



## کاربرد اتوماتای سلولی در مدل سازی و تحلیل سیستم های کامپیوتری

محبوبه اخوان اقدام<sup>۱</sup>، صغری شرافت<sup>۲</sup>، صبا قلیزاده انصاری<sup>۳</sup>، علیرضا خلیلیان<sup>۴</sup>

کارشناس نرم افزار، دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشکده فنی شریعتی، تهران، mah.aghdam@gmail.com

کارشناس نرم افزار، دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشکده فنی شریعتی، تهران، sherafat4037@gmail.com

کارشناس نرم افزار، دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشکده فنی شریعتی، تهران، saba.ansari5@gmail.com

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری نرم افزار، دانشگاه اصفهان، اصفهان، khalilian@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یکی از ساده ترین و مفیدترین مدل های محاسباتی تحت عنوان اتوماتای سلولی که برای نمایش ریاضی سیستم های پیچیده به کار می رود، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا حدود هشتاد مقاله انگلیسی و فارسی که در کنفرانس های مختلف داخلی و خارجی ارائه شده، یا در مجلات معتبر علمی به چاپ رسیده بودند، بررسی شد و خلاصه ای از مقاله های منتخب به نگارش درآمد. حاصل مطالعه های انجام شده، کاربردپذیری این مدل محاسباتی مفید را در مدل سازی، شبیه سازی و تحلیل سیستم های کامپیوتری در حوزه های مختلف نشان می دهد.

**کلید واژه:** اتوماتای سلولی، اتوماتای یادگیر، اتوماتای یادگیر سلولی

سلولی می باشد.

### ۱- مقدمه

امروزه در علوم کامپیوتر، ابزارهای مدل سازی مورد توجه قرار می گیرند که بتوانند نتایج را به صورت ملموسی ارائه دهند. در ضمن قابلیت تقسیم شدن به اجزای کوچک تر را نیز داشته باشند تا بتوان دقیق تر و راحت تر آن ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. اتوماتای سلولی این قابلیت ها را داراست. از این ابزار برای ارائه الگوریتم های مختلف در شبکه، پردازش تصویر، شبیه سازی، گراف، داده کاوی و سایر موضوعات مهم و قابل توجه در دنیای کامپیوتر به خصوص در دهه های اخیر استفاده شده است. به علاوه همان طور که اشاره شد با افزودن ویژگی یادگیری، کارایی اتوماتا افزایش یافته و به مرور زمان با سرعت و دقت بیشتری عمل می کند.

علی رغم کاربردهای متنوع اتوماتا و حجم بالای مقالات ارائه شده در این زمینه به خصوص در دانشگاه های داخل، هنوز یک مرجع فارسی خوب و جامع که به طور کامل، تمام مفاهیم مربوطه را مورد بررسی قرار داده و روش های پیشنهاد شده را نیز مرور کند وجود ندارد. هم چنین اگر کسی بخواهد وارد این حوزه تحقیقاتی شود، نیاز به خواندن مقالات متعددی به فارسی و انگلیسی دارد تا با کارهای انجام گرفته در این زمینه آشنا گردد. با توجه به دلایل گفته شده، تهیه ی منبعی کامل برای بررسی مفاهیم و کاربردهای اتوماتا که نشان-

اتوماتای سلولی در اواخر دهه ی ۱۹۴۰ توسط فون نیومن مطرح شد. سپس ریاضی دانی به نام یولام آن را به عنوان مدلی برای بررسی رفتار سیستم های پیچیده پیشنهاد کرد. اتوماتاهای سلولی سیستم های دینامیکی اند که ظرفیت اطلاعاتی پایینی دارند و به همین دلیل برای برخی کاربردها مطلوب نیستند. ظرفیت اطلاعاتی این سیستم ها را می توان به کمک یادگیری افزایش داد. اتوماتای یادگیر اولین بار توسط تستلین در اوایل دهه ی ۱۹۶۰ در شوروی سابق مطرح شد. اتوماتاهای یادگیر در محیطی تصادفی عمل می کنند و قادرند براساس ورودی های دریافت شده از محیط، احتمال انجام عملیات خود را بروز در آورند و از این طریق کارایی خود را بهبود بخشند. با توجه به ویژگی های دو مدل فوق، مدل جدیدی به نام اتوماتای یادگیر سلولی نیز پیشنهاد شده است. در این مدل هر سلول در اتوماتای سلولی مجهز به یک اتوماتای یادگیر است که وضعیت این سلول را مشخص می کند. هر اتوماتای یادگیر، براساس یک الگوریتم یادگیری عمل می کند و در طی زمان یاد می گیرد که از طریق تعامل با محیط چگونه بهترین پاسخ را انتخاب کند. در حالت خاص، مدل جدید رفتار اتوماتای سلولی را از خود نشان می دهد و به همین دلیل اتوماتای یادگیر سلولی دربرگیرنده ی اتوماتای

در سال ۲۰۰۳ روشی براساس اتوماتای یادگیر سلولی برای استخراج ویژگی‌های تصاویر [۹] به ویژه در تصاویر نویزی، بیان شد. از مشخصه‌های روش پیشنهادی توزیعی بودن آن‌هاست که موازی‌سازی آن‌ها را به سادگی امکان‌پذیر می‌سازد. اعمال این الگوریتم سبب می‌شود که تصویر یکنواخت شده و توازن نویز تصویر بازیابی شده به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

در سال ۲۰۰۳ روشی [۱۰] برای رفع نویز در تصاویر با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی پیاده‌سازی شده بر روی یک سیستم قابل بازپیکربندی ارائه شد. سیستم‌های محاسبات قابل بازپیکربندی امکان پیاده‌سازی کاربردها و افزایش کارایی آن‌ها را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از این روش حاکی از کارایی قابل توجه پیاده‌سازی سخت‌افزاری نسبت به پیاده‌سازی نرم‌افزاری است. از مزیت‌های پیاده‌سازی سخت‌افزاری اتوماتای یادگیر سلولی که با قابلیت بازپیکربندی انجام شده، این است که زمان حاصل از اجرای سخت‌افزاری مستقل از بعد اتوماتای یادگیر سلولی است. در حالی که در اجرای نرم‌افزاری به دلیل سریال بودن آن، زمان اجرا به نسبت ابعاد افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۴ مدلی برای تشخیص لبه تصاویر براساس اتوماتای سلولی ارائه شد [44]. در این مدل، متد مقیاس اطلاعات جهت‌دار تصاویر برای مقابله با ماتریس خاکستری تصویر، از طریق ایجاد یک نوع جدیدی از همسایگی با استفاده از اتوماتای سلولی تعریف شد و سپس با کمک یکی از قوانین محلی مناسب اتوماتای سلولی، طراحی شد.

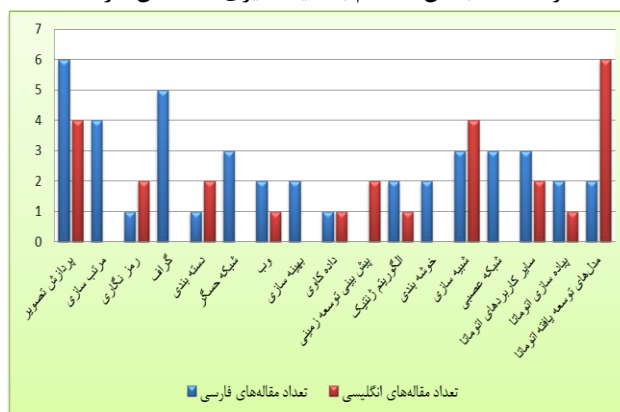
در سال ۲۰۰۶ الگوهایی [47] با استفاده از اتوماتای سلولی احتمالی ایجاد شد که در آن متدهای مبتنی بر احتمال، برای تخمین میزان هدف‌مندی قوانین اتوماتای سلولی در بازسازی الگوهای منظم مشاهده شده در پردازش تصویر، مطرح شدند. این روش دو بخش اصلی دارد: (۱) برآورد پارامترهای پردازش تصادفی اتوماتا، (۲) انتخاب نقشه محلی که شامل همسایگی و قوانین است.

