are the number of genes that are continuously evaluated in the problem space. In each generation, based on the fitness of the chromosomes and using the roulette wheel, parents are selected and then randomly paired with each other. Children are generated by hemming and mutation operators. The rate of hembray operator is 0.3 and the mutation probability is 0.1.

The continuous symmetry operator is performed on each pair of X_i and X_j in the form of equation 1. In this relation, a is a random value with a uniform distribution in the interval $[0,1]$.

$$X_{i, new} = X_i - a(X_i - X_j), X_{j, new} = X_j - a(X_i - X_j) \quad (1)$$

In the mutation operator on each child X_i , a gene X_{id} is randomly selected and its value is replaced with a new random value according to relations 2 and 3 in the range of the search space.

$$\text{Sigma} = \text{Scale} \times (1 - T_t), \text{Scale} = X_{hi} - 5 X_{lo} \quad (2)$$

$$a_{Id, new} = X_{id} + \text{rand} \times \text{Sigma} \quad (3)$$

In the relations above, X_{hi} and X_{lo} are the upper limit and lower limit of the search space, respectively. T is the total number of repetitions and rand is a random number with a normal distribution and zero mean.

Particle Population Optimization Algorithm (PSO)

The particle population optimizer algorithm is randomly generated with an initial population of 50 birds in the search space, and Vid, X id is calculated according to relations 4 and 5.

$$X \text{ id } (t+1) = X \text{ id } (t) + \text{Vid}(t+1) \quad (4)$$

$$\text{Vid } (t+1) = w(t)\text{Vid } (t) + C1r1(pbestid(t)) + C2r2(gbestd - xid(t)) \quad (5)$$

In these relations, ri1 and ri2 are two random variables in the interval [1,0], C 1 and C 2 are positive values, W is the inertial weight, X id and Vid indicate the position and speed of the particles in the d dimension, pbestid and gbestid respectively indicate the best previous position of the i-th particle and the best previous position among all the particles in the population. In these relationships, $C = 2$, $C1 = 2$ and W decreases linearly from 0.9 to 0.2 during repetitions.

Gravitational Particle Population Algorithm (GPS)

Equation 6 has been used to update the speed of the gravitational particle population algorithm, in which the speed of the particle population optimizer algorithm **Vid (t+1) PSO** and the acceleration of the gravitational search algorithm **Vid (t+1) GSA** have been used, respectively, given in relation 7 and 8. In these relations, **3r** is a uniform random variable in the interval [1,0], which is used to create the random property of the speed of the particle population optimization algorithm and the acceleration of the gravitational search algorithm in the gravitational particle population algorithm, and **3C** and **4C** are two constants to determine the degree of the speed of the particle population optimizer algorithm and the acceleration of the gravitational search algorithm in the gravitational particle population algorithm the values of which are considered **3C** and **4C**. Vid (t+1)GPS is also used to update the position of the agents in the particle population algorithm in equation 9.

$$\text{Vid } (t+1) \text{ GPS} = C3r13 \times \text{Vid } (t+1) \text{ PSO} + C4 (li - ri3) \times \text{Vid } (t+1) \text{ GSA} \quad (6)$$

$$\text{Vid } (t+1) \text{ PSO} = W(t)C3\text{Vid } (t) + C1r1(pbestid - X \text{ id } (t)) + c2r2(gbestid - X \text{ id } (t)) \quad (7)$$

$$\text{Vid } (t+1) \text{ GSA} = ravdi \times \text{Vid } (t) + aid(t) \quad (8)$$

$$X \text{ id } (t+1) = X \text{ id } (t) + \text{Vid } (t+1) \text{ GPS} \quad (9)$$

Standard Gravitational Search Algorithm (GSA) and Standard Gravitational Search Algorithm with Mutation (MUGSA)

The two standard gravitational search algorithms and the standard gravitational search algorithm with mutation are also randomly generated with an initial population of 50 objects in the search space. Algorithms are performed according to the second chapter. In the relationships of the second chapter, the value of a equals 20 and G_0 equals 100, and initially $K_0 = N$, where N is the number of factors, and decreases linearly to 1.

5. Discussion

In this research, the validation of the model, using the solution of the proposed model for different problems was estimated. Then, five collective optimizer algorithms, true inheritance algorithm, particle population optimization algorithm, gravity particle population algorithm, standard gravity search algorithm and mutated gravity search algorithm were provided. The search algorithm was used in solving 23 standard benchmark functions, including single mode and multi-mode functions.

The general conclusion is that the gravitational search algorithm and the mutated gravitational search algorithm have better answers on the 23 standard benchmark functions than the real genetic algorithms, the particle population algorithm and the gravitational particle population algorithm, except for the functions F2, F6, F12 to F15. In functions F1, F2, F15, the best results are observed in the gravitational particle population algorithm, while for functions F13, F14, the best results are observed in the particle population optimizer algorithm, and in F9, the real inheritance algorithm has better performance. The efficiency of the gravity search algorithm and the mutated gravity search algorithm is better in functions F4, F7, F11, F21. The diagram of the best solution is shown in Figure 1 and Figure 2 for the comparison between the gravity search algorithm and the mutated gravity search algorithm as an example, respectively for F3 and F11.



10.71737/JPM.2025.3073566

(مقاله پژوهشی)



برنامه ریزی سیستم های حمل و نقل یکپارچه با رویکرد الگوریتم جستجوی گرانشی توسعه یافته مبتنی بر کنترلر فازی جهش

علی رضا حسین زاده کاشانی^۱، سید احمد شایان نیا^{۲*}، محمد مهدی موحدی^۳، سهیلا سردار^۴

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶-پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹)

چکیده

الگوریتم جستجوی گرانشی یک الگوریتم فراابتکاری تازه ظهوری است؛ در این الگوریتم به دو روش می توان نیروی گرانشی میان پاسخ ها را محاسبه کرد. در روش اول یک پاسخ از فضای همسایگی محلی پاسخ جاری انتخاب شده و نیروی گرانشی بین این دو پاسخ محاسبه می شود. در روش دوم، نیروی گرانشی بین تمام پاسخ های همسایه در فضای همسایگی پاسخ جاری محاسبه می شود و به یک پاسخ همسایه محدود نمی شود. این الگوریتم در برخی از مسائل بهینه سازی دچار همگرایی زودرس شده و در بهینه محلی گیر می کند و پیشرفتی برای پیدا کردن جواب بهینه ندارد که این مشکل از معایب این الگوریتم محسوب می شود. برای حل این مشکل، ضمن تنظیم پارامترهای الگوریتم و توابع انتقال به سمت تعادل بهتر بین اکتشاف و بهره برداری، این الگوریتم را گسترش دادیم. در مرحله اول با مقایسه دو روش نامبرده تحت آزمون قرار گرفت که نتیجه آن بدین گونه می باشد: روش اول برتری نسبی از نظر پارامتر سرعت رسیدن به جواب و جواب برتر دارد و سپس با تعریف یک تابع جهش ابتکاری، که از کنترلر فازی جهت کنترل کردن میزان جهش استفاده می کند، برطرف می کند. روش پیشنهاد شده بر روی توابع محک استاندارد که شامل توابع تک مدی و چند مدی است ارزیابی شده است و نتایج حاصل از ارزیابی این دو روش با الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد (GSA) و الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی (GPS)، الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات (PSO) و الگوریتم وراثتی حقیقی (RGA) مقایسه شده است. آزمایش های مشاهده شده، نشان دهنده این است که این روش ارائه شده نتایج بهتری نسبت به دیگر الگوریتم های مقایسه شده دارد.

واژه های کلیدی: الگوریتم نیروی گرانشی، حمل و نقل یکپارچه ترکیبی، مسیریابی، حمل و نقل چند

وجهی، وسایل نقلیه، MTP, VRP

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران andishesaaz@gmail.com

۲. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران (نویسنده مسؤول) SA.shayannia@iau.ac.ir

۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران m_m_movahedi@iaufb.ac.ir

۴. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران s_sardar@iau-tnb.ac.ir

مقدمه

مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه به عنوان یک زمینه گسترده مطالعاتی همواره مورد توجه محققان بوده است. با مروری بر ادبیات این حوزه دیده شد که تا به حال محدودیت‌های مربوط به ظرفیت انبار، ظرفیت وسایل نقلیه و طول مسیر به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته نشده است درحالی که در نظر گرفتن هم‌زمان این سه محدودیت با یکدیگر مسأله را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰).

