



مدل ترکیبی مبتنی بر سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی و کاربرد آنها در مسائل بهینه‌سازی

رامین جوادزاده^۱، محمدرضا میدی^۲

دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد

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 اینمنی مصنوعی از جمله متاهیورستیک‌هایی هستند که در مسائل بهینه‌سازی، خوشبندی اطلاعات و شناسایی الگو کاربرد فراوان دارند. این الگوریتم‌ها در مسائل بهینه‌سازی که بیش از یک نقطه مورد نظر است نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهند. از اشکالات عده این الگوریتم‌ها می‌توان به همگرایی کند به بهینه سراسری و عدم پایداری در اجرای مختلف اشاره نمود. هدف از ارائه مدل ترکیبی سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی (CA-AIS) محلی کردن ارتباط بین آنتی‌بادی‌ها به منظور تعیین کارای پارامترهای اساسی این الگوریتم بر اساس ارزیابی محلی می‌باشد که علاوه بر سرعت برشیدن به محاسبات می‌تواند باعث بهبود کیفیت نتایج بدست آمده گردد. در این مدل ترکیبی برای در نظر گرفتن خاصیت محلی برای آنتی‌بادی‌ها از مقاومیت اتوماتای سلولی 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 اینمنی مصنوعی نتیجه می‌دهد.

کلمات کلیدی:

اتوماتای سلولی، بهینه‌سازی، سیستم اینمنی مصنوعی

مقدمه

الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی از جمله متاهیورستیک‌هایی هستند که در مسائل بهینه‌سازی، خوشبندی اطلاعات و شناسایی الگو کاربرد فراوان دارند. این الگوریتم‌ها در گروه الگوریتم‌های بهینه سازی اتفاقی قرار دارند که در آنها از قوانین موجود در سیستم اینمنی بیولوژیکی بمنظور بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها معمولاً برای حل مسائل بهینه‌سازی پارامتری که سایر روش‌های کلاسیک از حل آنها عاجزند مورد استفاده قرار می‌گیرند. الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی کلاسیک به دلیل سادگی و عدم نیاز به معادلات دیفرانسیل پیچیده در حل مسائل بهینه‌سازی با فضای

جستجوی غیر هموار مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بهینه‌سازی مسائلی که بیش از یک نقطه بهینه مورد نظر است نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهند. این الگوریتم‌ها بر پایه انتخاب کلونی و جهش آنتی‌بادی‌ها کار می‌کنند. بهترین جواب‌های تولید شده در هر دوره الگوریتم با نام آنتی‌بادی حافظه شناخته می‌شود که ترکیبی از متغیرهای مساله هستند [۱-۵].

رفتار الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی وابستگی شدیدی به پارامترهایی از جمله نحوه تعریف و احتمال عملگرهای جهش، اندازه کلونی ایجاد شده برای

سیستم اینمنی مصنوعی ۱-۱- سیستم اینمنی بیولوژیکی

سیستم اینمنی از سلول‌ها، مولکول‌ها و قوانینی تشکیل شده است که از آسیب رساندن عواملی همچون پاتوژنها به بدن میزان جلوگیری می‌نماید. سیستم اینمنی شامل دو شاخه اصلی سیستم اینمنی داخلی و تطبیقی می‌باشد. سیستم اینمنی داخلی، مکانیزمی غیرقابل تغییر است که ارگان‌های مهاجم مشخصی را شناسایی و نابود می‌کند در حالیکه سیستم اینمنی تطبیقی نسبت به سلول‌های بیگانه و ناشناخته پاسخ می‌دهد و این پاسخ به آن‌ها می‌تواند برای مدت طولانی در بدن باقی بماند. سیستم اینمنی برای داشتن عملکردی صحیح باید بتواند بین سلول‌های خودی و سلول‌های بیگانه خارجی و غیرخودی تمایز قائل شود که این پروسه تمایز خودی از غیر خودی^۱ نامیده می‌شود. آن سلول‌هایی که بعنوان خودی شناخته می‌شوند پاسخ سیستم اینمنی را فعال نمی‌کنند در حالیکه دیگر سلول‌ها که با نام پاتوژن شناخته می‌شوند باعث فعال شدن پاسخ سیستم اینمنی خواهند شد. آنتیزن قسمتی از پاتوژن است که توسط سیستم اینمنی شناسایی می‌شود. لفوسیت‌ها دسته‌ای از سلول‌های اینمنی هستند که پاتوژن را شناسایی و نابود می‌نمایند و شامل دو گروه سلول‌های B و سلول‌های T می‌باشند که هر کدام دارای ساختار و عملکردی متفاوت هستند. سلول‌های B آنتیبادی تولید می‌نمایند و با اتصال به آنتیزن‌ها مقدمات از بین رفتن پاتوژن را فراهم می‌نمایند در حالیکه دسته‌ای از سلول‌های T باعث تحریک سلول‌های B برای تولید آنتیبادی می‌شوند و دسته‌ای دیگر با همکاری دیگر سلول‌های سیستم اینمنی پاتوژن‌های شناسایی شده را از بین می‌برند^[۲].

