



# بهینه‌سازی در محیط‌های غیرقطعی و پیچیده پویا با روش‌های تکاملی

سید مسعود اجابتی\* و سید حمید ظهیری

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

## چکیده

در دنیای واقعی بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، پویا، غیرقطعی و پیچیده هستند که در آن تابع هدف یا محدودیت‌ها می‌توانند در طول زمان تغییر یابند و درنتیجه، بهینه‌این مسائل نیز می‌تواند تغییر کند؛ ازین‌رو الگوریتم‌های بهینه‌سازی نه تنها باید مقدار بهینه سراسری را در فضای جستجو پیدا، بلکه باید مسیر تغییرات بهینه را در محیط پویا دنبال کنند. در این مقاله برای دست یابی به این توانایی الگوریتم جدیدی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ذرات افزایشی کاهشی، پیشنهاد شده است. این الگوریتم همواره در روند بهینه‌سازی به طور انتطباقی با کاهش یا افزایش تعداد ذرات الگوریتم، توانایی یافتن و دنبال کردن تعداد بهینه متغیر با زمان را در محیط‌هایی که تغییرات آن قابل آشکارسازی نیست، دارد؛ علاوه‌بر این تعریف جدیدی به نام ناحیه جستجو متمرکز با هدف بر جسته کردن فضاهای امیدبخش برای سرعت بخشیدن به فرآیند جستجوی محلی و جلوگیری از همگرایی زودرس تعریف شده است. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی بر روی معیار قله‌های متحرک ارزیابی و با نتایج چندین الگوریتم معتبر مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت سازوکار کاهش افزایش ذرات بر زمان یافتن و دنبال کردن چندین بهینه در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبنی بر چند جمعیتی است.

واژگان کلیدی: افزایش و کاهش ذرات، مسائل بهینه‌سازی پویا (DOPs)، روش چند جمعیتی، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

## Optimization in Uncertain and Complex Dynamic Environments with Evolutionary Methods

Seyyed Masoud Ejabati\* & Seyed Hamid Zahiri

Electrical and Computer Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

In the real world, many of the optimization issues are dynamic, uncertain, and complex in which the objective function or constraints can be changed over time. Consequently, the optimum of these issues is changed nonlinearly. Therefore, the optimization algorithms not only should search the global optimum value in the space but also should follow the path of optimal change in dynamic environment. Accordingly, several researchers believe in the effectiveness of following a series of optimums compared to a global optimum. Therefore, when an environment is changed, following a global optimum in a series of best optimums is more efficient.

Evolutionary algorithms (EA) were inspired by biological and natural evolution. Because of changing characteristic of nature, it can be a good option for dynamic optimization. In recent years, different methods have been proposed to improve EA of static environments. One of the most common methods is multi-population method. In this method, the whole space is divided into sub-spaces. Each sub-space covers some local optimums and represents a sub-population. The algorithm updates the particles of each sub-space and

\* Corresponding author

نویسنده عهده‌دار مکاتبات



searches the best optimum. The most challenging issue of multi-population method is to create the desired number of sub-population and people to cover different sub-spaces in the search space. In the present study, in order to deal with the challenges, a new algorithm based on particle optimization algorithm, which is called decrement and increment particle optimization algorithm, was proposed. The algorithm is able to follow and find the number of time-varied optimum in an environment with invisible changes by increasing or decreasing the number of particles adaptively.

Another challenging issue in dynamic optimization is the detection of environmental changes, due to the impossibility of this issue and failure of detection-based algorithms. In the proposed method, there is no need to detect the environmental changes and it always adapts itself to the environment. Furthermore, the terms of focused search area were defined to emphasize on promising spaces to accelerate the local search process and prevent early convergence. The results of the proposed algorithm were evaluated on moving peaks and compared with several valid algorithms. The results showed the positive effect of decrement/increment mechanism of particles on finding and following time of many optimums compared to other multi-population based optimization algorithm.

**Keywords:** Increase decrease particle, Dynamic optimization problems (DOPs), Multi-population approach, Particle swarm optimization

از میزان تغییرات در محیط، تغییر قسمتی از محیط و عدم اطلاع از زمان تغییر در محیط را نیز می‌توان نام برد.

بهدلیل آن که الگوریتم‌های تکاملی برگرفته از تکامل طبیعی یا بیولوژیکی هستند و طبیعت نیز همواره در حال تغییر است، از این‌رو توانمندی خوبی برای استفاده در بهینه‌سازی پویا دارند. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای ارتقای الگوریتم‌های تکاملی سنتی که در محیط‌های ایستا کاربرد داشتند، پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به پنج گروه دسته‌بندی کرد:

۱- افزایش تنوع بعد از تغییر در محیط [3-5]

۲- حفظ تنوع در طول اجرا [6-8]

۳- طرح‌های حافظه [9, 10]

۴- روش‌های چندجمعیتی<sup>۸</sup> [11-17]

۵- هیبریداسیون [18, 19]

بسیاری از پژوهش‌گران بر این عقیده‌اند که برای حل مسائل بهینه‌سازی پویا، یافتن و دنبال کردن مجموعه‌ای از بهینه‌ها نسبت به یک بهینه سراسری مؤثرer است [20-22]. بدین خاطر که دنبال کردن بهینه سراسری در مجموعه‌ای از بهینه‌ها زمانی که محیط تغییر می‌کند، کارآمدتر است. در همین راستا به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های چندجمعیتی مانند تعداد زیادی از پژوهش‌ها [11-17]، برای یافتن و دنبال کردن چندین بهینه محلی نزدیک به بهینه سراسری در بهینه‌سازی مسائل پویا، نسبت به سایر روش‌ها کارآیی بهتری داشته باشد. اصول کار بدین صورت است که کل فضای جستجو به زیرفضاهایی<sup>۹</sup> تقسیم می‌شود؛ هر زیرفضا یک یا تعداد کمی بهینه محلی را پوشش داده و معرف یک زیرجمعیت است که الگوریتم به طور جداگانه ذرات هر

<sup>8</sup> Multi-population

<sup>9</sup> Sub-spaces

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از هوش جمعی و الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی در محیط‌های پویا<sup>۱</sup> و غیرقطعی<sup>۲</sup> بسیار مورد توجه قرار گرفته است [2].

در دنیای واقعی بسیاری از مسائل در محیط‌های پویا که یکی از عمومی‌ترین انواع آن مسائل غیرقطعی است، اتفاق می‌افتد. محیط‌های پویا برخلاف محیط‌های ایستا<sup>۳</sup> همواره در حال تغییر و درنتیجه مکان و مقدار نقاط بهینه نیز تغییر می‌کنند؛ از این‌رو الگوریتم‌های بهینه‌سازی نه تنها باید پاسخ بهینه سراسری را در فضای جستجوی خاصی پیدا کنند، بلکه نیاز دارد که به طور پیوسته تغییرات بهینه سراسری و گاه چندین بهینه نزدیک به آن را در محیط‌های مختلف دنبال کنند؛ از این‌رو الگوریتم‌ها باید توانایی تطبیق با تغییرات محیطی را داشته باشند. بنابراین اهداف، چالش‌ها و سنجش عملکرد و توابع محک در بهینه‌سازی محیط‌های پویا با محیط‌های ایستا به طور کامل متفاوت است.

هم‌گرایی زودرس، گیرافتادن در بهینه محلی و مصالحه بین اکتشاف و استخراج از جمله چالش‌هایی است که در محیط‌های ایستا با آن برخورد می‌کنیم، اما در محیط‌های پویا علاوه بر چالش‌های قبلی آشکارسازی تغییر در محیط، تبدیل بهینه محلی<sup>۴</sup> به بهینه سراسری<sup>۵</sup> و بالعکس، از دستدادن تنوع<sup>۶</sup> بعد از یک تغییر، حافظه منسوخ شده بعد از یک تغییر، احاطه بیش از یک بهینه توسط یک زیرجمعیت<sup>۷</sup> و بی‌اطلاعی

<sup>1</sup> Dynamic Environments

<sup>2</sup> Uncertain

<sup>3</sup> Static Environments

<sup>4</sup> Local Optimum

<sup>5</sup> Global optimum

<sup>6</sup> Diversity

<sup>7</sup> Sub-population





سازماندهی این مقاله به این صورت است که در بخش دو به مرور روش‌های چند جمعیتی که برای حل مسائل پویا توسعه یافته‌اند، می‌پردازیم. ساختار الگوریتم پیشنهادی idPSO<sup>۵</sup> را در بخش سه بیان می‌کنیم. بخش چهار شامل نتایج به دست آمده از عملکرد الگوریتم در مواجهه با تابع محک قله‌های متحرک با تنظیم‌های مختلف است و درنهایت مقاله با نتیجه‌گیری و بحث در بخش پنجم به پایان می‌رسد.

## ۲- روش‌های چند جمعیتی در محیط‌های پویا

در بهینه‌سازی محیط‌های پویا حفظ گوناگونی جمعیت یکی از اساسی‌ترین مسائل به شمار می‌رود. در همین راستا بسیاری از پژوهش‌ها در مواجهه با مسائل چنددهدفه<sup>۶</sup> در محیط‌های پویا نشان داده‌اند که برای حفظ گوناگونی جمعیت، رویکرد چند جمعیتی بسیار مؤثر است.

در [11-13] الگوریتم ACO چندکلونی<sup>۷</sup> به کار گرفته شده است که در آن برای به بیشینه‌سازدن اکتشاف<sup>۸</sup> در کل فضای جستجو، هر کلونی از جدول فرمون جداگانه‌ای استفاده می‌کند. اگرچه روش صریح و روشنی برای حفظ کلونی‌ها در کل فضای جستجو ارائه نشده اما نتایج حاکی از عملکرد بهتر نسبت به الگوریتم تک کلونی بود. در [14, 15] نیز از الگوریتم ACO چند کلونی استفاده شده است با این تفاوت که جدول فرمون برای همه کلونی‌ها که قبیله نامیده شده‌اند، مشابه است و تفاوت در تنظیم پارامترهای آن‌ها مسبب رفتارهای مختلف قبیله‌ها برای پوشش‌دادن نواحی بیشتری از فضای جستجو می‌شود. مشابه چنین ایده‌ای در PSO<sup>۹</sup> نیز به کار گرفته شده است [16].

در [27] الگوریتم PSO چند جمعیتی بر اساس مدل جزیره‌ای معرفی شده است؛ به طوری که ذرات به طور منظم بین جمعیت‌های مختلف مهاجرت می‌کنند. در [17] الگوریتم متفاوت عمل کرده و ارتباط بین جمعیت‌ها فقط زمانی رخ می‌دهد که تغییر در محیط مشاهده شود.

در پژوهش [28] کل جمعیت به دو دسته جمعیت والدین که موظف به جستجوی فضای جستجو و جمعیت فرزندان که موظف به دنبال کردن بهینه‌ها هستند، تقسیم شده‌اند. جمعیت والدین همواره در حال بررسی شرایط برای

زیر جمعیت را به روزرسانی کرده و به جستجوی بهینه بهتر می‌پردازد. موضوع چالش برانگیز در روش‌های چند جمعیتی چگونگی ایجاد تعداد مناسب زیر جمعیت و تعداد مناسب افراد برای پوشش دادن زیر فضاهای مختلف در فضای جستجو است. به عنوان نمونه یانگ و لی روش خوشبندی سلسه‌مراتبی را برای تقسیم خودکار فضای جستجو به زیر جمعیت‌ها به کار گرفته‌اند [22, 23].

بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پویا بر مبنای آشکارسازی تغییر<sup>۱</sup> در محیط شکل گرفته‌اند و در آن‌ها روش‌هایی برای آشکارسازی تغییر در محیط استفاده شده است. آشکارسازی تغییرات در محیط کاری سخت و حتی در موقعی می‌تواند غیرممکن باشد. فرض کنید که فقط قسمتی از کل فضای جستجو دست‌خوش تغییر شود، در این حالت پیش‌بینی آن زیرفضا و یا آشکارسازی تغییر بسیار دشوار می‌شود؛ به این دلیل الگوریتم‌هایی که نیازی به آشکارسازی تغییرات در محیط نداشته باشند، در محیط‌های گوناگون عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

در این مقاله جهت استفاده مؤثر از روش چند جمعیتی در محیط‌های غیرقطعی و غیرقابل آشکارسازی، الگوریتم idPSO<sup>۱۰</sup> پیشنهاد شده است. الگوریتم معرفی شده بر مبنای PSO<sup>۱۱</sup> برای محیط‌های پویا طراحی شده و برای سرعت بخشیدن به روند بهینه‌سازی از سازوکار ساده و در عین حال قدرتمندی برخوردار است. در روش پیشنهادی، برای مسائلی چون چگونگی ایجاد زیر جمعیت‌ها، جلوگیری از همگرایی زودرس و اجتماع بیش از حد افراد و چگونگی تطبیق رفتار افراد با شرایط محیطی راه کارهای نوینی ارائه شده است. همچنین تعاریف جدیدی به نام ناحیه جستجوی مرکز و شعاع جستجو معرفی شده است.

الگوریتم پیشنهادی بر روی تابع محک قله‌های متحرک<sup>۱۲</sup> [24, 25] که یکی از معروف‌ترین مسائل بهینه‌سازی در محیط‌های پویا برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پویا به شمار می‌رود [26] به کار گرفته شده است. برای ارزیابی، عملکرد idPSO با چندین الگوریتم که از روش‌های چند جمعیتی برای حل مسائل بهینه‌سازی پویا استفاده کرده‌اند، مقایسه و همچنین برای بررسی حساسیت الگوریتم نسبت به پارامترهای ساختاری خود آزمایش‌هایی انجام شده است.

<sup>1</sup> Detect change

<sup>2</sup> Increasing/Decreasing particle swarm optimization

<sup>3</sup> Particle swarm optimization

<sup>4</sup> Moving peaks Benchmark (MPB)



ایجاد جمعیت کودکان هستند. گفتنی است که تعداد کل افراد همواره ثابت است. الگوریتم بهینه‌سازی چندجمعیتی سریع<sup>۱</sup> [29] با این تفاوت که جمعیت والدین به عنوان جمعیت پایه بعد از تغییر در محیط به دنبال مناطق محتمل تر می‌شود و جمعیت کودکان برای جستجوی محلی در این مناطق محتمل استفاده می‌شوند، راهه شد. ایده‌ای مشابه توسط کاموسی و همکاران معرفی شده است که در آن جمعیت کودکان در صورت مؤثرنیودن تا زمانی که تغییر در محیط احساس نشود به اصطلاح در خواب زمستانی می‌روند [30].

در [31, 32] از خواص اتمها و اصل دافعه ذرات با پاره نام برای حفظ تنوع در جمعیت‌ها استفاده شده است. بدین صورت که جمعیت‌های باردار برای پوشش دادن بهینه‌ها به صورت مجزا معرفی شده‌اند. در نسخه بهبودیافته دو قانون ابتکاری برای افزایش تنوع اضافه شده است. به موجب یکی از قوانین در زمان ایجاد تغییر در محیط تعداد ذرات کوانتوم افزایش و تعداد مسیرهای ذرات کاهش می‌یابد. در قانون دوم ذرات با عملکرد نامناسب مقداردهی اولیه و یا متوقف می‌شوند [33].

الگوریتم بهینه‌سازی ذرات خوش‌های<sup>۲</sup> توسط لی و یانگ ارائه شده که در آن از یک روش خوشبندی سلسه‌مراتبی برای تقسیم جمعیت اولیه به زیر جمعیت‌هایی برای پوشش دادن به مناطق مختلف محلی استفاده شده است [22, 23].

بزدانی و همکاران یک الگوریتم چندجمعیتی به نام *finder-tracker multi-swarm PSO* با استفاده از چندین سازوکار برای مقابله با چالش‌های موجود در محیط‌های پویا از جمله: طرح شناسایی بهینه، طرح ردیابی بهینه، سازوکار بیداری و خواب برای زیر جمعیت‌ها، یک روش تشخیص تغییر در محیط و یک روش جستجوی محلی است، شکل گرفته است [34].

در پژوهش [35] روشی چندمنطقه‌ای<sup>۳</sup> مبتنی بر WDO<sup>۴</sup> اصلاح شده به کار گرفته شده است. در این روش که الهام گرفته از هواشناسی است با توجه به مناطق غیر محتمل بهمنظر شناسایی مناطق امیدوارکننده در طی فرآیند جستجو راه کارهایی ارائه شده است. منظور از مناطق امیدوارکننده، منطقه‌ای است که ممکن است، شامل بهینه‌هایی باشد که هر یک از آن‌ها به احتمال در محیط بعدی، به بهینه سراسری مبدل شوند.

<sup>1</sup> Fast multi-swarm optimization (FMSO)

<sup>2</sup> Clustering PSO (CPSO)

<sup>3</sup> Multi-region

<sup>4</sup> Wind Driven Optimization

در پژوهشی دیگر، یک روش تطبیقی مبتنی بر الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۵</sup> برای حل مسائل بهینه‌سازی پویای پیشنهاد شده است [36]. در این ارتقا این الگوریتم برای محیط‌های پویا، به جای استفاده از یک مقدار برای پرواز لووی<sup>۶</sup> از دو مقدار یکی برای جهش‌های<sup>۷</sup> کوتاه و دیگری برای جهش‌های طولانی استفاده شده است. این سازوکار سبب بهبود کنترل الگوریتم بر اکتشاف و استخراج<sup>۸</sup> نقاط بهینه در طی روند جستجو می‌شود.

فولادگر و لطفی<sup>۹</sup> [37] ایده‌هایی دیگر به الگوریتم جستجوی فاخته برای بهینه‌سازی پویا اضافه کرده‌اند. رویکرد آن‌ها استفاده از یک الگوریتم جستجوی فاخته اصلاح شده برای افزایش میزان هم‌گرایی جمعیت برای یافتن قله‌ها و استفاده از محرومیت<sup>۱۰</sup> برای جلوگیری از هم‌گراشدن جمعیت به مناطق مشابه در فضای جستجو است.

## ۱-۲- محیط‌های پویا با تغییرات غیرقابل تشخیص

در بسیاری از پژوهش‌هایی [38] که تاکنون برای حل مسائل بهینه‌سازی پویا<sup>۱۱</sup> (DOPs) بر مبنای الگوریتم‌های تکاملی صورت گرفته است، بر مبنای تشخیص تغییر در محیط، [22, 32, 39, 40] و یا پیش‌بینی تغییرات با فرض این‌که تغییرات از یک الگوی خواص تبعیت می‌کنند [41]، توسعه یافته‌اند. هنگامی که تغییرات تشخیص داده شد و یا پیش‌بینی شد آن گاه از استراتژی‌های گوناگونی برای افزایش تنوع بهره می‌گیرند.

با توجه به اهمیت حفظ تنوع در حل مسائل بهینه‌سازی پویا و وابستگی آن به تشخیص تغییرات محیط، حائز اهمیت است که عملکرد الگوریتم‌هایی که برای محیط‌های پویا پیشنهاد می‌شود وابسته به شناسایی تغییرات در محیط نباشند؛ زیرا آشکارسازی تغییرات محیط در برخی موارد بسیار دشوار و غیرممکن می‌شود. به طور مثال تصور کنید که فقط برخی نواحی از محیط جستجو دستخوش تغییر شوند و این قضیه روند الگوریتم را برای تشخیص تغییر در محیط بسیار سخت می‌کند و در صورتی که موفق به کشف تغییر نشود، تمامی استراتژی‌های متداوی به هم ریخته و الگوریتم از کار خواهد افتاد؛ همچنین در محیط‌های نویفه‌ای

<sup>5</sup> Cuckoo search

<sup>6</sup> Levy flight

<sup>7</sup> Mutation

<sup>8</sup> Exploitation

<sup>9</sup> Exclusion

<sup>10</sup> Dynamic optimization problems



(الگوریتم-۱): چهارچوب کلی الگوریتم پیشنهادی  
**(Algorithm-1): The general framework of the proposed algorithm**

#### **Algorithm 1 idPSO**

```

1 Initialize the free particles
2 while stop criteria is not satisfied do
3   for free particles do
4     PSO();
5   end for
6   convergenceChecking (free particles)
7   if FSZ exist then
8     for each FSZ[i] do
9       PSO(FSZ[i])
10      Update FSZ centers
11      Check velocity of focus particles
12    end for
13  end if
14  FSZoverlapChecking (FSZ,FSR)
15  RemoveUselessFSZ
16 end while

```

حلقه اصلی الگوریتم پیشنهادی با مقداردهی اولیه برای ذرات آزاد شروع می‌شود و در مرحله بعدی مکان‌های این ذرات توسط PSO مرسوم<sup>۲</sup> بهروز می‌شود. در ادامه هم‌گرایی ذرات آزاد مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ در صورت تشخیص امکان هم‌گرایی، ذراتی که در ناحیه جستجوی متتمرکز (FSZ) یعنی در شعاع جستجوی متتمرکز (FSR) حول بهترین ذره باشند، به عنوان ذرات متتمرکز، شناخته شده و یک ناحیه جستجوی متتمرکز جدید ایجاد می‌شود. حال مکان ذرات متتمرکز هر ناحیه جستجوی به طور جداگانه توسط PSO بهروزرسانی می‌شود و در صورت بیهوده بهینه FSR<sup>۱</sup>، مرکز بهینه مناسب‌تر یافت شده انتقال می‌یابد. در مرحله بعدی نواحی جستجوی متتمرکز از جهت روی همان‌افتادگی بروزی و در نهایت FSZ هایی که بهینه خود را در اثر تغییرات شدید شرایط محیطی از دست داده‌اند، حذف می‌شوند؛ چون فرض بر این است که تغییر مکانی بهینه پس از تغییر در محیط در محدوده FSZ باشد. روند روش پیشنهادی در روند نمایی شکل (۱) نمایش داده شده است.

در الگوریتم پیشنهادی ذرات به دو گروه ذرات آزاد و ذرات متتمرکز تقسیم می‌شوند. ذرات آزاد در قسمت نخست الگوریتم به تعداد از پیش تعیین شده، مقداردهی اولیه است. یکی از ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی متغیربودن تعداد ذرات متتمرکز در طول زمان بسته به شرایط محیط است. بدین‌سان تعداد کل ذرات در طول اجرای الگوریتم همواره تابع شرایط محیطی است و این ویژگی الگوریتم را از قید بهروزرسانی همیشگی تعداد بالای ذرات جدا می‌سازد.

تشخیص تغییر برای این دست از الگوریتم‌ها، بسیار دشوار است. برای مقابله با چنین نقطه ضعفی، الگوریتم پیشنهادی نیازی به کشف تغییر در محیط ندارد و همواره به صورت تطبیقی خود را با شرایط محیطی وقف می‌دهد.