مسأله مکان‌یابی مسیریابی، در بسیاری از محیط‌های لجستیک به مدیران برای اخذ تصمیماتی مثل محل استقرار تسهیلات (مراکز توزیع یا انبارها)، تخصیص مشتریان به این تسهیلات، سپس برنامه‌های حمل و نقل برای ارتباطات مشتریان به این تسهیلات کمک می‌کند. در واقع مسائل مکان‌یابی مسیریابی، به منظور پیدا کردن مکان و تعداد مناسب تسهیلات و نیز مسیرهای توزیع توسط وسایل نقلیه تعریف شده است. تفاوت اساسی بین مسأله مکان‌یابی مسیریابی با مسأله مکان‌یابی سنتی این است که در اولی پس از تعیین مکان تسهیلات، مسیرهای ارتباطی بین مشتریان و تسهیلات به صورت یک تور بررسی می‌شود ولی در دومی فرض بر این است که مسیرهای مستقیم بین مشتری و تسهیلات وجود دارد و این در نهایت به افزایش هزینه‌های توزیع منجر می‌شود. پس برخلاف روش مکان‌یابی سنتی، در روش مسأله مکان‌یابی مسیریابی با در نظر گرفتن تور، به‌طور هم‌زمان به دنبال مکان‌های بهینه تسهیلات و همچنین مسیرهای بهینه است (رضوی، ۱۳۹۹).

ترانزیت و حمل و نقل از جمله عوامل مهمی است که در چرخه اقتصاد یک کشور، تمامی ارکان اقتصادی از ابتدای امر تولید تا رساندن کالا به بازارهای مصرف نهائی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر حمل و نقل را در ابعاد کلان آن در نظر بگیریم هیچ فعلی در اقتصاد جامعه وجود ندارد که بدون استفاده از این صنعت انجام پذیرد. از این رو داشتن یک صنعت حمل و نقل کارا تأثیر بسزایی در اقتصاد یک جامعه دارد. کشورهایی که دارای موقعیت جغرافیایی مناسب هستند و از موقعیت ترانزیتی خوبی برخوردارند، درآمدهای حاصل از ترانزیت آن‌ها سهم مهمی در تولید ناخالص ملی آن کشور دارد. کشور ایران نیز با توجه به موقعیت استراتژیک و حساس خود می‌تواند در زمره کشورهای موفق در زمینه ترانزیت باشد. متأسفانه این صنعت در ایران یکی از بخش‌هایی به شمار می‌رود که با بی‌توجهی مسئولان روبه‌رو بوده است. بخش حمل و نقل و ترانزیت با توجه به گستره‌ای که تحت پوشش دارد سهم عمده‌ای در زمینه‌سازی برای افزایش حجم مبادلات تجاری دارد و همچنین رشد چشمگیر حجم مبادلات تجاری در قرن اخیر، متأثر از افزایش مازاد تولید در

برخی کشورها و به دنبال آن گسترش فعالیت های بازاریابی بین المللی است. بنابراین بازاریابی در بخش حمل و نقل و تبیین مشکلات موجود از اهمیت ویژه ای برخوردار است (نصرآزادانی و همکاران، ۱۳۹۲).

حمل و نقل یکی از زیرساخت های هر کشور است که مبنا و لازمه سطوح مختلف دسترسی و انتقال مردم و کالا از یک مکان به مکان های دیگر است. سامانه حمل و نقل یکی از عوامل مهم بیان کننده میزان توسعه یافتگی یک کشور است. سامانه های اطلاعات مکانی در زمینه مدیریت بهینه تسهیلاتی چون حمل و نقل، دارای قابلیت های فراوانی هستند. تجزیه و تحلیل شبکه مکانی همانند محاسبه کوتاه ترین مسیر، جابه جایی و تخصیص منابع، محاسبه سطح دسترسی و غیره از مهم ترین این قابلیت ها هستند (صابریان، ۱۳۹۵).

در مسأله حاضر، شبکه بین دپو تا بنادر بزرگ به شکل یک شبکه از مسیرهای وسایل نقلیه (VRP) و شبکه ارتباطی بین بنادر بزرگ و مراکز مصرف، به صورت یک شبکه حمل و نقل چند وجهی (MTP) مدل شده است و در این شبکه، امکان تبدیل روش های حمل کالا به یکدیگر با صرف هزینه در بعضی از مراکز مصرف و واسط وجود دارد بدین صورت که از بنادر بزرگ واقع در منطقه به عنوان مراکز واسط برای دریافت کالا از کشتی های بزرگ و ارسال کالا توسط کشتی های کوچک تر و سایر وسایل نقلیه به مشتریان استفاده می شود. مسأله مورد بررسی یک مسیریابی بهینه دو مرحله ای خواهد بود که مرحله اول شامل حمل و نقل کالاها از دپو به مراکز واسط و مرحله دوم شامل حمل و نقل کالاها از مراکز واسط به مشتریان است. ناوگان حمل و نقل شامل انواع مختلف وسیله نقلیه اعم از کشتی های سوخت بر، فله بر، کانتینربر، واگن های بقل دار، کمپرسی، تانکر، کپسولی برای حمل گاز، کامیون های چادری، کفی، کمرشکن، بوژی و غیره می باشد که دارای ظرفیت های متفاوتی برای حمل کالاها هستند. هدف این مسأله، ارسال کالاها به مشتریان به نحوی است که کالاها با کمترین هزینه حمل و نقل و هزینه انتقال به مشتریان تحویل گردد.

ایده قابل بررسی در این خصوص این است که از بنادر بزرگ موجود در منطقه، به عنوان مراکز واسط برای تغذیه شبکه حمل و نقل دریایی (شامل کشتی ها و بنادر کوچک تر) استفاده می شود. به این ترتیب فرض بر این است که کشتی های بزرگ از یک مرکز (دپو) واقع در خارج از منطقه خلیج فارس واقع در منطقه جبل علی می باشد، روانه منطقه می شوند و کالاها را در چند بندر بزرگ واسط در ایران شامل بندر عباس، بندر امام، چابهار و خرمشهر تخلیه کرده و سپس به دپو بر می گردند. کالاها سپس توسط یک شبکه حمل و نقل چندوجهی (با وجوه حمل دریایی توسط کشتی های کوچک تر؛ حمل ریلی؛ و حمل زمینی) به مراکز مصرف مورد نظر (مراکز مصرف استانی در ایران، و مقاصد ترانزیتی کالا از ایران مانند ترکمنستان، عراق، ترکیه، روسیه، ایتالیا و...) ارسال

می‌شوند. این وضعیت فرصت مناسبی را برای رونق کشتیرانی خصوصی و نیز بنادر کوچک‌تر و کمتر توسعه یافته ایران فراهم می‌کند. به علاوه، همسایگان ایران مانند امارات و پاکستان با سرمایه‌گذاری زیاد بنادر بزرگی را به وجود آورده‌اند که از ظرفیت آن‌ها می‌توان برای این منظور و رونق‌دهی به کشتیرانی و بنادر ایران در خلیج فارس و نیز برای افزایش ظرفیت حمل و نقل و ترانزیت ناوگان کشور بهره‌گرفت. به این ترتیب امکان بهره‌گیری از سرمایه‌دیگران در جهت فعال کردن بیش از پیش بنادر و ناوگان خصوصی ایران به وجود می‌آید. البته استفاده از این فرصت، نیازمند مطالعات امکان‌پذیری و اقتصادی و دیگر جنبه‌های سیاسی و اجتماعی است.

در این بخش به توصیف الگوریتم نیروی گرانشی و چرایی ایده استفاده از این الگوریتم در حل این قبیل مسائل می‌پردازیم. الگوریتم نیروی گرانشی یا جستجوی محلی GSA یک الگوریتم جدید است؛ همانطور که از نام آن پیداست یک روش جستجوی محلی اکتشافی است. علاوه بر این، این الگوریتم در گروه آن دسته از روش‌هایی که از برخی فرآیندهای طبیعی یا فیزیکی تقلید می‌کند (مثل سرد کردن شبیه‌سازی شده و الگوریتم ژنتیک)، قرار دارد.

در این طرح هدف توسعه الگوریتم نیروی گرانشی در راستای حل مسائل سیستم‌های حمل و نقل یکپارچه ترکیبی و چند هدفه می‌باشد و در دنیای واقعی تأثیر جاذبه بر اجسام به صورت متقابل و اعمال نیروی گرانشی به تمامی اجسام موجود در فضا ایده اصلی این الگوریتم می‌باشد. بدیهی است این نیرو باعث تغییر سرعت اجسام و کشیده شدن آن‌ها به سمت اجسام بزرگتر می‌شود که در طبیعت می‌توان به رابطه زمین، ماه، اشیای زمینی و دیگر اجسام و اجرام آسمانی موجود اشاره نمود.