در سال ۲۰۰۷ روشی [۱۹] برای یافتن لبه در تصاویر سیاه و سفید مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی ناهمگام باز ارائه شد و با یکی از روش‌های کلاسیک تشخیص لبه به نام روش کنی، مقایسه گردید. روش ارائه شده، به نویز حساسیت کمی دارد و هم‌چنین سعی می‌کند امتداد لبه‌ها را به‌طور متصل تشخیص دهد. مشخصه دیگر روش جدید، تشخیص لبه‌هایی با پهنای یک نقطه است، در صورتی که برخی روش‌های تشخیص لبه، لبه‌هایی با پهنای بیش از یک نقطه را تشخیص می‌دهند.

در سال ۲۰۰۹ مدل جدیدی از خودکاره یادگیر سلولی ارائه شد [۳۰]، که در آن هر سلول علاوه بر سیگنال تقویتی، ورودی نیز از محیط خارجی دریافت می‌کند. نتایج آزمایش الگوریتم‌های خوشه‌بندی و قطعه‌بندی تصاویر بر اساس این مدل نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از کارایی خوبی در این کاربردها برخوردار است و در بسیاری از موارد نتایج آن در مقایسه با الگوریتم‌های موجود بهتر می‌باشد.

دهنده‌ی روند تحقیق در این زمینه و چشم‌انداز کارهای آتی نیز باشد، ضروری به نظر می‌رسید. به همین منظور، بر آن شدیم تا در پژوهشی به بررسی کامل اتوماتا، کاربردهای آن و روش‌های ارائه شده بپردازیم. مقاله حاضر خلاصه‌ای بسیار کوتاه و در عین حال جامع از تحقیق انجام شده در پایان‌نامه کارشناسی نویسندگان است. شکل (۱) گستره کاربردهای اتوماتای سلولی را که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد.

ساختار مقاله در ادامه به شرح زیر است: در بخش‌های ۲ الی ۱۷ کاربردهای مختلف اتوماتای سلولی در مقاله‌های مختلف به ترتیب سال ارائه، ذکر شده‌اند. بخش ۱۸ هم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.



شکل (۱): گستره‌ی کاربرد اتوماتای سلولی

## ۲- کاربرد اتوماتای سلولی در پردازش تصویر

در سال ۲۰۰۱ الگوریتمی [۵] براساس اتوماتای یادگیر سلولی جهت بازیابی تصاویر تخریب شده (حذف نویز) پیشنهاد شد. در این روش هر اتوماتا سعی می‌کند که هر پیکسل را با پیکسلی که بیشترین شباهت را با همسایگان خود دارد، جایگزین کند و به‌طور هم‌زمان نویز تصاویر دو سطحی و سطح خاکستری را مورد بررسی قرار دهد.

در سال ۲۰۰۲ مقاله‌ای [۷] با مضمون کاربرد اتوماتای سلولی برای تحلیل الگوریتم‌های تکراری به منظور قسمت‌بندی تصویر ارائه شد. از مهم‌ترین خصیصه‌های این روش کارا بودن عملیات قسمت‌بندی تصویر در صورت وجود نویز، دقت بالای آن‌ها نسبت به روش‌های غیر تکراری و توزیعی بودن آن‌ها که امکان موازی‌سازی آن‌ها را فراهم می‌سازد، است. اتوماتای یادگیر سلولی با اندازه‌گیری میزان شباهت هر پیکسل با همسایگان خود، آن پیکسل را با احتمال بیشتر به کلاس شبیه به خود نسبت می‌دهد و از این طریق پیکربندی تصویر به سمت نواحی همگن میل می‌کند.

در سال ۲۰۰۲ روش‌هایی [41] برای حذف نویز و تشخیص مرز در تصاویر دیجیتالی با استفاده از اتوماتای سلولی دوبعدی ارائه و با چند روش کلاسیک مقایسه شد. ویژگی مهم در این روش هم‌زمانی درونی است. به‌علاوه تشخیص مرز به نوع تصویر وابستگی ندارد. این روش در مقایسه با فیلتر گوسین نتایج بهتری را حاصل می‌کند.

#### ۴- کاربرد اتوماتای سلولی در رمزنگاری

در سال ۱۹۹۰، توابع رمزهای بلاک [38] از طریق یک کلاس اتوماتای قابل برنامه‌ریز سلولی (PCA) که از تلفیق قوانین ۵۱، ۱۵۳ و ۱۹۵ ساخته شده‌است، برای رمزنگاری پیشنهاد شده‌است. قوانین ۹۰ و ۱۵۰ نیز به عنوان تولیدکننده‌ی کلید در حال اجرا برای رمزهای جریان پیشنهاد شده‌اند. هر دو طرح مطرح شده امنیت بهتری را در مقابل انواع مختلفی از حملات ایجاد می‌کنند که با استفاده از ساختار ساده، منظم و پیمانه‌ای اتوماتای سلولی برای پیاده‌سازی VLSI مناسب هستند.

در سال ۱۹۹۹، روش [۱] تولید کلید را با به‌کارگیری اتوماتای دوبعدی به‌هنگام‌سازی خطی ارائه شده است. این روش ضمن دارا بودن سرعت و کارایی بالا، دنباله کلید تولید را در حلقه‌های با طول بزرگ بر خلاف روش قبل تولید کرده و ویژگی‌های آماری مناسبی را از خود نشان داده‌است.

در سال ۲۰۰۸، نشان داده شده‌است که یک کلاس وسیع [52] از دنباله رمزنگاری می‌تواند با استفاده از اتوماتای سلولی ضرب چند جمله‌ای (ضرب چند جمله‌ای اتوماتای سلولی) تولید شود. در این راه، مدل گسسته خطی بر پایه‌ی اتوماتای سلولی بسیاری از دنباله‌های غیرخطی معروف را می‌تواند در برنامه جاری در رمزهای جریان را درک می‌کند. بنابراین سازنده دنباله رمزی اصالتاً از مدل‌های غیر خطی پیچیده، می‌تواند به آسانی به صورت معادلات خطی نوشته شود.

#### ۵- کاربرد اتوماتای سلولی در گراف

در سال ۲۰۰۰ روش [۳] جدیدی برای حل مسئله تناظر گراف با استفاده از چهار اتوماتای یادگیر از نوع مهاجرت اشیا پیشنهاد شد. روش ارائه شده روی گراف‌هایی با اندازه و درصد اغتشاش‌های مختلف آزمایش شده و جواب‌های مناسبی تولید گشته است. در حالتی که گراف‌ها بدون اغتشاش هستند، جواب‌های تولید شده (در صورت همگرایی) کاملاً دقیق می‌باشند. هم‌چنین متوسط پیچیدگی زمانی الگوریتم ارائه شده  $O(n^3)$  می‌باشد که بهبود قابل ملاحظه‌ای را در مرتبه پیچیدگی نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۰۲ الگوریتمی موازی [۸] برای رنگ‌آمیزی گراف با استفاده از اتوماتای سلولی دوبعدی ارائه شد. در این الگوریتم ابتدا گراف توری که هدف، رنگ‌آمیزی آن با حداقل رنگ ممکن است، در اتوماتای سلولی نگاشت شده، سپس به هر گره یک عدد تصادفی نسبت داده می‌شود. در هر گام عدد تصادفی تمام گره‌های رنگ نشده با عدد تصادفی گره‌های رنگ نشده‌ی مجاورش مقایسه می‌شود. گره در صورتی رنگ می‌شود که عدد تصادفی آن از تمام اعداد تصادفی مربوط به گره‌های مجاورش بزرگ‌تر باشد. رنگ گره برابر با کوچک‌ترین رنگی خواهد بود که توسط گره‌های رنگ شده مجاور اختیار نشده باشد. پایان الگوریتم زمانی خواهد بود که تمام گره‌ها رنگ شده باشند.

در سال ۲۰۱۱ روش نوینی [65] برای تولید نقشه برای یک روبات مسیریاب براساس اتوماتای سلولی ارائه شد. اکثر روش‌های قبلی تنها برای محیط‌های منظم کاربرد داشتند و در محیط‌های پیچیده و نامنظم، منجر به پاسخ‌های درستی نمی‌شدند. این روش سعی بر این دارد که با متدهای پیشرفته‌ی هوش مصنوعی و اتوماتای سلولی بتوان تحلیل درستی از مسیر را در اختیار روبات قرار داد. با این روش مسیر شناسایی شده در اتوماتای سلولی ذخیره می‌شود و روبات در پیمایش‌های بعدی نیازی به پردازش چندباره‌ی محیط ندارد.