در ادامه برای بهمود در حل مسائل بهینه‌سازی پویا و غلبه بر کاستی‌های مرورشده در این بخش، به توصیف روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

### ۳- الگوریتم بهینه سازی ذرات افزایشی کاهشی

در این بخش الگوریتم جدیدی به نام PSO برای بهینه‌سازی در محیط‌های پویا معرفی شده است. برای همگام‌سازی PSO مرسوم برای محیط‌های پویا، ذرات به دو گروه ذرات آزاد و ذرات متتمرکز تقسیم می‌شوند.

وظیفه ذرات آزاد جستجوی همیشگی در کل فضای جستجو است. زمانی که این ذرات به سمت هم‌گرایی پیش بروند تعدادی از آن‌ها که در محدوده‌ای به نام ناحیه جستجوی متتمرکز<sup>۱</sup> FSZ قرار دارند، به عنوان ذرات متتمرکز معرفی می‌شوند. محدوده ناحیه جستجوی متتمرکز حول بهترین ذره متتمرکز با شعاعی با نام شعاع جستجوی متتمرکز<sup>۲</sup> FSR مشخص می‌شود. با بهروزرسانی ذرات متتمرکز در صورت بیهوده بهترین ذره، مرکز FSZ نیز به مکان بهترین ذره متتمرکز تغییر پیدا می‌کند و سایر ذرات متتمرکز این ناحیه جستجو، ملزم به قرارگرفتن و جستجو در این زیرفضا می‌شوند. همزمان تصامی ذرات آزاد برای یافتن نقاط بیهوده دیگر در فضای جستجو پراکنده می‌شوند. در واقع وظیفه ذرات متتمرکز یافتن و یافتن زیرفضاهای محتمل و وظیفه ذرات متتمرکز یافتن و بهبود بهینه و دنبال کردن آن در حین تغییرات محیط است؛ بدین صورت تعداد ذرات با توجه به ایجاد نواحی جستجوی متتمرکز و به تبع آن تولید ذرات متتمرکز جدید افزایش می‌یابد. ساختار الگوریتم به گونه‌ای است که هر زمان بسته به شرایط محیط بهینه مربوط به هر ناحیه جستجوی متتمرکز از بین برود، کلیه ذرات متتمرکز عضو آن ناحیه حذف می‌شوند. بدین صورت همواره تعداد ذرات به طور تطبیقی در حال تغییر است. در الگوریتم (۱) چهارچوب کلی الگوریتم نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Focused Search Zone

<sup>2</sup> Focused Search Radius

می‌کند.  $r_1$  و  $r_2$  اعدادی تصادفی بین صفر و یک هستند.  $c_1$  و  $c_2$  با نام ثابت شتاب شناخته می‌شوند و بهترتیب میزان تبعیت ذره از بهترین خود (جزء شناختی) و بهترین جمعی (جزء اجتماعی) را نشان می‌دهد.

(الگوریتم-۲): الگوریتم بهینه‌سازی ذرات  
(Algorithm-2): The process of PSO algorithm

#### Algorithm 2 PSO

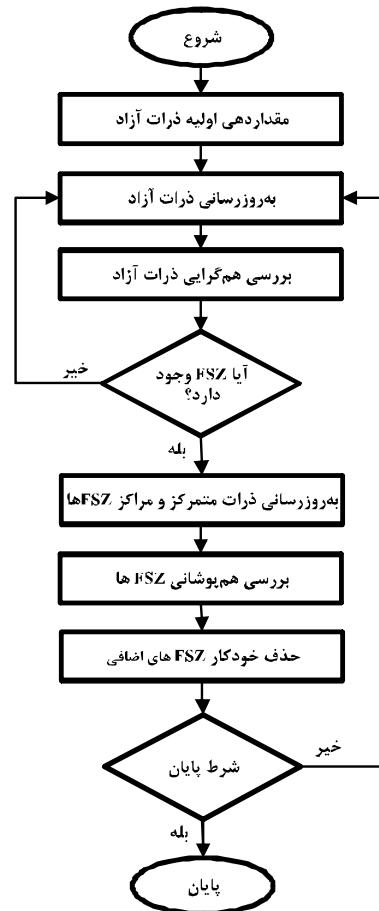
```

1 Evaluate the fitness of each particle
2 for each particle  $i$  do
3     Update particle  $i$  according to (1) and (2);
4     if  $f(\vec{x}_i) < f(\vec{x}_{pbest_i})$  then
5          $\vec{x}_{pbest_i} := \vec{x}_i$ ;
6         if  $f(\vec{x}_i) < f(\vec{x}_{gbest})$  then
7              $\vec{x}_{gbest} := \vec{x}_i$ ;
8         end if
9     end if
10    end for

```

در گام بعدی حلقه اصلی الگوریتم پیشنهادی، روند هم‌گرایی ذرات آزاد مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرط هم‌گرایی اولیه، بدین صورت است که میزان تغییرات موقعیت  $x_{gbest}$  ذرات آزاد و برآزندگی آن نسبت به مرحله قبل سنجیده می‌شود. روند بررسی هم‌گرایی ذرات آزاد در الگوریتم (۳) نمایش داده شده است. در صورتی که تغییرات  $x_{gbest}$  کمتر از  $r_{conv}/5$  و تغییرات برآزندگی آن کمتر از  $r_{conv}$  باشد، الگوریتم امکان هم‌گرایی ذرات آزاد را تشخیص می‌دهد. در این مرحله به بررسی موقعیت بهترین نقطه یافته شده پرداخته می‌شود و در صورتی که در هر یک از FSZها واقع شده باشد و مقدار برآزندگی آن بهینه‌تر از برآزندگی مرکز FSZ واقع در آن باشد، FSZ یادشده و به تبع آن ذرات مرکز عضو حذف و FSZ جدید با تعداد ذرات آزادی که در محدوده FSR به مرکزیت  $x_{gbest}$  باشند، تشکیل و تمامی ذرات آزاد برای جستجوی نواحی محتمل دیگر در کل فضای جستجو پراکنده می‌شود. از جهت دیگر در صورتی که مقدار برآزندگی  $x_{gbest}$  بهینه‌تر از برآزندگی مرکز FSZ واقع در آن نباشد، تمامی ذرات آزاد پراکنده می‌شوند.

پس از ارضای شرط اولیه هم‌گرایی، اگر موقعیت بهترین نقطه ذرات آزاد در هیچ یک از FSZها واقع نشده باشد، آنگاه به بررسی مجموع فواصل دو ذره آزاد که کمترین فاصله را نسبت به  $x_{gbest}$  دارند، پرداخته می‌شود؛ در صورتی که این مجموع نیز مقداری کمتر از  $r_{conv}$  داشته باشد، نشانه آن است که ذرات آزاد رو به هم‌گرایی هستند و  $x_{gbest}$  به عنوان مرکز FSZ در نظر گرفته شده و تعداد ذرات آزاد تا بیشینه چهار



(شکل-۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

(Figure-1): Flowchart Proposed Algorithm

در گام بعدی موقعیت ذرات آزاد توسط الگوریتم PSO که نخستین بار توسط کندی و ابرهارت پیشنهاد شد [42, 43]، به روزرسانی می‌شود. روند الگوریتم PSO در الگوریتم (۲) نشان داده شده است. هر ذره  $i$  با یک بردار سرعت  $\vec{v}_i$  و بردار موقعیت  $\vec{x}_i$  نمایش داده و توسط نسخه [44] با وزن انرسی<sup>۱</sup> به صورت زیر به روزرسانی می‌شود:

$$\begin{aligned} v_i'^d &= \omega v_i^d + c_1 r_1 (x_{pbest_i}^d - x_i^d) \\ &\quad + c_2 r_2 (x_{gbest}^d - x_i^d) \end{aligned} \quad (1)$$

$$x_i'^d = x_i^d + v_i'^d \quad (2)$$

در رابطه بالا  $x_i'^d$  موقعیت کنونی،  $x_i^d$  موقعیت قبلی،  $v_i^d$  سرعت کنونی و  $v_i'^d$  سرعت قبلی ذره  $i$ ام در بعد  $k$ ام است.  $x_{pbest_i}^d$  بهترین موقعیت ذره  $i$ ام تاکنون و  $x_{gbest}^d$  بهترین موقعیت در بین کل ذرات است. (0.1)  $\in \omega$  وزن انرسی است و میزان تأثیر سرعت قبلی در سرعت کنونی ذره را تعیین

<sup>۱</sup> Inertia weight



برازندگی مراکز سایر FSZ ها بود. FSZ ای که برازندگی بهینه یافت شده آن توسط ذرات متمرکز مقدار بدتری نسبت به دیگری داشت به عنوان بهینه محلی تلقی شده و FSZ یادشده و ذرات متمرکز مربوط به آن حذف می‌شوند. بدین صورت هم از جستجوی جند FSZ در یک فاصله از فضای جستجو جلوگیری شده و هم از گیرافتادن در بهینه‌های محلی اجتناب می‌شود که نتیجه آن افزایش سرعت الگوریتم در یافتن نقاط بهینه بیشتر در کل فضای جستجو در زمان محدودتری است. در الگوریتم (۴) روند بررسی همپوشانی FSZ ها نمایش داده شده است.

ایده دیگر به کار گرفته شده در الگوریتم پیشنهادی که در الگوریتم (۵) نمایش داده شده، حذف خودکار FSZ هایی است که پس از تغییرات شدید در محیط دیگر شاهد نقطه بهینه در منطقه خود نیستند و یا حذف ذرات متمرکزی که در بهینه محلی گیر افتاده‌اند. در اینجا نیز ضریبی ( $P_{mean}$ ) از میانگین برازندگی نقاط بهینه یافت شده به عنوان معیار سنجش معرفی می‌شود و در هر مرحله با مقایسه بدترین بهینه در FSZ ها با این معیار در صورتی که مقداری نامناسب‌تر داشته باشند، FSZ مربوطه همراه با ذرات متمرکز آن حذف می‌شوند. در بخش بعدی روش پیشنهادی را مورد آزمایش‌های مختلف فرار می‌دهیم تا عملکرد آن را نسبت به سایر روش‌های مطرح بسنجیم.

#### (الگوریتم-۴): روند بررسی همپوشانی FSZ ها

**(Algorithm-4): The FSZ overlap checking process**

---

**Algorithm 4 FSZoverlapChecking (FSZ, FSR)**

- 1 if distance between  $FSZ[i]$  center and  $FSZ[j] \dots$  center <  $2 * FSR$  then
- 2      $f_{mean}(center_{FSZ})$  – Calculation of mean fitness ... other centers
- 3     if  $f(center_{FSZ})$  and  $f(center_{FSZ[j]})$  better than ...  $P_{mean} * f_{mean}(center_{FSZ})$  and  $FSR > 1$  then
- 4          $FSR = (\text{distance between } FSZ[i] \text{ center and } FSZ[j] \text{ center}) / 2$
- 5     else
- 6         delete  $FSZ$  with worst fitness between ...  $FSZ[i]$  and  $FSZ[j]$
- 7     end if
- 8 end if

---

#### (الگوریتم-۵): حذف خودکار FSZ ها

**(Algorithm-5): The automatic removal of FSZs**

---

**Algorithm 5 RemoveUselessFSZ**

- 1  $f_{mean}(center_{FSZ})$  = Calculation of mean all fitness ... centers
- 2 if worst  $f(center_{FSZ[i]}) > f_{mean}(center_{FSZ})$  then
- 3     delete  $FSZ$  with worst fitness  $FSZ[i]$
- 4 end if

---

ذره که در محدوده FSZ نسبت به این مرکز باشد به عنوان ذرات متمرکز آن FSZ معرفی و تمامی ذرات آزاد برای جستجوی مناطق محتمل دیگر در کل فضای جستجو پراکنده می‌شوند. در صورتی که تعداد ذرات آزاد در محدوده FSZ جدید کمتر از دو ذره باشد، دو ذره نزدیک‌تر به عنوان ذرات متمرکز برای FSZ یادشده پذیرفته می‌شوند.

