



دانشگاه صنعتی مالک اشتر



بهبود کارایی الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی در مسائل بهینه سازی

رامین جوادزاده^۱، محمدرضا میدی^۲

۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد

javadzadeh.r@srbiau.ac.ir

۲ دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی امیرکبیر

mneybodi@aut.ac.ir

چکیده:

الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهیوریستیک‌های هستند که در مسائل بهینه‌سازی، خوشبندی 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 عمدۀ این الگوریتم‌ها می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و عدم پایداری در اجرای 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:

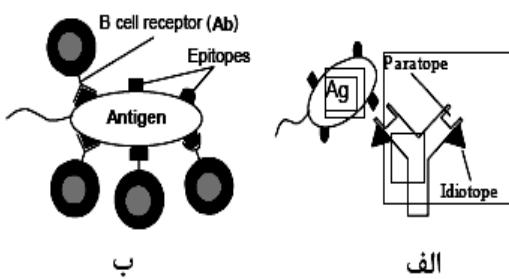
بهینه‌سازی، جستجوی محلی، سیستم ایمنی مصنوعی.

انتخاب و نگهداری بهترین جواب‌های تولید شده با نام آنتی‌بادی حافظه به سمت جواب‌های بهینه هدایت می‌شوند [۲-۴]. همانند دیگر متاهیوریستیک‌های 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 عده‌های که الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی با آن مواجه می‌باشند، عدم پایداری این الگوریتم‌ها در اجرای مختلف می‌باشد. ماهیت اتفاقی بودن این الگوریتم‌ها سبب می‌شود تا کیفیت پاسخ‌هایی که الگوریتم در اجرای مختلف نتیجه می‌دهد بسیار متنوع باشد. مشکل اخیر سبب می‌شود تا نتوانیم به پاسخ‌هایی که از الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌گردد اعتماد کنیم.

۱- مقدمه

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 برسنده نمایند [۱]. الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهیوریستیک‌هایی است که در طی چند دهه اخیر کانون توجه بسیاری از تحقیق‌ها قرار گرفته است. در این روش حل مسئله، ابتدا جمعیتی از راه حل‌ها میانی در واحدهایی موسوم به ژن و در ساختاری بنام آنتی‌بادی قالب‌بندی می‌گردد. طی یک فرایند تکرار، بر اساس مکانیزم دفاعی سیستم ایمنی بیولوژیکی استوار است که بر پایه انتخاب کلونی، جهش عالی آنتی‌بادی‌ها و

ژن‌ها می‌توانند 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 ایدوتوبیش به تصویر کشیده است^[۳].



شکل ۱: а- سلول B، آنتی‌بادی، آنتیژن، پاراتوپ و ایدوتوبی. 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 فعل 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 مسئله به کار رفته و پاسخ نهایی مسئله از ترکیب نتایج حاصل از این روش‌ها به دست می‌آید.

در این مقاله در ابتدا مرور مختصراً 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 می‌بان 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 لنفوцит‌های 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 ایدوتوب^۴ است (همانند اپیتوپ است) که در سطح متغیر شکل آنتی‌بادی قرار دارد. هر سلول B فقط توانایی تولید یک نوع آنتی‌بادی را داردست به همین دلیل monospecific خوانده می‌شود اما هر آنتی‌ژن چندین گونه مختلف اپیتوپ دارد که موجب می‌شود چندین آنتی‌بادی‌ی از اینها شناسایی نماید. پاراتوپ با نام ناحیه ۷ 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 مقایسه کوچک می‌باشد.

در این مقاله برای جستجوی محلی از جستجوی تپه‌نورده و الگوریتم‌های ژنتیکی استفاده شده است. در مسائلی که ابعاد فضای مساله کوچک باشد جستجوی تپه‌نورده 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 تپه‌نورده مناسب نخواهد بود و الگوریتم‌ها ژنتیکی کارائی 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 آنتی بادی‌های حافظه و در ادامه روند الگوریتم، علاوه بر اضافه نمودن تعدادی آنتی بادی بصورت تصادفی به جمعیت آنتی بادی‌ها، بخشی از آنتی بادی‌های حافظه برای افزایش سرعت همگرایی به جمعیت آنتی بادی‌ها اضافه می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای اعمال عملکر 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 الگوریتم های سیستم ایمنی که برای مسائل بهینه سازی توسعه یافته اند می توان 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 نموده اند 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 داده اند.