#### ۳- کاربرد اتوماتای سلولی در مرتب‌سازی

در سال ۲۰۰۴ دو الگوریتم [۱۲] مرتب‌سازی جدید برای اتوماتای سلولی دوبعدی پیشنهاد شد. الگوریتم‌های ارائه شده دارای پیچیدگی متوسط  $O(\sqrt{n})$  می‌باشند. در این مقاله از تمام ظرفیت سلول‌ها استفاده شده، یعنی در شروع کار الگوریتم‌ها، تمام سلول‌ها در صورت لزوم می‌توانند عمل جابه‌جایی را انجام دهند. در این الگوریتم از ارتباطات Wraparound استفاده شده‌است که باعث سرعت بخشیدن به کار مرتب‌سازی می‌شود.

در سال ۲۰۰۶ روشی [۱۵] برای مرتب‌سازی اتوماتای سلولی یک‌بعدی ارائه نمودند و در آن یک الگوریتم برای مرتب‌سازی  $n$  عدد با اتوماتای سلولی یک‌بعدی پیشنهاد شد که  $n$  عنصر را در  $n-1$  مرحله مرتب می‌نمود و نتیجه‌ای با سرعت اجرای حدوداً دو برابر در مقایسه با الگوریتم گوردیلو-لونا که مرتب‌سازی را در  $2n-3$  مرحله انجام می‌داد، حاصل شد.

در سال ۲۰۰۶ روشی [۱۶] برای مرتب‌سازی موازی اتوماتای سلولی دوبعدی ارائه شد. در این روش کل اتوماتا به صورت مارپیچی مرتب می‌شود. الگوریتم پیشنهادی ساده و محلی بوده و ایده اصلی آن جابه‌جایی مقادیر سلول‌های همسایه می‌باشد. هر سلول دارای حافظه‌ی اندکی است. تمامی سلول‌ها دارای ساختار یکسانی بوده و بصورت هم‌زمان و موازی در گام‌های گسسته از زمان کار یکسانی را انجام می‌دهند.

در سال ۲۰۰۸ دو الگوریتم [۲۲] مرتب‌سازی موازی برای اتوماتای سلولی خطی ارائه شد. در الگوریتم پیشنهادی اول هر سلول دارای دو همسایه سمت راست بوده و در الگوریتم پیشنهادی دوم تعداد همسایگان هر سلول برابر چهار می‌باشد. الگوریتم دوم با دو نوع همسایگی متقارن و همسایگی نامتقارن پیاده‌سازی شده‌است. دو الگوریتم پیشنهادی، پیچیدگی زمانی مشابهی با الگوریتم‌های گوردیلو-لونا دارند، ولی از نوع همسایگی، شعاع همسایگی و قوانین متفاوتی برخوردارند. هم‌چنین در ساختار استفاده شده برای مرتب‌سازی نیازی به حافظه‌ی اضافی برای کنترل جابه‌جایی مقادیر سلول‌های همسایه وجود ندارد.

عمل پردازش را انجام می‌دهند. هدف از این پردازش، پیدا کردن الگوهایی است که منجر به حالات کلیدی می‌گردند. در سال ۲۰۰۳، سوشیل و گری به وسیله الگوریتم ژنتیک روشی [43] را برای درجه‌بندی اتوماتای سلولی که برای مدل‌سازی جواز استخراج معدن استفاده شده‌بود، پیشنهاد کردند. با اعمال درجه‌بندی اتوماتا براساس الگوریتم ژنتیک، زمان پردازش اتوماتا بسیار کاهش یافته و در بسیاری موارد پاسخ‌های دقیق‌تری را نیز ارائه می‌کند.

## ۷- کاربرد اتوماتای سلولی در شبکه حسگر

در سال ۲۰۰۹ میلادی، یک توپولوژی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم برای شبکه‌های حسگر ارائه شد [۲۸]. در این مقاله شبکه‌ای ناهمگن که در آن گره‌ها می‌توانند محدوده انتقال غیر یکسان داشته باشند، بررسی شده‌است. در این پروتکل، یک اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم بر روی شبکه نگاشت می‌شود. در این اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم، هر گره دارای یک اتوماتای یادگیر است که توسط آن می‌تواند از سه محدوده انتقال خود، یکی را با توجه به شرایط شبکه و محدوده انتقال دیگر گره‌ها انتخاب کند.

در سال ۲۰۰۹ روشی [۲۹] برای خوشه‌بندی گره‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی ارائه شد. در این روش شبکه به تعدادی خوشه‌ی مستقل قسمت‌بندی می‌شود که هر کدام یک سرخوشه دارند که اطلاعات را از گره‌های داخل خوشه‌اش جمع‌آوری می‌کند. سپس این سرخوشه‌ها اطلاعات را مستقیماً یا گام به گام با تعداد گام‌های کم‌تر و صرفاً با استفاده از گره‌های سرخوشه به مرکز اصلی ارسال می‌کنند. خوشه‌بندی می‌تواند به میزان زیادی هزینه‌های ارتباطی را کاهش دهد و با کاهش مصرف انرژی عمر شبکه حسگر افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۰ الگوریتمی [۳۶] برای زمان‌بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر اساس بازی اقلیت و اتوماتای یادگیر سلولی طراحی گردید. این الگوریتم همواره گره‌ها را در دو حالت *On* و *Standby* قرار می‌دهد، به طوری که با تعداد حسگرهای *On* در نظر گرفته‌شده، بتوان تمامی نواحی شبکه را پوشش داد. حالت *On* حالتی است که در آن حسگر می‌تواند به مانیتور نمودن محیط پیرامونی تحت پوشش خود بپردازد. حالت *Standby* حالتی است که در آن حسگر، در فعالیت‌ها شرکت نداشته و به ذخیره‌سازی انرژی می‌پردازد. این روش، کارایی مناسبی را در مدیریت مصرف انرژی برای افزایش طول عمر شبکه دارا می‌باشد.

## ۸- کاربرد اتوماتای سلولی در وب

در سال ۲۰۰۸ الگوریتمی [54۲۷] برای تشخیص اجتماعات وب با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی طراحی گردید. مجموعه‌ای از صفحات وب با موضوع مشترک که توسط افراد یا سازمان‌های مختلف که علائق مشترک دربارهمی آن موضوع خاص دارند ایجاد شده‌اند،

در سال ۲۰۰۸ الگوریتم [۲۶] جدیدی برای حل مسئله بزرگ‌ترین برش در گراف با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی ارائه شد. بزرگ‌ترین برش گراف عبارت است از افراز رأس‌های گراف به دو قسمت به گونه‌ای که تعداد یال‌هایی که یک سر آن‌ها در هر کدام از این قسمت‌ها قرار گرفته است، بیشینه شود. بر اساس مقایسه الگوریتم ارائه شده با برخی از الگوریتم‌های تقریبی مانند: سه‌نی، ژئومنس و نیز الگوریتم‌های ترکیبی و ژنتیک، الگوریتم ارائه‌شده نتایج بهتری را تولید می‌کند.

در سال ۲۰۱۰ الگوریتمی [۳۴، 61] بر اساس اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم برای رنگ‌آمیزی گراف طراحی شد. در این الگوریتم درجه سلول به معنای تعداد سلول‌های همسایه آن که رنگ متفاوتی را انتخاب کرده‌اند، می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی از نظر تعداد رنگ نتایج بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها تولید کرده اما از نظر زمان اجرا، سایر الگوریتم‌ها عمل کرد بهتری دارند.

در سال ۲۰۱۰ الگوریتمی [۳۷] جهت رنگ‌آمیزی گراف با استفاده از اتوماتای یادگیر و الگوریتم ژنتیک ارائه شد. در هنگام حل مسئله با الگوریتم ژنتیک در صورت تعیین جایگاه مناسب ژن‌ها در کروموزوم‌ها می‌توان در تعداد نسل‌های بسیار کمتری به جواب نزدیک به بهینه رسید. در الگوریتم پیشنهادی هر کروموزوم معادل یک اتوماتا و هر ژن معادل یک اقدام از اتوماتا می‌باشد. هر اتوماتا نمایش‌دهنده یک رنگ‌آمیزی تصادفی می‌باشد. در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، این الگوریتم خیلی سریع‌تر به جواب بهینه نزدیک می‌شود.

