

الگوریتم بهینه سازی حرکت کاتورهای گازها:

الگوریتم جدید الهام گرفته از حرکت مولکولهای گاز

مرجان عبدچیری^۱، محمدرضا میبدی^۲ و هلنا بهرامی^۳

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ایران،
marjan.abdechiri@gmail.com, bahramihelena@yahoo.com

^۲ دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران،
mmeybodi@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله روش بهینه سازی جدیدی با الهام از حرکت کاتورهای مولکولهای گاز در فضای پیشنهادی، الگوریتم بهینه سازی حرکت کاتورهای گازها یا GBMO (Gases Brownian Motion Optimization) نامیده می شود. ماهیت کاتورهای در حرکت مولکولهای گاز به آن ها این توانایی را می دهد که به سرعت فضایی که در آن قرار می گیرند را پیموده و در کل آن فضای انتشار یابند. در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از این خصوصیت مولکولهای گاز و با مدل سازی حرکت جنبشی آن ها، روشی کارا برای جستجوی فضای مسائل بهینه سازی پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم GBMO در مقایسه با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم های ICA، PSO و GA نشان دهنده عملکرد بهتر و سرعت بالاتر این الگوریتم در یافتن در راه حل بهینه است.

کلمات کلیدی

حرکت کاتورهای گازها، ارتعاش مولکولها، الگوریتم بهینه سازی.

۱- مقدمه

مسائل بهینه سازی سراسری بطور گسترده در مهندسی و علوم ریاضی بکاربرده می شوند. تا کنون تلاش های بسیار زیادی برای حل مسائل بهینه سازی عمومی صورت گرفته است. تا کنون الگوریتم های تکاملی (EA) [1]، زیادی برای حل مسئله بهینه سازی عمومی ارائه شده اند. در الگوریتم های تکاملی که تا کنون ارائه شده اند با مدل کردن فرآیند تکامل طبیعی، سعی در یافتن جواب بهینه برای مسئله بهینه سازی می نمایند. این موضوع از طریق تکامل دادن جمعیتی از راه حل های کاندید، مشابه فرآیند تکامل جمعیت بیولوژیکی انجام می شود که می تواند با تغییرات محیطی سازگار گردد. الگوریتم های تکاملی گوناگونی تاکنون برای بهینه سازی ارائه شده اند که از آن میان می توان به شبیه سازی حرارت [2,3]، جستجوی تابو [4]، الگوریتم ژنتیک [5,6]، بهینه سازی اجتماع ذرات [7]، الگوریتم تکامل تفاضلی [8,9]، سیستم ایمنی مصنوعی [10]، الگوریتم های تکامل فرهنگی [11] و الگوریتم رقابت استعماری [12] اشاره نمود. الگوریتم های بهینه سازی بیان شده از پدیده های طبیعی و یا از پدیده اجتماعی- انسانی الهام گرفته شده اند.

در این مقاله روش بهینه سازی تکاملی جدیدی با الهام از حرکت کاتورهای مولکولها در گازها پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی با مدل سازی حرکت کاتورهای مولکولهای گاز در فضای ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم بهینه سازی حرکت کاتورهای گازها یا GBMO (Gases Brownian Motion Optimization) نامیده می شود. ماهیت کاتورهای در حرکت مولکولهای گاز به آن ها این

توانایی را می دهد که به سرعت فضایی که در آن قرار می گیرند را پیموده و در کل آن فضای انتشار یابند. اساس کار الگوریتم پیشنهادی حرکت کاتورهای و حرکت ارتعاشی ذرات در جای خود می باشد. در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از این خصوصیت مولکولهای گاز و با مدل سازی حرکت جنبشی آن ها، روشی کارا برای جستجوی فضای مسائل بهینه سازی پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم GBMO در مقایسه با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم های ICA، PSO و GA نشان دهنده عملکرد بهتر و سرعت بالاتر این الگوریتم در یافتن در راه حل بهینه است.