پس از شناسایی آنتیزن، سلول‌های B شروع به تولید و تکثیر آنتیبادی می‌نمایند. از بین سلول‌های شناساگر تولید شده، دسته‌ای بعنوان سلول‌های حافظه انتخاب و نگهداری می‌شود تا در برخوردهای بعدی با آنتیزن‌های همانند و یا با ساختاری مشابه پاسخ سریعتر و قویتر سیستم اینمنی حاصل شود. در سیستم اینمنی

هرآنتیبادی، اندازه جمعیت و تعداد دوره‌های تولید شده دارد. تعریف نامناسب این پارامترها باعث به دام افتادن الگوریتم در نقاط بھینه محلی می‌شود به منظور رفع این مشکل با استفاده از مفاهیم اتوماتای سلولی و همسایگی-های مطرح در آن، عملگرهای سیستم اینمنی مصنوعی بومی‌سازی شده‌اند. همچنین بکارگیری مفاهیم اتوماتای سلولی تلاشی در جهت پیاده سازی محاسبات موازی در الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی بوجود خواهد آورد.

در الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی هر آنتی-بادی می‌تواند با هر آنتیبادی دیگر ارتباط داشته و ساختار ارتباطی به صورت یک گراف کامل می‌باشد. با توجه به مساله ارتباطات محلی بین کروموزومها در الگوریتم‌های ژنتیکی و بهبودهای قابل توجه در این زمینه^[۶] در این مقاله نیز از ایده سازنده آن استفاده شده و در این راهکار بکار رفته است. بنابراین مساله ارتباطات محلی بین آنتی-بادی‌ها در الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی در این مقاله مطرح شده است. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد مساله محلی کردن ارتباطات علاوه بر ساده سازی محاسبات موازی می‌تواند سبب افزایش کیفیت جواب الگوریتم گردد^[۷-۱۰]. مدلی که با استفاده از آن فرایند محلی سازی عملگرهای سیستم اینمنی و ارتباط بین آنتی-بادی‌ها صورت پذیرفته است، مدل ترکیبی سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی می‌باشد. مدل ترکیبی سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی که از ترکیب الگوریتم‌های سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی حاصل شده است به دلیل ماهیت توزیع شدگی براحتی بر روی پردازندۀ‌های موازی قابل پیاده‌سازی است^[۱۱].

در این مقاله در ابتدا مرور مختصری بر سیستم اینمنی مصنوعی خواهد شد. در بخش سوم اتوماتای سلولی بررسی می‌شود. بخش چهارم به معرفی مدل ترکیبی سیستم اینمنی مصنوعی و اتوماتای سلولی اختصاص پیدا کرده است و در بخش پنجم به اعتبار سنجی مدل ارائه شده پرداخته شده و بخش نهایی مقاله نیز نتیجه گیری می‌باشد.



خود را با در نظر گرفتن همسایه‌های مجاور خود بdstت می‌آورد.

قوانين اتوماتای سلوی، نحوه تأثیر پذیرفتن سلوی از سلوهای همسایه خود را مشخص می‌کند. یک سلوی، همسایه سلوی دیگر گفته می‌شود هرگاه بتواند آن را در یک مرحله و براساس قانون حاکم تحت تأثیر قرار دهد.

تعریف رسمی اتوماتای سلوی به صورت زیر است.

اتوماتای سلوی d بعدی یک چندتایی

$$CA = (Z^d, \phi, N, F)$$

Z^d یک شبکه از d تایی‌های مرتب از اعداد صحیح می‌باشد.