## ۶- کاربرد اتوماتای سلولی در دسته‌بندی

دسته‌بندی جدیدی [48] برای قوانین اتوماتای سلولی با هدف ترکیب کردن اتوماتای سلولی بازگشت‌پذیر در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد داده شده است. این دسته‌بندی امکان ترکیب اتوماتای سلولی بازگشت‌پذیر را در زمان خطی ممکن می‌سازد که در شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی از اهمیت بالایی برخوردارند.

در سال ۲۰۰۸ میلادی، یک دسته‌بند فازی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی ناهمگن ناهمگام باز [۲۳] پیشنهاد شده‌است که به کمک مجموعه‌ای از اتوماتاهای یادگیر سلولی، توابع عضویت و قوانین فازی به طور اتوماتیک تولید می‌شوند، تعداد پارامترهایی که بایستی با توجه به نوع مسئله تنظیم شوند، کمتر است و نسبت به روش‌های گذشته نتیجه بهتری به دنبال دارد. مشکل این روش این است که اتوماتاهای یادگیر با هم هیچ تعاملی ندارند و توابع عضویت یا با یکدیگر فاصله زیاد می‌گیرند؛ یا یک تابع عضویت توسط تابع عضویت دیگر، کاملاً پوشانده می‌شود.

یک اتوماتای سلولی دسته‌بند دوکلاسه [66] را در سال ۲۰۱۱ ارائه شده است. این دسته‌بند که شامل یک مدل حافظه انجمنی نیز می‌باشد، از دو کلاس مجزا تشکیل شده‌است که به صورت همزمان

با استفاده از مفاهیم اتوماتای سلولی و همسایگی‌های مطرح در آن، عمل‌گرهای سیستم ایمنی مصنوعی بومی‌سازی شده‌اند.

### ۱۰- کاربرد اتوماتای سلولی در داده‌کاوی

در سال ۲۰۰۸ تلاش شد تا الگوریتم‌های [51] پایه‌ی داده‌کاوی به کمک اتوماتای سلولی شبیه‌سازی شود. برای درک داده‌کاوی بر روی ابرهای محاسباتی، لازم است که این وظیفه به سلول‌های اتوماتا واگذار شود. در این مقاله اثبات شده که عمومی‌سازی روش‌های داده‌کاوی به کمک اتوماتای سلولی امکان‌پذیر است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی روش‌های مختلف داده‌کاوی با استفاده از اتوماتای سلولی بسیار مشابه نتایجی است که از مدل‌های پیچیده داده‌کاوی به دست می‌آید.

در سال ۲۰۰۹، الگوریتم [۳۲] جدیدی به نام CACO برای زمان‌بندی کارهای مستقل از هم برای بهینه‌سازی هزینه در گریدهای محاسباتی اقتصادی با مدل بازار کالا و با استفاده از اتوماتای سلولی پیشنهاد شده‌است. این الگوریتم غیرمتمرکز و مقیاس‌پذیر بوده و با شروع از یک وضعیت تصادفی و قوانین محلی به یک هدف سراسری، به بهینه‌سازی هزینه می‌رسد. این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های قبلی به مقدار قابل توجهی هزینه را کاهش داده و در شرایط خاص مانند ناهمگنی بالای کارها، دارای عملکرد مناسبی است.

### ۱۱- کاربرد اتوماتای سلولی در پیش‌بینی توسعه

#### زمینی

یک مدل [49] اتوماتای سلولی گسترده برای استخراج اطلاعات توسعه زمینی در سال ۲۰۰۶ طراحی شد. برای پیش‌بینی وضعیت یک منطقه در آینده، نیاز است تا با بررسی گذشته آن به الگوهای رسید که به کمک آن‌ها بتوان وضعیت آینده یک منطقه را پیش‌بینی کرد و بر اساس آن‌ها برنامه‌ریزی بلند مدت انجام داد. مدل ارائه شده، مدلی بر اساس اتوماتای سلولی می‌باشد. اما با افزودن ویژگی‌هایی جدید و استفاده از متدهای مختلف استخراج اطلاعات به مدلی کارآمد برای اهداف بیان‌شده، تبدیل شده است.

یک مدل [57] شبیه‌سازی پیشرفت شهری با استفاده از اتوماتای سلولی و چندعاملی بر پایه مدل تجمعی برای شهر کینگدائو در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد گردید. در هر سلول، علاوه بر وضعیت فعلی، اطلاعات مربوط به تغییر وضعیت زمین مانند قوانین و اطلاعات وضعیت طبیعی نیز نگهداری می‌شود. قوانین حاکم بر این اتوماتا بر اساس مطالعه‌ی تاریخ صد سال گذشته‌ی این شهر و چگونگی تبدیل آن از یک روستای ماهیگیری به یک شهر ساحلی توریستی و پیشرفته تعریف شده‌اند. این مدل قابلیت تعمیم به یک مدل گسترده و پیچیده را دارد.

اجتماع وب نامیده می‌شود. این الگوریتم دو مرحله‌ای است. در مرحله اول با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی و رفتار کاربران در مشاهده صفحات وب، ساختار ارتباطی صفحات وب به دست می‌آید. در مرحله دوم با اعمال الگوریتم HITS بر ساختار به دست آمده، اجتماعات وب مرتبط با موضوعات دلخواه به دست می‌آیند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم و مقایسه آن با نتایج الگوریتم‌های دیگر حاکی از کارایی بالای روش پیشنهادی دارد.

یک روش [58] مؤثر برای دسته‌بندی صفحات وب با استفاده از اتوماتای سلولی غیرخطی در سال ۲۰۱۰ ارائه شد. روش پیشنهادی، روش فهرست‌گذاری نوین براساس اتوماتای سلولی می‌باشد؛ که صفحات مختلف وب را دسته‌بندی می‌کند. سپس این دسته‌بندی در حافظه موتور جست‌وجو ذخیره شده و با هر درخواست جدید، کاربر به دسته‌ی مربوطه هدایت می‌گردد تا به صورت کارآمدتری به نتایج دلخواه خود دست یابد.

یک سیستم پیشنهاد دهنده‌ی وب [59] بر اساس اتوماتای یادگیر سلولی در سال ۲۰۱۰ ارائه گردید. سیستم‌های پیشنهاد دهنده‌ی وب وقایع ثبت شده در سرورهای وب را به عنوان ورودی دریافت می‌کنند و با استفاده از تکنیک‌های استخراج اطلاعات، الگوهای پیمایش صفحات وب توسط کاربران را استخراج کرده و براساس آن‌ها پیشنهادهای گوناگونی را ارائه می‌دهند. در سیستم ارائه شده، از یک اتوماتای یادگیر سلولی ناهمگام برای یادگیری الگوهای پیمایشی کاربران و پیش‌بینی صفحات مفید و جالب استفاده شده است. هر یک از سلول‌های این اتوماتا به عنوان یکی از صفحات وب در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به ساختار اتوماتا، الگوهای مورد نظر استخراج شده و برای پیشنهاد به کاربران وب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۹- کاربرد اتوماتای سلولی در بهینه‌سازی

در سال ۲۰۰۸ میلادی یک مدل ترکیبی [۲۴] برای حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوریتم داشتن تنها یک پارامتر است که در نتیجه استفاده از آن را در حل مسائل ساده‌تر می‌کند. سرعت همگرایی این الگوریتم بسیار بالا بوده و همچنین نحوه حرکت این الگوریتم به سمت جواب به‌گونه‌ای است که در صورت رسیدن به جواب، جواب را با دقت بسیار بالایی تولید و محاسبه می‌کند. برای جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در بهینه‌های محلی پیشنهاد شد که الگوریتم بهینه‌سازی حدی تعمیم یافته در کنار اتوماتای یادگیر سلولی قرار گیرد تا در شرایطی که به تنهایی از کارایی بالا برخوردار نیست بتواند با کمک گرفتن از اتوماتای یادگیر سلولی مشکل گرفتار شدن در نقاط بهینه محلی را نداشته باشد و دامنه مسئله را برای یافتن جواب به شکل بهتری بررسی کند.

