

بهبود کارایی الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی در مسائل بهینه سازی

رامین جوادزاده^۱، محمدرضا میبیدی^۲

۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد

javadzadeh.r@srbiau.ac.ir

۲ دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی امیرکبیر

mmeybodi@aut.ac.ir

چکیده:

الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهوریستیک‌هایی هستند که در مسائل بهینه‌سازی، خوشه‌بندی اطلاعات و شناسایی الگو کاربرد فراوان دارند. این الگوریتم‌ها در مسائل بهینه‌سازی که بیش از یک نقطه بهینه مورد نظر است نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهند. از اشکالات عمده این الگوریتم‌ها می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و عدم پایداری در اجراهای مختلف اشاره نمود. در این مقاله برای غلبه بر این مشکل از یک جستجوی محلی ولی در ابعاد کوچک در اطراف آنتی‌بادی‌های حافظه بهره گرفته شده است. برای اعتبار سنجی راهکار پیشنهادی شبیه‌سازی‌هایی صورت گرفته است که نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد راهکار پیشنهادی پاسخ‌های به مراتب بهتری نسبت به الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌دهد.

کلید واژه:

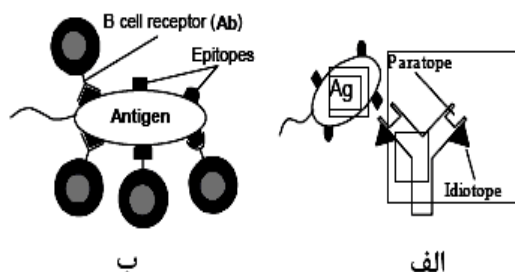
بهینه‌سازی، جستجوی محلی، سیستم ایمنی مصنوعی.

۱-مقدمه

انتخاب و نگهداری بهترین جواب‌های تولید شده با نام آنتی‌بادی حافظه به سمت جواب‌های بهینه هدایت می‌شوند [۲-۴]. همانند دیگر متاهوریستیک‌های رایج این الگوریتم نیز در گام‌های نخست، ناحیه‌هایی از فضای حالت مسئله، که بهینه‌های محلی و سراسری را در بر می‌گیرند به سرعت شناسایی می‌گردد ولی در ادامه مسیر همگرا شدن به بهینه‌های سراسری، روند بهینه‌سازی تقریباً متوقف می‌گردد. به بیانی دیگر کاهش تنوع ژنتیکی در طی فرایند تکامل سبب می‌شود تا روند جستجوی فضای حالت مسئله مختل گردد. دومین مشکل عمده‌ای که الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی با آن مواجه می‌باشند، عدم پایداری این الگوریتم‌ها در اجراهای مختلف می‌باشد. ماهیت اتفاقی بودن این الگوریتم‌ها سبب می‌شود تا کیفیت پاسخ‌هایی که الگوریتم در اجراهای مختلف نتیجه می‌دهد بسیار متنوع باشد. مشکل اخیر سبب می‌شود تا نتوانیم به پاسخ‌هایی که از الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌گردد اعتماد کنیم.

در حوزه کاری علوم پایه و فنی و مهندسی، گاه با مسائلی مواجه هستیم که به دلیل گستردگی و پیچیدگی بیش از حد فضای حالت مسئله، دستیابی به یک پاسخ بهینه در مدت زمانی معقول و با استفاده از ابزارهای کلاسیک حل مسئله امکان‌پذیر نمی‌باشد. اهمیت و لزوم حل این دسته از مسائل سبب شده است تا محققین با بهره‌گیری از تکنیک‌های مختلف رایانش نرم، به پاسخ‌های نسبتاً بهینه بسنده نمایند [۱]. الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهوریستیک‌هایی است که در طی چند دهه اخیر کانون توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است. در این روش حل مسئله، ابتدا جمعیتی از راه‌حل‌ها میانی در واحدهایی موسوم به ژن و در ساختاری بنام آنتی‌بادی قالب‌بندی می‌گردند. طی یک فرایند تکرار، بر اساس مکانیزم دفاعی سیستم ایمنی بیولوژیکی استوار است که بر پایه انتخاب کلونی، جهش عالی آنتی‌بادی‌ها و

ژن‌ها می‌تواند شکل خود را تغییر دهد و به همین دلیل از آن به ناحیه متغیر نیز نام می‌برند. میزان تعامل بین آنتی-بادی و آنتی‌ژن‌ها با میزان تطابق و یا شباهت^۵ در ناحیه اتصال بین آنها سنجیده می‌شود. شکل ۱ آنتی‌ژن را با چندین اپیتوپ و آنتی‌بادی را پاراتوپ و ایدوتوپش به تصویر کشیده است [۳].