تحقیق حاضر به استفاده از الگوریتم گرانش برای حل مسائل حمل و نقل یکپارچه ترکیبی می‌پردازد. نوآوری پژوهش هم در توسعه مدل حمل و نقل ترکیبی و همچنین در توسعه الگوریتم نیروی گرانشی است به این صورت که در حالت توسعه یافته الگوریتم تنها k جرم مناسب‌تر جمعیت امکان وارد آوردن نیرو به سایر اجرام را دارند. یعنی در هر تکرار الگوریتم نیروی وارد بر هر جرم، برابر برآیند نیروی وارد از سوی k جرم برتر جمعیت است. در این رابطه k_{best} ، بیانگر مجموعه k جرم برتر جمعیت است. در تکرارهای اولیه الگوریتم، هنوز مساله احتیاج به کاوش بالا دارد اما با جلو رفتن زمان، جمعیت به نتایج بهتری می‌رسد بنابراین مقدار k به صورت متغیر با زمان تعریف می‌شود. به این صورت که در زمان شروع تمام اجرام روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند و با گذشت زمان از تعداد اعضا تأثیر گذار بر جمعیت، به صورت یک نسبت خطی کم می‌شود تا اینکه در انتها، تنها ۲ درصد جمعیت بر سایر اعضا نیرو وارد می‌کنند.

خلاصه پژوهش های انجام شده در این زمینه به قرار ذیل می باشد:

جدول ۱: خلاصه پژوهش های انجام شده

Table 1- Summary of the conducted researches

نویسنده	عنوان	نشریه و سال انتشار	نتیجه
یوسف ربانی، محمد مهدی سپهری، سید حسام الدین دگرودی	مسأله مسیریابی وسیله نقلیه متصل به حمل و نقل چندوجهی رویکرد یکپارچه	پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۷	در این مقاله یک شبکه متشکل از مسیرهای وسایل نقلیه و مسیرهای حمل و نقل چند وجهی برای اولین بار طرح و مدل شده است و با استفاده از روش ابتکاری به نام SB- RAB براساس روش سیمپلکس با ورود محدود متغیرها توسعه داده شده است.
یاسر موحی، روح... ذوالفقاری، فریدون جویای	"اثر شلای" درنظریه تائین دو رده ای	نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۵، شماره ۲، مهر ۱۳۹۰	عوامل مالی تأثیرگذار بر تشدید اثر شلای مورد توجه قرار گرفته است و به کمی سازی این اثر پرداخته و با وارد کردن عوامل مالی در مدل حاصله در دو حالت مورد بررسی دقیق قرار می گیرد:
مجید دره میرکی	الگوریتم ابتکاری جدید برای حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه	مجله تحقیق در عملیات و کاربرد های آن، سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۹۱	- بررسی ارزش زمانی پول در تخمین ارزش مالی تقاضای برآورد شده در طول P دوره - بررسی تغییرات ارزش پولی سفارشات در اثر مدت انتظار برای تحویل سفارش (L)
رضا توکلی مقدم، مسعود ربانی، محمد علی شریعت، نیما صفایی	حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری تلفیقی	نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۴، مهرماه ۱۳۸۵	یک مدل سه معیاره مسیریابی وسایل حمل و نقل با فرض پنجره های زمانی نرم و سخت؛ جهت کمینه سازی هزینه ناوگان؛ هزینه مسافت طی شده و جریمه نقض محدودیتهای پنجره زمانی نرم ارائه شده که برای حل از روش فرا ابتکاری تلفیقی از آنیلینگ شبیه سازی شده (SA) با اپراتورهای ژنتیک استفاده شده است.
محمد تقی تقوی فرد، کیوان شیخ، آریین شهسواری	ارائه روش اصلاح شده کلونی مورچگان جهت حل مسأله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره های زمانی	نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره ۲، جلد ۲۰، تابستان ۱۳۸۸	الگوریتم اصلاح شده کلونی مورچگان بر روی تعدادی از نمونه مسائل Solomon برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به همراه پنجره های زمانی و ناوگانی ناهمگن از وسایل نقلیه بکار گرفته شد.

نوعی روش فرا ابتکاری ترکیبی شامل روش اصلاحی ژنتیک که در آن روش جدید تقاطع برای ترکیب کروموزوم‌ها ارائه شده والگوریتم بهبود دهنده سه گانه می باشد برای حل مساله کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه پیشنهاد می شود.	نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره ۲، جلد ۲۱، تابستان ۱۳۸۹	الگوریتم ترکیبی موثر ژنتیک برای حل مساله مسیریابی وسیله نقلیه	علی ظفری، سید مهدی تشکری هاشمی، مجید یوسفی خوشبخت
در این مقاله، بر مبنای مشاهدات دنیای واقعی، رویکرد جدیدی از مسائل مسیریابی وسائط نقلیه به نام مسیریابی رقابتی توسعه یافته است و علاوه بر مدلسازی درجهت اعتبارسنجی به مدل، برای حل مسائل با ابعاد بزرگ ازالگوریتم فراابتکاری تلفیقی مبتنی بر شبیه سازی تیرید با اپراتورهای ژنتیک استفاده شده است.	پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۸	ارائه حل مدل برنامه ریزی ریاضی جدید برای مسیریابی وسائط نقلیه در حالت رقابتی: یک مطالعه موردی	رضا توکلی مقدم، مهدی علینقیان، علیرضا سلامت بخش
در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی خطی- عددیصحیح از مساله مسیریابی وسایط نقلیه حمل برگشتی با پنجره زمانی وظرفیت (CVRPBTW) ارائه شده، همچنین یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر بازپخت شبیه سازی شده (HSA) پیشنهاد گردیده که جواب های خوبی در مدت زمان مناسب ایجاد می کند.	پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفتم، شماره اول، بهار ۱۳۸۹	مسیریابی وسایط نقلیه و تعیین تعداد ماشین های جمع آوری زباله با استفاده از یک روش فرا ابتکاری - یک مطالعه موردی	ابرج مهدوی، رضا توکلی مقدم، سید مصطفی قاضی زاده هاشمی
هدف این مقاله ارائه مدلی بیان شده که با ایجاد توازن در مقدار کالای توزیع شده نسبت به ظرفیت وسائط نقلیه در یک ناوگان ناهمگن، حداکثر رضایت برای رانندگان ایجاد گردد و از سویی دیگر با کاهش هزینه های حمل و نقل، سود ناشی از توزیع افزایش یابد. برای حل این مدل یک الگوریتم بهبود یافته بهینه سازی انبوه ذرات (IPSO) ارائه گردیده است.	پژوهشنامه حمل و نقل، سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۰	مساله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن توازن در توزیع کالاها با استفاده از الگوریتم بهبود یافته بهینه سازی انبوه ذرات	رضا توکلی مقدم، نرگس نوروزی، علیرضا سلامت بخش ورجوی، مهدی علینقیان
الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی رقابتی فراگیر (ICA) به منظور کمینه سازی هزینه های مسیریابی وسایل نقلیه که مجبور نیستند به انبار بازگردند (OVRP) ارائه شده است و بر روی ۲۲ مثال مورد آزمایش قرار گرفته است.	پژوهشنامه حمل و نقل، سال نهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۱	الگوریتم موثر رقابتی فراگیر برای حل مسئله مسیریابی وسيله نقلیه باز	محمد یوسفی خوشبخت، فرزاد دیده ور، فرهاد رحمتی، محمد صدیق پور

در این مقاله، یک مدل مسیریابی وسائط نقلیه چند هدفه شامل کمینه سازی هزینه حمل و نقل و ریسک وقوع حوادث در حمل و نقل مواد خطرناک ارائه شد. روشفر ابتکاری NSGA-II پیشنهاد و برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی، جواب های به دست آمده درابعاد کوچک باجوابهای به دست آمده ازروش محدودیت اسیلون مقایسه شد.

مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۰

رک یک مدل جدید برای مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک

علیقیان، نرگس نیروزی، علیرضا رضا توکلی مقدم، مهدی سادات بخش

از جمله اهداف این مقاله عبارتند از:

- ۱- توسعه الگوریتم نیروی گرانشی برای برنامه ریزی سیستم های حمل و نقل یکپارچه ترکیبی شامل مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) و مسیریابی حمل و نقل چندوجهی (MTP)
- ۲- توسعه مدل حمل و نقل ترکیبی از حالت یک دیو به چند دیو
- ۳- مقایسه الگوریتم نیروی گرانشی توسعه یافته با الگوریتم نیروی گرانشی از لحاظ کیفیت روند رسیدن به جواب

بنابراین این پژوهش به دنبال پاسخگویی به سوال اساسی زیر می باشد:

آیا اجرای نیروی گرانشی، برای حل یک مشکل واقعی در دنیای بیرون قادر به تولید راه حل های معتبر می شود؟

ابزار و روش

در این پژوهش هدف توسعه الگوریتم نیروی گرانشی در راستای حل مسائل سیستم های حمل و نقل یکپارچه ترکیبی و چند هدفه می باشد و در دنیای واقعی تأثیر جاذبه بر اجسام به صورت متقابل و اعمال نیروی گرانشی به تمامی اجسام موجود در فضا ایده اصلی این الگوریتم می باشد. بدیهی است این نیرو باعث تغییر سرعت اجسام و کشیده شدن آنها به سمت اجسام بزرگتر می شود که در طبیعت می توان به رابطه زمین، ماه، اشیای زمینی و دیگر اجسام و اجرام آسمانی موجود اشاره نمود. الگوریتم نیروی گرانشی یا جستجوی محلی GSA یک الگوریتم جدید است و همانطور که از نام آن پیداست یک روش جستجوی محلی اکتشافی است. علاوه بر این، این الگوریتم در گروه آن دسته از روش هایی که از برخی فرایندهای طبیعی یا فیزیکی تقلید می کنند (مثل سرد کردن شبیه سازی شده و الگوریتم ژنتیک)، قرار دارد.

در الگوریتم نیروی گرانشی فضای جستجو به عنوان کهکشان تصور می شود و راه حل های

موجود در فضای جستجو به مانند اجسام داخل کهکشان هستند. هر یک از این اجسام نیروی متقابلی برهم وارد می‌سازند که برای به دست آوردن این نیرو از قانون جاذبه نیوتن به همراه اندکی تغییر برای مسائل $F = \frac{m-n}{r^2}$ استفاده می‌شود. این نیرو بر اساس فرمول برابر است با تفاضل مقدار تابع ارزیابی پاسخ نامزد و پاسخ جاری تقسیم بر شعاع همسایگی به نمای دو. از آنجا که سرعت بالای الگوریتم نیروی گرانشی به سبب جستجوی محلی می‌باشد، ایجاد و انتخاب همسایگی و همچنین انتخاب شروط صحیح برای همسایه بودن راه حل‌ها در این الگوریتم از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر سرعت بالا در رسیدن به پاسخ بهینه، الگوریتم با توجه به خواص ذاتی جاذبه از رسیدن و ماندن در یک بهینه محلی اجتناب می‌کند.

در الگوریتم GSA بهینه‌یابی به کمک طرح قوانین گرانشی و حرکت، در یک سیستم مصنوعی بازمان گسسته انجام می‌شود. محیط سیستم همان محدوده تعریف مساله می‌باشد طبق قانون گرانش هر جرم محل و وضعیت سایر اجرام را از طریق نیروی جاذبه گرانشی درک می‌کند. بنابراین می‌توان از این نیرو به عنوان ابزاری برای تبادل اطلاعات استفاده کرد. از بهینه‌یاب طراحی شده، می‌توان برای حل هر مساله بهینه‌سازی که در آن هر جواب مساله به صورت یک موقعیت در فضا قابل تعریف است و میزان شباهت آن با سایر جواب‌های مساله به صورت یک فاصله قابل بیان باشد، استفاده نمود. میزان اجرام با توجه به تابع هدف تعیین می‌شوند.

در قدم اول فضای سیستم مشخص می‌شود. محیط شامل یک دستگاه مختصات چند بعدی در فضای تعریف مساله است هر نقطه از فضا، یک جواب مساله است. عامل‌های جستجوکننده، مجموعه‌ای از اجرام می‌باشند. هر جرم سه مشخصه دارد:

الف: موقعیت جرم

ب: جرم گرانشی

ج: جرم اینرسی.

اجرام فوق برگرفته از مفاهیم جرم گرانشی اکتیو و جرم اینرسی در فیزیک می‌باشند. در فیزیک جرم گرانشی اکتیو معیاری از میزان شدت نیروی گرانشی حول یک جسم و جرم اینرسی معیاری از مقاومت جسم در مقابل حرکت است. این دو مشخصه برخلاف واقعیت می‌توانند بایکدیگر برابر نباشند و مقدار آنها با توجه به برازندگی هر جرم تعیین می‌شود موقعیت جرم، نقطه ای در فضا است که جوابی از مساله است.

VRP

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه به مجموعه‌ای از مسائل اطلاق می‌گردد که در آن تعدادی خودرو متمرکز در یک یا چند قرارگاه باید به مجموعه‌ای از مشتریان مراجعه نموده و خدمتی را ارائه دهند که هر یک دارای تقاضای معینی می‌باشند.

MTP

برنامه‌ریزی چندوجهی به شیوه سنتی شامل چهار مرحله: تولید جریان، توزیع جریان، شکستن جریان بین وسایل و تخصیص جریان به وسایل می‌شود که همگی به صورت بخش‌های مجزا دیده می‌شوند. مشکل این روش، در نظر نگرفتن هم‌زمان جریان کالا و نوع وسیله حمل و نقل است که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود.

یافته ها

مدل ریاضی حمل و نقل یکپارچه VRP و MTP

جدول ۲: پارامترهای مسئله

Table 2: Problem parameters

پارامتر	تعریف پارامتر
N	تعداد گره ها در زیر شبکه VRP
$n + kk$	تعداد گره ها در زیر شبکه MTP
C_{ij}^k	هزینه حمل و نقل برای طی کردن یال $E(i, j)$ است که غیرمنفی است.
T_{kq}^i	هزینه انتقال واحد کالا از وسیله نوع k به نوع q در گره j به صورت یک عدد غیرمنفی است.
d_j	تقاضا (مصرف) گره j که یک مقدار عدد صحیح است $j \in V - \{1\}$
M	تعداد وسیله نقلیه در زیر شبکه VRP است.
Q_k	ظرفیت هر وسیله در زیر شبکه VRP است $Q_k \in Z^+$
K_v	تعداد انواع وسیله نقلیه در زیر شبکه MTP است که روی گره های $V - \{1\}$ فعال هستند.

در این صورت مدل مسیریابی را می‌توان توسط روابط زیر بیان کرد :

$$\begin{aligned} \text{MIN } Z = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n \sum_{k=1}^m c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i=2}^{n+kk} \sum_{j=2, i \neq j}^{n+kk} \sum_{k=m+1}^{m+kv} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^{m+kv} \sum_{q=1, k \neq q}^{m+kv} T_{kq}^j Y_{kq}^j \\ & + \sum_{j=n+1}^{n+kk} \sum_{k=m+1}^{m+kv} \sum_{q=m+1, k \neq q}^{m+kv} T_{kq}^j Y_{kq}^j \quad (1) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n W_{ij}^k + \sum_{q=1, q \neq k}^{m+kv} Y_{qk}^j = Z_j^k + \sum_{i=2, i \neq j}^n W_{ji}^k + \sum_{q=1, q \neq k}^{m+kv} Y_{kq}^j, \quad j=2, 3, \dots, n; \quad k=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=2, i \neq j}^{n+kk} X_{ij}^k + \sum_{q=1, q \neq k}^{m+kv} Y_{qk}^j = Z_j^k + \sum_{i=2, i \neq j}^{n+kk} X_{ji}^k + \sum_{q=1, q \neq k}^{m+kv} Y_{kq}^j, \quad j=2, 3, \dots, n; \quad k=m+1, m+2, \dots, m+kv \quad (3)$$

$$\sum_{i=2, i \neq j}^{n+kk} X_{ij}^k + \sum_{q=m+1, q \neq k}^{m+kv} Y_{qk}^j = Z_j^k + \sum_{i=2, i \neq j}^{n+kk} X_{ji}^k + \sum_{q=1, q \neq k}^{m+kv} Y_{kq}^j, \quad j=n+1, \dots, n+kk; \quad k=m+1, m+2, \dots, m+kv \quad (4)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n X_{ij}^k = \sum_{i=1, i \neq j}^n X_{ji}^k, \quad j=1, 2, \dots, n; \quad k=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{m+kv} Z_j^k = d_j, \quad j=2, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{k=m+1}^{m+kv} Z_j^k = d_j, \quad j=n+1, n+2, \dots, n+kk \quad (7)$$

$$\sum_{j=2}^n Z_j^k + \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^{m+kv} Y_{kq}^j \leq Q_k, \quad k=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$W_{ij}^k \leq M X_{ij}^k, \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad k=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

