

## بهبود سیستم ایمنی مصنوعی با استفاده از منطق فازی

علیرضا رضوانیان، محمد رضا میبدی

**چکیده.** سیستم ایمنی مصنوعی یک تکنیک الهام گرفته شده از مکانیزم‌های دفاعی سیستم ایمنی طبیعی می‌باشد که در زیر مجموعه الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت و تکاملی قرار می‌گیرد. در این الگوریتم بهترین آنتی‌بادی‌های به عنوان حافظه نگهداری می‌شوند و مجموعه آنتی‌بادی‌ها با انتخاب همزاد توسط ابرجهش به دنبال بهترین آنتی‌بادی‌ها (پاسخها) هستند. از مشکلات الگوریتم اولیه سیستم ایمنی مصنوعی، می‌توان به افتادن در بهینه محلی و پایین بودن سرعت همگرایی اشاره نمود. بنابراین تغییرات نرخ جهش (ابرجهش) در این الگوریتم به عنوان تنها و مهمترین عملگر تغییر که منجر به تغییرات سرعت همگرایی و خروج از بهینه‌های محلی می‌گردد، حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله با استفاده از منطق فازی، روش جدیدی برای بهبود تغییرات نرخ ابرجهش پیشنهاد شده است. آزمایشات بر روی چندین تابع محک استاندارد اعمال شده و نتایج روش پیشنهادی به همراه روش‌های متدال دیگر، حاکی از مطلوبیت روش پیشنهادی است.

### ۱. مقدمه

الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی، روش‌هایی هستند که از نظریه‌های ایمنولوژی و مشاهدات زیستی مکانیزم‌های پیچیده دفاعی سیستم ایمنی طبیعی در موجودات زنده برای مقابله با عوامل بیماری‌زا الهام گرفته شده‌اند<sup>[۱]</sup>. این الگوریتم‌ها با داشتن ویژگی‌هایی چون قابلیت تنظیم پویای اندازه جمعیت، اکتشاف و استخراج فضای جستجو، یافتن چندین بهینه و قابلیت نگهداری راه حل‌های بهینه محلی، در حل خیلی از مسائل مورد توجه محققان فراوانی قرار گرفته و نسخه‌ها و توسعه‌های مختلفی بر الگوریتم اولیه داده است<sup>[۲]</sup>. اما با وجود مزایای زیاد این الگوریتم، چندین چالش نیز مانند: وجود ارتباط مابین تابع هزینه با اندازه جمعیت<sup>[۵]</sup>، تناسب مابین دقت و خطأ در حالت بازنمایی دودویی، تکامل به صورت تغییرات جهش تصادفی، قرار گرفتن در بهینه محلی و نرخ همگرایی پایین وجود دارد<sup>[۶]</sup>. برخی از محققین نیز پیشنهادهایی را برای بهبود کارایی الگوریتم ارائه نموده‌اند. در [۷] یک نیمه عمر احتمالی برای هر سلول B معرفی شده است. در [۸] الگوریتمی صرفاً برای تنوع آنتی‌بادی‌ها در الگوریتم سیستم ایمنی ارائه شده است. استفاده از مفهوم نیچ در [۹] و [۱۱] برای بهبود عملکرد الگوریتم اولیه پیشنهاد شده است. در [۱۰] از نظریه آشوب در ترکیب با ابرجهش برای افزایش کارایی فرآیند تغییر استفاده شده است. استفاده از الگوریتم ژنتیک در [۱۱] ارائه شده است. در [۱۲] برای بهبود نتایج استفاده از جستجوی محلی در اجرای الگوریتم پیشنهاد شده است. در [۱۳] استفاده از اتوماتاهای یادگیر به منظور توازن تغییرات نرخ جهش مطرح گردید. اما عدم اطلاع از نرخ یادگیری مناسب در اتوماتای یادگیر باعث افزایش یا کاهش سرعت همگرایی و یا افتادن در بهینه محلی را منجر می‌گشت. بنابراین برای حل همین مشکل در [۱۴] استفاده از مفهوم همکاری پیشنهاد گردیده است. به طور مشابه در [۲۰] نیز از اتوماتای یادگیر سلولی بهره برده شده است. در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی فازی با سیستم ایمنی مصنوعی ارائه شده است، بدین صورت که یک سیستم استنتاج فازی وظیفه توازن مابین جستجوی محلی و سراسری را با تنظیم تغییر نرخ ابرجهش بر عهده دارد و مشکلات الگوریتم با استفاده از منطق فازی معرفی شده است. در این مدل کرده‌اند [۱۸] و این الگوریتم‌ها با گرفتن بازخورد از اجرای الگوریتم با استفاده از منطق فازی می‌توان تغییرات نرخ ابرجهش را به خوبی در نظر گرفت و در واقع می‌توان حالت تطبیقی را در الگوریتم به وجود آورد.