#### (الگوریتم-۳): روند بررسی همگرایی ذرات آزاد

**(Algorithm-3): The process of investigating free particle convergence**

**Algorithm 3 convergenceChecking ()**

---

- 1 if  $(f(x_{gbest})^{t-1} - f(x_{gbest}))^t < r_{conv}$  and  $(\|x_{gbest}\|^{t-1} - \|x_{gbest}\|^t) < r_{conv}/5$  then
- 2     if  $x_{gbest}$  was within  $FSZ[i]$  then
- 3         if  $f(x_{gbest})$  better than  $f(center_{FSZ[i]})$  then
- 4             Replace selected free particles with focus... particles in  $FSZ[i]$
- 5             re-initialize the free particles
- 6         else
- 7             re-initialize the free particles
- 8         end if
- 9     else
- 10         create a new  $FSZ$  with selected free ... particles as the focus particles
- 11         re-initialize the free particles
- 12     end if
- 13 end if
- 14 end if
- 15 end if
- 16 end if

---

در گام بعدی موقعیت ذرات متمرکز هر FSZ به طور مجزا توسط الگوریتم PSO به روزسانی می‌شوند و در صورت بهبود بهترین ذره هر FSZ، مرکز آن FSZ به موقعیت بهترین ذره تغییر مکان می‌دهد. بدین صورت موقعیت مکانی FSZ ها نیز در فضای جستجو به روزسانی می‌شود. الگوریتم همچنین سرعت ذرات متمرکز را رسید می‌کند تا هر زمان نزدیک به صفر شد، با پراکنده کردن ذرات متمرکز یادشده در محدوده FSZ خودشان، از گیرافتادن در بهینه محلی جلوگیری کند. در الگوریتم پیشنهادی سازوکاری برای جلوگیری از همپوشانی FSZ ها و موازی کاری ذرات متمرکز به کار گرفته شده است. در این روش فواصل بین مراکز FSZ ها محاسبه شده و دو همسایه که فاصله مراکزشان کمتر از دو برابر FSR از هم باشند، در نظر گرفته می‌شوند؛ حال برای اجتناب از تحت تأثیر قرار گرفتن الگوریتم از بهینه‌های محلی، میانگین برازندگی بهینه‌های یافت شده به وسیله سایر FSZ ها محاسبه می‌شود. در صورتی که برازندگی مراکز دو FSZ مذکور بهتر از ضریبی ( $P_{mean}$ ) از میانگین برازندگی مراکز سایر FSZ ها بود، شعاع جستجو به نصف فاصله مراکز این دو FSZ کاهش می‌یابد تا هر دو بتوانند بهینه خود را دنبال کنند؛ حال اگر برازندگی یکی یا هر دو FSZ بدتر از ضریبی ( $P_{mean}$ ) از میانگین

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش الگوریتم بهینه‌سازی ذرات افزایشی کاوشی برای حل مسأله MPB به کار گرفته شده است [24، 25]. آزمایش‌های انجام‌شده را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد.

هدف از قسمت نخست بررسی سازوکار idPSO و تجزیه تحلیل پارامترهای کلیدی در روند بهینه‌سازی الگوریتم در مواجهه با مسأله MPB است. در قسمت دوم از آزمایش‌ها، عملکرد idPSO با تعدادی از الگوریتم‌هایی که در این زمینه معرفی شده‌اند، مقایسه می‌شود. نتایج تمام الگوریتم‌هایی که در این مقاله نشان داده شده‌اند، برگرفته از مقالات پیشنهادشان است.

در الگوریتم PSO ثابت‌های شتاب  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب میزان تبعیت ذره از بهترین خود (جزء شناختی) و بهترین جمعی (جزء اجتماعی) را نشان می‌دهد و وزن انرسی سرعت هم‌گرایی را تغییر می‌دهد. با توجه به وظایف مختلفی که برای ذرات آزاد و ذرات متمنکز در idPSO در نظر گرفته شده است، مقادیر ثابت‌های شتاب و وزن انرسی برای بهروزرسانی ذرات آزاد که وظیفه یافتن نواحی محتمل در کل فضای جستجو و ذرات متمنکز که موظف به یافتن و دنبال کردن بهینه در FSZ خودشان هستند، متفاوت در نظر گرفته شده است. مقادیر  $c_1$ ،  $c_2$  و  $\omega$  ذرات آزاد برای جستجوی کلی به ترتیب ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۵ در نظر گرفته شده است.

### ۴-۱- نتایج تجربی

#### Moving Peaks Benchmark (MPB) Problem .۱

تابع محک قله‌های متمنکز یکی از معروف‌ترین مسائل بهینه‌سازی در محیط‌های پویا است و به طور گسترده‌ای برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پویا به کار گرفته شده است [24، 25]. در مسأله MPB، بهینه می‌تواند با سه ویژگی موقعیت، ارتفاع و عرض قله‌ها متفاوت باشد. این مسأله در بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(\vec{x}, t) = \max_{i=1, \dots, p} \frac{H_i(t)}{1 + W_i(t) \sum_{j=1}^D (x_j(t) - X_{ij}(t))^2} \quad (3)$$

در رابطه (3)  $H_i(t)$  و  $W_i(t)$  به ترتیب ارتفاع و پهنای قله  $i$  در زمان  $t$  و  $X_{ij}(t)$  زمین عنصر از مکان قله  $i$  در زمان  $t$  است. پارامتر  $p$  به طور مستقل برای قله‌های مشخص توسعه

فصل سی

تابع  $\max$  مخلوط می‌شود. مکان قله در جهتی تصادفی توسط بردار  $\vec{r}$ <sup>۱</sup> به اندازه یک فاصله  $s$ <sup>۱</sup> که معرف حساسیت پویایی مسأله است، انتقال می‌پابد. حرکت یک قله تنها به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{v}_i(t) = \frac{s}{|\vec{r} + \vec{v}_i(t-1)|} ((1-\lambda)\vec{r} + \lambda\vec{v}_i(t-1)) \quad (4)$$

بردار انتقال  $(t)$  یک ترکیب خطی از بردار تصادفی  $\vec{r}$  و بردار انتقال قبلی  $(t-1)$  است و نسبت به طول تغییر  $s$  نرمالیزه شده است. مقدار پارامتر همبستگی  $\lambda$  صفر در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده ناهمبستگی حرکات قله است. روابط تغییرات یک قله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H_i(t) = H_i(t-1) + height\_severity \times \sigma \quad (5)$$

$$W_i(t) = W_i(t-1) + width\_severity \times \sigma \quad (6)$$

$$\vec{X}_i(t) = \vec{X}_i(t)(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (7)$$

که در آن  $\sigma$  یک عدد تصادفی با توزیع نرمال و میانگین صفر و واریانس یک است.

#### ۲. تنظیم‌های آزمایش:

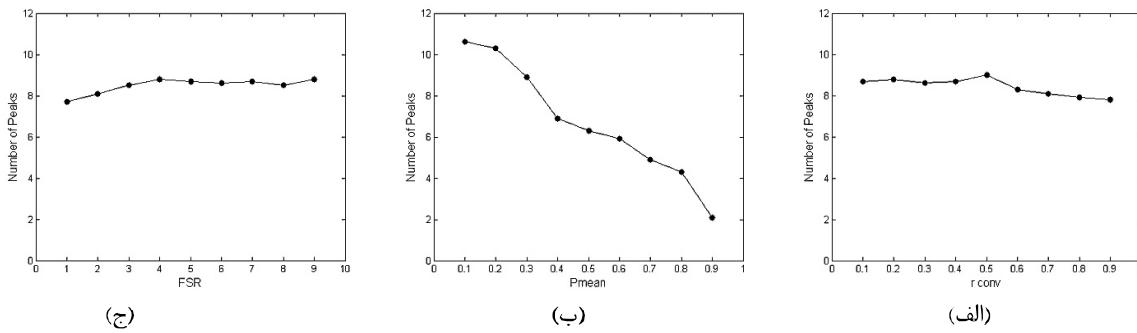
در جدول (۱) تنظیم‌های پیش‌فرض تابع محک قله‌های متمنکز آورده شده است. اصطلاح تغییر فرکانس  $U$  به معنای تغییر محیط بعد از  $U$  بار ارزیابی تابع برآزندگی است. مقدار Peak location range نشان‌دهنده بازه تغییرات مکان قله در هر بعد است. ارتفاع قله به صورت تصادفی در بازه [۳۰, ۷۰] و پهنای آن در بازه [۱, ۱۲] تغییر می‌کند.

(جدول-۱): تنظیم‌های پیش‌فرض برای مسأله MPB

(Table-1): Default setting for MPB

Parameter	Value
Number of peaks, $p$	[1,200]
Change frequency, $U$	5000
Height severity	7.0
Width severity	1.0
Peak shape	Cone
Basic function	No
Shift length, $s$	1.0
Number of dimensions, $D$	5
Correlation coefficient, $\lambda$	0
Peaks location range	[0,100]
Peak height, $H$	[30,70]
Peak width, $W$	[1,12]
Initial value of peaks	50.0

<sup>۱</sup> Shift length

(شکل-۲): (الف) تأثیر تغییر  $r_{conv}$  بر تعداد قله‌های یافت شده      (ب) تأثیر تغییر  $P_{mean}$  بر تعداد قله‌های یافت شده

ج) تأثیر تغییر FSR بر تعداد قله‌های یافت شده

(Figure-2): (a) The effect of  $r_{conv}$  change on the number of peaks found (b) The effect of  $p_{mean}$  change on the number of peaks found (c) The effect of the FSR change on the number of peaks found

شده است. در شکل (۲) تأثیر تغییرات پارامترها بر روی تعداد قله‌های یافت شده، آمده است.

در شکل (۲) الف، تغییرات  $r_{conv}$  بر روی تعداد قله‌های یافت شده، با توجه به ماهیت تصادفی بودن مسئله MPB در هر تکرار، نشان از آن دارد که الگوریتم حساسیت چندانی در قبال تغییر  $r_{conv}$  نشان نمی‌دهد؛ زیرا افزایش و کاهش  $r_{conv}$  در واقع زمان انتقال وظیفه جستجوی نواحی محتمل و نقطه بهینه از ذرات آزاد به ذرات متتمرکز را به ترتیب کم و زیاد می‌کند. هنگامی که افزایش می‌یابد، ذرات آزاد زودتر به سمت هم‌گرایی تشخیص داده می‌شوند و درنتیجه FSZ جدید تشکیل شده و شروع به یافتن بهینه می‌کند و ذرات آزاد دوباره به وظیفه اصلی خود یعنی یافتن نواحی محتمل بر می‌شوند. در این حالت امکان ایجاد بهینه‌های محلی افزایش می‌یابد که این ضعف سریعاً توسط الگوریتم‌های کنترلی با حذف FSZ یا ارتقا ذرات متتمرکز برطرف می‌شود. در مقابل، با کاهش  $r_{conv}$  در واقع ذرات آزاد علاوه‌بر جستجوی نواحی محتمل، تا حد زیادی محکوم به یافتن مقدار بهینه که جزو وظایف ذرات متتمرکز است، می‌شوند. این قضیه زمانی اهمیت می‌یابد که سرعت تغییرات محیط افزایش یابد (فرکانس تغییرات  $U$  کاهش یابد). در اینجا بدلیل توانایی الگوریتم تغییرات  $r_{conv}$  تأثیر چندانی بر مقدار خطای برون خط و تعداد قله‌های یافت شده ندارد.