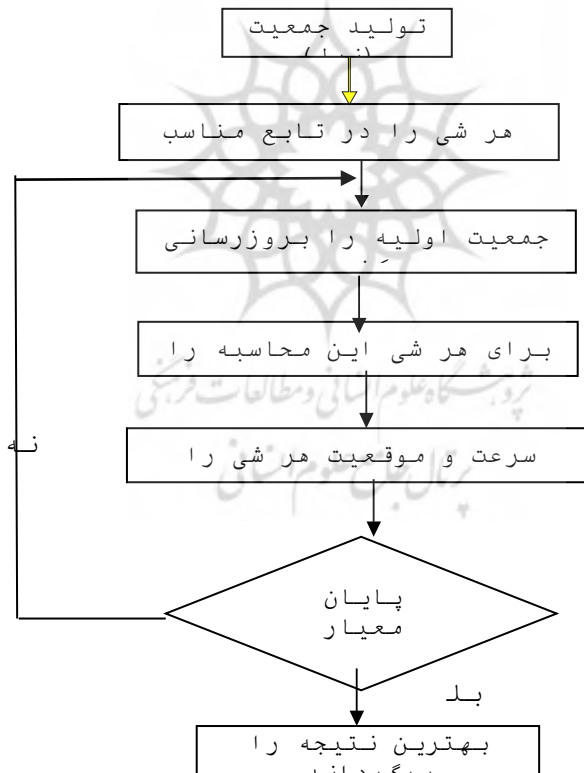
$$X_{ij}^k = 0, 1 W_{ij}^k \geq 0, \quad M \in R^+; \quad i, j=1, 2, \dots, n; \quad k=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$X_{ij}^k \geq 0, \quad i, j=2, \dots, n+kk; \quad k=m+1, m+2, \dots, m+kv \quad (11)$$

$$Y_{kq}^j \geq 0, \quad i, j=2, \dots, n+kk; \quad k, q=1, 2, \dots, m+kv \quad (12)$$

رابطه (۱) از چهار قسمت تشکیل شده است: بخش اول مربوط به هزینه های حمل از دپو تا مراکز واسط می باشد، بخش دوم مربوط به هزینه های حمل از مراکز واسط تا مقصد نهایی می باشد، بخش سوم شامل هزینه های انتقال بین مراکز واسط می باشد و بخش چهارم مربوط به هزینه های انتقال بین مراکز مصرف می باشد. توجه داشته باشید که در این مدل تابع هدف حاصل جمع هزینه های حمل و نقل کالا و انتقال کالا بین وسایل نقلیه است. رابطه (۴) - (۲) معادلات تعادل برای هر نوع وسیله در هر گره هستند. رابطه (۵) معادلات تعادل برای تعداد وسایل نقلیه فعال در زیر شبکه VRP را بیان می کند. رابطه (۷) - (۶) ارضای تقاضاهای موجود در گره ها را تضمین می کنند. رابطه (۸) ظرفیت وسایل موجود در زیر شبکه را در نظر می گیرد. رابطه (۱۰) - (۹) توأم تضمین کننده آنند که فقط در صورتی که یالی بین دو گره انتخاب شده باشد، جریان مواد در داخل آن جاری شود. رابطه (۱۲) - (۱۱) دو محدودیت کلی هستند.

مراحل پیاده سازی الگوریتم به قرار زیر می باشد:



دیگرام بلوکی الگوریتم جستجوی گرانشی

نتیجه

در این بخش نتایج پیاده‌سازی الگوریتم وراثتی حقیقی (RGA)، الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات (PSO)، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی (GPS)، الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد (SGSA) و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته (MUGSA) بر روی ۲۳ تابع محک استاندارد که در جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده است ارایه می‌شود:

الگوریتم وراثتی حقیقی (RGA)

الگوریتم وراثتی حقیقی با جمعیت اولیه ۵۰ عضو در فضای جستجو به صورت تصادفی تولید می‌شود. ابعاد مسئله همان تعداد ژن‌ها است که به صورت پیوسته در فضای مسئله مقداردهی می‌شود. در هر نسل براساس برازندگی کروموزوم‌ها و با استفاده از چرخ رولت، والدین انتخاب می‌شوند و پس از آن به صورت تصادفی با یکدیگر جفت می‌شوند. فرزندان با عملگر همبری و جهش تولید می‌شوند. نرخ عملگر همبری ۰.۳ است و احتمال جهش ۰.۱ در نظر گرفته شده است. عملگر همبری پیوسته روی هر جفت X_i و X_j به صورت رابطه (۱) انجام می‌شود. در این رابطه a یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ است.

$$X_{i, \text{new}} = X_i - a (X_i - X_j), X_{j, \text{new}} = X_j - a (X_i - X_j) \quad (1)$$

در عملگر جهش روی هر فرزند X_i ، یک ژن X_{id} به صورت تصادفی انتخاب کرده و مقدار آن با یک مقدار جدید تصادفی مطابق روابط ۲ و ۳ در محدوده فضای جستجو جایگزین می‌شود.

$$\text{Sigma} = \text{Scale} \times (1 - T_t), \text{Scale} = X_{hi} - 5 X_{lo} \quad (2)$$

$$a_{Id, \text{new}} = X_{id} + \text{rand} \times \text{Sigma} \quad (3)$$

در روابط بالا X_{hi} و X_{lo} به ترتیب حد بالا و حد پایین محدوده فضای جستجوی می‌باشند. T تعداد کل تکرارها و rand یک عدد تصادفی با توزیع نرمال و میانگین صفر می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات با جمعیت اولیه ۵۰ پرند در فضای جستجو به صورت تصادفی تولید می‌شود که X_{id} ، V_{id} مطابق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (4)$$

$$V_{id}(t+1) = w(t)V_{id}(t) + C_1 r_1 (pbest_{id}(t)) + C_2 r_2 (gbest_{id}(t) - X_{id}(t)) \quad (5)$$

که r_1 و r_2 دو متغیر تصادفی در بازه $[0,1]$ است، C_1 و C_2 مقادیر مثبت هستند، W وزن اینرسی است، X_{id} و V_{id} نشان دهنده موقعیت و سرعت ذرات در بعد d است $pbest_{id}$ و $gbest_{id}$ به ترتیب نشان دهنده بهترین موقعیت قبلی ذرات i ام و بهترین موقعیت قبلی در میان تمام ذرات جمعیت است.

در این روابط $C = C_1 = C_2 = 2$ و W در طول تکرارها به صورت خطی از $0/9$ تا $0/2$ کاهش می یابد.

الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی (GPS)

برای بروزرسانی سرعت الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی از رابطه ۶ استفاده شده است که در این رابطه، از سرعت الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات PSO $V_{id}(t+1)$ و شتاب الگوریتم جستجوی گرانشی GSA $V_{id}(t+1)$ استفاده شده است که به ترتیب در رابطه ۷ و ۸ آورده شده است. که در این روابط $3r$ یک متغیر تصادفی یکنواخت در بازه $[0,1]$ است که برای ایجاد خاصیت تصادفی سرعت الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات و شتاب الگوریتم جستجوی گرانشی در الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی استفاده شده است و C_3 و C_4 دو ثابت برای تعیین درجه سرعت الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات و شتاب الگوریتم جستجوی گرانشی در الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی است که مقدار C_3 و C_4 در نظر گرفته شده است. $V_{id}(t+1)$ GPS برای بروزرسانی موقعیت عامل ها در الگوریتم جمعیت ذرات نیز از رابطه ۹ استفاده شده است.

$$V_{id}(t+1)_{GPS} = C_3 r_1 \times V_{id}(t+1)_{PSO} + C_4 (li - r_2) \times V_{id}(t+1)_{GSA} \quad (6)$$

$$V_{id}(t+1)_{PSO} = W(t)C_3 V_{id}(t) + C_1 r_1 (pbest_{id} - X_{id}(t)) + C_2 r_2 (gbest_{id} - X_{id}(t)) \quad (7)$$

$$V_{id}(t+1)_{GSA} = ravdi \times V_{id}(t) + aid(t) \quad (8)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1)_{GPS} \quad (9)$$

الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد (GSA) و الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد همراه با جهش (MUGSA)

دو الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد و الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد همراه با جهش نیز با جمعیت اولیه ۵۰ جرم در فضای جستجو به صورت تصادفی تولید می شوند. الگوریتم ها مطابق فصل دوم انجام می شوند. در روابط فصل دوم مقدار a برابر 20 و G_0 برابر ۱۰۰ و در ابتدا $K_0 = N$ که N تعداد عامل ها است به صورت خطی به ۱ کاهش می یابد.