شکل ۱: الف- سلول B، آنتی‌بادی، آنتی‌ژن، اپیتوپ، پاراتوپ و ایدوتوپ. ب- آنتی‌بادی و اتصال با آنتی‌ژن

سیستم ایمنی برای داشتن عملکردی صحیح باید بتواند بین سلول‌های خودی^۶ و سلول‌های بیگانه خارجی و غیرخودی^۷ تمایز قائل شود. این پروسه تمایز خودی از غیر خودی^۸ نامیده می‌شود. آن سلول‌هایی که بعنوان خودی شناخته می‌شوند پاسخ سیستم ایمنی را فعال نمی‌کنند در حالیکه دیگر سلول‌ها باعث تحریک پاسخ سیستم ایمنی خواهند شد.

پس از ورود پاتوژن آن دسته از سلول‌های ایمنی که پاتوژن را شناسایی می‌نمایند شروع به تولید و تکثیر می‌نمایند. از بین سلول‌های شناساگر تولید شده، دسته‌ای بعنوان سلول‌های حافظه انتخاب و نگهداری می‌شود تا در برخوردهای بعدی با پاتوژن‌های همانند و یا با ساختاری مشابه پاسخ سریعتر و قویتر سیستم ایمنی حاصل شود. در حین روند تولید، این سلول‌ها تحت تاثیر عملگر جهش با نرخ بالا قرار می‌گیرند. مراحل انتخاب و جهش، تکامل وابستگی^۹ نامیده می‌شود. در سیستم ایمنی سلول‌ها از طریق تقسیم سلولی تکثیر می‌شوند و در تولید سلول‌های جدید فرایند آمیزش^{۱۰} نقشی ندارد به همین دلیل تمام سلول‌های تولید شده ساختاری کاملاً مشابه با سلول والد خود دارند اما هر سلول با توجه به میزان شباهت با پاتوژن

تلاشی که در این مقاله برای تقویت الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی صورت گرفته است استفاده از استراتژی ترکیب می‌باشد به اینصورت که از یک هیوریستیک جستجوی محلی در آنتی‌بادی‌های حافظه استفاده می‌شود. در این تکنیک، روش‌های مختلف حل مسأله به کار رفته و پاسخ نهایی مسأله از ترکیب نتایج حاصل از این روش‌ها به دست می‌آید.

در این مقاله در ابتدا مرور مختصری بر سیستم ایمنی مصنوعی خواهد شد. بخش سوم به راه‌کار پیشنهادی اختصاص پیدا کرده است و در بخش چهارم به اعتبار سنجی مدل ارائه شده پرداخته شده و بخش نهایی مقاله نیز نتیجه گیری می‌باشد.

۲- سیستم ایمنی مصنوعی

ایمنی از سلول‌ها، مولکول‌ها و قوانینی تشکیل شده است که از آسیب رساندن عواملی همچون پاتوژن‌ها به بدن میزبان جلوگیری می‌نماید. قسمتی از پاتوژن به نام آنتی-ژن توسط این سیستم قابل شناسایی است و موجب فعال شدن پاسخ سیستم ایمنی خواهد شد. یکی نمونه از پاسخ‌های سیستم ایمنی می‌تواند ترشح آنتی‌بادی توسط سلول‌های B و یا لنفوسیت‌های B باشد. آنتی‌بادی‌ها مولکول‌های شناساگری به شکل Y می‌باشند که به سطح سلول‌های B متصل هستند و با قوانینی از پیش تعریف شده آنتی‌ژن‌ها را شناسایی می‌نمایند و به آنها متصل می‌شوند. مولکول‌های آنتی‌بادی قسمتی از آنتی‌ژن را بنام اپیتوپ^۱ شناسایی می‌نمایند. ناحیه‌ای از آنتی‌بادی که وظیفه شناسایی و اتصال به آنتی‌ژن را دارد پاراتوپ^۲ نامیده می‌شود. ایدوتایپ^۳ نیز مجموعه‌ای از ایدوتوپ^۴ است (همانند اپیتوپ است) که در سطح متغیر شکل آنتی‌بادی قرار دارد. هر سلول B فقط توانایی تولید یک نوع آنتی‌بادی را داراست به همین دلیل monospecific خوانده می‌شود اما هر آنتی‌ژن چندین گونه مختلف اپیتوپ دارد که موجب می‌شود چندین آنتی‌بادی مختلف آنرا شناسایی نماید. پاراتوپ با نام ناحیه V نیز شناخته می‌شود و به منظور ایجاد بیشترین میزان تطابق با آنتی-