در ادامه مقاله در بخش دوم سیستم ایمنی مصنوعی مختصرًا معرفی شده است. بخش سوم به پیش‌زنیهای در مورد منطق فازی اختصاص یافته است. الگوریتم پیشنهادی در بخش چهارم ارائه شده است و در نهایت در بخش پنجم نتایج روش پیشنهادی به همراه روش‌های دیگر توسط توابع محک استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته است.

### ۲. سیستم ایمنی مصنوعی

سیستم ایمنی مصنوعی یکی از شاخه‌های هوش محاسباتی در علوم کامپیوتر می‌باشد. محققان با الهام گرفتن از فرآیندهای سیستم ایمنی طبیعی موجودات زنده برای مقابله با پاتوژن‌ها، الگوریتم‌هایی برای حل مسائل کامپیوتری ارائه نموده‌اند<sup>[۱۴]</sup>. سیستم ایمنی طبیعی دارای سطوح مختلفی مانند ایمنی ذاتی و تطبیقی می‌باشد که الگوریتم‌هایی که در سیستم ایمنی مصنوعی طراحی شده‌اند بیشتر ایمنی تطبیقی را مدل کرده‌اند<sup>[۱۸]</sup> و این الگوریتم‌ها برای حل طیف وسیعی از مسائل مختلف از جمله بهینه‌سازی<sup>[۱۰]</sup>، شناسایی الگو، دسته‌بندی،

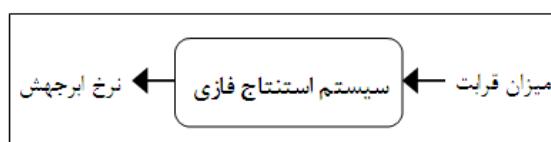
خوشبندی، تشخیص نفوذ، طراحی مدارهای آنالوگ [۲۱] و مسائل دیگر کامپیوتری استفاده شده‌اند [۱۵]. در این رابطه از ویژگی‌های مهم سیستم ایمنی مصنوعی می‌توان به تطبیق‌پذیری، استخراج ویژگی، تحمل خودی و تکنیک‌پذیری اشاره نمود. در الگوریتم ایمنی مصنوعی، جهش به عنوان تنها و مهمترین عملگر تغییر به صورت موثر عمل می‌کند که از آن به ابرجهش یاد می‌شود و به صورت احتمالی، با نسبت قربات (نژدیکی) میان آنتی‌بادی و آنتی‌ژن استفاده می‌شود. جمعیت با نسبت قربات بالا کمترین نرخ جهش و آنتی‌بادی‌های با قربات پایین، نرخ جهش بالا را متتحمل می‌شود. بنابراین در الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی جهش به عنوان تنها و مهمترین عملگر باستی صورت خیلی موثری عمل نماید [۱۴].