نتایج پیاده سازی توابع جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷ که نتایج از میانگین بهترین جواب و میانه بهترین جواب به دست آمده حاصل ۳۰ بار اجرا است و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: نتایج پیاده سازی الگوریتم وراثتی حقیقی، الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته روی توابع محک

Table 3: The results of the implementation of the real inheritance algorithm, the particle population optimization algorithm, the gravitational particle population algorithm, the gravitational search algorithm and the mutated gravitational search algorithm on the benchmark functions.

		RGA[27]	PSO[27]	GPS[27]	GSA	MUGSA
F ₁	Average best so far	23.13	1.8×10^{-3}	5.43×10^{-19}	2.26×10^{-17}	3.3032×10^{-17}
	Median best so far	21.87	1.2×10^{-3}	5.65×10^{-19}	2.09×10^{-17}	3.3858×10^{-17}
F ₂	Average best so far	1.07	2.0	2.33×10^{-9}	2.34×10^{-8}	2.3330×10^{-8}
	Average best so far	1.07	2.0	2.33×10^{-9}	2.34×10^{-8}	2.3330×10^{-8}
F ₃	Average best so far	5.6×10^3	4.1×10^3	1.83×10^3	240.33	14.6302
	Median best so far	5.6×10^3	2.2×10^3	1.62×10^3	240.50	13.0726
F ₄	Average best so far	11.78	8.1	16.88	3.63×10^{-9}	4.1430×10^{-9}
	Median best so far	11.94	7.4	16.08	3.53×10^{-9}	4.2047×10^{-9}
F ₅	Average best so far	1.1×10^3	3.6×10^4	40.70	32.75	29.6085
	Median best so far	1.0×10^3	1.7×10^3	26.70	26.14	26.1217
F ₆	Average best so far	24.01	1.0×10^{-3}	357.93	0	0
	Median best so far	24.55	6.6×10^{-3}	311	0	0
F ₇	Average best so far	0.06	0.04	0.0099	0.06	0.0178
	Median best so far	0.06	0.04	0.0086	0.06	0.0155

جدول ۴: نتایج پیاده سازی الگوریتم وراثتی حقیقی، الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته روی توابع محک کمینه شونده چند مد و با بعد متغییر

Table 4: The results of implementing the real inheritance algorithm, the particle population optimization algorithm, the gravity particle population algorithm, the gravity search algorithm and the mutated gravity search algorithm on multi-mode minimization benchmark functions with variable dimension.

		RGA [27]	PSO [27]	GPS [27]	GSA	MUGSA
F ₈	Average best so far	-1.2×10+4	-9.8×10+3	-5.78×10 ⁺³	-1.10×10 ³	-3.4920×10 ³
	Median best so far	-1.2×10+4	-9.8×10+3	-5.73×10 ⁺³	-1.10 ×10 ³	-3.5776×10 ³
F ₉	Average best so far	5.90	55.1	17.01	15.69	14.6259
	Median best so far	5.71	56.6	15.42	14.92	13.9294
F ₁₀	Average best so far	2.13	9.0×10-3	1.02	3.66×10 ⁻⁹	3.6336×10 ⁻⁹
	Median best so far	2.16	6.0×10-3	1.25	3.57 ×10 ⁻⁹	3.4925×10 ⁻⁹
F ₁₁	Average best so far	1.16	0.01	31.24	4.25	0.0087
	Median best so far	1.14	0.0081	29.92	3.92	0.0086
F ₁₂	Average best so far	0.051	0.29	8.12	0.0372	0.0051
	Median best so far	0.039	0.11	6.58	1.57 ×10 ⁻¹⁹	1.6007×10 ⁻¹⁹
F ₁₃	Average best so far	0.081	3.1×10-18	27.14	7.32×10-4	3.6625×10 ⁻⁴
	Median best so far	0.032	2.2×10-23	27.82	2.02 ×10 ⁻¹⁸	2.0831×10 ⁻¹⁸

جدول ۵: نتایج پیاده سازی الگوریتم وراثتی حقیقی، الگوریتم بهینه ساز جمعیت ذرات، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته روی توابع محک کمینه شونده چند مد و با بعد متغیر

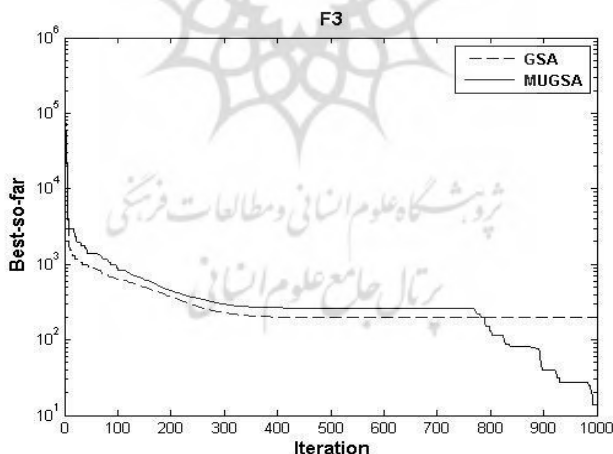
Table 5: The results of implementing the real inheritance algorithm, the particle population optimization algorithm, the gravity particle population algorithm, the gravity search algorithm and the mutated gravity search algorithm on multi-mode minimization benchmark functions with variable dimension.

		RGA[27]	PSO[27]	GPS[27]	GSA	MUGSA
F14 n=2	Average best so far	0.998	0.998	7.13	12.74	1.1022
	Median best so far	0.998	0.998	6.90	12.67	1.0022
F15 n=4	Average best so far	4.0×10^{-3}	2.8×10^{-3}	6.80×10^{-4}	2.93×10^{-3}	9.2500×10^{-4}
	Median best so far	1.7×10^{-3}	7.1×10^{-4}	6.27×10^{-4}	2.15×10^{-3}	7.7164×10^{-4}
F16 n=2	Average best so far	-1.0313	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0305
	Median best so far	-1.0315	-1.0316	-1.0316	-1.0316	-1.0310
F17 n=2	Average best so far	0.3996	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979
	Median best so far	0.3980	0.3979	0.3979	0.3979	0.3979
F18 n=2	Average best so far	5.70	3.00	3.00	3.00	3.0000
	Median best so far	3.0	3.00	3.00	3.00	3.0000
F19 n=3	Average best so far	-3.8627	-3.8628	-3.8628	-3.8628	-3.8698
	Median best so far	-3.8628	-3.8628	-3.8628	-3.8628	-3.8698
F20 n=6	Average best so far	-3.3099	-3.2369	-3.2621	-3.3220	-3.1298
	Median best so far	-3.3217	-3.2031	-3.2625	-3.3220	-3.1243
F21 n=4	Average best so far	-5.6605	-6.6290	-6.8232	-5.9200	-4.3915
	Median best so far	-2.6824	-5.1008	-10.1532	-2.6829	-3.7784
F22 n=4	Average best so far	-7.3421	-9.1118	-9.3842	-10.403	-4.6502
	Median best so far	-10.3932	-10.402	-10.4029	-10.403	-4.1366
F23 n=4	Average best so far	-6.2541	-9.7634	-10.0575	-10.5364	-5.1276
	Median best so far	-4.5054	-10.536	-10.5364	-10.5364	-4.7831

بحث

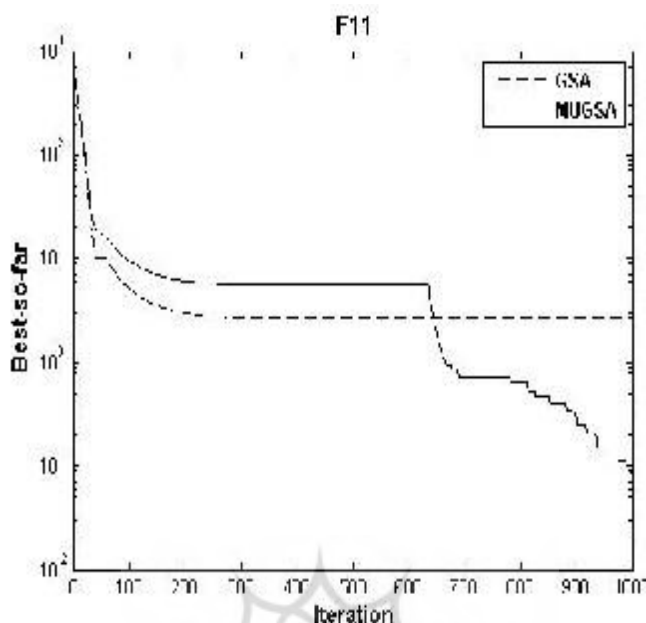
در این پژوهش اعتبارسنجی مدل با استفاده از حل مدل پیشنهادی، برای مسائل مختلف برآورد شده است سپس پنج الگوریتم بهینه‌ساز جمعی، الگوریتم وارثی حقیقی، الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی استاندارد و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته در حل ۲۳ تابع محک استاندارد که شامل توابع تک مدو چند مد بودند به کار گرفته شده است.