در ادامه این مقاله به معرفی گازهای ایدهآل و سینماتیک گازها و قوانین حاکم بر ذرات پرداخته شده است. سپس الگوریتم پیشنهادی GBMO ارائه شده است. در بخش چهارم، نتایج را مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده و در بخش آخر به نتیجه گیری و جمع بندی پرداخته شده است.

۲- سینماتیک گازها و قوانین حاکم بر ذرات

وابستگی حرکت مولکولهای ماده از یکدیگر در حالت گاز بسیار کمتر از حالت های جامد و یا مایع است. در حالت گاز فواصل مولکولها از یکدیگر بسیار زیاد بوده و به همین دلیل نیروهای برهم کنش مولکولی در آن بسیار اندک هستند. در حالت گازی نیز مولکولها به صورت کاتورهای حرکت می کنند اما از آنجا که فواصل آن ها از یکدیگر زیاد

پس می‌توان نوشت.

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (8)$$

بنابراین طبق فرمول‌های بالا هر مولکول از گاز دارای جرم m بر حسب دما دارای سرعت v می‌باشد که در راستای تصادفی باعث حرکت مولکول در هر زمان می‌شود. این حرکت‌های نامنظم و کاتورهای بسته به دمای محیط تغییر می‌کند. در زمانی که دمای محیط به صفر بررسد بنابراین سیستم به پایداری رسیده و بیرون حرکت هر مولکول به صفر می‌رسد. بنابراین پایداری در این سیستم‌ها در دمای $T=0$ ایجاد می‌شود.

مولکول‌های گاز علاوه بر حرکت کاتورهای که در فضا دارای حرکت ارتعاشی در جای خود نیز می‌باشند. در الگوریتم پیشنهادی به مدل‌سازی این دو حرکت پرداخته و فضای جستجو را مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- الگوریتم پیشنهادی

حرکت مولکولی در گاز طبیعت کاتورهای دارد، راستای برتری برای سرعت مولکولی وجود ندارد. بلکه به طور نامنظم در همه راستاهای توزیع شده است. در نتیجه برخورد مولکول‌ها، هم راستا و هم مقدار سرعت مولکول‌ها پیوسته تغییر می‌کند به این دلیل سرعت مولکول‌های گاز خیلی متغارت است. ماهیت کاتورهای در حرکت مولکول‌های گاز به آن‌ها این توانایی را می‌دهد که به سرعت فضایی را که در آن قرار می‌گیرند پیموده و کل حجم مکانی که در آن انتشار می‌یابند را اشغال کنند. در الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی حرکت براونی گازها GBMO با الهام از ماهیت حرکت کاتورهای مولکول‌ها در گازها، روشی برای جستجوی فضای مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شده است که کارایی آن در جستجوی فضای مسئله در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی پیشین قابل ملاحظه است.

گام ۱: در فضای جستجو یک سری مولکول گاز بطور تصادفی ایجاد می‌شود.

گام ۲: برای هر مولکول بصورت تصادفی شعاعی در بازه $[0,1]$ در نظر گرفته می‌شود.

گام ۳: سپس دمای سیستم - که پارامتری برای تضمین همگرایی الگوریتم است - مقداردهی می‌شود. مقدار دما در ابتدای جستجو زیاد است و با گذشت زمان دما کاهش می‌یابد. در ابتدا، فرآیند جستجو با توجه به زیاد بودن انرژی جنبشی و درنتیجه سرعت مولکول‌ها محدوده وسیعتری را جستجو می‌کند (جستجوی عمومی). با گذشت زمان و کاهش دما و متعاقب آن کاهش انرژی جنبشی و سرعت حرکت مولکول‌ها، جستجوی محلی تری خواهد داشت.

گام ۴: سرعت و مکان مولکول‌ها با توجه به فرمول‌های زیر محاسبه و بروزرسانی می‌شوند.

است تعداد برخوردهای میان آن‌ها بسیار کمتر از حالت‌های دیگر ماده است [18-13].

