

# سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک (MAIS)

محمدرضا میبیدی  
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات  
دانشگاه صنعتی امیر کبیر  
تهران ایران  
[mmevbodi@aut.ac.i](mailto:mmevbodi@aut.ac.i)

رامین جوادزاده  
دانشکده مهندسی کامپیوتر  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران  
تهران ایران  
[javadzadeh.r@srbiau.ac.ir](mailto:javadzadeh.r@srbiau.ac.ir)

**چکیده:** الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی از جمله متاهیورستیک‌هایی 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 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

## ۱- مقدمه

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 مسأله مختل 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 هیورستیک 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 حوزه علوم پایه و مهندسی، گاه با مسائلی مواجه هستیم که به دلیل گستردگی و پیچیدگی بیش از حد فضای حالت مسأله، 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 متاهیورستیک‌هایی است که در چند دهه اخیر کانون توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است. در این روش حل مسأله، ابتدا جمعیتی از راه‌حل‌های میانی موسوم به ژن و در ساختاری بنام آنتی‌بادی قالب‌بندی می‌گردند. 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 متاهیورستیک‌ها این الگوریتم‌ها نیز در

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 نتیجه گیری می باشد.

## 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 می نماید. 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 پاسخ های سیستم ایمنی می تواند ترشح آنتی بادی توسط سلول های B و یا لنفوسیت های B باشد. آنتی بادی ها مولکول های شناساگری به شکل Y می باشند که به سطح سلول های B متصل هستند و با قوانینی از پیش تعریف شده آنتی ژن ها را شناسایی می نمایند و به آنها متصل می شوند. مولکول های آنتی بادی قسمتی از آنتی ژن را بنام اپیتوپ<sup>۱</sup> شناسایی می نمایند. ناحیه ای از آنتی بادی که وظیفه شناسایی و اتصال به آنتی ژن را دارد پاراتوپ<sup>۲</sup> نامیده می شود. ایدوتایپ<sup>۳</sup> نیز مجموعه ای از ایدوتوپ<sup>۴</sup> است که در سطح متغیر شکل آنتی بادی قرار دارد. هر سلول B فقط توانایی تولید یک نوع آنتی بادی را داراست به همین دلیل monospecific خوانده می شود اما هر آنتی ژن چندین گونه مختلف اپیتوپ دارد که موجب می شود چندین آنتی بادی مختلف آنرا شناسایی نماید. پاراتوپ با نام ناحیه V نیز شناخته می شود و به منظور ایجاد بیشترین میزان تطابق با آنتی ژن ها می تواند شکل خود را تغییر دهد و به همین دلیل از آن به ناحیه متغیر نیز نام می برند. میزان تعامل بین آنتی بادی و آنتی ژن ها با میزان تطابق و یا شباهت<sup>۵</sup> در ناحیه اتصال بین آنها سنجیده می شود [۳].

سیستم ایمنی برای داشتن عملکردی صحیح باید بتواند بین سلول های خودی و سلول های بیگانه خارجی و غیر خودی تمایز قائل شود. این پروسه تمایز خودی از غیر خودی<sup>۶</sup> نامیده می شود. آن سلول هایی که بعنوان خودی شناخته می شوند پاسخ سیستم ایمنی را فعال نمی کنند در حالیکه دیگر سلول ها باعث تحریک پاسخ سیستم

ایمنی خواهند شد. پس از ورود پاتوژن آن دسته از سلول های ایمنی که پاتوژن را شناسایی می نمایند شروع به تولید و تکثیر می نمایند. از بین سلول های شناساگر تولید شده، دسته ای بعنوان سلول های حافظه انتخاب و نگهداری می شود تا در برخوردهای بعدی با پاتوژن های 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 می گیرند. مراحل انتخاب و جهش، تکامل وابستگی<sup>۷</sup> نامیده می شود. در سیستم ایمنی سلول ها از طریق تقسیم سلولی تکثیر می شوند و در تولید سلول های جدید فرایند آمیزش<sup>۸</sup> نقشی ندارد به همین دلیل تمام سلول های 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 می گیرد در اینصورت هر چه میزان شباهت با پاتوژن کمتر باشد سلول با شدت بیشتری تغییر خواهد شد. همچنین در این روند تعداد سلول هایی که هر سلول می تواند تولید کند نیز به میزان شباهت با پاتوژن بستگی دارد هر چه میزان شباهت با پاتوژن بیشتر باشد آن سلول می تواند سلول های 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<sup>۹</sup> و تمیس<sup>۱۰</sup> الگوریتم های سیستم ایمنی مصنوعی را در دو دسته مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر شبکه تقسیم نموده اند. 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 [۲].