در سال ۲۰۰۹، مدلی ترکیبی [۳۳] مبتنی بر سیستم ایمنی مصنوعی و اتوماتای یادگیر سلولی که در مسائل بهینه‌سازی کاربرد دارد، پیشنهاد شد. به منظور رفع مشکل به دام افتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی

## ۱۲- کاربرد اتوماتای سلولی در الگوریتم ژنتیک

در سال ۲۰۰۵ مکانیزم بازچینی برای اتوماتای سلولی ژنتیکی [۱۴] پیشنهاد شده است. این مکانیزم در فواصل مشخص به تغییر همسایگی‌ها و ایجاد آرایش جدید در سلول‌ها می‌پردازد. مزیت استفاده از این مکانیزم کاهش تعداد همگرایی‌های زودرس و نامطلوب در همسایگی‌ها و ایجاد فرصت‌های بهتر برای افراد جمعیت به منظور تولید نسل می‌باشد.

در سال ۲۰۰۶، چینش‌های جدید [۱۷] برای اتوماتای سلولی ژنتیکی پیشنهاد شده است. عمل چینش سبب از میان رفتن همسایگان قدیمی یک سلول و ایجاد همسایگان جدید برای آن سلول می‌گردد و از این طریق، رشته‌ای که در صدد انتخاب یک رشته و ترکیب با آن برای ایجاد فرزندان جدید است، دارای محدودیت دسترسی و انتخاب می‌باشد و فقط از یک سری رشته محدود در همسایگان خود حق انتخاب دارد. نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج گذشته حاکی از برتری‌های این مدل می‌باشد.

## ۱۳- کاربرد اتوماتای سلولی در خوشه‌بندی

در سال ۲۰۰۸ یک روش خوشه‌بندی مورچه‌ای داده‌ها براساس اتوماتای یادگیر [۲۷] مطرح شد که از اتوماتاهای یادگیر برای یادگیری مکان‌هایی که مورچه‌ها برای انداختن داده‌ها بر روی صفحه باید در نظر بگیرند، استفاده شده است. مقایسه‌ی این روش با تنها روش موجود برای تعیین مکان انداختن داده‌ها، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی احتیاج به محاسبات کمتری دارد و خوشه‌های دقیقتری را تولید می‌کند. همچنین برتری این روش در مقایسه با روش K-Means نشان داده شد.

در سال ۲۰۰۹ روش خوشه‌بندی ترکیبی [۳۱] مبتنی بر سیستم کلونی مورچه‌ها و اتوماتای یادگیر سلولی ارائه شد. این الگوریتم با استفاده از شبکه سلولی بدون مرز دوری و ایجاد قوانینی برای از حرکت باز ایستادن مورچه‌ها، پس از تعدادی تکرار، به ایجاد خوشه‌های ثابت و مجزا منجر می‌شود. در مراحل پایانی یادگیری که تعداد مورچه‌های مشابه همسایه به تدریج بیشتر می‌شود، سرعت همگرایی افزایش می‌یابد. به علاوه روش پیشنهادی با الگوریتم‌های استفاده شده برای خوشه‌بندی مقایسه شده است و نتایج حاصله حاکی از سرعت و کارایی بیشتر آن نسبت به الگوریتم‌های دیگر می‌باشد.

در سال ۲۰۱۰، الگوریتمی [۳۵] مبتنی بر اتوماتاهای یادگیر سلولی برای خوشه‌بندی مورچه‌فازی داده‌ها مطرح شد. الگوریتم مذکور سعی می‌کند تا مناسب‌ترین مقدار را برای معیارهای خوشه بندی مورچه‌فازی که دارای حداقل خطا در خوشه بندی می‌باشند، پیدا کند تا خوشه‌بندی با دقت بالاتر و خطای کمتری انجام گیرد. بعلاوه دو مشکل تأثیر گروه‌بندی اولیه داده‌ها و حساسیت به شرایط اولیه الگوریتم در نتایج خوشه‌بندی که در اکثر الگوریتم‌های قبلی وجود داشت، نیز برطرف شده است.

## ۱۴- کاربرد اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی

نوعی شبیه‌سازی [39] جدید برای اتوماتای سلولی در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است که استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی‌های آینده است. این مسئله به افزایش سرعت شبیه‌سازی کمک شایانی می‌کند. شاید هنوز نتوان حتی با الگوریتم ارائه شده تمام مسائل مربوط به شبیه‌سازی اتوماتای سلولی را با روش‌های موازی اجرا کرد؛ اما در مورد پیام‌های بین سلولی این روش به درستی و سرعت بالاتر کار می‌کند.

در سال ۲۰۰۱، مقاله‌ای [۶] با عنوان کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی در مدل‌سازی انتشار شایعه ارائه شده است که مدل جدیدی تحت عنوان اتوماتای یادگیر سلولی در مدل‌سازی انتشار شایعه مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده است.

روشی [46] با استفاده از اتوماتای سلولی با ویژگی‌های شی‌گرایی برای مدل کردن شبکه‌ی مولکولی موازی در سال ۲۰۰۵ ارائه شده است. یکی از تغییرات اعمال شده، امکان نسبت دادن اعداد اعشاری به جای اعداد صحیح به سلول‌های اتوماتا به عنوان حالت‌های متفاوت آن است و به جای این که در هر واحد زمانی هر سلول با بررسی سلول‌های همسایه‌ی خود، حالت جدیدی را به خود اختصاص دهد؛ با دریافت پیام جدید از سلول فرستنده حالت فعلی خود را براساس پیام دریافتی، تغییر می‌دهد.

در سال ۲۰۰۶، مقاله‌ای [۱۸] با عنوان مدل یادگیری Q سلولی و کاربردهای آن ارائه شده است. این مدل جدید با استفاده از قابلیت‌های یادگیری Q مشکل نبود عدم قطعیت در تغییر حالات در اتوماتای سلولی را تا حدودی مرتفع می‌سازد. کاربرد این مدل ترکیبی در مسئله تخصیص کانال در شبکه‌های سلولی مخابراتی مورد بررسی قرار گرفت. مقاله‌ای [۲۰] با عنوان شبیه‌سازی فرآیند نفوذ سموم شیمیایی در خاک به کمک اتوماتای یادگیر سلولی در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است. در این مقاله از اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه‌سازی واقعی‌تر حرکت آب در خاک استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی دیگر عوامل مؤثر در حرکت آب از قبیل خاصیت موئینگی و خاصیت پیوستگی مولکول‌ها نیز منظور شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل کارایی آن را نسبت به مدل اتوماتای سلولی نشان می‌دهد.

مدل [64] شبیه‌سازی ماشین‌های تورینگ برگشت‌پذیر و سیستم نشانه‌گذاری دوره‌ای با استفاده از اتوماتای سلولی یک‌بعدی برگشت‌پذیر را در سال ۲۰۱۱ پیشنهاد شده است. مشکلات شبیه‌سازی ماشین‌های تورینگ برگشت‌پذیر و سیستم نشانه‌گذاری دوره‌ای را با ماشین تورینگ با  $m$  حالت و  $n$  نشانه اتوماتای سلولی یک‌بعدی با دو همسایه تعریف می‌شود که تعداد حالت‌های آن از  $(m+2n+1)(m+n+1)$  کمتر است، ارائه کرده است.

در سال ۲۰۱۱ مقاله‌ای [62] تحت عنوان یک مدل اتوماتای سلولی با همسایگی تعمیم یافته برای اپیدمی انتشار ارائه شده است. مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان یک مبنای کمی برای راه‌کارهای درمان پزشکی آینده به کار رود. به کمک آن می‌توان میزان اثربخشی درمان

کاربرد اتوماتای حالت متناهی در برخی زمینه‌های مدرن علم کامپیوتر و فن‌آوری ارائه شده‌است. به‌طور خاص، زمینه‌های استفاده از اتوماتای حالت متناهی در جبر کامپیوتری، زیست‌شناسی، و تصدیق در نظر گرفته شده‌است.