### ۳. سیستم‌های فازی

منطق فازی، به عنوان مفهوم جدیدی در مقابل روش‌های متداوی برای طراحی و مدلسازی سیستم‌های مبتنی بر ریاضیات و احتمالات پیشرفت‌هه و پیچیده به کار می‌رود. در طراحی سیستم فازی از مقادیر و قوانین مبتنی بر متغیرهای زبانی یا به عبارت دیگر از داشت فرد خبره استفاده می‌شود. سیستم‌های کنترل مبتنی بر منطق فازی تعمیمی از منطق بولی محسوب می‌شوند. از آنجا که در منطق سنتی هر چیزی به صورت دودویی (۰ یا ۱) بیان می‌شود، بنابراین در منطق فازی، گزاره‌های صحیح بولی با درجه‌ای از درستی بیان می‌شوند.تابع عضویت در مجموعه فازی چگونگی نگاشت هریک از نقاط فضا به درجه عضویت که مقداری بین ۰ تا ۱ می‌باشد، را مشخص می‌کند. در سیستم‌های فازی به مرحله پردازش، موتور استنتاج گفته می‌شود که براساس مجموعه‌ای از قوانین فازی به صورت **IF-THEN** عمل می‌کنند. برای استنتاج دو شیوه عمدۀ به صورت مدل استنتاج فازی ممدادی و استنتاج فازی تاکاگی سوگنو وجود دارد. این دو روش در فازی‌سازی ورودی‌ها و عملگرهای فازی یکسان هستند اما از نظر خروجی، متفاوت عمل می‌کنند. در روش استنتاج فازی ممدادی، خروجی به صورت توابع عضویت مجموعه فازی مورد نظر است اما در روش استنتاج تاکاگی سوگنو خروجی عضو تابعی به صورت خطی یا ثابت می‌باشد [۱۹]. در روش پیشنهادی که در بخش بعدی معرفی شده است از روش استنتاج فازی ممدادی بهره برده شده است.

### ۴. روش پیشنهادی: سیستم ایمنی مصنوعی فازی

در این بخش روش پیشنهادی برای بهبود الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی شرح داده شده است. پیشنهاد ما برای بهبود الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی، تنظیم مقدار تغییرات نرخ جهش توسط قوانین فازی است. نرخ جهش در الگوریتم استاندارد و برخی از نسخه‌های گسترش یافته همواره ثابت انگاشته شده و معمولاً با عکس میزان قربات به صورت تطبیقی صورت می‌پذیرد. چنانچه گفته شد در موقعي که میزان قربات آنتی‌بادی‌ها نسبت به حافظه (قربات بهترین آنتی‌بادی‌ها) از مقدار بالایی برخوردار نیست، بایستی از مقادیر بالا برای جهش استفاده نمود و به طور مشابه در زمانیکه میزان قربات آنتی‌بادی‌ها نسبت به حافظه (میزان قربات بهترین آنتی‌بادی‌ها) از مقدار پایینی برخوردار است بایستی از مقادیر پایین برای جهش استفاده شود. در روش پیشنهادی برای مشخص نمودن کیفیت مقدار قربات آنتی‌بادی‌ها از میزان تعلق مقدار قربات آنتی‌بادی به مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. در ایجاد قوانین مورد نظر از مقادیر بیشینه و کمینه آنتی‌بادی‌های موجود استفاده می‌شود که باعث پویایی دامنه توابع عضویت در روند تکامل نیز خواهد بود. ساختار کلی سیستم استنتاج فازی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم استنتاج فازی پیشنهادی

برای سیستم استنتاج فازی پیشنهادی، ۵ مجموعه فازی برای کیفیت مقدار قربات آنتی‌بادی در نظر گرفته شده است که به ترتیب به صورت "خیلی کم"، "کم"، "متوسط"، "زیاد" و "خیلی زیاد" تعریف شده‌اند. با توجه به موارد یاد شده می‌توان ۵ قانون مختلف را در نظر گرفت که با افزایش مقدار قربات آنتی‌بادی‌ها، نرخ تغییرات جهش کاهش یافته و به عبارت دیگر، رفته رفته از میزان جستجوی سراسری کم شده و جستجوی محلی افزایش یابد. مجموعه قوانین فازی در فرآیند فازی‌سازی ورودی‌ها و غیرفازی‌سازی خروجی‌ها به صورت یکسانی انتخاب و به عنوان (VERY LOW, LOW, MEDIUM, HIGH, VERY HIGH) تعریف شده‌اند که در جدول ۱ لیست شده است. همچنین توابع عضویت به صورت مثالی در نظر گرفته شده است. و برای غیرفازی‌سازی از روش میانگین مراکز استفاده شده است.

