

سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک (MAIS)

محمد رضا میبدی

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی امیر کبیر
تهران ایران

mmevbodi@aut.ac.ir

رامین جوادزاده

دانشکده مهندسی کامپیوتر
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
تهران ایران

javadzadeh.r@srbiau.ac.ir

چکیده: الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهیوریستیک‌هایی 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 عمده این الگوریتم‌ها می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و عدم پایداری در اجراهای مختلف اشاره نمود. در این مقاله برای اولین بار سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک (MAIS) (به منظور غلبه بر مشکلات سیستم ایمنی مصنوعی معرفی شده است که 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.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، جستجوی محلی، سیستم ایمنی مصنوعی

گام‌های نخست، ناحیه‌هایی از فضای حالت، که بهینه‌های محلی و سراسری را دربر می‌گیرند به سرعت شناسایی می‌نمایند، ولی در ادامه مسیر همگرا شدن به بهینه‌های سراسری، روند بهینه‌سازی کند می‌شود. کاهش تنوع ژنتیکی در طی فرایند تکامل سبب می‌شود تا روند جستجوی فضای حالت مسئله مختلط گردد. مشکل دیگر 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.

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 حوزه علوم پایه 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 زمان معقول و با استفاده از روش‌های کلاسیک امکان‌پذیر نمی‌باشد. اهمیت حل این دسته از مسائل سبب شده تا محققین با بهره‌گیری از تکنیک‌های محاسبات نرم، به پاسخ‌های نسبتاً بهینه بسنده نمایند [۱]. الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهیوریستیک‌هایی است که در چند دهه اخیر کانون توجه بسیاری از تحقیق‌ها قرار گرفته است. در این روش حل مسئله، ابتدا جمعیتی از راه حل‌های میانی موسوم به ژن و در ساختاری بنام آنتی‌بادی قالب‌بندی می‌گردد. طی فرایند تکرار، براساس مکانیزم دفاعی سیستم ایمنی بیولوژیکی، که بر پایه انتخاب کلونی، جهش و نگهداری بهترین آنتی‌بادی‌ها است، به سمت جواب‌های بهینه هدایت می‌شوند [۲-۴].

همانند دیگر متاهیوریستیک‌ها این الگوریتم‌ها نیز در

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 ترخ بالا قرار می‌گیرند. مراحل انتخاب و جهش، تکامل وابستگی^۷ نامیده می‌شود. در سیستم ایمنی سلول‌ها از طریق تقسیم سلولی تکثیر می‌شوند و در تولید سلول‌های جدید فرایند آمیزش^۸ 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 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 [۲۰]. از جمله الگوریتم‌های سیستم ایمنی که برای مسائل بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند می‌توان به الگوریتم ClonalG^۹ و opt-aiNet^{۱۰} اشاره نمود. کاسترو^۹ و تمیس^{۱۰} الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی را در دو دسته مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر شبکه تقسیم نموده‌اند. بر این اساس انتخاب منفی و کلونی را در دسته اول و مدل شبکه ایمنی را در دو گروه شبکه پیوسته و گستته در دسته دوم قرار داده‌اند [۲].

۳- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک (MAIS)

از جنبه‌های مهم الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی می‌توان به انتخاب و کلونی سلول‌هایی که بیشترین سطح تحریک را دارند و همچنین از بین رفتن سلول‌هایی که تحریک نمی‌شوند اشاره نمود. براساس این الگوریتم‌ها، آنتی‌بادی‌ها بر اساس کلونی، جهش و تصحیح شناساگرها، تکامل می‌یابند و بهترین آنها وارد حافظه می‌شوند. به بیان دیگر، آنتی‌بادی‌های حافظه با آنتی‌بادی‌هایی که در روند الگوریتم در برابر آنتی‌ژن‌ها ارزیابی و بهبود بخشیده شده‌اند بروزرسانی می‌شوند. بنابراین آنتی‌بادی‌های

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

۲- سیستم ایمنی مصنوعی

سیستم 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 آنتی‌ژن 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 لنفوسيت‌های 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 اپیتوب^۱ شناسایی می‌نمایند. ناحیه‌ای از آنتی‌بادی که وظیفه شناسایی و اتصال به آنتی‌ژن را دارد پاراتوب^۲ نامیده می‌شود. ایدوتایپ^۳ نیز مجموعه‌ای از ایدوتوب^۴ 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 اپیتوب دارد که موجب می‌شود چندین آنتی‌بادی مختلف آنرا شناسایی نماید. پاراتوب با نام ناحیه V نیز شبخته می‌شود و به منظور ایجاد بیشترین میزان تطابق با آنتی‌ژن‌ها می‌تواند شکل خود را تغییر دهد و به همین دلیل از آن به ناحیه متغیر نیز نام می‌برند. میزان تعامل بین آنتی‌بادی و آنتی‌ژن‌ها با میزان تطابق و یا شباهت^۵ در ناحیه اتصال بین آنها سنجیده می‌شود [۲].