$\{1, \dots, m\} = \phi$ یک مجموعه متناهی از حالتها می‌باشد.

$N = \{\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m\} \in Z^d$ ، یک زیر مجموعه متناهی از Z^d می‌باشد که بردار همسایگی خوانده می‌شود. بردار همسایگی، موقعیت نسبی همسایگان را برای هر سلوی u در شبکه سلوی بر اساس رابطه ۱ مشخص می‌کند:

$$N(u) = \{u + \bar{x}_i \mid i = 1, \dots, m\} \quad (1)$$

تابع $N(u)$ دو شرط زیر را ارضاء می‌کند(رابطه ۲):

$$\forall u \in Z^d \Rightarrow u \in N(u) \quad (2)$$

$$\forall u, v \in Z^d \Rightarrow u \in N(v) \wedge v \in N(u)$$

$\phi \rightarrow \underline{\phi}^m : CA$ قانون محلی F می‌باشد.

دو نمونه از همسایگی‌های معروف در اتوماتای سلوی در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای اطلاعات بیشتر درباره اتوماتای سلوی می‌توان به [۱۲] و [۷] مراجعه نمود.

سلول‌ها از طریق تقسیم سلوی تکثیر می‌شوند و در تولید سلوهای جدید فرایند آمیزش^۲ نقشی ندارد به همین دلیل تمام سلوهای تولید شده ساختاری کاملاً مشابه با سلوهای والد خود دارند اما هر سلوی با توجه به میزان شباهت^۳ با آنتیژن تحت تاثیر عملگر جهش قرار می‌گیرد در اینصورت هر چه میزان شباهت با آنتیژن کمتر باشد سلوی با شدت بیشتری تغییر خواهد کرد. همچنین در این روند تعداد سلوهایی که هر سلوی می‌تواند تولید کند نیز به میزان شباهت با آنتیژن بستگی دارد هر چه میزان شباهت با آنتیژن بیشتر باشد سلوی والد می‌تواند سلوهای بیشتری تولید نماید. مراحل انتخاب و جهش، تکامل وابستگی^۴ نامیده می‌شود [۱۲].

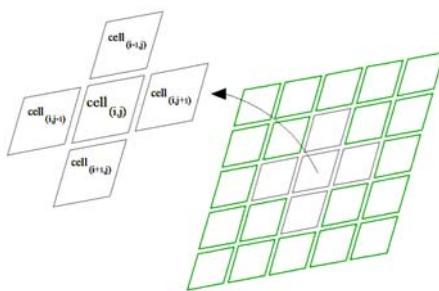
۲-۱- سیستم ایمنی مصنوعی

به منظور ساده سازی در بیشتر کاربردها در سیستم ایمنی مصنوعی از سلوهای B و T بعنوان یک مجموعه واحد یاد می‌شود. از جمله الگوریتم‌های سیستم ایمنی که برای مسائل بهینه‌سازی تطبیق یافته‌اند می‌توان به الگوریتم ClonalG و opt-aiNet اشاره نمود همچنین الگوریتم aiNet در دسته الگوریتم‌های خوشبندی قرار دارد. کاسترو^۵ و تمیس^۶ الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی را در دو دسته مبتنی بر جمعیت^۷ و مبتنی بر شبکه^۸ تقسیم بندی نموده‌اند که بر این اساس انتخاب منفی و کلونی را در دسته اول و مدل شبکه ایمنی را در دو دسته شبکه پیوسته و گسسته در دسته دوم قرار داده‌اند [۱].

اتوماتای سلوی

اتوماتای سلوی^۹ به عنوان مدلی برای بررسی رفتار سیستم‌های پیچیده پیشنهاد شد. اتوماتای سلوی در حقیقت سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای هستند که رفتارشان کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. در اتوماتای سلوی، فضا بصورت یک شبکه تعریف می‌گردد که به هر خانه آن یک سلوی گفته می‌شود. زمان بصورت گسسته پیش می‌رود و قوانین آن بصورت سرتاسری است که از طریق آن در هر مرحله هر سلوی، وضعیت جدید