۲- قانون گازهای ایده‌آل

در دما و فشار ثابت حجم یک گاز با تعداد مول‌های آن نسبت مستقیم دارد. حجم یک مول گاز نصف حجم اشغال شده توسط ۲ مول گاز می‌باشد. گاز ایده‌آل یک تقریب از گازهای حقیقی است که برای مقاصد محاسباتی بکار می‌رود. گاز ایده‌آل به گازی گفته می‌شود که:

۱. بین ذرات آن نیرویی وجود نداشته باشد و تنها برهم‌کنش بین ذرات، برخورد صلب باشد.

۲. اندازه ذرات نسبت به مسیر آزاد میانگین ناچیز باشد. (در فاصله برخوردهای پی درپی، هر مولکول از گاز با سرعت ثابتی در طول یک خط راست حرکت می‌کند. فاصله متوسط بین این برخوردهای پی درپی را مسافت آزاد میانگین می‌نامند).

گازهای حقیقی را در چگالی‌های پایین با تقریب خوبی می‌توان ایده‌آل فرض کرد. گازهای ایده‌آل در حالت تعادل داخلی از معادله گاز ایده‌آل پیروی می‌کنند:

$$PV=nRT$$

که در آن P فشار داخلی سیستم، V حجم سیستم، n تعداد مول‌های ذرات سیستم، R ثابت جهانی گازها و T دمای سیستم با یکای کلوین است.

۲- قانون گازهای ایده‌آل توسط نظریه جنبشی گازها

با فرض اینکه سرعت میانگین هر مولکول گاز برابر v باشد، در هر ثانیه هر مولکول گاز به اندازه $\frac{v}{2a}$ برخورد دارد و در هر برخورد به اندازه $2mv$ به اندازه حرکت آن تغییر می‌کند. پس در هر ثانیه هر مولکول گاز به اندازه زیر به سطح نیرو وارد می‌کند.

$$\left(\frac{v}{2a}\right)(2mv) = \frac{mv^2}{a} \quad (1)$$

از این رو برای تمام مولکول‌های گاز می‌توان نوشت.

$$\left(\frac{N}{3}\right)\left(\frac{mv^2}{a}\right) \quad (2)$$

вшار عبارت است از نیرو بر سطح بنابراین داریم.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\frac{Nm v^2}{3a}}{a^2} = \frac{Nm v^2}{3a^3} = \frac{Nm v^2}{3V} \quad (3)$$

$$PV = \frac{1}{3} N m v^2 = \left(\frac{2}{3} N\right) \left(\frac{1}{2} m v^2\right) = \frac{2}{3} N (KE) \quad (4)$$

که KE در آن میانگین انرژی جنبشی مولکولی گاز می‌باشد. و از آنجا که انرژی جنبشی یک گاز (بنابر نظریه جنبشی گازها) با دمای مطلق آن نسبت مستقیم دارد و همچنین $N \propto n$ ، پس:

$$N(KE) \propto nT \quad (5)$$

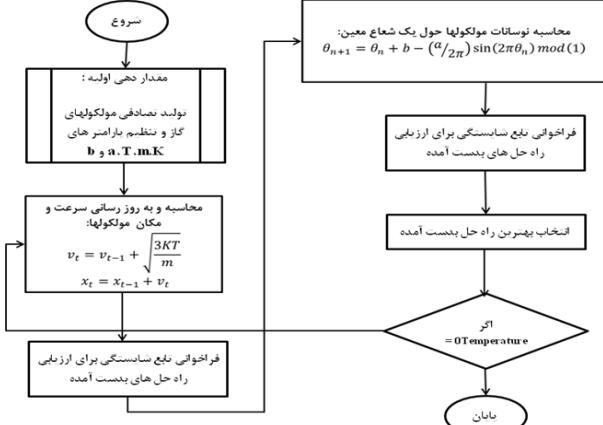
که با ضرب کردن عدد ثابتی مثل R ، می‌توان تناسب را به تساوی تبدیل کرد.

$$PV = nRT \quad (6)$$

میانگین انرژی جنبشی در بین مولکول‌های گاز برابر است با

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T, \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \quad (7)$$

با توجه به شکل ۲، مشاهده می‌شود که مولکول‌های گاز هر یک در راستای تصادفی و بصورت نامنظم حرکت می‌کنند و علاوه بر آن بصورت ارتعاشی در در جای خود نیز به جستجو می‌پردازند. در شکل ۳، فلوچارت الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم GBMO.