جدول ۱: قوانین فازی اگر-آنگاه پیشنهادی

Rules	Input (Affinity)	Output (Pm)
I	Very Low	Very High
II	Low	High
III	Medium	Medium
IV	High	Low
V	Very High	Very Low

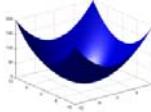
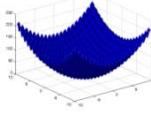
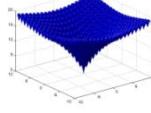
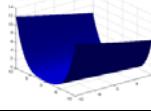
حال با توجه به قوانین مذکور می‌توان الگوریتم پیشنهادی را به صورت مراحل زیر در نظر گرفت:

۱. مقداردهی اولیه آنتی‌بادی‌ها
۲. محاسبه میزان قربات آنتی‌بادی‌ها
۳. انتخاب بهترین آنتی‌بادی‌ها و تولید همزاد
۴. مشخص کردن مقادیر قربات بیشینه/کمینه و اعمال قوانین فازی
۵. محاسبه نرخ ابرجهش جدید با استفاده از غیرفازی‌سازی
۶. جهش آنتی‌بادی‌ها با توجه به مقدار جدید نرخ ابرجهش
۷. روز رسانی آنتی‌بادی‌های حافظه با بهترین آنتی‌بادی‌های حاصله (در هر گروه به طور مجزا)
۸. جایگزینی آنتی‌بادی‌های ضعیف با آنتی‌بادی‌های جدید (حذف قسمتی از آنتی‌بادی‌های با شایستگی پایین و متراکم)
۹. ادامه مراحل بالا (۲ تا ۹) تا رسیدن به شرایط توقف مورد نظر

## ۵. نتایج آزمایشات

جهت ارزیابی روش پیشنهادی آزمایشات بر روی چهارتابع محک استاندارد صورت گرفته است. توابع استفاده شده عبارتند از توابع اسفر، رستریجین، آکلی و روزنبرک که به ترتیب در جدول ۲ آرائه شده‌اند [۱۸].

جدول ۲: توابع محک استاندارد برای آزمایشات

نمودار	بازه	ضابطه تابع
	[-5.12, 5.12]^n	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$
	[-5.12, 5.12]^n	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$
	[-32, 32]^n	$f_3(x) = 20 + e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)}$
	[-30, 30]^n	$f_4(x) = \sum_{i=1}^{n-1} (100(x_{i+1} - x_i)^2 + (x_i - 1)^2)$

در میان این توابع دو تابع اسفر و روزنبرک به صورت توابع یک و چهاری (تک بهینه) و توابع رستریجین و آکلی به صورت توابع چند وجهی (چند بهینه) شناخته می‌شوند. این توابع همگی دارای بهینه سراسری با مقدار ۰ هستند. اندازه جمعیت اولیه و تعداد گام‌ها به ترتیب ۲۰ و ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. از مقدار بهترین نتایج برای مقایسه روش‌های الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی استاندارد با عنوان SAIS [۲۲]، الگوریتم سلول BCA با عنوان BCA [۲۳]، الگوریتم گرینش همزاد با عنوان CSA [۲۴]، الگوریتم گرینش همزاد تطبیقی با عنوان ACSA [۱۶]، الگوریتم ژنتیک استاندارد با عنوان SGA [۴]، شبیه‌سازی حرارت با عنوان SA [۲]، و سیستم ایمنی مصنوعی فازی با عنوان FAIS استفاده شده است. همچنین به منظور مقایسه تأثیر تعداد قوانین فازی بر اجرای الگوریتم، دو حالت با ۲ قانون فازی با عنوان FAIS\_2 و ۵ قانون فازی با عنوان FAIS\_5 در نظر گرفته شده است.