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 واستگی آنتی‌زنی است و همچنین از بین رفتن سلول‌هایی که تحریک نمی‌شوند اشاره نمود. براساس این الگوریتم‌ها، آنتی‌بادی‌ها بر اساس کلونی، جهش عالی و تصحیح شناسایگرهاشان تکامل می‌یابند و بهترین آنها وارد حافظه می‌شوند. به عبارتی بهتر، آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از آنتی‌بادی‌هایی که در روند الگوریتم در برابر آنتی‌زن‌ها 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 آنتی بادی‌های حافظه بهره برده شده است. که با جستجوی محلی با مقیاس کوچک در اطراف بهترین آنتی بادی‌ها (آن‌تی بادی‌های حافظه) محقق می‌شود. و بدینوسیله شایستگی آنتی بادی‌های حافظه افزایش یافته

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

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

۱-۴- راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی

تپه‌نوردی

در این بخش، راه کار پیشنهادی از جستجوی تپه‌نوردی به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از آن بهبود می‌یابند. جستجوی تپه‌نوردی مورد استفاده، جستجوی تپه‌نوردی کامل است که در این روش تمام همسایه‌ها در شعاع همسایگی معین بررسی و بهترین همسایه، جایگزین حالت فعلی می‌گردد. برای مطالعه روند همگرایی راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی تپه‌نوردی، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی را برای راه کار پیشنهادی نشان می‌دهد.

جدول ۱: راه کار پیشنهادی با جستجوی محلی تپه‌نوردی (توابع سازی را برای راه کار پیشنهادی شده‌اند. در جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی را برای راه کار پیشنهادی نشان می‌دهد).

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 پیش‌بینی نبوده و پیچیدگی زمانی هر تکرار نیز نمایی می‌باشد، زمان لازم برای اجرای الگوریتم در تکرارهای مختلف یکسان نبوده و حتی ممکن است در یک حالت خاص الگوریتم تقليدی 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 آنتی‌بادی‌ها

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

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

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

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

در این رابطه N_c مجموع کل کلونی تولید شده برای آنتی‌بادی‌ها، β ضریب تکثیر، N تعداد آنتی‌بادی‌ها و Round(.) نیز عملگری است که آرگومان‌های ورودی خود را به نزدیکترین عدد گرد می‌کند. مقداری که این رابطه برای آنتی‌بادی برمی‌گردد بیانگر اندازه کلونی آنتی‌بادی است.

۴- نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج شبیه‌سازی راه کار پیشنهادی برای چهار تابع محک استاندارد (روابط ۳-۶) به ازای کیفیت جواب بدست آمده براساس روش‌های مختلف جستجوی محلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارزیابی راه‌کارهای پیشنهادی به جز در مورد جستجوی محلی تپه‌نوردی توابع مورد آزمایش بصورت سی بعدی و آنتی‌بادی‌ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند و راه کارهای پیشنهادی با ۱۰۰ تکرار برای بدست آوردن پاسخ بهینه مورد آزمون قرار گرفته اند.

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

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

تصویرت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند.

۴-۲- راهکار پیشنهادی با جستجوی محلی ژنتیک

در این بخش راهکار 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 راهکار پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، راهکار 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.

۵- نتیجه‌گیری

از مهمترین مشکلاتی که الگوریتم‌های سیستم ایمنی راچ با آن مواجه می‌باشند، می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و همچنین عدم پایداری در اجرایی 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 راهکار پاسخ‌های بسیار بهتری را در مقایسه با الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌دهد. اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها نیز نشان داد که راهکار 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.

جدول ۲: راهکار 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 راهکار 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

بارمترها	مقدار
تعداد نسل‌ها	۵
برابر با تعداد آنتی‌بادی‌های حافظه	تعداد جمعیت
نرخ عملگر پیوند	۰/۲
نرخ عملگر چesh	۰/۰۱



دانشگاه صنعتی مالک اشتر

سومین کنفرانس ملی انجمان علمی فرمانده و کنترل ایران

انجمن علمی فرمانده و کنترل ایران (C4I)



- [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/Nonself 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