نتیجه گیری کلی این است که الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته بر روی ۲۳ تابع محک استاندارد جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم‌های وارثی حقیقی، الگوریتم جمعیت ذرات و الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی دارند به جز در توابع F_2 , F_6 ، F_{12} الی F_{15} در توابع F_1 , F_2 , F_{15} بهترین نتایج در الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی مشاهده می‌شود در حالی که برای توابع F_{13} , F_{14} بهترین نتایج در الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات مشاهده شده است و در F_9 الگوریتم وارثی حقیقی کارایی بهتری دارد. کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته در توابع F_4 , F_7 , F_{11} , F_{21} بهتر است و نمودار بهترین جواب دیده در شکل ۱ و شکل ۲ برای مقایسه بین الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته به عنوان نمونه، به ترتیب برای F_3 , F_{11} است.



شکل ۱: نمودار مقایسه بهترین جواب برای الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته (MUGSA) در تابع F_3

Figure 1: Comparison diagram of the best solution for the gravitational search algorithm (GSA) and the mutated gravitational search algorithm (MUGSA) in the F_3 function.



شکل ۲: نمودار مقایسه بهترین جواب برای الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و الگوریتم جستجوی گرانشی جهش یافته (MUGSA) در تابع F11

Figure 2: Comparison diagram of the best answer for the gravity search algorithm (GSA) and the mutated gravity search algorithm (MUGSA) in function F11

نتیجه گیری

نوآوری این پژوهش علاوه بر آنکه در توسعه مدل حمل و نقل ترکیبی و در توسعه الگوریتم نیروی گرانشی کاربرد دارد در حفظ حداکثری به رهگیری و اکتشاف با تعریف یک تابع جهش جدید که به وسیله یک کنترلر فازی کار می‌کند این مشکل را نیز برطرف می‌کند و کارایی روش پیشنهادی با پیاده سازی روی توابع محک استاندارد و مقایسه این روش با چند الگوریتم ابتکاری بررسی شده است. در این پژوهش با تعریف یک تابع جهش جدید برای الگوریتم جستجوی گرانشی که به وسیله کنترلر فازی کار می‌کند و با الگوبرداری از فیزیک کوانتوم مطرح گردیده و این مشکل رفع شده است و باعث بهبود عملکرد این الگوریتم شده است، همچنین پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش به صورت شهودی مورد استفاده قرار گرفته است. عامل‌های جستجوکننده مجموعه‌ای از اجرام در فضای کوانتومی می‌باشند. منطقه‌های بهینه چاه‌های پتانسیلی هستند که اجرام به خودشان جذب می‌کنند. اطلاعات مربوط به برازندگی هر جرم، در قالب جرم گرانشی ذخیره می‌شوند. مقادیر

فوق با توجه به برازندگی هر جرم، در قالب جرم گرانشی ذخیره می‌شوند. مقادیر فوق با توجه به برازندگی نسبی هر عامل نسبت به سایر عامل‌ها در هر تکرار برورسانی می‌شود. تبادل اطلاعات و اثرگذاری اجرام روی یکدیگر تحت نیروی جاذبه حاکم بر فضای کوانتومی با وجود چندین چاه پتانسیل انجام می‌شود. با شبیه‌سازی فضای کوانتومی و قوانین حاکم بر آن، موقعیت عامل‌های جستجوکننده با گذشت زمان بهبود پیدا می‌کند. در هر تکرار، اجرامی که تابع برازش بهتری دارند، جرم گرانشی بیشتری نسبت داده می‌شود. در نتیجه تأثیر آن‌ها روی سایر عامل‌ها بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، هر جرم به اندازه شایستگی خود، سایر اجرام به سمت موقعیت‌های مناسب‌تر که همان مراکز چاه‌های پتانسیل می‌باشند، حرکت می‌کنند. همچنین با توجه به اینکه مراکز چاه‌های پتانسیل اجرام برتر هستند، بنابراین جرم بیشتری دارند و در مراحل تکرار الگوریتم نسبت به دیگر اجرام جا به جایی کمتری دارند. این رویکرد سبب می‌شود تا نقاط مناسب یافت شده در طول الگوریتم، حفظ شوند. این ایده پیشنهاد شده بر روی ۲۳ تابع محک استاندارد که شامل توابع تک مد و چند مد است ارزیابی شده است و نتایج به دست آمده نیز با الگوریتم‌های بهینه‌سازی معروفی از قبیل الگوریتم وراثتی حقیقی، الگوریتم بهینه‌ساز جمعیت ذرات، الگوریتم جمعیت ذرات گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانش استاندارد مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این ایده پیشنهاد شده در مقایسه با روش‌های دیگر یک روش قابل توجهی برای بهبود نتایج است و در آینده این روش جدید پیشنهاد شده، می‌تواند در مسایل بهینه‌سازی مختلفی استفاده شود. آزمایش‌های انجام شده (شامل دوگروه تابع محک استاندارد (کلاسیک و جدید)، با فضای جستجوی پیوسته کارایی الگوریتم را اثبات می‌کند. الگوریتم QIGSA پیشنهادی از سرعت و دقت خوبی برای توابع تک مدی برخوردار می‌باشد. این الگوریتم برای اغلب توابع تک مدی با سرعت بالایی به نقطه بهینه دست می‌یابد. پس از آن الگوریتم QIGSA معرفی شد. QIGSA توانایی بسیار خوبی برای حل انواع مسائل تک مدی و چند مدی دارد. به منظور بررسی الگوریتم QIGSA، این الگوریتم با ۹ الگوریتم دیگر در سه بعد مقایسه شد. نتایج حاصل، برتری الگوریتم QIGSA را نسبت به دیگر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. الگوریتم QIGSA پیشنهادی، برای توابع پیچیده و چند مدی مطرح شده، دقیقاً به نقطه بهینه دست می‌یابد که این یکی از ویژگی‌های این الگوریتم می‌باشد. پس از آن نسخه گسسته الگوریتم نیروی گرانشی مطرح شد در نهایت بهینه‌سازی مسایلی در حوزه حمل و نقل یکپارچه ترکیبی VRP/MTP، تقریب سیستم‌های خطی در فضای جستجوی پیوسته و گسسته آورده شد که نشان دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. در تمامی این مسایل الگوریتم‌های پیشنهادی به نتایج مناسبی دست پیدا کردند.

نتایج حاصل از مقایسه این پژوهش با نتایج پژوهش (سبزی‌مون و دومینیک، ۲۰۱۳) و (دو و هی، ۲۰۱۷) حاکی از آنست که روش به‌کارگرفته شده کارایی لازم را داشته و می‌تواند در حل مسائل نتایج بهینه‌تری ارائه دهد.

از آنجایی که ایده پیشنهاد شده در این مقاله یک ایده نسبتاً تازه و مهمی است، جای کار زیادی دارد؛ از جمله می‌توان در ادامه کار، روی این الگوریتم به تأثیر مقادیر مختلف پارامترها و نیز تنظیم وقفی پارامترها تحقیق کرد. همچنین می‌توان کارایی آن را در زمینه کاربردهای دیگری از زمینه‌های مختلف بهینه‌سازی و سایر موارد بررسی کرد.

تضاد منافع:

نویسندگان هیچگونه تضاد منافی با یکدیگر ندارند.