در شکل (۲) ب نیز مشابه آنچه در تغییرات  $r_{conv}$  اتفاق می‌افتد، با افزایش مقدار  $P_{mean}$  ایجاد نواحی محتمل با صرف زمان بیشتری صورت می‌گیرد و تا یافتن قله به تأخیر می‌افتد. افزایش بیش از  $70\%$   $P_{mean}$  الگوریتم را برای یافتن همه نواحی

### ۳ اندازه‌گیری عملکرد:

برای اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌ها در محیط‌های پویا چندین معیار سنجش معرفی شده است [45] به منظور ایجاد نتایج قابل قیاس با سایر روش‌های مطرح در این زمینه، از معیار خطای برون خط<sup>۱</sup> که به صورت میانگین اختلاف مقدار بهینه یافت شده توسط الگوریتم با مقدار بهینه سراسری در هر محیط تعریف می‌شود، استفاده شده است.

$$OE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (h_k - f_k) \quad (8)$$

در رابطه با  $f_k$  بهترین جواب یافت شده توسط الگوریتم تا قبل از تغییر  $k$ -ام در محیط و  $h_k$  مقدار بهینه محیط  $k$ -ام است. میانگین اختلاف  $f_k$  و  $h_k$  در کل  $K$  تغییر در محیط است [45]. همه نتایج گزارش شده برای بیش از پنجاه بار اجرای برنامه برای یکصد تغییر در محیط است.

## ۴- حساسیت الگوریتم نسبت به پارامترهای ساختاری

به منظور بررسی حساسیت الگوریتم نسبت به پارامترهای  $r_{conv}$  (شعاع همگرایی)،  $P_{mean}$  (ضریب میانگین برازنده‌گی) و  $U$  (شعاع جستجوی متتمرکز) آزمایش‌هایی روی MPB با مقدار پیش‌فرض ( $\gamma=10$ ،  $\delta=1$ ،  $U=5000$ ) صورت گرفته است.

به دلیل آن که مقدار خطای برون خط به‌ازای تغییرات پارامتر در فرکانس تغییرات پنج‌هزار، به طور تقریبی برابر و همواره به کمترین مقدار می‌رسد، برای مشاهده تأثیر تغییرات هر پارامتر، به جای بررسی مقدار خطای برون خط تعداد متوسط قله‌های یافت شده به‌وسیله الگوریتم، در نظر گرفته

<sup>۱</sup> Offline error (OE)

برای ایجاد FSZ ها و بهبود بهینه ها توسط ذرات متمرکز جدید می شوند و این به معنی بار محاسباتی اضافه و صرف زمان بیشتر برای بهینه سازی است.

همان گونه که در قبل ذکر شد، درنظر گرفتن مقادیر بالا (بین ۶ تا ۱۰) موجب می شود، بهبود بهینه با سرعت کمتری صورت گیرد؛ در صورتی که بعد از تعییر در محیط احتمال حضور بهینه در همین FSZ بالا می رود. در عمل مقادیر بالا برای FSR به وسیله سازوکار FSZoverlapChecking تعديل شده و به مقادیر متوسط کاهش می یابد.

با توجه به توصیفات اخیر، مقادیر بهینه پارامترهای idPSO برای حل مسأله MPB با مقادیر پیش فرض (۱۰-۱۰, ۵-۵۰۰۰, ۵-۵۰۰۰) در جدول (۲) آورده شده است.

(جدول-۲): تنظیم های idPSO برای حل مسأله MPB پیش فرض

(Table-2): idPSO settings for solving the default MPB problem

Parameter	Value
Number of Free Particles	20
$r_{conv}$	0.5
$P_{mean}$	0.3
FSR	4

شکل (۳) به منظور تجسم رفتار ذرات در مراحل مختلف روند بهینه سازی برای یک محیط دوبعدی آورده شده است. در این شکل ذرات آزاد با علامت به علاوه آبی، مکان قله ها با مریع مشکی، ذرات متمرکز با نقاط آبی، ناحیه جستجوی متمرکز با دوایر آبی و مراکز آن با ستاره قرمز رنگ مشخص شده اند.

روند بهینه سازی از (الف) تا (و) نشان می دهد که الگوریتم با تعداد ذرات آزاد ۲۰ شروع به کار می کند (شکل (۳) الف) و با بررسی هم گرایی (شکل (۳) ب)، با یافتن نخستین منطقه محتمل در تکرار یازدهم ارزیابی برآوردگی و ایجاد نخستین FSZ، ۴ ذره متمرکز به کل ذرات اضافه می شود (شکل (۳) ج) و پس از آن کلیه ۲۰ ذره آزاد پراکنده می شوند. همین روند برای یافتن تمامی مناطق محتمل و قله ها ادامه می یابد. در شکل (۳) حرکت مراکز FSZ در سیر تکامل الگوریتم به سمت قله ها نشان داده شده است. در تکرار ۳۲۵ تمامی ده قله توسط ذرات متمرکز احاطه شده و مرکز هر FSZ بر روی قله مورد نظر خود قرار گرفته است. همان گونه که در شکل (۳-۵) مشخص است، دو FSZ که مجاور هم هستند، دچار هم پوشانی شده و سازوکار FSZoverlapChecking، مقدار FSR را از ۴ به ۲/۴۵ کاهش می دهد. از این به بعد همان گونه که پیش تر بیان شد، سازوکارهای RemoveUselessFSZ و convergenceChecking اجراه شده اند.

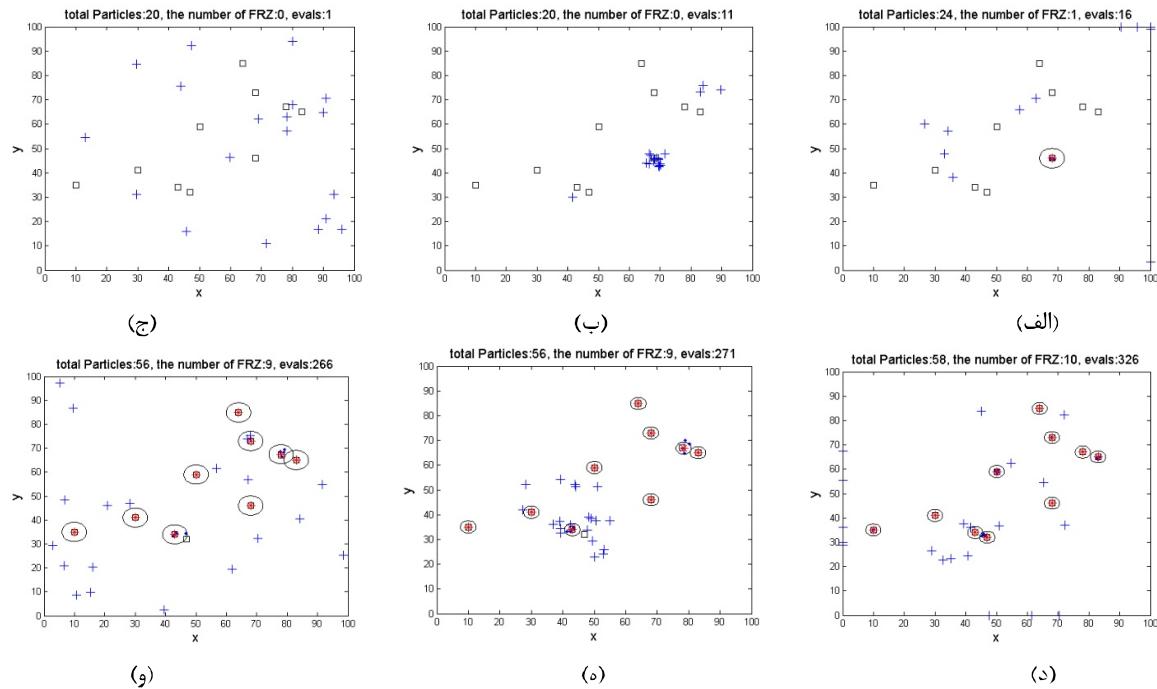
طبق تعریف PSR (شعاع جستجوی متمرکز) محدوده ناحیه جستجوی متمرکز حول بهترین ذره متمرکز آن ناحیه در کل روند بهینه سازی، را مشخص می کند. دو وظیفه برای این ناحیه متصور است. وظیفه نخست یافتن بهینه در منطقه محتمل و بهبود هر چه بیشتر بهینه یافتشده تا زمانی که تعییر در محیط صورت نگیرد. وظیفه دوم زمانی است که در محیط تعییر ایجاد شود. تعییر مکان بهینه در این محیط دنبال می شود. درنتیجه اهمیت تنظیم مقدار FSR برای این است که پس از تعییر در محیط، همچنان بهینه در همین ناحیه جستجوی متمرکز باشد. همچنین درنظر گرفتن مقادیر زیاد FSR برای اطمینان تعییر مکان بهینه در همین ناحیه پس از تعییر، سبب می شود که بهبود بهینه (وظیفه نخست) بدليل مواجه بودن با ناحیه بزرگ تر، سخت تر شود. بدینسان باید مصالحه ای بین بهبود بهینه و وجود بهینه پس از تعییر در ناحیه برقرار شود.

در شکل (۲) ج اثر تعییر مقدار PSR بر تعداد قله های یافتشده، نشان داده شده است. مقادیر کم (کمتر از ۲) سبب بهبود هر چه بیشتر بهینه می شود، اما با تعییر در محیط بیش تر FSZ ها بهینه خود را از دست داده و توسط سازوکار RemoveUselessFSZ حذف می شوند. درنهایت الگوریتم پیشنهادی به دليل سازوکار مختصرا، زمان زیادی برای بهینه سازی با فرکانس تعییر محیط (U) ۵۰۰ دارد و مقدار بهینه سراسری را با دقت بالایی می یابد، اما نکته حائز اهمیت آن است که ذرات آزاد مجبور به یافتن نواحی محتمل جدید

افزایش تعداد ذرات، سیر تکامل را طی کرده و کلیه مقادیر بهینه را پیدا می‌کند. در ادامه به مقایسه میزان کارآیی روش پیشنهادی با سایر روش‌ها پرداخته می‌شود.

ایجاد FSZ‌های جدید را تا تغییر در شرایط محیطی و یا اضافه شدن قله نمی‌دهند.

با توجه مرحله اولیه تا مرحله نهایی در شکل (۳)، مشخص می‌شود که idPSO به صورت خودکار با کاهش و



(شکل-۳): روند یافتن مناطق محتمل توسط ذرات آزاد و قله‌ها توسط ذرات متمرکز در یک محیط دو بعدی

(Figure-3): The process of locating probable areas by free particles and peaks by focus particles in a two-dimensional environment

تنظیم‌های بهینه است، صورت گرفته است. با توجه به جدول (۳)، نتایج برای الگوریتم پیشنهادی برای بیشتر تعداد قله‌ها بهتر از سایر الگوریتم‌ها در زمینه بهینه‌سازی پویا است. تنظیم‌های الگوریتم برای تمامی تعداد قله‌ها همان مقادیر تنظیم‌های پیش‌فرض بیان شده، است.

با دقت در مقادیر خطای برونو خط idPSO و سایر الگوریتم‌ها در جدول (۳) متوجه می‌شویم که با افزایش تعداد قله‌ها مقدار خطای برونو خط کاهش می‌یابد. درست است که کار الگوریتم در یافتن و دنبال کردن تعداد بالای قله‌ها مشکل‌تر می‌شود، اما منطقی است که با افزایش بهینه‌های محلی یافت شده احتمال تزدیک‌تر شدن مقدار برآزندگی این بهینه‌ها به برآزندگی بهینه سراسری افزایش می‌یابد. همچنین مناطق بیشتری در فضای جستجو توسط ذرات متمرکز تحت نظر و جستجو هستند که درنتیجه پس از تغییر در محیط امکان حضور بهینه سراسری در این مناطق بیش از پیش افزایش می‌یابد.