## ۳- سیستم ایمنی مصنوعی ممتیک (MAIS)

از جنبه های مهم الگوریتم های سیستم ایمنی مصنوعی می توان به انتخاب و کلونی سلول هایی که بیشترین سطح تحریک را دارند و همچنین از بین رفتن سلول هایی که تحریک نمی شوند اشاره نمود. براساس این الگوریتم ها، آنتی بادی ها بر اساس کلونی، جهش و تصحیح شناساگرها، تکامل می یابند و بهترین آنها وارد حافظه می شوند. به بیان دیگر، آنتی بادی های حافظه با آنتی بادی هایی که در روند الگوریتم در برابر آنتی ژن ها ارزیابی و بهبود بخشیده شده اند بروزرسانی می شوند. بنابراین آنتی بادی های

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

در رابطه (۲)  $N_c$  مجموع کل کلونی تولید شده،  $\beta$  ضریب تکثیر،  $N$  تعداد آنتی‌بادی‌ها و  $\text{round}$  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.

بمنظور جستجوی محلی از مدل‌های ترکیبی CA-AIS [۵]، FCA-AIS [۵]، CLA-AIS-Pm [۶]، CLA-AIS [۶]، 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 سازی تابع

در این بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 مدل سیستم ایمنی ممیتیک 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.

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

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

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

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

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 ممیتیک.

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].

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

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

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  $\delta = 1$ ،  $\beta$  پارامتری برای کنترل ضریب کاهش تابع نمایی است و  $f^*$  نیز مقدار شایستگی است و در بازه  $[0,1]$  نرمال شده است [۲].

#### ۴-۱- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی تپهنوردی

در این بخش، سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 ممیتیک با جستجوی محلی تپهنوردی، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی را برای راه‌کار پیشنهادی نشان می‌دهد.

جدول ۱: سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با جستجوی محلی تپهنوردی (توابع ۲ بعدی)

Function	Average	Variance	Best Result
F <sub>1</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>2</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>3</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>4</sub>	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 می‌باشد، 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 راه‌کار پیشنهادی توابع مورد آزمایش بصورت دو بعدی و آنتی‌بادی‌ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند.

#### ۴-۲- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی ژنتیک

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

می‌یابند. برای مطالعه روند همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با جستجوی محلی ژنتیک، 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، سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با جستجوی محلی ژنتیک به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۲: سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با جستجوی محلی ژنتیک

Function	Average	Variance	Best Result
F <sub>1</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>2</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>3</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>4</sub>	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<sup>۱۱</sup> به منظور انتخاب والد‌ها در عملگر پیوند<sup>۱۲</sup> 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	۰/۲
نرخ عملگر جهش	۰/۰۱

#### ۴-۳- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی CA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 ممیتیک با جستجوی محلی CA-AIS، بدترین، میانگین و انحراف معیار ارزش تمام آنتی‌بادی‌های حافظه برای تمام تابع‌های مورد آزمایش گزارش شده‌اند. در جدول ۴ نتایج

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

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

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

#### ۴-۴- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی FCA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 ممیتیک با جستجوی محلی FCA-AIS، بهترین، بدترین، 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 ممیتیک با جستجوی محلی FCA-AIS به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

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

Function	Average	Variance	Best Result
F <sub>1</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>2</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>3</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>4</sub>	0/0	0/0	0/0

#### ۴-۵- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی CLA-AIS-Pm

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 ممیتیک 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 CLA-AIS(LRP(0.01,0.01),1,2,-) 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 ممیتیک با CLA-AIS-Pm به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

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

Function	Average	Variance	Best Result
F <sub>1</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>2</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>3</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>4</sub>	0/0	0/0	0/0

#### ۴-۶- سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با

##### جستجوی محلی CLA-AIS

در این بخش سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 کارایی بالاتری دارند. اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها نشان داد، 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. 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.

در مدل ترکیبی CLA-AIS معرفی شده، هر آنتی‌بادی از یک رشته و 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، جایگزین آن می‌شود.

برای مطالعه روند همگرایی سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک 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 راه‌کار پیشنهادی با استفاده از CLA-AIS(LRP(0.01,0.01),1,2,-) نشان می‌دهد. که در آن جستجوی 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 ممیتیک با جستجوی محلی CLA-AIS به جواب‌های بهینه همگرا می‌شوند.

جدول ۷: سیستم ایمنی مصنوعی ممیتیک با جستجوی محلی CLA-AIS

Function	Average	Variance	Best Result
F <sub>1</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>2</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>3</sub>	0/0	0/0	0/0
F <sub>4</sub>	0/0	0/0	0/0

## نتیجه‌گیری

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 ممیتیک ارائه شده است که در آن از یک جستجوی محلی در اطراف آنتی‌بادی‌های حافظه بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این راه‌کار، پاسخ‌های

- 1 Epitope
- 2 Paratope
- 3 Idiotope
- 4 Idiotope
- 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