References

- A. Haramlou, S. Abdullah, Z. (2011), Othman, Gravitational Search Algorithm with Heuristic Search for clustering problems, 3rd Conference on data mining and Optimization, Malaysia, **doi.org:10.1109/dmo.2011.5976526**
- A. Saffar, R. Hooshmand and A. Khodabakhshian. A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm, Applied Soft Computing, vol.11, pp. 4021-4028, 2011. **doi:10.1016/j.asoc.**
- A.P. Engelbrecht. Fundamentals of computational swarm intelligence, John wiley and sons, 1-640. 2005. **doi: 10.1007/s10710-006-9020-8**
- A.P.F. Saeidi-Khabisi, and E. Rashedi. Fuzzy Gravitational Search Algorithm, 2nd International eConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2012. **doi.org:10.1109/iccke**
- B. Sahu, D. Mishra. A Novel Feature Selection Algorithm using Particle Swarm Optimization for Cancer Microarray Data, Procedia Engineering, vol. 38, pp. 27-31, 2012. **doi:10.1016/j.proeng**
- C, Li, J, Zhou K Parameter's identification of hydraulic turbine governing and Management 52(2011)374-381. **doi.org:10.1109/appeec.2010.5448987**
- Ch. Guo, Zh. Jiang, H. Zhang, N. Li. Decomposition-based classified ant colony optimization algorithm for scheduling semiconductor wafer fabrication system, Computers & Industrial Engineering, vol. 62, pp. 141-151, 2012. **doi:10.1016/j.cie**
- D. d. Serafino, S. Gomez, L. Milano, F. Riccio, G. Toraldo. A genetic algorithm for a global optimization problem arising in the detection of gravitational waves, Springer Science and Business Media, vol. 48, pp.41– 55, 2010. **doi:10.1007/s10898-010-9525-9**
- D. Hu, A. Sarosh, Y. F. Dong. An improved particleswarm optimizer for parametric optimization of flexible satellite controller, Applied Mathematics and Computation, 217, 8512-8521, 2011. **doi:10.1016/j.amc**
- D. Mishra. Discovery of Overlapping Pattern Biclusters from Gene Expression Data using Hash based PSO, Procedia Technology, vol. 4, pp. 390 – 394, 2012. **doi:10.1016/j.protcy**
- D. Holliday, R. resnick and J. Walker. Fundamentals of physics, John wiley and sons, 1-1431. 1993. **doi.org:10.2174/9789815049909123010003**

- E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi. GSA: a gravitational search algorithm, *Information sciences*, vol. 179, no. 13, pp. 2232-2248, 2009. **doi.org:10.1016/j.ins**
- E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, S. Saryazdi. Filter modeling using gravitational search algorithm, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 24, no.1 pp. 117-122, 2011. **doi:10.1016/j.engappai**
- E. Rasshedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi. BGSA: binary gravitational search algorithm, *Natural computing*, vol. 9, no. 3, pp. 727-745, 2010. **doi.org: 10.1007/s11047**
- F. Musharavati, A. M. S. Hamouda. Simulated annealing with auxiliary knowledge for process planning optimization in reconfigurable manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, pp. 113-131, 2012. **doi:10.1016/j.rcim**
- H. Ding, L. Benyoucef and X. Xie. A simulation-based multi-objective genetic algorithm approach for networked enterprises optimization, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 19, pp. 609-623, 2006. **doi:10.1016/j.engappai**
- H. S. Kim and S. B. Cho. Application of interactive genetic algorithm to fashion design, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 13, pp. 635-644, 2000. **doi.org:10.1016/s0952**
- Hossein. Nezamabadipour. *Inheritance Algorithm, Basic and Advanced Concepts*, First Edition, 1-230. 2010. [In Pershian]. **doi:10.1109/iscisc**
- I. Aydogdu, A. Akin and M.P. Saka. Design Optimization of real-World steel space frames using artificial bee colony with Levy flight distribution, *Advance in Engineering Software*, vol. 92, pp. 1-14, 2016. **doi:10.1016/j.advengsoft**
- J. Kennedy, and R. C. Eberhart. particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp.1942-1948, 1995. **doi.org:10.5772/6754**
- J. Xkao, F. Qi, Y. Li. Gravitational Choatic Search Algorithm for partners Selection with Due Date Constraint in Virtual Enterprise, *Fourth International Workshio on Advanced Computatianal Intelligence*, 2011. **doi.org:10.1109/iwaci.2011.6159990**
- K. Ioannidis, G. Ch. Sirakoulis, I. Anreadis. Cellular ants: A method to create collision free trajectories for a cooperative robot team, *Robotics and Autonomous System*, vol. 59, pp. 113-127, 2011. **doi:10.1016/j.robot**

- L.A.Zadeh. Fuzzy Sets, Information and Cotorol, vol.8, pp.338-353,1965.
doi.org:10.1007/s12543
- M. Doraghinejad, and H. Nezamabadi-pour. Black Hole: A New Operator For Gravitational Search Algorithm, International Journal Of Computational Intelligence Systems, 7(5), pp. 1-18, 2014. **doi.org:10.1080/18756891**
- M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B 26 (1) (1996) 29–41. **doi.org:10.5772/13840**
- M. Shams, E. Rashedi and A. Hakimi. Clustered Gravitational Search Algorithm and its application in parameter optimization of a low noise amplifier, Applied Mathematics and computation, vol. 258, pp. 436-453, 2015. **doi:10.1016/j.amc**
- M. Shams, E. Rashedi and A. Hakimi. Clustered Gravitational Search Algorithm and its application in parameter optimization of a low noise amplifier, Applied Mathematics and computation, vol. 258, pp. 436-453, 2015. **doi.org:10.1016/j.amc**
- M. Soleimanpour Moghadam, H. Nezamabadi-pour, and M. Farsangi. A Quantum Behaved Gravitational Search Algorithm, Intelligent Information Management, pp. 390-395, 2012. **doi.org:10.4236/iim.2012.46043**
- M.Y. Cheng, Doddy prayogo, Y.W. Wu and M. Marcellinus Lukito. A Hybrid Harmony Search algorithm for discrete sizing optimization of truss structure, Automation in Construction, vol. 69, no.pp.21-33, 2016. **doi:10.1016/j.autcon**
- N. KarasnogorandJ.Smith. A tutorial for competent memtic alprithm: model, taxonomyand degign issues, IEEE transaction on evolutionary computation, 9(5), 474 - 488.,2005. **doi.org:10.1109/tevc.2005.850260**
- N. Mohd Sabri, M. Puteh, and M.R. Mahmood. A Review of Gravitational Search Algorithm, International Journal of Advances in soft computing and its applications, vol. 5, no. 3, 2013. **doi.org:10.1103/physrevd.36.2901**
- P. C. Chang, J. J. Lin, C. H. Liu. An attribute weight assignment and particle swarm optimization algorithm for medical database classifications, Computer Methods and Programs in Biomedicine vol. 107, pp. 382-392, 2012. **doi:10.1016/j.cmpb**

- P. Tarasewich, and P. R. McMullen. Swarm intelligence: Power in numbers, Appears in communication of ACM, Agust 2002, 45(8), 62-67. **doi.org:10.1049/pbce119h_ch21**
- Q. Zhua, J. Hu, L. Henschen. A new moving target interception algorithm for mobile robots based on subgoal forecasting and an improved scout and algorithm, Applied Soft Computing, vol. 13, pp. 539-549, 2013. **doi:10.1016/j.asoc**
- R. Dinverno. Introducing Einsteinian Relativity, Published in the United States by Oxford university Press Inc, New York, 1992. **doi.org:10.1017/cbo9781139140355.020**
- R. Mansouri, F. Nasserli and M. Khorrami. Effective time variation of G in a model universe with variable space dimension, Physics Letters, vol. 259, pp. 194-200, 1999. **doi.org:10.1016/s0375**
- R.L. Haupt and E. Haupt. Practical Genetic Algorithms, second ed., John Wiley & Sons, 1-288. 2004. **doi.org:10.1201/9781420011326**
- S. Ebrahimi Mood, E. Rasshedi and M.M. Javidi. (2010), New Functions for Mass Calculation in Gravitational Search Algorithm. **doi.org:10.24425/aoa**
- S. Mondal, A. Bhattacharya, S. H. N. Dey. Multi-Objective economic emission load dispatch solution using gravitational search algorithm and considering wind power penetration, Electrical Power and Energy Systems, vol. 44, pp. 282, 292, 2013. **doi:10.1016/j.jepes**
- S. Sarafrazi, H. Neannhadi-pour, S. Sayazdi. Disruption: A new operator in Gravitational search algorithm Scientia Iranica, pp.539-548, Feb 2011. **doi.org:10.1016/j.scient.2011.04.003**
- U. Guvenca, Y. Sonmez, S. Dumank, N. Yorukerend. Combined economic and emission dispatch solution using gravitational search algorithm, Scientia Iranica, 19(6):1754-1762. 2012 in press. **doi:10.1016/j.scient**
- W. Zhao. Adaptive Image Enhancement based on Gravitational Search Algorithm, Procedia Engineering, vol. 15, pp. 3288-3292, 2011. **doi:10.1016/j.proeng**
- X. Han and X. Chang. Chaotic secure communication based on a gravitational search algorithm filter, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 24, pp.766-774, 2012. **doi:10.1016/j.ins**
- X.Yao, Y. Liu and G. Lin. Evolutionary programming made faster, IEEE Transaction