همسایگی مطرح شده در اتماتای سلولی با تعامل با همسایگان و محلی شدن عملگرهای سیستم ایمنی مصنوعی به تکامل می‌رسند. منظور از محلی کردن عملگرهای سیستم ایمنی مصنوعی، سازگار نمودن عملکرد ساخت کلونی در تعیین مناسب و کارای اندازه کلونی براساس همسایگی تعریف شده برای آنتی‌بادی مورد پردازش و همچنین در عملگر جهش نیز تعیین مناسب نرخ جهش در محدوده همسایگی تعریف شده می‌باشد. پارامترهای تاثیر گذار در اندازه کلونی مربوط به هر آنتی‌بادی، میزان شایستگی نسبت به آنتی‌بادی‌های همسایه بعلاوه نوع و شعاع همسایگی تعریف شده می‌باشد. در عملگر جهش نیز پارامترهای تاثیر گذار در میزان باشند. در عملگر جهش، میزان عکس شایستگی نسبت به آنتی‌عملگر جهش، میزان عکس شایستگی از همسایگی و نیومن باشند. در این مدل ترکیبی، از همسایگی و نیومن با شعاع همسایگی یک و ساختار دو بعدی شبکه سلولی در شبیه‌سازی‌ها بهره گرفته شده است (شکل ۲). در الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی استاندارد در هر تکرار، هر آنتی‌بادی در جمعیت آنتی‌بادی‌ها با توجه به میزان شایستگی خود نسبت به شایستگی دیگر آنتی‌بادی‌های جمعیت، کلونی شده و به تناسبی به میزان عکس شایستگی، عملگر جهش بر روی آن تاثیر می‌گذارد. اما در روش ترکیبی پیشنهاد شده آنتی‌بادی‌های واقع در هر سلول شبکه سلولی بر اساس میزان شایستگی در بین آنتی‌بادی‌های مجاور خود تحت تاثیر عملگرهای سیستم ایمنی مصنوعی قرار می‌گیرند.



شکل ۲: همسایگی و نیومن با شعاع همسایگی یک در شبکه سلولی دو بعدی در مدل ترکیبی CA-AIS
نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج شبیه‌سازی سیستم ایمنی

(-1,-1)	(0,1)	(1,1)
(-1,0)	(0,0)	(1,0)
(-1,+1)	(0,+1)	(1,+1)

(-1,-1)	(0,0)	(1,1)
(0,-1)	(0,0)	(1,0)
(0,+1)	(0,+1)	(1,+1)

(الف) (ب)

شکل ۱: (الف) همسایگی و نیومن - (ب) همسایگی مور

مدل ترکیبی سیستم ایمنی مصنوعی و اتماتای سلولی

این مدل از ترکیب الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی و اتماتای سلولی حاصل شده است. در مدل پیشنهاد شده جمعیت آنتی‌بادی‌ها بر روی یک شبکه سلولی منطبق است، به نحوی که هر آنتی‌بادی در یک سلول قرار می‌گیرد. به این مدل هم می‌توان به دید یک اتماتای سلولی و هم بعنوانیک سیستم ایمنی مصنوعی نگریست. آنتی‌بادی‌ها در این مدل محاسباتی به صورت همزمان و از طریق تعامل با همسایگان خود کلونی شده و تکامل می‌یابند. هر سلول در اتماتای سلولی دارای تعدادی زن در قالب آنتی‌بادی است که نمایش دهنده یک جواب ممکن برای مساله مورد مطالعه می‌باشد. از طرف دیگر زن‌ها معرف حالت سلول در اتماتای سلولی هستند. حالت بعدی اتماتای سلولی با کمک قوانین اتماتای سلولی که قوانین ایجاد کلونی و جهش می‌باشد تولید می‌گردد. در جدول ۱ مفاهیم استفاده شده در این مدل و الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی مقایسه شده‌اند. هدف از ارائه این مدل استفاده از مفاهیم اتماتای سلولی است تا نرخ جهش و اندازه کلونی بطور مناسب و کارا انتخاب شود. همچنین با استفاده از مفاهیم توزیعی و توازنی اتماتای سلولی، می‌توان محاسبات را در این مدل پیشنهادی بصورت موازی انجام داد.