## ۱۶- پیاده‌سازی اتوماتای سلولی

در سال ۲۰۰۲ مقاله‌ای [40] با عنوان طراحی و پیاده‌سازی اتوماتای سلولی موازی استاندارد و غیر استاندارد در زبان CARPET ارائه گردید. CARPET زبانی براساس اتوماتای سلولی است که روی کامپیوترهای موازی به اجرا درآمده است. این زبان مخصوص برنامه‌نویسی محاسبات سلولی و الگوریتم‌های سلولی موازی طراحی شده‌است. این مقاله به تحلیل ویژگی‌های اساسی این زبان پرداخته و چگونگی استفاده از آن‌ها را برای پیاده‌سازی اتوماتاهای سلولی مختلف روی کامپیوترهای موازی شرح می‌دهد.

پیاده‌سازی اتوماتای سلولی با استفاده از آرایه‌های سیستم‌لیک در سال ۲۰۱۰ طراحی شد [60]. آرایه‌های سیستم‌لیک، تعدادی پردازنده‌ی ساده‌اند که در کنار هم بر اساس مدل ثابتی قرار گرفته‌اند. این پردازنده‌ها قادر به برقراری ارتباط با همسایه‌های خود هستند و حتی امکان مبادله‌ی داده نیز بین آن‌ها وجود دارد. در این مقاله چگونگی پیاده‌سازی اتوماتای سلولی با این روش مورد بررسی قرار گرفته‌است. زمان این شبیه‌سازی نسبت به روش سریال به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

پیاده‌سازی اتوماتای سلولی با قوانین متفاوت به صورت سریال بیس در سال ۲۰۱۱ ارائه گردید [68]. در این مقاله ابتدا یک اتوماتای سلولی به صورت سریال و با استفاده از یک پردازنده پیاده‌سازی شده‌است، سپس قوانین دیگری برای همان تعداد سلول وضع شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی این دو اتوماتای سلولی با هم مقایسه شده‌اند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، قوانین اتوماتای سلولی هیچ تأثیری بر زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی اتوماتا ندارد.

## ۱۷- مدل‌های توسعه یافته اتوماتای سلولی

در سال ۲۰۰۳ مقاله‌ای [42] با عنوان معادلات دیفرانسیل و اتوماتای سلولی ارائه شده‌است. این مقاله بر طبق معادله دیفرانسیل زنجیره‌ی Gompertz در میزان رشد تومور، به شرح ارتباط بین اتوماتای سلولی و معادلات دیفرانسیل پرداخته که از آن برای شبیه‌سازی میزان رشد تومور بهره‌برد.

در سال ۲۰۰۷ کلاس جدیدی برای اتوماتای سلولی یک‌بعدی ارائه شده‌است [50] که خطای کمتری را نسبت به دو روش رایج اتوماتای سلولی پیوندی خطی و ثبات‌های انتقال بازخورد خطی دارد. این کلاس براساس ۵ سلول همسایه، ساختار انتقالی قوی را حاصل می‌کند، اما همچنان پیچیدگی اتصالات داخلی را کم نگه می‌دارد. اثر استفاده از

پزشکی را تعیین و سپس زمینه‌ای برای گرفتن اقدامات پیشگیرانه را فراهم کند.

## ۱۵- سایر کاربردهای اتوماتای سلولی

در سال ۲۰۰۰ الگوریتم [۴] نوینی برای کنترل درخواست ورود در شبکه‌های ATM با استفاده از اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر ارائه شد. بدین منظور برای هر اتصال جدید به شبکه ATM تخمینی از میزان پهنای باند لازم زده و با استفاده از این تخمین درباره‌ی پذیرش درخواست‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. اتوماتا به مرور زمان با دریافت عکس‌العمل محیط، خود را با محیط وفق داده و تخمین بهتری صورت می‌پذیرد.

در سال ۲۰۰۳ کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی در جایابی مدارهای مجتمع متراکم [۱۱] تشریح شد. اتوماتای یادگیر استفاده شده در این کاربرد دارای ورودی و شعاع همسایگی متغیر است. برای این مسئله از اتوماتای یادگیر طوری استفاده می‌شود که خصوصیات موجود در تعدادی بردار ورودی را در سلول‌های خود منعکس کند. انتخاب بردارهای ورودی بر اساس مداری که جایابی آن انجام می‌شود، صورت می‌گیرد. بردارهای فاصله به‌عنوان ورودی به اتوماتای یادگیر سلولی داده می‌شوند. این روش یادگیری باعث شده که در نهایت سلول‌های با اتصالات بیشتر، بر روی سلول‌هایی از اتوماتای سلولی که به‌هم نزدیک‌تر هستند، نگاشت شوند. استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی که دارای ساختار موازی است، باعث حل مسئله با زمان کمتری نسبت به روش‌های دیگر می‌شود.

در سال ۲۰۰۵، مقاله‌ای [45] با عنوان استفاده از اتوماتای سلولی در مطالعه سیستم پیچیده ارائه شد. این مقاله به تجزیه و تحلیل رابطه بین اتوماتای سلولی و سیستم‌های پیچیده بر اساس ویژگی‌های خاص آن‌ها می‌پردازد. پس از آن، برخی از برنامه‌های کاربردی از اتوماتای سلولی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، تجزیه و تحلیل و کنترل بیان شده‌اند.

در سال ۲۰۰۸ الگوریتمی [۲۵] برای حل مسئله خوشه‌های نرم‌افزاری پیشنهاد شد. برای خوشه‌بندی یک سیستم نرم‌افزاری، ابتدا ساختار سیستم را با یک گراف به نام گراف وابستگی پیمان‌های MDG، مدل می‌کنند. در این گراف، پیمان‌های سیستم (فایل‌ها و کلاس‌ها) رأس‌های گراف و روابط بین پیمان‌ها (فراخوانی توابع و ارث‌بری و غیره) یال‌های گراف در نظر گرفته می‌شوند. این گراف به یک الگوریتم خوشه‌بندی داده می‌شود تا به خوشه‌های معنادار، افراز شود. الگوریتم پیشنهادی، یک الگوریتم تقریبی و ترکیبی است که از ترکیب اتوماتای سلولی یادگیر مهاجرت اشیا و الگوریتم ژنتیک حاصل شده‌است. این الگوریتم علاوه بر پایداری، سرعت بالایی برای رسیدن به پاسخ مطلوب دارد و در بهینه‌های محلی نیز به دام نمی‌افتد.

در سال ۲۰۱۱، مقاله‌ای [63] با عنوان اتوماتای حالت متناهی در تکنولوژی‌های اطلاعات، ارائه شد. یک بررسی کوتاه از برنامه‌های

هشتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۰۰۰.

[۵] رفیع خوارزمی، محمد و میبیدی، محمدرضا، «الگوریتمی براساس اتوماتای سلولی یادگیر جهت بازیابی تصاویر تخریب شده»، اولین کنفرانس بینایی و پردازش تصویر ایران، ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند، ۲۰۰۱.

[۶] میبیدی، محمدرضا و طاهرخانی، مسعود، «کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی در مدل‌سازی انتشار شایعه»، نهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ایران، تهران، مرکز تحقیقات انفورماتیک، محاسبات نرم دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۲۰۰۱.

[۷] رفیع خوارزمی، محمد و میبیدی، محمدرضا، «کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی در قطعه بندی تصاویر»، دهمین کنفرانس برق، ایران، تبریز، دانشگاه تبریز، ۲۰۰۲.

[۸] گلزاری، شهرام و میبیدی، محمدرضا، «یک الگوریتم موازی برای رنگ-آمیزی گراف برای اتوماتای سلولی دو بعدی»، دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ایران، تبریز، دانشگاه تبریز، ۲۰۰۲.

[۹] رفیع خوارزمی، محمد و میبیدی، محمدرضا، «کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی در استخراج ویژگی در تصویر»، دومین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر، ایران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۰۰۳.

[۱۰] میبیدی، محمدرضا و صاحب زمانی، مرتضی و مهدی پور، فرهاد، «رفع نویز در تصاویر با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی»، اولین کنفرانس مهندسی مکترونیک ایران، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۲۰۰۳.