۴- تحلیل و بررسی نتایج

در این مقاله برای ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی GBMO در یافتن بهینه‌ عمومی، هشت تابع محک معروف که اغلب در روش‌های بهینه‌سازی تکاملی استفاده می‌شوند، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. توابع محک ذکر شده در جدول ۱، قابل مشاهده‌اند. برای بررسی نرخ همگرایی و کیفیت راه حل بهینه الگوریتم پیشنهادی GBMO، در مقایسه با الگوریتم‌های PSO, ICA و GA شبیه‌سازی‌های انجام شد که در آن‌ها همه توابع محک بطور جداگانه با ابعاد ۲۰، ۳۰ و ۶۰ و دو تابع Zakharov و Booth نیز با ۲ بعد مورد آزمایش قرار گرفتند. هر تابع ۲۰ بار اجرا شد و میانگین مقدار راه حل بهینه بدست آمد.

جدول ۱. توابع محک مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها.

نام تابع	نامیش راضی تابع	محبوده	ابعاد	نوع تابع
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	(-100,100)	N	UM [*]
Rastrigin	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \times \cos(2\pi x_i) + 10)$	(-10,10)	N	MM*
Rosenbrock	$f_3(x) = \sum_{i=1}^{n-1} (100 \times (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2)$	(-100,100)	N	UM
Griewank	$f_4(x) = \frac{1}{4000} \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}}) + 1$	(-600,600)	N	MM
Ackley	$f_5(x) = -20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)) + 20 + e$	(-32,32)	N	MM
Booth	$f_6 = (x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2 - 5)^2$	(-10,10)	2	UM
Zakharov	$f_7 = z_n(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + (\sum_{i=1}^n 0.5ix_i)^2 + (\sum_{i=1}^n 0.5ix_i)^4$	(-5,10)	2	UM

پارامترهایی که باید در الگوریتم ICA, PSO و GA و GBMO تنظیم شوند همراه با مقداریشان در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در الگوریتم PSO مورد استفاده برای مقایسه نتایج از تابع سوگنو بعنوان منحنی نزولی وزن اینرسی استفاده شده است [20].

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم‌های ICA, PSO, GA ICA و GBMO

الگوریتم	پارامترها
ICA	NumOfCountries = 80, NumOfInitialImperialists = 8, NumOfDecades = 1000, RevolutionRate = 0.3, AssimilationCoefficient = 2, Zeta = 0.02.
GA	PopSize = 80, MaxGenerations = 1000, CrossPercent = 50/100, MutationRate = 0.02; SelectionMode: Tournament
PSO	C1 = 1.5, C2 = 1.5, $\beta = \frac{iter}{iter_{max}}$, S=-0.5, ParticleSize = 80, MaxIter = 1000
GBMO	MoleculeSize = 80, Temprature = 100, a=0.5, b=0.2

$$v_t = v_{t-1} + \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (9)$$

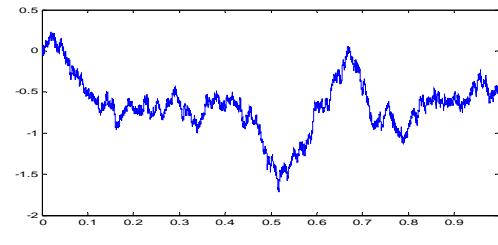
$$x_t = x_{t-1} + v_t \quad (10)$$

گام ۴: تابع شایستگی برای ارزیابی پاسخ‌های بدست آمده فراخوانی می‌شود. بهترین پاسخ‌ها برای مقایسه با نتایج بدست آمده نگهداری می‌شوند.