### ۴-۳- مقایسه idPSO با الگوریتم‌های دیگر

در این بخش از آزمایش‌ها، الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های مطرح در این مبحث از جمله CPSO [22,23]، SPSO [46]، CESO [45]، mQSO [32]، mCPSO [32]، APSO [49]، mPSO [48]، AmQSO [47]، SPSO [21]، CDEPSO، PSO-AQ [51]، SFA [50]، FTMPSO [34]، BfCS-wVN [36]، WD2O [35]، CbDF-wCA [53]، [52]، eGA [54] در حل مسئله MPB با تنظیم‌های مختلف مقایسه شده است. در ادامه نتایج پژوهش تغییر تعداد قله‌ها، شدت تغییرات و فرکانس تغییرات محیط  $U$  بر روی خطای برونو خط idPSO آورده شده است.

#### ۱. تغییر تعداد قله‌ها:

در مجموعه آزمایش‌هایی که در جدول (۳) جمع‌آوری شده است، چگونگی برخورد الگوریتم idPSO با تعداد قله‌های متفاوت در بازه یک تا دویست برای مسئله MPB نمایش داده است. مقایسه بر مبنای خطای برونو خط و انحراف معیار با هفده الگوریتم دیگر که مقادیر برگرفته از مقالاتشان و با

مکان بهینه به فاصله دورتر جابه‌جا می‌شود. این قضیه کار الگوریتم را برای دنبال کردن بهینه بسیار سخت‌تر می‌کند؛ ازین‌رو با توجه به جدول (۴) مقادیر خطای برون خط هشت الگوریتم در آورده شده است. تنظیم‌های محیط همان فرکانس تغییرات ۵۰۰۰ برای ده قله و شدت تغییرات ۱، ۲، ۳ و ۵ است. همان‌طور که می‌دانیم با افزایش مقدار shift severity افزایش می‌یابد. تنظیم‌های بهینه الگوریتم که در قبل بیان شد، قابل چشم‌پوشی است و این نکته نشان از پایداری بالای الگوریتم در یافتن و دنبال کردن بهینه در هر مقدار شدت تغییر است.

۲. تغییر حساسیت پویایی محیط (شدت تغییرات):<sup>۱</sup>  
در جدول (۴) مقادیر خطای برون خط هشت الگوریتم در مقایسه با الگوریتم idPSO برای چهار شدت تغییر مختلف آورده شده است. تنظیم‌های محیط همان فرکانس تغییرات ۵۰۰۰ برای ده قله و شدت تغییرات ۱، ۲، ۳ و ۵ است. همان‌طور که می‌دانیم با افزایش مقدار shift severity شدت تغییرات در محیط افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر هر چه مقدار shift severity بیشتر افزایش می‌یابد، بعد از تغییر در محیط

(جدول-۳): مقایسه خطای آفلاین الگوریتم‌ها برای تعداد قله‌های مختلف در مسئله MPB در فرکانس تغییرات  $U = 5000$ (Table-3): Comparison of offline error algorithms for different peak numbers in the MPB problem at the change frequency of  $U=5000$ 

Algorithm	Number of peaks, $\rho$							
	1	5	10	20	30	50	100	200
CPSO	0.14(0.11)	0.72(0.30)	1.06(0.24)	1.59(0.22)	1.58(0.17)	1.54(0.12)	1.41(0.08)	1.24(0.06)
mCPSO	4.93(0.17)	2.07(0.08)	2.08(0.07)	2.64(0.07)	2.63(0.08)	2.65(0.06)	2.49(0.04)	2.44(0.04)
mQSO(5,5q)	2.24(0.05)	1.82(0.08)	1.85(0.08)	2.48(0.09)	2.51(0.10)	2.53(0.08)	2.35(0.06)	2.24(0.05)
CESO	1.04(0.00)	-	1.38(0.02)	1.72(0.02)	1.24(0.01)	1.45(0.01)	1.28(0.02)	-
rSPSO	1.42(0.06)	1.04(0.03)	1.50(0.08)	2.20(0.07)	2.62(0.07)	2.72(0.08)	2.93(0.06)	2.79(0.05)
SPSO	2.64(0.10)	2.15(0.07)	2.51(0.09)	3.21(0.07)	3.64(0.07)	3.86(0.08)	4.01(0.07)	3.82(0.05)
$\Delta m$ QSO	2.62(0.10)	1.01(0.09)	1.51(0.10)	2.00(0.15)	2.19(0.17)	2.43(0.13)	2.68(0.12)	2.62(0.10)
mPSO	2.42(0.05)	1.82(0.08)	1.85(0.08)	2.48(0.09)	2.51(0.10)	2.53(0.08)	2.35(0.06)	2.24(0.05)
APS0	0.53(0.01)	1.05(0.06)	1.31(0.03)	1.69(0.05)	1.78(0.02)	1.95(0.02)	1.95(0.01)	1.90(0.01)
FTMPSO	0.18(0.01)	0.47(0.05)	0.67(0.04)	0.93(0.04)	1.14(0.04)	1.32(0.04)	1.61(0.03)	1.67(0.03)
SFA	0.42(0.03)	0.89(0.07)	1.05(0.04)	1.48(0.05)	1.56(0.06)	1.87(0.05)	2.01(0.04)	1.99(0.06)
PSO-AQ	0.34(0.02)	0.80(0.12)	0.89(0.03)	1.45(0.06)	1.52(0.04)	1.77(0.05)	1.95(0.05)	1.96(0.04)
CDEPSO	0.41(0.00)	0.97(0.01)	1.22(0.01)	1.54(0.01)	2.62(0.01)	2.20(0.01)	1.54(0.01)	2.11(0.01)
CbDL-wCA	0.14(0.03)	<b>0.30(0.02)</b>	0.86(0.08)	0.98(0.05)	1.34(0.04)	1.31(0.04)	1.35(0.03)	1.29(0.02)
WD2O	1.21(0.03)	0.76(0.003)	1.25(0.02)	1.22(0.01)	1.75(0.01)	1.87(0.01)	2.10(0.01)	1.95(0.01)
cGA	0.92(0.09)	1.06(0.07)	1.15(0.10)	1.18(0.06)	1.35(0.51)	1.65(0.07)	1.80(0.06)	1.71(0.05)
BfCS-wVN	0.30(0.06)	0.38(0.21)	<b>0.51(0.11)</b>	<b>0.74(0.12)</b>	1.00(0.11)	0.84(0.06)	1.11(0.06)	1.18(0.08)
idPSO	0.12(0.02)e-7	0.58(0.07)	0.62(0.05)	0.75(0.03)	0.67(0.04)	0.64(0.01)	0.25(0.02)	0.26(0.04)

است که مقدار فرکانس کمتر یعنی زمان به مراتب کمتر برای وفق یافتن با محیط جدید و در طرف مقابل فرصت مناسب برای یافتن و بهبود بهترین بهینه متناظر با مقدار فرکانس بالا است. در جدول (۵) و جدول (۶) نتایج حاصل از حل مسئله MPB با تعداد قله‌های مختلف و فرکانس تغییر محیط هزار و ده هزار آمده است. به عنوان نمونه برای ده قله در فرکانس تغییر هزار خطای برون خط ۱/۶۱ به دست آمد؛ در صورتی که در فرکانس ده هزار الگوریتم زمان بیشتری داشته و خطای برون خط تا ۰/۳۳ کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴- به کارگیری روش پیشنهادی در ردیابی هدف متحرک

یکی از کاربرهای روش پیشنهادی در ردیابی هدف در فیلم است. تابع برازنده‌گی با استفاده از معیار شباهت بین دو قاب تنظیم شده است که میزان شباهت هدف را با نامزد احتمالی

(جدول-۴): مقایسه خطای برون خط الگوریتم‌ها برای مقادیر مختلف shift severity در مسئله MPB

(Table-4): Comparison of the offline error of algorithms for various shift Severity in MPB problem

Algorithm	Shift severity, $s$			
	1	2	3	5
CPSO	1.06(0.24)	1.17(0.22)	1.36(0.28)	1.58(0.32)
mCPSO	2.05(0.07)	2.80(0.07)	3.57(0.08)	4.89(0.11)
mQSO(5,5q)	1.85(0.08)	2.40(0.06)	3.00(0.06)	4.24(0.10)
CESO	1.38(0.02)	1.78(0.02)	2.03(0.03)	2.52(0.06)
rSPSO	1.50(0.08)	1.87(0.05)	2.40(0.08)	3.25(0.09)
SPSO	2.51(0.09)	3.78(0.09)	4.96(0.12)	6.76(0.15)
cGA	0.92(0.09)	2.19(0.15)	3.31(0.25)	6.45(0.45)
BfCS-wVN	<b>0.51(0.11)</b>	0.89(0.16)	1.26(0.13)	2.39(0.20)
idPSO	0.62(0.05)	0.67(0.07)	0.76(0.06)	0.91(0.09)

#### ۳. تغییر فرکانس تغییرات محیط:

فرکانس تغییر محیط  $U$  در واقع زمان الگوریتم برای یافتن بهینه در هر محیط قبل از تغییر را مشخص می‌کند. واضح

<sup>۱</sup> shift severity



شماحت ساختاری بین دو تصویر است. توان‌های  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  برای تنظیم اثر هر معیار روی مقدار پایانی شماحت استفاده شده است.

$$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \geq 0 \quad (13)$$

معیار شماحت تعریف شده در معادله (9) یک مرز بالایی یکتایی دارد:  $SIM(a,b) \leq 1$  و اگر دو تصویر یکی باشند:  $SIM(a,b) = 1$ . در این روابط پارامترهای  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل (4) دیده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی قابلیت پیداکردن هدف را در قاب‌های مختلف دارد. در این ویدئو فاصله بین قاب‌ها پنج قاب در نظر گرفته شده است تا حرکت هدف در تصویر محسوس باشد.