[۱۱] میبیدی، محمدرضا و مهدی پور، فرهاد، «کاربرد اتوماتای یادگیر سلولی را در جایایی مدارهای مجتمع مترامک»، هشتمین کنفرانس بین‌المللی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۰۰۳.

[۱۲] شاه آبادی، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «الگوریتم های مرتب سازی جدید برای اتوماتای سلولی دو بعدی»، نهمین کنفرانس انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۴.

[۱۳] انجیدنی، مجید و میبیدی، محمدرضا، «یک الگوریتم برای ساختن شبکه‌های عصبی کوچک با قدرت تعمیم بالا»، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، ۲۰۰۵.

[۱۴] لسانی، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «مکانیزم بازچینی برای اتوماتای سلولی ژنتیکی»، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۰۰۵.

[۱۵] شاه آبادی، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «یک الگوریتم مرتب سازی برای اتوماتای سلولی یک بعدی»، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۰۰۶.

[۱۶] گلزاری، شهرام و میبیدی، محمدرضا، «یک الگوریتم مرتب سازی موازی برای اتوماتای سلولی دو بعدی»، یازدهمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پژوهشکده علوم کامپیوتر، ۲۰۰۶.

[۱۷] میبیدی، محمدرضا و رجبعلی پور، حسین، «چینش های جدید برای اتوماتای سلولی ژنتیکی»، یازدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فن‌آوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۲۰۰۶.

این کلاس به عنوان مولدی برای خودآزمون داخلی مدارات ISCAS 85 و 89 مورد بررسی قرار گرفته‌است.

در سال ۲۰۰۹، مقاله‌ای [53] منتشر شده است که نشان می‌دهد اتوماتای سلولی بولی دارای یک فرم خاص از جمع است؛ اگر و تنها اگر رفتار مربوط به اتوماتای سلولی فازی در اطراف نقطه ثابت خود را هم‌زمان با رفتار بولی باشد.

در سال ۲۰۰۹ مقاله‌ای [55] با عنوان یک مدل تعمیم‌یافته از اتوماتای سلولی ارائه شده‌است. مدل ECA قابلیت توصیف سیستم‌های پیچیده را بهبود می‌بخشد. در نتیجه این روش جدید مؤثر برای توصیف سیستم‌های تکاملی پویای پیچیده پیشنهاد شده که متشکل از زیرسیستم‌های چندگانه تعاملی هستند.

یک اتوماتای یادگیر سلولی در سال ۲۰۱۰ ارائه شده‌است [56] که در این طرح هر سلول از اتوماتا خود شامل تعدادی اتوماتای یادگیر است که با استفاده از این مدل جدید اتوماتای یادگیر سلولی نتایج بهتری برای شبیه‌سازی مسائلی مانند شبکه‌های سلولی موبایل و محاسبات پویا به دست می‌آید.

## ۱۸- نتیجه‌گیری

این مقاله، برخی از مهم‌ترین کاربردها و الگوریتم‌های ارائه شده با اتوماتای سلولی یادگیر در مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های کامپیوتری را مرور کرد. حجم بالا و تنوع روش‌ها و کاربردها، انعطاف‌پذیری و مؤثر بودن این مدل محاسباتی را نشان می‌دهد. هم‌چنین می‌توان پیش‌بینی کرد که این مدل پتانسیل بکارگیری در کاربرد تحلیلی دیگری را نیز داشته باشد. الگوریتم‌های به‌دست آمده یا سر‌یعت‌رند، یا مصرف حافظه کمتری دارند یا نتیجه مطلوب‌تری تولید می‌کنند.

## مراجع

[۱] قائمی بافقی، عباس و میبیدی، محمدرضا و صادقیان، بابک، «اتوماتای سلولی و کاربرد آن در رمزنگاری»، هفتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ایران، تهران، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، ۱۹۹۹.

[۲] بیگی، حمید و میبیدی، محمدرضا «بهینه‌سازی ساختار شبکه‌های عصبی توسط اتوماتای یادگیر»، چهارمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۱۹۹۹. «مهندسی شبکه‌های عصبی توسط اتوماتای یادگیر: تعیین اندازه مطلوب برای شبکه‌های عصبی سه لایه»، دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، پنجمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۰۰۰.

[۳] بیگی، حمید و میبیدی، محمدرضا، «حل مسئله تناظر گراف توسط اتوماتان‌های یادگیر»، پنجمین کنفرانس بین‌المللی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۰۰۰.

[۴] شهریاری، حمیدرضا و میبیدی، محمدرضا، «کنترل درخواست ورود در شبکه‌های ATM با استفاده از اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر»،



- [۱۸] میبیدی، محمدرضا، رستگار، رضا، «مدل یادگیری Q سلولی و کاربردهای آن»، یازدهمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۲۰۰۶.
- [۱۹] بهلول، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «یافتن لبه در تصاویر مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی نابهنگام باز»، چهارمین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۰۰۷.
- [۲۰] میبیدی، محمدرضا و نوفرستی، سمیرا، «شبیه سازی فرآیند نفوذ سموم شیمیایی در خاک به کمک اتوماتای یادگیر سلولی»، دوازدهمین کنفرانس بین المللی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۰۰۷.
- [۲۱] جعفرپور، برنا و میبیدی، محمدرضا، «بهبود روش خوشه بندی با کمک اتوماتای یادگیر»، سیزدهمین کنفرانس ملی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، جزیره کیش، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۸.
- [۲۲] حسینی سدهی، میثم و میبیدی، محمدرضا، «یک الگوریتم مرتب سازی موازی برای اتوماتای سلولی خطی»، سیزدهمین کنفرانس ملی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، جزیره کیش، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۸.
- [۲۳] حمیدی، ماندانا و میبیدی، محمدرضا، «یک دسته‌بند فازی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی»، سیزدهمین کنفرانس ملی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، جزیره کیش، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۸.
- [۲۴] خاتم نژاد پاکزاد، آیدین و میبیدی، محمدرضا، «یک مدل ترکیبی برای حل مسایل بهینه سازی (اتوماتای یادگیری سلولی + بهینه سازی حدی)»، دومین کنفرانس داده‌کاوی ایران، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۰۰۸.
- [۲۵] صفری ممقانی، علی و میبیدی، محمدرضا، «GALA: یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله خوشه‌بندی سیستم‌های نرم‌افزاری»، ایران، اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه مالک اشتر اصفهان، ۲۰۰۸.
- [۲۶] عنایت زارع، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «حل مسئله بزرگ‌ترین برش در گراف با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی»، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، خلیج فارس، جزیره کیش، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۸.
- [۲۷] مطیعی، سارا و میبیدی، محمدرضا، «تشخیص اجتماعات وب با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی»، سیزدهمین کنفرانس ملی انجمن کامپیوتر ایران، ایران، جزیره کیش، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۰۸.
- [۲۸] ابوالحسنی، سید محمد و اثنی‌عشری، مهدی و میبیدی، محمدرضا، «CLATC: یک پروتکل کنترل توپولوژی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم برای شبکه‌های حسگر»، چهاردهمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۰۰۹.
- [۲۹] احمدی نیا، محمد و میبیدی، محمدرضا، «خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از اتوماتاهای یادگیر سلولی»، سومین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند، ایران، یزد، دانشگاه یزد، ۲۰۰۹.
- [۳۰] آهنگران، میثم و بیگی، حمید، «خودکاره یادگیر سلولی با ورودی خارجی و کاربردهای آن در بازشناسی الگو»، پنجمین کنفرانس بین-المللی محاسبات نرم، ایران، تهران، ۲۰۰۹.
- [۳۱] قدیری گرجان، سیمین و میبیدی، محمدرضا، «یک روش ترکیبی برای خوشه‌بندی داده‌ها (کلونی مورچه‌ها + اتوماتای یادگیر)»، سومین کنفرانس داده‌کاوی، ایران، تهران، ۲۰۰۹.
- [۳۲] میبیدی، محمدرضا و خواجه وند، اسکندر، «بهینه‌سازی زمان در زمان-بندی گریدهای محاسباتی اقتصادی با استفاده از اتوماتای سلولی»، سومین کنفرانس داده‌کاوی، ایران، تهران، ۲۰۰۹.
- [۳۳] میبیدی، محمدرضا و جواد زاده، رامین، «مدل ترکیبی جدید مبتنی بر سیستم ایمنی مصنوعی و اتوماتای یادگیر سلولی»، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، مرکز توسعه فناوری نیرو (متن)، ۲۰۰۹.
- [۳۴] انعامی عراقی، علی‌رضا و اکبری ترکستانی، جواد و میبیدی، محمدرضا، «حل مسئله رنگ‌آمیزی گراف با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی»، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، مرکز توسعه فناوری نیرو (متن)، ۲۰۱۰.
- [۳۵] اسماعیل زاده، امیر و میبیدی، محمدرضا، «الگوریتمی مبتنی بر اتوماتاهای یادگیر سلولی برای خوشه بندی مورچه- فازی داده‌ها»، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، مرکز توسعه فناوری نیرو (متن)، ۲۰۱۰.
- [۳۶] محمدپور، تورج و میبیدی، محمدرضا، «زمان‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از بازی اقلیت و اتوماتای یادگیر سلولی»، چهارمین کنفرانس ملی فرماندهی و کنترل ایران، دانشگاه صنعتی شریف، ۲۰۱۰.
- [۳۷] مطیع قادر، حبیب و میرزایی ثمرین، عباس و دادجوین علی‌اکبر، «یک الگوریتم نوین جهت رنگ‌آمیزی گراف با استفاده از اتوماتای یادگیر»، پانزدهمین کنفرانس ملی سالانه انجمن کامپیوتر ایران، ایران، تهران، مرکز توسعه فناوری نیرو (متن)، ۲۰۱۰.
- [38] Nandi, S and Kar, B.K and Chaudhuri, P. Pal, "Theory and Applications of Cellular Automata in Cryptography", TRANSACTIONS ON COMPUTERS, VOL. 43, No. 12, Dec 1990.
- [39] Worsch, Thomas, "Simulation of cellular automata", Future Generation Computer Systems, Vol. 16, Pages 157-170, 1999.
- [40] Talia, Domenico, "Implementing Standard and Nonstandard Parallel Cellular Automata in CARPET", IEEE, 2002.
- [41] Popovici, Adriana and Popovici, Dan, "Cellular Automata in Image Processing", University of the West Timisoara, 2002.
- [42] Ruanxiaogang, Huricha, "Differential Equation and Cellular Automata Model", International Conference on Robotics Intelligent Systems and Signal Processing Proceedings of the 2003 IEEE, China, Changsha, 2003.
- [43] Sushil, J.Louis and Gary, L.Raines, "Genetic Algorithm Calibration of Probabilistic Cellular Automata for Modeling Mining Permit Activity", the 15th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'03), 2003.
- [44] Gdong, Yun-Yin and Chang, Chun-Ling, "CELLULAR AUTOMATA FOR EDGE DETECTION OF IMAGES", Third International