و بر سرعت همگرایی و همچنین دقت الگوریتم تاثیر بسزایی خواهد داشت. دلیل نامگذاری جستجوی محلی، انجام جستجو فقط در اطراف آنتی‌بادی‌های حافظه در مقیاس کوچک می‌باشد.

در این مقاله برای جستجوی محلی از جستجوی تپه‌نوردی و الگوریتم‌های ژنتیکی استفاده شده است. در مسائلی که ابعاد فضای مساله کوچک باشد جستجوی تپه‌نوردی دقت بالایی دارد، حال آنکه با بالا رفتن ابعاد فضای مساله، زمان اجرا بصورت نمایی افزایش می‌یابد و به همین دلیل برای چنین مسائلی جستجوی تپه‌نوردی مناسب نخواهد بود و الگوریتم‌ها ژنتیکی کارایی بالاتری دارند. الگوریتم پیشنهادی بصورت شکل ۲ می‌باشد.

```
Randomly initialize
While stopping criterion is not met do
    Determine the fitness of all antibodies
    Select the n highest affinity antibodies
    Generate a number Nc of clones for n selected
    antibodies
    hypermut each clone
    Determine the fitness of all antibodies
    For each clone, select the cell with highest
    fitness
    selected antibodies to be a candidate to enter
    the set
    memory antibodies of
    Apply local search on Memory Antibody
    replace the d lowest affinity antibodies by i
    new
    antibodies and j Memory Antibody(d=i+j)
EndWhile
```

شکل ۲: الگوریتم پیشنهادی.

پس از بهبود آنتی‌بادی‌های حافظه و در ادامه روند الگوریتم، علاوه بر اضافه نمودن تعدادی آنتی‌بادی بصورت تصادفی به جمعیت آنتی‌بادی‌ها، بخشی از آنتی‌بادی‌های حافظه برای افزایش سرعت همگرایی به جمعیت آنتی‌بادی‌ها اضافه می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای اعمال عملگر جهش عالی از رابطه ۱ استفاده شده است [۲]. همچنین اندازه کلونی تولید شده برای n آنتی-بادی بر اساس رابطه ۲ تعیین می‌شود [۲].

تحت تاثیر عملگر جهش قرار می‌گیرد در اینصورت هر چه میزان شباهت با پاتوژن کمتر باشد سلول با شدت بیشتری تغییر خواهد شد. همچنین در این روند تعداد سلول‌هایی که هر سلول می‌تواند تولید کند نیز به میزان شباهت با پاتوژن بستگی دارد هر چه میزان شباهت با پاتوژن بیشتر باشد آن سلول می‌تواند سلول‌های بیشتری تولید نماید [۳ و ۲].

از جمله الگوریتم‌های سیستم ایمنی که برای مسائل بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند می‌توان به الگوریتم ClonalG و opt-aiNet اشاره نمود. کاسترو^{۱۱} و تمیس^{۱۲} الگوریتم-های سیستم ایمنی مصنوعی را در دو دسته مبتنی بر جمعیت^{۱۳} و مبتنی بر شبکه^{۱۴} تقسیم بندی نموده‌اند که بر این اساس انتخاب منفی و کلونی را در دسته اول و مدل شبکه ایمنی را در دو گروه شبکه پیوسته و گسسته در دسته دوم قرار داده‌اند.