بعاد توابع مورد آزمایش به صورت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بعدی در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده با توجه به میانگین ۱۰ بار اجرای الگوریتم بدست آمده است. نتایج این آزمایشات با توجه شرایط مذکور در مقایسه با دیگر روش‌ها به ترتیب در جداول ۳ تا ۶ برای اسفر، رستربیجن، آکلی و روزنبرک ارائه شده است. مقادیر مطلوب برای جدول به صورت ضخیم مشخص شده است.

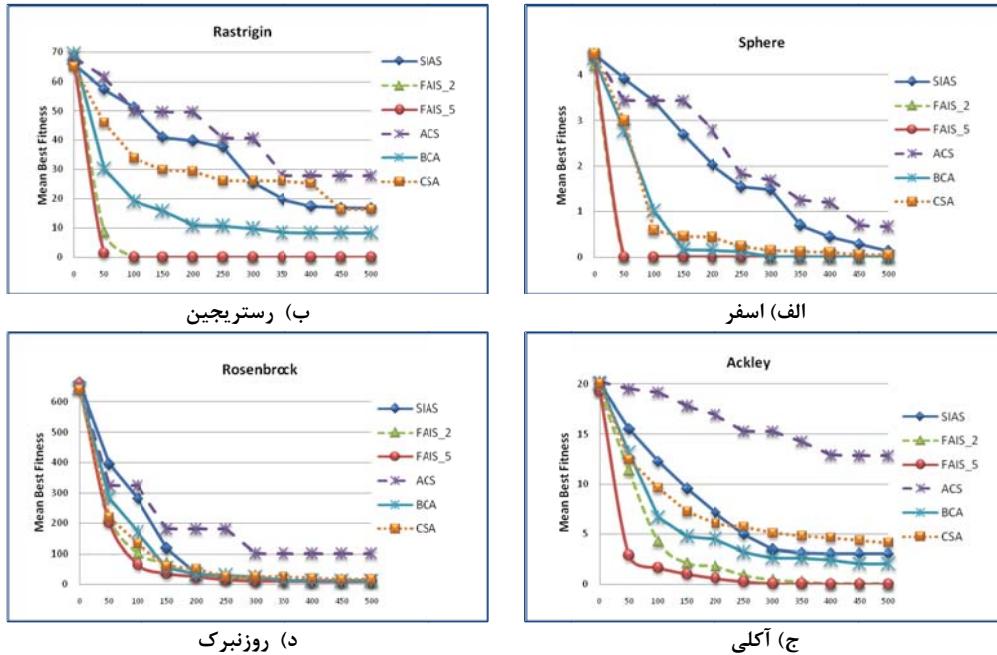
جدول ۴: نتایج روش پیشنهادی والگوریتم‌های دیگر برای تابع رستربیجن

بعاد				الگوریتم
بهترین (بعد ۳۰)	بهترین (بعد ۲۰)	بهترین (بعد ۱۰)	بعاد	
209.3208	82.8412	16.6121	SAIS	
60.9751	37.2728	8.3351	BCA	
129.8958	43.2896	16.1973	CSA	
1.69879	6.3786	2.1654	SGA	
1.7506	7.2951	8.6157	SA	
5.93e-11	6.29e-13	5.72e-15	FAIS_2	
<b>8.86e-12</b>	<b>4.75e-14</b>	<b>3.54e-15</b>	<b>FAIS_5</b>	

جدول ۵: نتایج روش پیشنهادی والگوریتم‌های دیگر برای تابع آکلی

بعاد				الگوریتم
بهترین (بعد ۳۰)	بهترین (بعد ۲۰)	بهترین (بعد ۱۰)	بعاد	
3.7199	1.1706	1.35e-01	SAIS	
2.2165	1.6721	2.56e-03	BCA	
3.0241	2.6723	5.29e-02	CSA	
9.10e-2	2.19e-03	1.19e-04	SGA	
7.1849	1.2278	0.1115	SA	
8.68e-52	5.73e-58	1.83e-74	FAIS_2	
<b>2.64e-78</b>	<b>3.86e-83</b>	<b>1.24e-89</b>	<b>FAIS_5</b>	