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

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

در رابطه (۲) N_c مجموع کل کلونی تولید شده، β ضریب تکثیر، N تعداد آنتی‌بادی‌ها و $round$ نیز عملگری است که آرگومان خود را به نزدیکترین عدد صحیح گرد می‌کند. مقداری که این رابطه برای هر آنتی‌بادی برمی‌گرداند بیانگر اندازه کلونی آن آنتی‌بادی است.

بهمنظور جستجوی محلی از مدل‌های ترکیبی [۵] CA-AIS، [۵] FCA-AIS، [۶] CLA-AIS، [۶] CLA-AIS، جستجوی تپه‌نوردی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و براساس آن‌ها مدل‌های ارائه شده است که در ادامه، نتایج حاصل از ترکیب روش‌های ذکر شده در ادامه آورده شده است.

۴- بهینه سازیتابع

در این بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک برای چهار تابع محک استاندارد (روابطه 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 مدل سیستم ایمنی ممتیک همراه با جستجوی تپه‌نوردی توابع مورد آزمایش بصورت سی بعدی و آنتی‌بادی‌ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند. و راه‌کارهای پیشنهادی با ۱۰۰ تکرار برای بدست آوردن پاسخ بهینه مورد آزمون قرار گرفته شده‌اند.

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

$$- \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$$

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

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

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

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 و بر سرعت همگرایی و همچنین دقت و پایداری پاسخ‌های الگوریتم تاثیر بسزائی خواهد داشت. دلیل نامگذاری جستجوی محلی، انجام جستجو فقط در اطراف آنتی‌بادی‌های حافظه در مقیاس کوچک می‌باشد. الگوریتم مدل ترکیبی MAIS 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 N_c 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 of memory antibodies

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 سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک.

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 این راه‌کار برای اعمال عملگر جهش از رابطه (۱) استفاده شده است [۲]. همچنین اندازه کلونی تولید شده برای n آنتی‌بادی بر اساس رابطه (۲) تعیین می‌شود [۲].

$$\begin{aligned} c &= c' + \alpha \cdot N(0,1) \\ \alpha &= (1/\beta) \times \exp(-f^*) \end{aligned} \quad (1)$$

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

۱-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با

جستجوی محلی تپه‌نوردی

در این بخش، سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک 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 سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی تپه‌نوردی، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی راه‌کار پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی ژنتیک به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۲: سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک 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^{۱۱} به منظور انتخاب والدها در عملگر پیوند^{۱۲} استفاده شده است [۷].

جدول ۳: مشخصات الگوریتم ژنتیکی استاندارد

جدول ۱: سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک 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 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 تقليیدی 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 راه‌کار پیشنهادی توابع مورد آزمایش بصورت دو بعدی و آنتی‌بادی‌ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند.

۲-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با

جستجوی محلی ژنتیک

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از الگوریتم ژنتیکی استاندارد به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از آن بهبود

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

۳-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با

CA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از مدل ترکیبی CA-AIS که در [۵] معرفی شده است به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از این مدل ترکیبی بهبود می‌یابند. برای مطالعه روند همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CA-AIS، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۴ نتایج

۴-۵- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS-Pm

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از مدل ترکیبی CLA-AIS که در [۶] معرفی شده است، به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از این مدل ترکیبی بهبود می‌یابند. این مدل ترکیبی CLA-AIS با بهره‌گیری از اتوماتای یادگیر در روند پردازشی سیستم ایمنی مصنوعی بهترین نرخ جهش را می‌آموزد و بکار می‌بندد.