- [57] Fu, Qiang and Song, Jun and Mao, Feng and Zhu, Wensheng, "Simulation of City Development Using Cellular Automata and Agent Based Integrated Model—A Case Study of Qingdao City", The 18<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics, Peking University, China, Beijing, 2010.
- [58] Kundu, Anirban and Roy, Debasis, "An Efficient Approach to Web Page Classification using Non-Linear Cellular Automata", 1<sup>st</sup> International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing, India, Wagnaghat Solan, 2010.
- [59] Talabeigi, Mojdeh and Forsati, Rana and Meybodi, MohammadReza, "A Dynamic Web Recommender System Based on Cellular Learning Automata", IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Engineering and Technology, China, Chengdu, Chengdu Convention Center, 2010.
- [60] Yarahmadi, Ali and Setayeshi, Saeed, "An Implementation of Cellular Automata on Systolic Array", Second International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, United Kingdom, Liverpool, Liverpool University, 2010.
- [61] Enami Eraghi, Alireza and Akbari Torkestani, Javad and Meybodi, Mohammad Reza, "Cellular Learning Automata-based Graph Coloring Problem", International Conference on Machine Learning and Computing, Singapore, 2011.
- [62] Guan, Chao and Yuan, Wenyan and Peng, Yun, "A Cellular Automaton Model with Extended Neighborhood for Epidemic Propagation", Forth International Joint Conference on Computational Science and Optimization IEEE Computer Society, 2011.
- [63] Kryvyi, S.L., "FINITE-STATE AUTOMATA IN INFORMATION TECHNOLOGIES", Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 47, No. 5, 2011.
- [64] Morita, Kenichi, "Simulating reversible Turing machines and cyclic tag systems by one-dimensional reversible cellular automata", Theoretical Computer Science, Volume 412, Issue 30, Pages 3856–3865, 2011.
- [65] Naigong, Yu and Chunyan, Ma, "Mobile Robot Map Building Based on Cellular Automata", Third Pacific-Asia conference on circuits, communications and system, China, Wuhan, 2011.
- [66] Ponkaew, Jetsada and Wongthanavasus, Sartra and Wongthanavasus, Sartra, "Two-Class Classifier Cellular Automata", IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Malaysia, Langkawi, 2011.
- [67] Ponkaew, Jetsada and Wongthanavasus, Sartra and Wongthanavasus, Sartra, "Two-Class Classifier Cellular Automata", IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Malaysia, Langkawi, 2011.
- [68] Yarahmadi, Ali and Setayeshi, Saeed and Moarefi, Nazanin, "Implementing Cellular Automata with Dissimilar Rule on Serial Base", IEEE UKSim Fourth European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation, 2011.
- [69] Arrighi, P. and Grattage, J., "Intrinsically universal n-dimensional quantum cellular automata", Journal of Conference on Machine Learning and Cybernetics, China, Shanghai, 2004.
- [45] NAIGONG, YU and MINGAI, LI and XIAOGANG, RUAN, "APPLICATIONS OF CELLULAR AUTOMATA IN COMPLEX SYSTEM STUDY", International Journal of information and systems sciences, Vol.1, Number 3-4, Pages 302-310, 2005.
- [46] Zhu, Hao and Wu, Yinghui and Huang, Suin and Sun, Yan and Dhar, Pawan, "Cellular Automata With Object-Oriented Features for Parallel Molecular Network Modeling", IEEE TRANSACTIONS ON NANOBIOSCIENCE, VOL. 4, NO. 2, 2005.
- [47] Craiu, Radu V. and Lee, Thomas C. M., "Pattern Generation Using Likelihood Inference for Cellular Automata", IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 15, NO. 7, 2006.
- [48] Das, Sukanta and Sikdar, Biplab.K, "Classification of CA Rules Targeting Synthesis of Reversible Cellular Automata", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4173, pp. 68-77, 2006.
- [49] Hu, Gongzhu and Xie, Yichun, "An Extended Cellular Automata Model for Data Mining of Land Development Data", In Proceedings of the 5<sup>th</sup> IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, USA, Washington.DC, 2006.
- [50] Jabbari, Hosna and Muzio, Jon C. and Sun, Lin, "A New Class Of Cellular Automata", IEEE 2007 In 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007), 2007.
- [51] Fawcett, Tom, "Data mining with cellular automata", SIGKDD Explorations, Vol. 10, Issue 1, pp. 32-39, 2008.
- [52] Subater, Fuster and Gill, Caballero, "Linear Cellular Automata as Discrete Models for Generating Cryptographic Sequences", 6th Australasian Information Security Conference (AISC 2008), Wollongong, Australia, 2008.
- [53] Betel, H. and Flocchini, P., "On the Asymptotic Behavior of Fuzzy Cellular Automata", Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 252, Pages 23–40, 2009.
- [54] Motiee, Sarah and Meybodi, MohammadReza, "Identification of Web Communities using Cellular Learning Automata", The 14<sup>th</sup> international CSI Computer Conference, Iran, Tehran, Amirkabir University of Technology, 2009.
- [55] Yuecheng, Yu and Jiandong, Wang and Jianli, Ding, "An Extended Model of the Cellular Automata", ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2009.
- [56] Beigy, Hamid and Meybodi, Mohammad Reza, "Cellular Learning Automata With Multiple Learning Automata in Each Cell and Its Applications", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, Vol. 40, NO.1, 2010.