به جهت مقایسه‌ی بهتر روش پیشنهادی و روش‌های مذکور در ادامه در شکل ۲ نیز نمودار مقدار تابع شایستگی برای حالت ۱۰ بعدی با میانگین ۱۰ بار اجرا نمایش داده شده است.



شکل ۲: نموار مقایسه میزان شایستگی روش‌های مختلف و پیشنهادی برای تابع استاندارد

چنانچه از نتایج جداول و نمودارها مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی تحت عنوان سیستم اینمنی مصنوعی فازی ضمن برخورداری از بازخورد نتایج، نرخ ابرجهش را با توجه به قوانین فازی مشخص شده تغییر می‌دهد. این ویژگی رفتار متناسب‌تری را در اجرای الگوریتم به وجود آورده و با اعمال قوانین فازی در ابتدا جستجوی سراسری بیشتر و در ادامه تکامل کاهش یافته و به صورت محلی پیگیری می‌شود. همچنین با بررسی نتایج حاصله می‌توان به این مهم دست یافت که با افزایش ابعاد فضای جستجو، نتایج بدست آمده بهتر از الگوریتم‌های دیگر عمل می‌کند.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای بهبود الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی با استفاده از سیستم استنتاج فازی ارائه شد. در کلیه روش‌های مبتنی بر سیستم ایمنی مصنوعی نرخ تغییرات جهش، به عنوان تنها و مهمترین عامل‌گر تکاملی ثابت بوده و با توجه به عکس مقدار قربات میان آنتی‌بادی‌ها صورت می‌پذیرد. در روش پیشنهادی قوانین فازی با توجه به بازخورد تغییرات کیفیت آنتی‌بادی‌ها و مقدار قربات میان آنتی‌بادی‌ها، نرخ تغییرات جهش را به خوبی بهنگام می‌کند. در واقع سیستم استنتاج فازی استفاده شده موازنی‌ای میان جستجوی سراسری و محلی برقرار می‌کند. نتایج آزمایشات حاکی از موقوفیت روش پیشنهادی در بهبود نتایج در ابعاد بالا می‌باشد. همچنین کارایی الگوریتم پیشنهادی با افزایش ابعاد نیز در مقایسه با دیگر روش‌ها به خوبی مشاهده گردید.