۳- راهکار پیشنهادی

از جنبه‌های مهم الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی

می‌توان به انتخاب و کلونی سلول‌هایی که بیشترین سطح تحریک را دارند که متناسب با میزان وابستگی آنتی‌ژنی است و همچنین از بین رفتن سلول‌هایی که تحریک نمی‌شوند اشاره نمود. براساس این الگوریتم‌ها، آنتی-بادی‌ها بر اساس کلونی، جهش عالی و تصحیح شناساگرهایشان تکامل می‌یابند و بهترین آنها وارد حافظه می‌شوند. به عبارتی بهتر، آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از آنتی‌بادی‌هایی که در روند الگوریتم در برابر آنتی‌ژن‌ها ارزیابی و بهبود بخشیده شده‌اند بروزرسانی می‌شوند. بنابراین آنتی‌بادی‌های حافظه، بیشترین شایستگی را کسب می‌نمایند [۲].

برای بهبود دقت این الگوریتم از ایده جستجوی محلی در ناحیه آنتی‌بادی‌های حافظه بهره برده شده است. که با جستجوی محلی با مقیاس کوچک در اطراف بهترین آنتی‌بادی‌ها (آنتی‌بادی‌های حافظه) محقق می‌شود. و بدینوسیله شایستگی آنتی‌بادی‌های حافظه افزایش یافته

$$F_3(x) = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \quad (5)$$

$$F_4(x) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (6)$$

۴-۱- راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی

تپهنوردی

در این بخش، راه کار پیشنهادی از جستجوی تپهنوردی به منظور جستجوی محلی استفاده می نماید و آنتی بادی های حافظه با استفاده از آن بهبود می یابند. جستجوی تپهنوردی مورد استفاده، جستجوی تپهنوردی کامل است که در این روش تمام همسایه ها در شعاع همسایگی معین بررسی و بهترین همسایه، جایگزین حالت فعلی می گردد. برای مطالعه روند همگرایی راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی تپهنوردی، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی بادی های حافظه برای تمام تابع های مورد آزمایش گزارش شده اند. در جدول ۱ نتایج شبیه سازی را برای راه کار پیشنهادی نشان می دهد.

جدول ۱: راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی تپهنوردی (توابع

۲ بعدی)

| Function | Average | Variance | Best Result |
|----------------|---------|----------|-------------|
| F ₁ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₂ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₃ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₄ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |

با توجه به اینکه تعداد تکرارهای مورد نیاز برای هر بار اجرای جستجوی تپهنوردی از قبل قابل پیش بینی نبوده و پیچیدگی زمانی هر تکرار نیز نمای می باشد، زمان لازم برای اجرای الگوریتم در تکرارهای مختلف یکسان نبوده و حتی ممکن است در یک حالت خاص الگوریتم تقلیدی تبدیل به یک جستجوی کامل گردد و با بالا رفتن ابعاد فضای مساله عملاً این روش کارایی مناسبی نخواهد داشت. بر این اساس برای ارزیابی این راه کار پیشنهادی توابع مورد آزمایش بصورت دو بعدی و آنتی بادی ها

$$c = c' + \alpha.N(0,1) \quad (1)$$

$$\alpha = (1/\beta) \times \exp(-f^*)$$

که در رابطه بالا c' مقدار آنتی بادی است که تحت تاثیر عملگر جهش قرار گرفته، $N(0,1)$ عدد تصادفی تابع گوسین با میانگین صفر و انحراف معیار β ، $\delta = 1$ پارامتری برای کنترل ضریب کاهش تابع نمای است و f^* نیز مقدار شایستگی است که در بازه [۰ و ۱] نرمال شده است [۲].

$$N_c = \sum_{i=1}^n \text{round}\left(\frac{\beta.N}{i}\right) \quad (2)$$

در این رابطه N_c مجموع کل کلونی تولید شده برای آنتی بادی ها، β ضریب تکثیر، N تعداد آنتی بادی ها و Round(.) نیز عملگری است که آرگومان های ورودی خود را به نزدیکترین عدد گرد می کند. مقداری که این رابطه برای آنتی بادی برمی گرداند بیانگر اندازه کلونی آنتی بادی است.

۴- نتایج آزمایش ها

در این بخش نتایج شبیه سازی راه کار پیشنهادی برای چهار تابع محک استاندارد (روابط ۳-۶) به ازای کیفیت جواب بدست آمده براساس روش های مختلف جستجوی محلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارزیابی راه کارهای پیشنهادی به جز در مورد جستجوی محلی تپهنوردی توابع مورد آزمایش بصورت سی بعدی و آنتی بادی ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده اند و راه کاره پیشنهادی با ۱۰۰ تکرار برای بدست آوردن پاسخ بهینه مورد آزمون قرار گرفته اند.

$$F_1(x) = -20 \cdot \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e \quad (3)$$

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4)$$

بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند.