گام ۵: هر مولکول غیر از حرکت در جهت‌های مختلف در جای خود و در یکشعاع معینی نوسان (ارتعاش) می‌کند. این نوسان ابتدای فرایند جستجوی محلی‌تر و در گام‌های آخر جستجوی عمومی‌تر را ایجاد می‌کند.

$$\theta_{n+1} = \theta_n + b - (\alpha/2\pi) \sin(2\pi\theta_n) \text{ mod}(1) \quad (11)$$

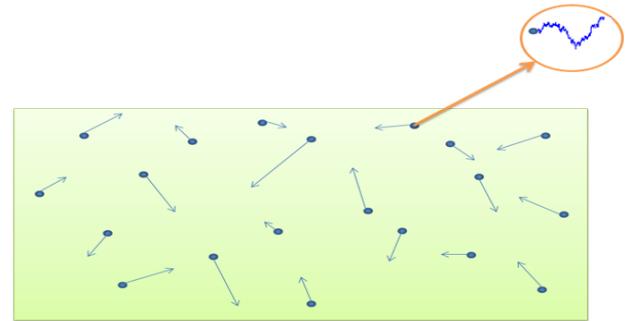
نوسان مولکول‌ها را با استفاده از یک مولد رشته بی‌نظم [19] مدلسازی کردیم. در فرمول بالا، $b=0.2$, $a=0.5$ در نظر گرفته می‌شود و مکان حرکت هر مولکول را نشان می‌دهد. نمودار حرکت نوسانی مولکول‌ها در گازها در شکل ۱، نشان داده شده است. این ارتعاش برای مولکول‌های مختلف متفاوت و در شعاع تعريف شده می‌باشد.



شکل ۱. حرکت ارتعاشی (نوسانی) مولکولی با شعاع یک.

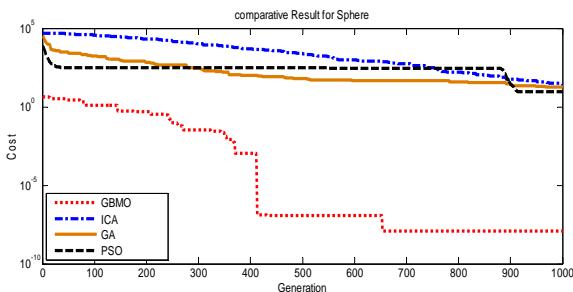
گام ۶: تابع شایستگی برای ارزیابی پاسخ‌های بدست آمده فراخوانی می‌شود. بهترین پاسخ‌ها برای مقایسه با نتایج بدست آمده نگهداری می‌شوند.

گام ۷: شرط خاتمه الگوریتم: دما بررسی می‌شود اگر به صفر رسیده بود الگوریتم متوقف می‌شود در غیر اینصورت جستجو ادامه می‌یابد. در این الگوریتم قابلیت جستجوی عمومی و محلی با حرکت‌های کاتورهای و نوسانی مولکول‌ها در فضای پیاده‌سازی شده است. که در شکل ۲، این این حرکات نشان داده شده است.



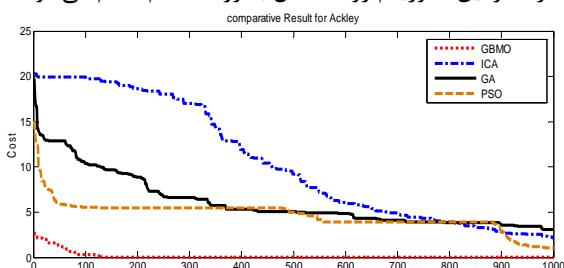
شکل ۲. حرکت کاتورهای و ارتعاشی مولکول‌ها در فضای جستجوی مسئله.