شکل-۴): ردیابی هدف توسط روش پیشنهادی  
(Figure-4): Target tracking by the proposed method

(جدول-۵): مقایسه خطای آفلاین الگوریتم‌ها برای تعداد قله‌های متفاوت در مسئله MPB در فرکانس تغییرات  $U = 1000$   
(Table-5): Comparison of offline error algorithms for different peak numbers in the MPB problem at the change frequency of  $U=1000$

Algorithm	Number of peaks, $p$							
	1	5	10	20	30	50	100	200
mQSO(5,5q)	18.60(1.63)	6.56(0.38)	5.71(0.22)	5.85(0.15)	5.81(0.15)	5.87(0.13)	5.83(0.13)	5.54(0.11)
AmQSO	2.33(0.31)	2.90(0.32)	4.56(0.40)	5.36(0.47)	5.20(0.38)	6.06(0.14)	4.77(0.45)	5.75(0.26)
mPSO	4.44(0.02)	3.93(0.16)	4.57(0.18)	4.97(0.13)	5.15(0.12)	5.33(0.10)	5.60(0.09)	5.78(0.09)
APSO	2.72(0.04)	2.99(0.09)	3.87(0.08)	4.13(0.06)	4.12(0.04)	4.11(0.03)	4.26(0.04)	4.21(0.02)
FTMPSO	0.89(0.05)	1.70(0.10)	2.36(0.09)	3.01(0.12)	3.06(0.10)	3.29(0.10)	3.63(0.09)	3.74(0.09)
SFA	2.45(0.12)	2.71(0.06)	3.64(0.04)	4.01(0.07)	4.02(0.08)	4.12(0.07)	4.40(0.07)	4.43(0.07)
cGA	1.10(0.10)	<b>1.12(0.11)</b>	<b>1.28(0.13)</b>	1.76(0.09)	2.01(0.14)	2.56(0.10)	2.42(0.14)	2.20(0.11)
idPSO	0.21(0.02)	1.33(0.05)	1.61(0.03)	1.73(0.06)	1.70(0.04)	1.41(0.01)	0.92(0.03)	0.96(0.03)

(جدول-۶): مقایسه خطای آفلاین الگوریتم‌ها برای تعداد قله‌های متفاوت در مسئله MPB در فرکانس تغییرات  $U = 10000$   
(Table-6): Comparison of offline error algorithms for different peak numbers in the MPB problem at the change frequency of  $U=10000$

Algorithm	Number of peaks, $p$							
	1	5	10	20	30	50	100	200
mQSO(5,5q)	1.90(0.18)	1.03(0.06)	1.10(0.07)	1.84(0.09)	2.00(0.09)	1.99(0.07)	1.85(0.05)	1.71(0.04)
AmQSO	0.19(0.02)	0.45(0.04)	0.76(0.06)	1.28(0.12)	1.78(0.09)	1.55(0.08)	1.89(0.14)	2.52(0.10)
mPSO	0.27(0.02)	0.70(0.10)	0.97(0.04)	1.34(0.08)	1.43(0.05)	1.47(0.04)	1.50(0.03)	1.48(0.02)
APSO	0.25(0.01)	0.57(0.03)	0.82(0.02)	1.23(0.02)	1.39(0.02)	1.46(0.01)	1.38(0.01)	1.36(0.01)
FTMPSO	0.09(0.00)	0.31(0.04)	0.45(0.03)	0.56(0.01)	0.69(0.09)	0.86(0.02)	1.08(0.03)	1.13(0.04)
SFA	0.26(0.03)	0.53(0.04)	0.72(0.02)	0.91(0.03)	0.99(0.04)	1.19(0.04)	1.44(0.04)	1.52(0.03)
BfCS-wVN	0.18(0.04)	0.20(0.02)	<b>0.30(0.06)</b>	0.84(0.05)	0.66(0.08)	0.54(0.70)	0.85(0.05)	0.85(0.05)
idPSO	0.3(0.04)e-12	0.12(0.03)	0.33(0.04)	0.44(0.07)	0.53(0.10)	0.43(0.05)	0.19(0.00)	0.19(0.00)

متسرکز ( $FocusPartc$ )

$$T_1 = O(FreePartc + FocusPartc)$$

• زمان محاسبه بررسی هم‌گرانی که قسمت عمده آن صرف

مرتب‌سازی ذرات آزاد می‌شود:

$$T_2 = O(\log(FreePartc))$$

• زمان محاسبه بررسی هم‌پوشانی مراکز FSZ‌ها:

$$T_3 = O(\log(FocusPartc))$$

اندازه گیری می‌کند و بیشترین شماحت را به عنوان محل هدف انتخاب می‌کند [55]. شماحت بین دو تصویر  $a$  و  $b$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SIM(a,b) = \left( \frac{2\mu_a\mu_b}{\mu_a^2 + \mu_b^2} \right)^\alpha \left( \frac{2\sigma_a\sigma_b}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right)^\beta \left( \frac{\sigma_{ab}}{\sigma_a\sigma_b} \right)^\gamma \quad (9)$$

که در آن  $\mu$  میانگین:

$$\mu_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad (10)$$

انحراف معیار:

$$\sigma_a = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_i - \mu_a)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

کواریانس بین دو تصویر:

$$\sigma_{ab} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_i - \mu_a)(b_i - \mu_b) \quad (12)$$

سه مؤلفه شماحت از چپ، معیار نزدیکی روش‌نایابی،وضوح و



(جدول-۶): مقایسه خطای آفلاین الگوریتم‌ها برای تعداد قله‌های متفاوت در مسئله MPB در فرکانس تغییرات  $U = 10000$

#### ۴-۵- پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم idPSO به صورت زیر

محاسبه می‌شود:

• زمان محاسبه برآوردگری ذرات آزاد ( $FreePartc$ ) و

دلیل سازوکار کوتاه و مختصر خود سرعت مناسبی برای بهینهسازی پویا دارد. ایده نوین اصلی الگوریتم پیشنهادی، انطباق همیشگی تعداد ذرات با شرایط محیطی برای یافتن و دنبال کردن بهینه است. در این الگوریتم ذرات به دو گروه ذرات آزاد و متمرکز تقسیم شده‌اند و توسط سازوکارهای نوینی روند ایجاد و حذف ذرات متمرکز کنترل می‌شود. همچنین الگوریتم idPSO به گونه‌ای طراحی شده است که نیاز به آشکارسازی تغییر در محیط را ندارد و همواره خود را با شرایط محیط وقف می‌دهد.

در بهینهسازی پویا کاستن از زمان بهینهسازی به عبارت دیگر هم‌گرایی سریع تر به بهینه در عین حفظ تنوع در کل فضای جستجو بسیار مهم است. بیشتر الگوریتم‌های پویا با تعداد بالای ذرات شروع به کار می‌کنند و با پیشرفت روند بهینهسازی از تعداد ذرات کاسته می‌شود. این قضیه به معنای صرف زمان بیهوده برای محاسبه برازنده‌گی تعداد ذرات بالا در مراحل اولیه بهینهسازی است. برای جلوگیری از این دست محاسبات بیهوده الگوریتم idPSO روند نوینی را پیش گرفته است و با ذرات کم شروع به کار می‌کند و همواره افزایش تعداد ذرات تابع شرایط محیط از جمله افزایش تعداد نقاط بهینه، است. در مقابل، با توجه به شرایط محیط الگوریتم اقدام به کاهش تعداد ذرات کرده که خود سبب کاهش بار محاسباتی و افزایش سرعت بهینهسازی می‌شود.

کارایی الگوریتم idPSO برای حل مسئله قله‌های متغیر (MPB) که یکی از معروف‌ترین توابع محک در محیط‌های پویا است، مورد بررسی قرار گرفته است. گستردگی آزمایش‌ها برای تنظیم‌های مختلف مسئله MPB اعم از تعداد قله‌های متفاوت، تغییر حساسیت پویایی محیط و فرکانس تغییر محیط متفاوت، نشان از عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مطرح در زمینه بهینهسازی پویا دارد.

از جمله پیشنهادهای پژوهش‌های آینده می‌توان به به کارگیری الگوریتم برای بهینهسازی مسائل واقعی دنیا، اشاره کرد. همچنین به کارگیری الگوریتم در خوشیابی<sup>۱</sup> پویا مانند داده‌های web مدد نظر است. به کارگیری سازوکارهای انطباقی<sup>۲</sup> و خودانطباقی<sup>۳</sup> برای پارامترهای ساختاری الگوریتم می‌تواند توانایی روش را برای انطباق سریع تر با شرایط محیطی در پی داشته باشد.

<sup>1</sup> Clustering<sup>2</sup> Adaptive<sup>3</sup> Self-adaptive

• زمان مورد نیاز برای تشخیص و حذف FSZ‌های اضافی که صرف مرتب‌سازی برازنده‌گی مراکز FSZ‌ها و مقایسه با

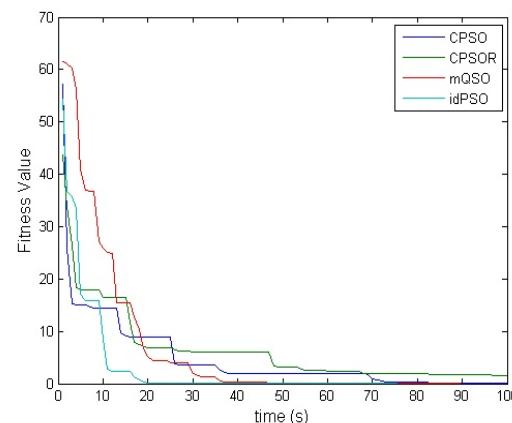
$$T_4 = O(\log(FocusPartc)) \quad P_{mean}$$

پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی به صورت  $T_{total} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$  محاسبه می‌شود. در صورتی که  $M$  را مجموع کل ذرات در نظر بگیریم مرتبه پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی به صورت  $T_{total} = O(M)$  می‌شود. در جدول (۷) الگوریتم idPSO با سه الگوریتم CPSO و mQSO از نظر پیچیدگی محاسباتی مقایسه شده است (مقدار  $M$  اندازه جمعیت در الگوریتم‌ها است).

(جدول-۷): مقایسه پیچیدگی محاسباتی  
(Table-7): Comparison of Computation Complexity

Algorithm	Computation Complexity
CPSO	$O(M^3)$
CPSOR	$O(M^3)$
mQSO(5,54)	$O(M^2)$
idPSO	$O(M)$

در شکل (۵) زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. نتایج الگوریتم idPSO و سه الگوریتم دیگر برای یکبار تغییر در محیط پنج بعدی و تعداد قله ۵ در فرکانس تغییر هزار گردآوری شده است. نتایج شکل (۵) در کنار جدول (۵) نشان از سرعت و دقیقیت الگوریتم در رسیدن به پاسخ بهینه‌تر است. الگوریتم با صرف زمان کمتر به مقدار خطای برونو خط بهتری نسبت سایر الگوریتم‌ها دست یافته است.



(شکل-۵): مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها برای مسئله MPB  
(Figure-5): Comparison of run time algorithms for the MPB problem

## ۵- نتیجه‌گیری و بحث

در این مقاله الگوریتم نوینی برای بهینهسازی در محیط‌های پویا، غیرقطعی و پیچیده پیشنهاد شده است. این الگوریتم به