۲-۴- راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی

ژنتیک

در این بخش راه کار پیشنهادی از الگوریتم ژنتیکی استاندارد به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از آن بهبود می‌یابند. برای مطالعه روند همگرایی را-کار پیشنهادی با جستجوی محلی ژنتیک، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش

آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی راه کار پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی ژنتیک به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند و برای مقایسه با نتایج الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی استاندارد نتایج حاصل از این الگوریتم در جدول ۴ آمده است.

جدول ۲: راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی ژنتیک

| Function | Average | Variance | Best Result |
|----------------|---------|----------|-------------|
| F ₁ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₂ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₃ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |
| F ₄ | 0/0 | 0/0 | 0/0 |

در راه کار پیشنهادی از الگوریتم ژنتیکی استاندارد با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ به منظور بهبود در آنتی‌بادی‌های حافظه استفاده شده است. همچنین در این الگوریتم از مکانیزم انتخاب چرخ رولت^{۱۵} به منظور انتخاب والد‌ها در عملگر پیوند^{۱۶} استفاده شده است [۷].

جدول ۳: مشخصات الگوریتم ژنتیکی استاندارد

| پارامترها | مقدار |
|-----------------|------------------------------------|
| تعداد نسل‌ها | ۵ |
| تعداد جمعیت | برابر با تعداد آنتی‌بادی‌های حافظه |
| نرخ عملگر پیوند | ۰/۳ |
| نرخ عملگر جهش | ۰/۰۱ |

جدول ۴: نتایج الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی استاندارد

| Function | Average | Variance | Best Result |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| F ₁ | 3.2156e-002 | 6.3675e-003 | 1.3456e-006 |
| F ₂ | 9.3712e-004 | 3.1952e-006 | 4.7666e-008 |
| F ₃ | 2.3171e-002 | 5.2671e-003 | 9.2438e-006 |
| F ₄ | 7.2087e-003 | 3.7544e-004 | 5.6859e-005 |

با توجه به نتایج بدست آمده، (براساس جدول-های ۲ و ۴) می‌توان کارایی راه کار پیشنهادی نسبت به الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی را تایید کرد.

۵- نتیجه گیری

از مهمترین مشکلاتی که الگوریتم‌های سیستم ایمنی رایج با آن مواجه می‌باشند، می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و همچنین عدم پایداری در اجراهای مختلف اشاره نمود. در این مقاله برای غلبه بر این مشکلات از یک جستجوی محلی در اطراف آنتی-بادی‌های حافظه بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این راه کار پاسخ‌های بسیار بهتری را در مقایسه با الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌دهد. اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها نیز نشان داد که راه کار پیشنهادی از پایداری قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

مراجع

- [1] A. E. Eiben and J. E. Smith, "Introduction to Evolutionary computing," Springer, 2003.
- [2] L. N. deCastro and F. VonZuben, "Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle" IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 239-251, 2002.
- [3] L. N. deCastro and F. J. VonZuben, "aiNet: An Artificial Immune Network for Data Analysis," In Data Mining: A Heuristic Approach, 2001.
- [4] J. Timmis and C. Edmonds, "A Comment on opt-AiNET: An Immune Network Algorithm for Optimisation," soft computing, vol. 7, 2003.



- [5] K. S. Narendra and M. A. L. Thathachar, Learning automata: An introduction: Prentice Hall, 1989.
- [6] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithm and Engineering Design: Jhon Wiley & Sons, 1997.

زیر نویس‌ها

-
- 1 Epitope
 - 2 Paratope
 - 3 Idiotype
 - 4 Idiotope
 - 5 Affinity
 - 6 Self
 - 7 Noneselfe
 - 8 Self/Nonsself discrimination
 - 9 Affinity muturation
 - 10 Crossover
 - 11 L.N.De Castro
 - 12 J.L.Timmis
 - 13 Population-based
 - 14 Network-based
 - 15 Roulette wheel
 - 16 Crossover