جدول ۶ مقدایر بهینه برای توابع دو بعدی Booth و Zakharov را نشان می‌دهد. در تابع Booth الگوریتم PSO به پاسخ بهینه‌تر دست یافته است و در تابع Zakharov GBMO از سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل کرده است. از مقایسه مقدایر که برای این هشت تابع محک در ابعاد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۲ بعد بدست آمد هاست می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بالاتر نتایج بهتری کسب می‌کند. در ابعاد پایین‌تر این الگوریتم PSO است که نتایج مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم‌های ICA، GA و GBMO بدست آورده است. الگوریتم GBMO تا انتهای فرآیند جستجو تعادل میان جستجوی عمومی و محلی را به شیوه‌ای مناسب حفظ می‌کند. به همین دلیل با افزایش ابعاد مسئله بهینه‌سازی الگوریتم پیشنهادی می‌تواند فضای مسئله را بطور موثرتر جستجو کرده و نتیجه بهتری نسبت به الگوریتم‌های ICA و PSO کسب کند. به عبارت دیگر در الگوریتم پیشنهادی در ابتدای جستجو که دما زیاد است مولکول‌ها سرعت زیادتری دارند و جستجوی عمومی بهتری انجام می‌دهند و در عین حال با نوسان در یک شعاع معین بطور محلی فضای اطراف هر مولکول گاز نیز جستجو می‌شود. با گذشت زمان و کاهش دما سرعت حرکت مولکول‌ها کاهش می‌یابد و جستجوی فضای محلی تر می‌شود اما نوسانات مولکول‌ها باعث جستجوی عمومی‌تر نسبت به قبل می‌شوند. در شکل‌های ۴ تا ۸ که به ترتیب متعلق به توابع Sphere، Ackley، Rosenbrock و Rastrigin، Griewank، GBMO با ۳۰ بعد است، روند عملکرد الگوریتم به خوبی قابل مشاهده است. همانطور که دیده شود ماهیت بی‌نظم حرکت مولکول‌ها سرعت یافتن بهینه محلی را نسبت به سایر الگوریتم‌ها افزایش داده است.



شکل ۴. مقایسه نتایج در تابع Sphere

همان‌طور که در نتایج نشان داده شده است، الگوریتم GBMO در ابتدای فرآیند و در گام‌های پایین بهترین الگوریتم در یافتن بهینه محلی دارد. در این الگوریتم روند تکامل بصورت منظم انجام می‌شود.



شکل ۵. مقایسه نتایج در تابع Ackley

در جداول ۳ تا ۶ به ترتیب میانگین مقدار بهینه برای ۲۰ بار اجرای تابع در ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۲ بعد مشاهده می‌شوند. بهترین مقدایر در جداول مذکور بر جسته شده‌اند تا مقایسه آن‌ها آسان‌تر گردد.

جدول ۳. میانگین مقدار بهینه برای ۲۰ بار اجرا توابع در ۱۰ بعد.

	GA	PSO	ICA	GBMO
F1	0.2499	1.1405 × 10⁻¹⁷	6.2799 × 10 ⁻¹¹	4×10^{-9}
F2	1.0993×10^{-11}	0	0	7.9357×10^{-9}
F3	48.9673	0.0020	0.4466	8.0096
F4	-0.0972	-0.0987	-0.0987	-0.0987
F5	0.1016	0.0298	1.9386×10^{-7}	1.7×10^{-11}

در جدول ۳، همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم GBMO در دو تابع چند ریختی Griewank و Ackley بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل کرده است. اما در توابع تک ریختی Sphere و Rosenbrock و تابع چند ریختی Rastrigin الگوریتم PSO گوی سبقت را در رقابت بین الگوریتم‌های GBMO، GA، ICA و PSO برده است.

جدول ۴. میانگین مقدار بهینه برای ۲۰ بار اجرا توابع در ۲۰ بعد.

	GA	PSO	ICA	GBMO
F1	3.2958	0.0143	0.0732	8×10^{-9}
F2	0.6609	5.4021×10^{-4}	8.4028×10^{-4}	1.5871×10^{-8}
F3	1.3182×10^3	19.5173	1.9191×10^3	18.3735
F4	-0.3373	-0.7114	-0.7206	-0.7225
F5	2.1664	0.2105	0.1205	2.5602×10^{-5}

مقایسی جدول ۴ نشان می‌دهند که الگوریتم GBMO در هر ۵ تابع Sphere، Ackley، Rosenbrock، Griewank و Rastrigin مقایسه با سه الگوریتم دیگر نتایج بهتری بدست آورده است.