## 6- References

- Computational Intelligence in Dynamic and Uncertain Environments (CIDUE)*, pp. 9–16, 2014.
- [12] B. van Veen, M. Emmerich, Z. Yang, T. Bäck, J. Kok, “Ant colony algorithms for the dynamic vehicle routing problem with time windows”, in J. M. Ferrández Vicente, J. R. Álvarez Sánchez, F. de la Paz López, F. J. Toledo Moreo (Eds.), *Natural and Artificial Computation in Engineering and Medical Applications: 5th International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, IWINAC 2013, Mallorca, Spain, Proceedings, Part II*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 1–10.
- [13] Z. Yang, M. Emmerich, T. Bäck, “Ant based solver for dynamic vehicle routing problem with time windows and multiple priorities”, in 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2015, pp. 2813–2819.
- [14] L. Melo, F. Pereira, E. Costa, “Multi-caste ant colony algorithm for the dynamic traveling salesperson problem”, in M. Tomassini, A. Antonioni, F. Daolio, P. Bussler (Eds.), *Adaptive and Natural Computing Algorithms*, Vol. 7824 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 179–188.
- [15] L. Melo, F. Pereira, E. Costa, “Extended experiments with ant colony optimization with heterogeneous ants for large dynamic traveling salesperson problems”, in 14th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA), 2014, pp. 171–175.
- [16] U. Boryczka, Ł. Strāk, “Heterogeneous DPSO algorithm for DTSP”, in M. Nuñez, T. N. Nguyen, D. Camacho, B. Trawiński (Eds.), *Computational Collective Intelligence: 7th International Conference, ICCCI 2015, Madrid, Spain, Proceedings, Part II*, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 119–128.
- [17] M. Okulewicz, J. Mańdziuk, “Two-phase multi-swarm PSO and the dynamic vehicle routing problem”, in *IEEE Symposium on Computational Intelligence for Human-like Intelligence (CILI)*, pp. 1–8, 2014.
- [18] M. Mavrovouniotis, S. Yang, “Dynamic vehicle routing: A memetic ant colony optimization approach”, in A. Uyar, E. Ozcan, N. Urquhart (Eds.), *Automated Scheduling and Planning*, Vol. 505 of *Studies in Computational Intelligence*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 283–301.
- [19] M. Mavrovouniotis, F. M. Müller, S. Yang, “Ant colony optimization with local search for the dynamic travelling salesman problems”, *IEEE Trans. Cybern.*, Vol. 99, pp. 1–14, 2016.
- [20] L. Liu and S. R. Ranjithan, “An adaptive optimization technique for dynamic envir-
- [1] M. Mavrovouniotis, Ch. Li and S. Yang, “A survey of swarm intelligence for dynamic optimization: Algorithm and application”, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 33, pp. 1–17, 2017.
- [2] T. T. Nguyen, S. Yang, and J. Branke, “Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art”, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 6, pp. 1–24, 2012.
- [3] J. Euchi, A. Yassine, H. Chabchoub, “The dynamic vehicle routing problem: Solution with hybrid metaheuristic approach”, *Swarm and Evol. Comput.*, Vol. 21, pp. 41–53, 2015.
- [4] Y. E. Demirtas, E. Özdemir, U. Demirtas, “A particle swarm optimization for the dynamic vehicle routing problem”, in *Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, 6th International Conference on, 2015, pp. 1–5.
- [5] M. Mavrovouniotis, S. Yang, “Applying ant colony optimization to dynamic binary-encoded problem”, in A. Mora, G. Squillero (Eds.), *Evo-Applications: Applications of Evolutionary Computation*, Vol. 9028 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer International Publishing, 2015, pp. 845–856.
- [6] U. Boryczka, Ł. Strāk, “Diversification and entropy improvement on the DPSO algorithm for DTSP”, in T. N. Nguyen, B. Trawiński, R. Kosala (Eds.), *Intelligent Information and Database Systems: 7th Asian Conference, ACIIDS 2015, Bali, Indonesia, Proceedings, Part I*, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 337–347.
- [7] M. Mavrovouniotis, S. Yang, “Ant colony optimization with self-adaptive evaporation rate in dynamic environments”, in *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Dynamic and Uncertain Environments (CIDUE)*, pp. 47–54, 2014.
- [8] S. Gao, Y. Wang, J. Cheng, Y. Inazumi, Z. Tang, “Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem”, *Appl. Math. Comput.*, Vol. 285, pp. 149–173, 2016.
- [9] M. Mavrovouniotis, S. Yang, “Ant colony optimization with memorybased immigrants for the dynamic vehicle routing problem”, in *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 2645–2652, 2012.
- [10] M. Mavrovouniotis, S. Yang, “Ant colony optimization with immigrants schemes for the dynamic travelling salesman problem with traffic factors”, *Appl. Soft Comput.*, Vol. 13, pp. 4023–4037, 2013.
- [11] M. Mavrovouniotis, S. Yang, X. Yao, “Multi-colony ant algorithms for the dynamic travelling salesman problem”, in *IEEE Symposium on*



- [32] T. M. Blackwell and J. Branke, "Multi-swarms, exclusion, and anticonvergence in dynamic environments", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 10, No. 4, pp. 459–472, 2006.
- [33] I. del Amo, D. Pelta, Gonz'aez, and J. lez, "Using heuristic rules to enhance a multi-swarm pso for dynamic environments", in 2010 Congr. Evol. Comput., 2010, pp. 1–8.
- [34] D. Yazdani, B. Nasiri, A. Scpas-Moghaddam, and M. R. Meybodi, "A novel multi-swarm algorithm for optimization in dynamic environments based on particle swarm optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 13, pp. 2144–2158, 2013.
- [35] A. Boulesnane, S. Meshoul, "WD2O: a novel wind driven dynamic optimization approach with effective change detection," *Applied Intelligence*, Vol. 47, pp. 488–504, September 2017.
- [36] J. Kazemi Kordestani, H. Abedi Firouzjaee, M. R. Meybodi, "An adaptive bi-flight cuckoo search with variable nests for continuous dynamic optimization problems," *Applied Intelligence*, Vol. 48, pp. 97–117, January 2018.
- [37] N. Fouladgar, S. Lotfi, "A novel approach for optimization in dynamic environments based on modified cuckoo search algorithm," *Soft Comput*, pp 1–15, 2015.
- [38] C. Li, S. Yang, "A general framework of multipopulation methods with clustering in undetectable dynamic environments", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 16, No. 4, pp. 556–577, 2012.
- [39] R. I. Lung and D. Dumitrescu, "Evolutionary swarm cooperative optimization in dynamic environments", *Natural Comput.*, No. 9, No. 1, pp. 83–94, 2010.
- [40] H. Richter, "Detecting change in dynamic fitness landscapes", in 2009 Congr. Evol. Comput., 2009, pp. 1613–1620.
- [41] A. Simoes and E. Costa, "Evolutionary algorithms for dynamic environments: prediction using linear regression and markov chains", in *Parallel Problem Solving from Nature*, pp. 306–315, 2008.
- [42] R. C. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", in Proc. 6th Int. Symp. Micro Mach. Human Sci., 1995, pp. 39–43.
- [43] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization", in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw., 1995, pp. 1942–1948.
- onments", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 23, No. 5, pp. 772–779, 2010.
- [21] D. Parrott and X. Li, "Locating and tracking multiple dynamic optima by a particle swarm model using speciation", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 10, No. 4, pp. 440–458, 2006.
- [22] S. Yang and C. Li, "A clustering particle swarm optimizer for locating and tracking multiple optima in dynamic environments", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 14, No. 6, pp. 959–974, 2010.
- [23] C. Li and S. Yang, "A clustering particle swarm optimizer for dynamic optimization", in *Congr. Evol. Comput.*, pp. 439–446, 2009.
- [24] J. Branke, The Moving Peaks Benchmark, 1999. Available: <http://web.archive.org/web/20130906140931/http://people.aifb.kit.edu/jbr/MovPeaks/>
- [25] J. Branke, "Memory enhanced evolutionary algorithms for changing optimization problems", in *Congr. Evol. Comput.*, Vol. 3, 1999, pp. 1875–1882.
- [26] J. Yaochu and J. Branke, "Evolutionary optimization in uncertain environments-a survey", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 9, pp. 303–317, 2005.
- [27] M. Khoudjia, E. Alba, L. Jourdan, E.-G. Talbi, "Multi-swarm optimization for dynamic combinatorial problems: A case study on dynamic vehicle routing problem", in M. Dorigo, M. Birattari, G. Di Caro, R. Doursat, A. Engelbrecht, D. Florcano, L. Gambardella, R. Groß, E. S. ahin, H. Sayama, T. Stutzle (Eds.), *Swarm Intelligence*, Vol. 6234 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 227–238.
- [28] J. Branke, T. Kaußler, C. Schmidth, and H. Schmeck, "A multipopulation approach to dynamic optimization problem", in 4th Int. Conf. Adaptive Comput. Des. Manuf., 2000 pp. 299–308.
- [29] C. Li and S. Yang, "Fast multi-swarm optimization for dynamic optimization problems", in 4th Int. Conf. Natural Comput., Vol. 7, 2008, pp. 624–628.
- [30] M. Kamosi, A. B. Hashemi, and M. R. Meybodi, "A hibernating multiswarm optimization algorithm for dynamic environments", in World Congr. on Nature and Biologically Inspired Computing, NaBIC-2010, 2010, pp. 363–369.
- [31] T. M. Blackwell and J. Branke, "Multi-swarm optimization in dynamic environments", in *EvoWorkshops 2004: Appl. Evol. Comput.*, LNCS 3005, 2004, pp. 489–500.





سیدمسعود اجابتی دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق-الکترونیک به ترتیب در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه گیلان و سال ۱۳۹۲ از دانشگاه بیرجند اخذ کرده و در حال حاضر نیز دانشجوی دکترای مهندسی برق-الکترونیک دانشگاه بیرجند است. از جمله زمینه‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان به بازناسنی الگو، بهینه‌سازی پویا، الگوریتم‌های تکاملی و پردازش سیگنال می‌توان اشاره کرد.

نشانی رایانمه ایشان عبارت است از:

[ejabati\\_masoud@birjand.ac.ir](mailto:ejabati_masoud@birjand.ac.ir)



سید Hammond ظهیری ممقانی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در رشته مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه صنعتی شریف و تربیت مدرس دریافت کردن. ایشان در سال ۱۳۸۴ مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی برق-الکترونیک در دانشگاه فردوسی مشهد به اتمام رساندند. وی در حال حاضر استاد تمام گروه برق-الکترونیک دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند هستند. زمینه‌های مورد علاقه ایشان، روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، روش‌های بهینه‌سازی هوش جمعی، محاسبات نرم، تشخیص الگو، پردازش تصویر و پردازش سیگنال است.

نشانی رایانمه ایشان عبارت است از:

[hzahiri@birjand.ac.ir](mailto:hzahiri@birjand.ac.ir)

[44] Y. Shi, R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer", in Proc. IEEE Conf. Evol. Comput., 1998, pp. 69–73.

[45] R. I. Lung and D. Dumitrescu, "A collaborative model for tracking optima in dynamic environments", in Proc. Congr. Evol. Comput., 2007, pp. 564–567.

[46] S. Bird and X. Li, "Using regression to improve local convergence", in Proc. IEEE Congr. Evol. Comput., 2007, pp. 592–599.

[47] T. Blackwell, J. Branke, and X. Li, "Particle swarms for dynamic optimization problems", Swarm Intelligence, pp. 193–217, 2008.

[48] M. Kamosi, A. Hashemi, and M. Meybodi, "A New Particle Swarm Optimization Algorithm for Dynamic Environments", *Swarm Evolutionary and Memetic Com-puting*, pp. 129–138, 2010.

[49] I. Rezazadeh, M. Meybodi, and A. Naebi, "Adaptive particle swarm optimization algorithm for dynamic environments", *Advances in Swarm Intelligence*, pp. 120–129, 2011.

[50] B. Nasiri and M. Meybodi, "Speciation based firefly algorithm for optimization in dynamic environments", *International Journal of Artificial Intelligence*, Vol. 8, pp. 118–132, 2012.

[51] D. Yazdani, B. Nasiri, R. Azizi, A. Sepas-Moghaddam, and M. R. Meybodi, "Optimization in Dynamic Environments Utilizing a Novel Method Based on Particle Swarm Optimization", *International Journal of Artificial Intelligence*, Vol. 11, pp. 170–192, 2013.

[52] J. K. Kordestani, A. Rezvanian, and M. R. Meybodi, "CDEPSO: a bi-population hybrid approach for dynamic optimization problems", *Applied intelligence*, Vol. 40, pp. 682–694, 2014.

[53] R. Mukherjee, G. R. Patra, R. Kundu, and S. Das, "Cluster-based differential evolution with Crowding Archive for niching in dynamic environments", *Information Sciences*, Vol. 267, pp. 58–82, 2014.

[54] M. Mohammadpour, H. Parvin, M. Sina, "Chaotic Genetic Algorithm based on Explicit Memory with a new Strategy for Updating and Retrieval of Memory in Dynamic Environments," *AI and Data Mining*, Vol. 6, pp. 191–205, Winter and Spring 2018.

[55] E. Wang, Z. Bovik, A. Sheik, H. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE Transactions on Image processing*, 2004.