## مراجع

- [1] N. Leandro and J. T de Castro, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*, Springer Verlag, 2002.
- [2] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, *Optimization by Simulate Annealing*, Science, Vol. 220, Pp. 671-680, 1983.
- [3] H. He, F. Qian, and W. Du, *A Chaotic Immune Algorithm with Fuzzy Adaptive Parameters*, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Vol. 3, No. 6, Pp.695-705, 2008.
- [4] David B Fogel, and Zbigniew Michalwicz, *Evolutionary Computation 1 - Basic Algorithms and Operators*, Bristol, UK, Institute of Physics (IoP) Publishing, 2000.
- [5] V. Cutello et al., *Clonal Selection Algorithm with Dynamic Population Size for Bimodal Search Spaces*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4221, Pp. 949, 2006.
- [6] L. Liu, Z. Cai, and H. Chen, *Immunity Clone Algorithm With Particle Swarm Evolution*, Journal of Central South University of Technology Vol. 13, No. 6, Pp. 703-706, 2006.
- [7] V. Cutello, G. Nicosia, and M. Pavone, *A Hybrid Immune Algorithm with Information Gain For The Graph Coloring Problem*, Lecture Notes in Computer Science, Pp. 171-182, 2003.
- [8] M. O. Hong-wei and J. I. N. Hong-zhang, *The Modified Immune Diversity Algorithm Used In Function Optimization*, Journal of Harbin Engineering University, 2004.
- [9] Z. H Zhang and X. Y Huang, *Novel Immune Algorithm and Its Application to Multi-Modal Function Optimization*, Kongzhi Lilun yu Yingyong , Vol. 21, No. 1, Pp. 17-21, 2004.
- [10] Maoguo Gong , Licheng Jiao, Xiangrong Zhang, *A Population-based Artificial Immune System for Numerical Optimization*, Neurocomputing, Vol. 72, No. 1-3, Pp. 149-161, Dec. 2008.
- [11] M. Li and J. Kou, *Crowding With Nearest Neighbors Replacement for Multiple Species Niching and Building Blocks Preservation in Binary Multimodal Functions Optimization*, Journal of Heuristics, Vol. 14, No. 3, Pp. 243-270, 2008.
- [12] R. Javadzadeh, M. R. Meybodi, , *Memetic Artificial Immune Systems*, Proceedings of The Third Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, University of Yazd, Yazd, Iran, 15-17 July 2009.
- [13] A. Rezvanian, M. R. Meybodi, *A New Method for Function Optimization using Artificial Immune System and Learning Automata*, Proceedings of The Third Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, University of Yazd, Yazd, Iran, 15-17 July 2009.
- [14] J. Timmis, A. Hone, T. Stibor, E. Clark, *Theoretical Advances in Artificial Immune Systems*, Theoretical Computer Science, Vol. 403, No. 1, Pp. 11-32, 2008.
- [15] Dipankar Dasgupta, *Artificial Immune Systems and their Applications*. Springer Verlag, 1998.
- [16] Simon M. Garrett, *Parameter-Free, Adaptive Clonal Selection*, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computing (CEC 2004), Portland Oregon, USA, 2004.
- [17] Dai Yongshou, Li Yuanyuan, Wei Lei, Wang Junling & Zheng Deling, *Adaptive Immune-Genetic Algorithm for Global Optimization to Multivariable Function*, Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol. 18, No. 3, Pp.655-660, 2007.
- [18] A. Rezvanian, M. R. Meybodi, *A New Hybrid Optimization Method (Cooperative Artificial Immune System + Learning Automata)*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> Annual CSI Computer Conference (CSICC'10), Tehran, Iran, Feb. 20-22, 2010.
- [19] M. H. Noroozi Beyrami, and M. R. Meybodi, *Improving Particle Swarm Optimization using Fuzzy Logic*, Proceedings of the Second Iranian Data Mining Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 11-12 Nov. 2008.
- [20] R. Javadzadeh, M. R. Meybodi, *A New Hybrid Optimization Method (Artificial Immune System + CLA)*, Proceedings of the 15th Annual CSI Computer Conference (CSICC'10), Tehran, Iran, 20-22 Feb. 2010.
- [21] G. Nicosia, S. Rinaudo, and E. Sciacca, *An Evolutionary Algorithm-Based Approach to Robust Analog Circuit Design Using Constrained Multi-Objective Optimization*, Knowledge-Based Systems, 2007.
- [22] Vincenzo Cutello and Giuseppe Nicosia, *The Clonal Selection Principle for In Silico and In Vivo Computing*, Recent Developments in Biologically Inspired Computing. Hershey, London, Melbourne, Singapore: Idea Group Publishing, 2005.
- [23] J. Timmis, C. Edmonds, J. Kelsey, *Assessing the Performance of Two Immune Inspired Algorithms and a Hybrid Genetic Algorithm for Function Optimisation*, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2004), Portland, Oregon, USA, 2004.
- [24] L. N. de Castro and F. J. van Zuben, *Learning and Optimization using the Clonal Selection Principle*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volume 6, No. 3, Pp. 239-251, June 2002.

علیرضا رضوانیان<sup>\*</sup>، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان  
آدرس پست الکترونیکی: rezvan@iauh.ac.ir

محمد رضا میبدی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران  
آدرس پست الکترونیکی: mmeybodi@aut.ac.ir