جدول ۵. میانگین مقدار بهینه برای ۲۰ بار اجرا توابع در ۳۰ بعد.

	GA	PSO	ICA	GBMO
F1	18.8398	9.0371	28.7678	1.2×10^{-8}
F2	6.3023	0.0015	0.4128	2.3807×10^{-8}
F3	9.8512×10^3	28.7533	1.0179×10^6	28.0826
F4	-0.3702	-0.3687	-0.8319	-2.3712
F5	3.0695	1.0289	19.9587	2.5602×10^{-5}

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی Sphere، Ackley، Rosenbrock، Griewank و Rastrigin راه حل‌های بهتری را در توابع ۳۰ بعد بدست آورد.

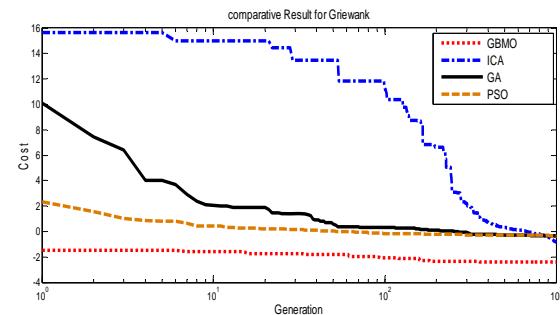
جدول ۶. میانگین مقدار بهینه برای ۲۰ بار اجرا توابع در ۲ بعد.

	GA	PSO	ICA	GBMO
F7	2.2516×10^{-9}	0	7.8886×10^{-6}	0.0085
F8	1.6432×10^{-10}	3.9162×10^{-51}	1.7×10^{-11}	0

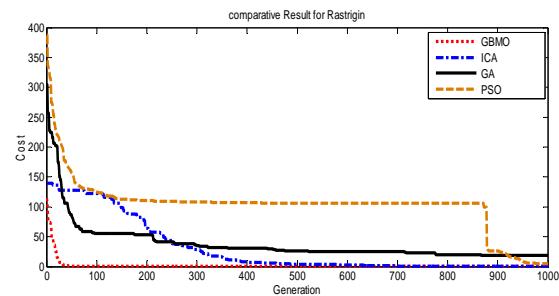
با ابعاد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و دوتابع دو بعدی، در مقایسه با نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های PSO، ICA و GA نشان دهنده عملکرد بهتر و سرعت بالاتر این الگوریتم در یافتن راه حل بهینه است. الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بالاتر نتایج بهتری بدست می‌آورد در ضمن اینکه زمان اجرای نسبتاً قابل قبولی دارد. دیگر مزیت این الگوریتم پارامترهای کم و ساده بودن پیاده‌سازی آن است. با تعیین استراتژی‌های مناسب برای کنترل جستجوی عمومی می‌توان در ابعاد کم نیز نتایج بهتری دریافت کرد که این موضوع می‌تواند زمینه تحقیقات آتی قرار گیرد.