جدول ۱: تشابه و تفاوت بین الگوریتم مدل ترکیبی CA-AIS و

الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی کلاسیک

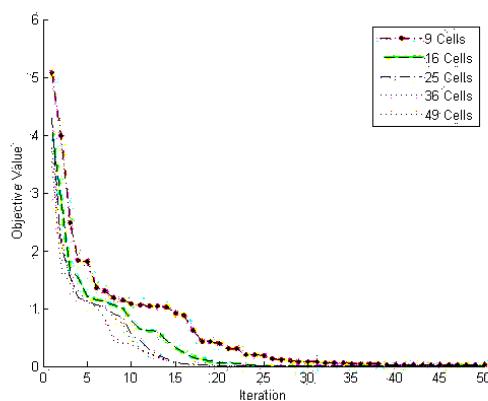
AIS	CA-AIS-
آنتی‌بادی	سلول
شبکه سلول‌ها	کلونی آنتی‌بادی
حالات سلول	مقدار زن آنتی‌بادی
عملگر سیستم ایمنی	عملگر سیستم ایمنی

همانطور که مشاهده شد در این مدل، آنتی‌بادی‌ها بر اساس

تعداد سلول‌ها، روند همگرایی به بهینه سراسری شتاب بخشیده می‌شود. اما تا حدی افزایش تعداد سلول‌ها می‌تواند بر سرعت همگرایی بیافزاید و با افزایش تعداد سلول‌ها از تعداد ۳۶ سلول، تاثیر چشمگیری در سرعت رسیدن به بهینه سراسری مشاهده نمی‌شود و با توجه به حجم محاسبات کمتر، مدل پیشنهادی با تعداد ۳۶ سلول پیشنهاد می‌شود.

جدول ۲: نتایج مدل CA-AIS

Function	Average	Variance	Best Result
F1	2.176e-009	1.6210e-018	2.2483e-012
F2	50.6920e-015	3.8048e-027	8.4184e-017
F3	1.6544e-010	1.3234e-019	2.8599e-013
F4	5.6090e-011	2.8527e-020	3.5083e-014
F1	3.2156e-002	6.3675e-003	1.3456e-006
F2	9.37.12e-004	3.1952e-006	4.7666e-008
F3	2.3171e-002	5.2671e-003	9.2438e-006
F4	7.2087e-003	3.7544e-004	5.6859e-005



شکل ۳: بهترین مقدار بدست آمده در هر تکرار الگوریتم (تابع F4)

به منظور مطالعه تاثیر شاعع همسایگی بر کارایی مدل پیشنهادی چندین شبیه‌سازی با شاعع همسایگی ۱ تا ۴ انجام شده است که نتایج آن در تابع F4 در شکل ۴ ارائه

مصنوعی مبتنی بر اتوماتای سلولی CA-AIS برای چهار تابع محک استاندارد (روابط ۳ تا ۶) به ازای کیفیت جواب بدست آمده در مقابل الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی استاندارد مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارزیابی راه-کار پیشنهادی توابع مورد آزمایش بصورت سی بعدی و آنتی‌بادی‌ها بصورت اعداد حقیقی کدگذاری شده‌اند و راه-کار پیشنهادی با ۱۰۰ تکرار برای بدست آوردن پاسخ بهینه مورد آزمون قرار گرفته شده است. با توجه به ماهیت آزمون‌های آماری، پس از سی بار اجرای مکرر به ازای هر تابع، از شاخص‌های بهترین پاسخ و میانگین پاسخ‌ها برای مقایسه کارایی الگوریتم و از شاخص واریانس (که یکی از شاخص‌های پراکندگی است) برای مقایسه پایداری استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از راه‌کار پیشنهادی و الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

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

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

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

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

با توجه به نتایج بدست آمده، براساس جداول ۲ (3) و ۳ می‌توان کارایی راه‌کار پیشنهادی نسبت به الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی را تایید کرد.

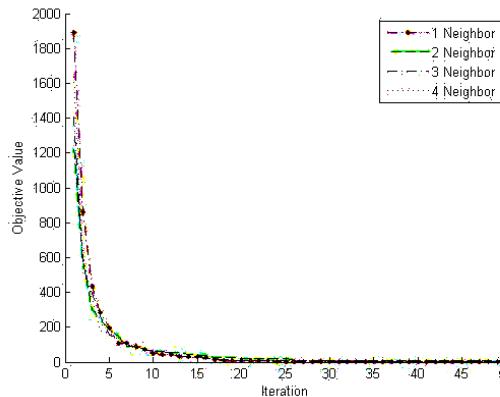
تعداد سلول‌ها، پارامتری مهم است که بر کارایی مدل CA-AIS تاثیر مستقیم دارد. شکل ۳ تاثیر تعداد سلول‌ها را بر سرعت همگرایی مدل پیشنهادی در تابع F4 نشان داده است. هر نقطه نشان داده شده در این تصاویر ارزش بهترین جواب بدست آمده در هر تکرار الگوریتم را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد با افزایش