برای مطالعه روند همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۶ نتایج شبیه‌سازی را برای راه‌کار پیشنهادی با استفاده از (-۰,۱,۰,۰۱), CLA-AIS(LRP(0.01,0.01),۱,۲,-۰۱)، نشان می‌دهند. که در آن جستجوی محلی CLA-AIS با نرخ پاداش و جریمه ۰/۰۱، شعاع همسایگی یک و جمعیت به تعداد سلول‌های حافظه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند، سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با CLA-AIS-Pm به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۶: سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS بمنظور تعیین نرخ جهش

Function	Average	Variance	Best Result
F ₁	0/0	0/0	0/0
F ₂	4.57e-135	9.55e-270	0/0
F ₃	0/0	0/0	0/0
F ₄	0/0	0/0	0/0

۶-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از مدل ترکیبی CLA-AIS که در [۶] معرفی شده است به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از این مدل ترکیبی بهبود می‌یابند.

شبیه‌سازی را برای راه‌کار پیشنهادی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CA-AIS به جواب‌های تقریباً نزدیک به بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۴: سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CA-AIS

Function	Average	Variance	Best Result
F ₁	0/0	0/0	0/0
F ₂	4.57e-135	9.55e-270	0/0
F ₃	0/0	0/0	0/0
F ₄	0/0	0/0	0/0

۴-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی FCA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از مدل ترکیبی FCA-AIS که در [۵] معرفی شده است به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از این مدل ترکیبی بهبود می‌یابند. برای مطالعه سرعت همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی FCA-AIS، بهترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی را برای راه‌کار پیشنهادی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی FCA-AIS به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۵: سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی FCA-AIS

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

۶-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک از مدل ترکیبی CLA-AIS که در [۶] معرفی شده است به منظور جستجوی محلی استفاده می‌نماید و آنتی‌بادی‌های حافظه با استفاده از این مدل ترکیبی بهبود می‌یابند.

بسیار بهتری را در مقایسه با الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی نتیجه می‌دهد. 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 استفاده از دیگر روش‌ها به منظور جستجوی محلی کارائی بالاتری دارند. اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها نشان داد، راه کار ییشه‌هادی 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. J. 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] R. Javadzadeh and M. R. Meybodi, "Hybrid Models based on Artificial Immune systems, Cellular Automata and Fuzzy Cellular Automata and Their Applications to Optimization Problems", Technical Report, Computer Engineering Department, Amirkabir University, Tehran, Iran, 2008.
 - [6] R. Javadzadeh and M. R. Meybodi, "Hybrid Models based on Artificial Immune systems, Cellular Automata and Cellular Learning Automata and Their Applications to Optimization Problems", Technical Report, Computer Engineering Department, Amirkabir University, Tehran, Iran, 2008.
 - [7] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithm and Engineering Design; Jhon Wiley & Sons, 1997.

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

- 1 Epitope
- 2 Paratope
- 3 Idiotype
- 4 Idiotipe
- 5 Affinity
- 6 Self/Nonself discrimination
- 7 Affinity maturation
- 8 Crossover
- 9 L.N.De Castro
- 10 J.L.Timmis
- 11 Roulette wheel
- 12 Crossover

در مدل ترکیبی CLA-AIS معرفی شده، هر آنتی‌بادی از یک مدل احتمالاتی تشکیل شده و آنتی‌بادی‌ها بروی یک شبکه سلولی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در هر زمان تمام سول‌ها به صورت همزمان فعال می‌شوند و بر اساس مقادیر آنتی‌بادی خود و همسایگان مدل احتمالاتی خود را به روز رسانی می‌کنند. در مرحله بعد براساس آنتی‌بادی و اتوماتای یادگیر، یک آنتی‌بادی دیگر تولید می‌کند که در صورت داشتن کیفیتی بالاتر از آن‌تی‌بادی قبلی، چاپگزین آن می‌شود.

برای مطالعه روند همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS، بهترین، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتیبادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی را برای راه کار پیشنهادی با استفاده از $(-0.01, 0.01), 1, 2, -$ CLA-AIS(LRP)، نشان می‌دهد. که در آن جستجوی CLA-AIS با نرخ پاداش و جریمه $0.01, 0.01$ ، شاعع همسایگی یک و جمعیت به تعداد سلول‌های حافظه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند، سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک با جستجوی محلی CLA-AIS به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۷: سیستم اینمنی مصنوعی مهندسی با جستجوی CLA-AIS محلی

از 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. برای غلبه بر این مشکلات در این مقاله برای اولین بار سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک ارائه شده است که در آن از یک جستجوی محلی در اطراف آنتن‌بادی‌های حافظه بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این راهکار، پاسخ‌های