مراجع

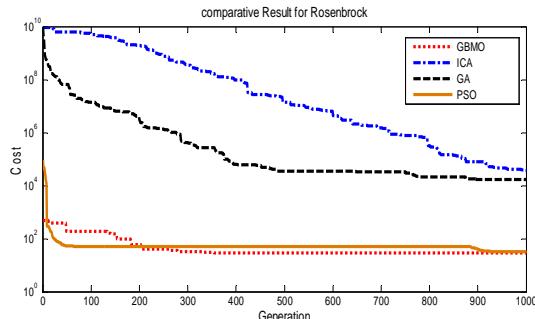
- [1] H.Sarimveis and A. Nikolopoulos," A Line Up Evolutionary Algorithm for Solving Nonlinear Constrained Optimization Problems", *Computers & Operations Research*, 32(6):pp.1499–1514, 2005.
- [2] L.A. Ingber, "Simulated annealing: practice versus theory", *J. Math. Comput. Modell.* 18 (11), pp.29–57, 1993.
- [3] S. Kirkpatrick and C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol 220, Number 4598, pp. 671-680, 1983.
- [4] A.R. Hedar, M. Fukushima, "Tabu Search Directed by Direct Search Methods for Nonlinear Global Optimization", *European Journal of Operational Research*, 2006, Vol. 170, Pp. 329-349, 2006.
- [5] M. Melanie, " An Introduction to Genetic Algorithms, Massachusetts": MIT Press, 1999.
- [6] H. M'uhlenbein, M. Schomisch, J.Born, "The Parallel Genetic Algorithm as Function Optimizer", Proceedings of The Fourth International Conference on Genetic Algorithms, University of California, San diego, pp. 270-278,1991.
- [7] J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp.1942-1948, 1995.
- [8] R. Storn, "Differential Evolution, A Simple and Efficient Heuristic Strategy for Global Optimization over Continuous Spaces", *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, Dordrecht, pp. Springer Verlag, Heidelberg, 1997341-359, 1997.
- [9] K. Price, R. Storn, J. Lampinen, "Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization", Springer, Berlin, 2005.
- [10] G. Maoguo, J. Licheng, Z. Xiangron, "A population-based artificial immune system for numerical optimization", *Neurocomputing*, Volume 72 , Issue 1-3, Pages 149-161, December 2008.
- [11] B. Franklin and M. Bergerman, "Cultural Algorithms: Concepts and Experiments", In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, volume 2, pp. 1245–1251, 2000.
- [12] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition," *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*, pp 4661-4667,2007.
- [13] J. Hirschfelder, "Molecular theory of Gases and Liquids," Wisconsin, John Wiley & Sons Inc., pp 250-262, 1966.
- [14] C.A. Mugruza Vassallo, "Van der Waals and Ideal gas models for compressibility by means of pressure in pneumatic pipes from 1 to 100 Lpm". *Electro electrónica*, 22:pp. 07 - 11, 2004.
- [15] L. S. Ornstein, "On the Brownian motion," *Proc. Royal Acad. Amsterdam* 21:pp.96–108, 1917.
- [16] L. S. Ornstein and H. C. Burger, "On the theory of the Brownian motion", *Proc. Royal Acad. Amst.* 21:pp.922–931, 1919.
- [17] S. Chandrasekhar, "Stochastic problems in physics and astronomy" *Rev. Modern Phys.*, 15: pp. 1-89,1943.
- [18] G.E. Uhlenbeck, L.S. Ornstein, "On the theory of Brownian motion" *Phys. Rev.* , 36:pp. 823-841, 1930.
- [19] W. Zheng, "Kneading plane of the circle map", *Chaos, Solitons& Fractals*, 4:1221, 1994.
- [20] K. Lei, Y. Qiu, and Y. He, A New Adaptive Well-Chosen Inertia Weight Strategy to Automatically Harmonize Global and Local Search Ability in Particle Swarm Optimization, ISSCAA, 2006.



شکل ۶. مقایسه نتایج در تابع Griewank



شکل ۷. مقایسه نتایج در تابع Rastrigin



شکل ۷. مقایسه نتایج در تابع Rosenbrock

در جدول ۷، مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌های ICA، GA و PSO نشان داده شده است. الگوریتم PSO سریع‌ترین الگوریتم است و بعد از آن الگوریتم GBMO دارای زمان اجرای بهتری است. یکی دیگر از مزیت‌های الگوریتم پیشنهادی پارامترهای کم و سادگی پیاده‌سازی آن است.

جدول ۷. مقایسه زمان اجرا در الگوریتم‌های ICA، GA و PSO

الگوریتم	زمان اجرا
ICA	40.533618s
GA	38.043467s
PSO	24.245529s
الگوریتم پیشنهادی	36.076119s

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روش بهینه‌سازی جدیدی با الهام از حرکت کاتورهای مولکول‌های گاز در فضا پیشنهاد شد. در الگوریتم بهینه‌سازی حرکت کاتورهای گازها یا GBMO با مدل‌سازی حرکت جنبشی مولکول‌های گاز روشنی موثر برای جستجوی فضای مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد گردید. نتایج بدست آمده از اعمال الگوریتم GBMO بررسی توابع محک