- مراجع**
- [1] 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.
 - [2] L. N. deCastro and F. J. VonZuben, "aiNet: An Artificial Immune Network for Data Analysis," In Data Mining: A Heuristic Approach, 2001.
 - [3] J. Timmis and C. Edmonds, "A Comment on opt-AiNET: An Immune Network Algorithm for Optimisation," soft computing, vol. 7, 2003.
 - [4] S. Bachmayer, "Artificial Immune Systems," soft computing, vol. 7, pp. 69-86, 2006.
 - [5] J. Timmis, "An Introduction to Artificial Immune Systems," ICARIS, vol. 7, 2004.
 - [6] لسانی، م، میدبی‌مر، "مکانیزم بازچینی برای اتوماتای سلولی ژنتیکی"، دوازدهمین کنفرانس بین المللی انجمن کامپیوتر ایران، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۵.
 - [7] E. Alba and J. Troya, "Cellular Evolutionary Algorithms: Evaluating the Influence of Ratio", Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI, Schoenauer, M. et al. (eds.) Springer Verlag, pp. 29-38, 2000.
 - [8] U. Kohlmorgen and H. Schmeck and K. Haase ,Experiences with Fine-Grained Parallel Genetic Algorithms, Annals of Operations Research, Vol.90, S.203-219, 1999.
 - [9] M. Mitchell and J. Crutchfield and R. Das, "Evolving Cellular Automata with Genetic Algorithms: A Review of recent Work", Proceeding of First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications, EvCA'96, Moscow, Russian Academy of Sciences, 1996.
 - [10] G. Rudolph and J. Sprave, "A Cellular Genetic Algorithm with Self-Adjusting Acceptance Threshold", Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications, Russian Academy of Sciences, 1996.
 - [11] M. Lessani and M.R Meybodi, "Genetic Cellular Automata", Technical Report, Computer Engineering Department, Amirkabir University,2004.
 - [12] Cellular Automata Llinks,<http://www.soc.surrey.ac.uk/research/simsoc/ca.htm>.
 - [13] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithm and Engineering Design: Jhon Wiley & Sons, 1997.

زیر نویس‌ها

- 1 Self/Nonself discrimination
- 2 Crossover
- 3 Affinity
- 4 Affinity maturation
- 5 L.N.De Castro
- 6 J.L.Timmis
- 7 Population-based
- 8 Network-based
- 9 Cellular Automata

شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی CA-AIS با شعاع همسایگی ۱ جوابهایی با کیفیتی قابل قبول تولید می‌کند که در مقایسه با دیگر شعاع‌های همسایگی به دلیل حجم محاسبات کمتر به دلیل شعاع همسایگی محدودتر، دارای امتیاز است.



شکل ۴: تأثیر شعاع همسایگی (تابع F4)

نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل ترکیبی AIS-CA به منظور محلی کردن ارتباط بین آنتی‌بادی‌ها در الگوریتم‌های سیستم ایمنی مصنوعی به منظور تعیین کارایی پارامترهای اساسی این الگوریتم ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل پیشنهادی علاوه بر سرعت بخشیدن به محاسبات دارای دقت بیشتری نسبت به الگوریتم استاندارد سیستم ایمنی مصنوعی می‌باشد. اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها نیز نشان داد که این الگوریتم از پایداری بیشتری برخوردار می‌باشد. همچنین به منظور مطالعه تاثیر پارامترها بر روند همگرایی، پارامترهایی همچون تعداد سلول‌های شبکه و شعاع همسایگی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از آن است که با افزایش تعداد سلول‌ها، مدل ترکیبی پیشنهادی با سرعت بالاتری به بهینه سراسری نزدیک می‌شود این در حالی است که در یک شبکه سلولی افزایش شعاع همسایگی تاثیر چشمگیری بر سرعت همگرایی نداشته و اتوماتای سلولی با شعاع همسایگی یک به دلیل حجم محاسبات کمتر از مقبولیت بیشتری برخوردار است.