دهمین
کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران
۲۷ تا ۲۹ بهمن ۱۳۸۳

شبیه‌سازی تکامل ماقبل حیات با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی

یاسر مهدوی‌فر
mahdavifar@ce.aut.ac.ir

محمدرضا میبدی
meybodi@ce.aut.ac.ir

آزمایشگاه محاسبات نرم
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تهران ایران

چکیده: بررسی فرآیند تکاملی مولکولها در پیش از شکل‌گیری حیات، تاکنون توسط معادلات دیفرانسیل معمولی و پس از آن با استفاده از مدل اتوماتای سلولی انجام شده است. در این فرایند، یک فوق‌چرخه قرار دارد که در آن، مولکولها در یک رابطه حلقوی، تکثیر یکدیگر را سرعت می‌دهند. تلاشهایی برای مدل‌سازی زندگی مولکولهای یک فوق‌چرخه با فرضیات مختلف و چگونگی برخورد آنها با پارازیتها صورت گرفته است که نتیجه آن، مشاهده ساختارهای مارپیچی با حرکات موجی بی‌پایان می‌باشد که در مقابل پارازیتها غالباً از خود مقاومت نشان می‌دهند. در این مقاله فرض جدیدی را برای مولکولها مطرح می‌کنیم که همسایگی با مولکولهای کاتالیزور و همنوع باعث افزایش مدت زندگی یک مولکول می‌شود. شبیه‌سازی فوق‌چرخه با این فرض، با استفاده از روش معمول مبتنی بر اتوماتای سلولی امکان‌پذیر نیست. در این مقاله روش جدیدی با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی به عنوان مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند تکاملی ارائه شده است. در این مدل، به ساختارهای مارپیچی با حرکات موجی برخورد می‌کنیم که پس از مدتی به ساختارهای ثابت تبدیل می‌شوند.

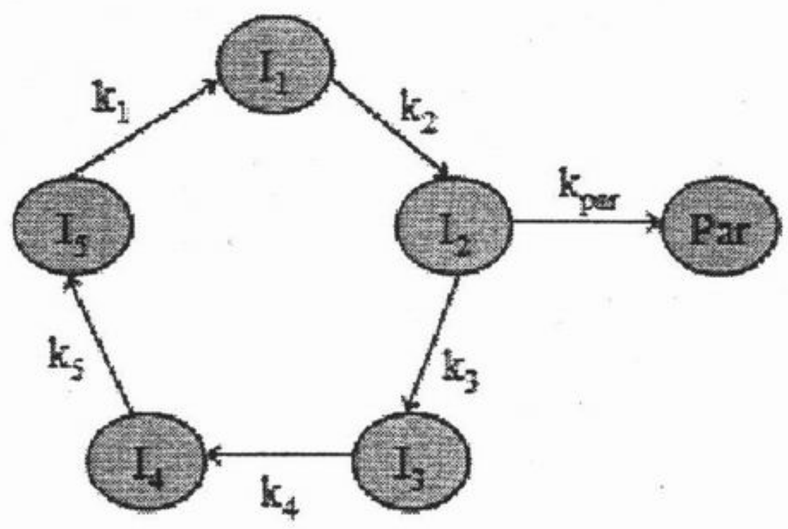
کلمات کلیدی: اتوماتای سلولی، اتوماتای یادگیر سلولی، فوق‌چرخه، تکامل تدریجی.

۱. مقدمه

مفهوم فوق‌چرخه (Hypercycle) توسط Eigen در سال ۱۹۷۱ مطرح شد [۱] [۲]. یک فوق‌چرخه سیستمی است که شامل تعدادی از گونه‌های مولکولی خودتکثیرشونده (Self-replicative) می‌باشد و این گونه‌ها در یک ارتباط حلقوی، تکثیر یکدیگر را سرعت می‌دهند؛ یعنی هر نوع مولکول، کاتالیزور نوع دیگری می‌باشد و از این رابطه کاتالیزوری یک حلقه تشکیل می‌شود. مولکولهای این گونه‌ها زمان زندگی محدودی دارند و پس از مدتی از بین می‌روند. هر مولکول در زمان زندگی خود می‌تواند مولکولهایی همانند خود را تولید کند. ایده فوق‌چرخه در مطالعات تکامل قبل از حیات، نقشی اساسی دارد؛ زیرا

می‌تواند توجیه کند که چگونه گونه‌های مولکولی که دارای تعداد کمی مولکول هستند، تکامل پیدا می‌کنند و موجوداتی با اطلاعات ژنتیکی بسیار زیاد تشکیل می‌شود.

در یک فوق‌چرخه ممکن است مولکولهایی از نوع پارازیت وجود داشته باشند. مولکولهای پارازیت نیز زمان زندگی محدودی دارند و این قابلیت را دارند که خود را تکثیر کنند. گونه پارازیت در رابطه حلقوی فوق‌چرخه قرار نمی‌گیرد؛ زیرا با اینکه تکثیر مولکولهای پارازیت توسط مولکولهای گونه دیگری کاتالیز می‌شود، ولی مولکولهای پارازیت فاقد ویژگی کاتالیزوری برای گونه‌های دیگر هستند. شکل ۱ یک فوق‌چرخه با ۵ نوع مولکول را به همراه یک نوع پارازیت نشان می‌دهد. تکثیرشدن پارازیت، از طرف گونه شماره ۲ کاتالیز می‌شود ولی پارازیت، کاتالیزور هیچ گونه‌ای نمی‌باشد.



شکل ۱ : یک فوق‌چرخه به همراه پارازیت

Eigen و Schuster در سال ۱۹۷۹ شبیه‌سازی زندگی مولکولهای یک فوق‌چرخه را با استفاده از معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی انجام دادند [۲]. همچنین آنها پایداری فوق‌چرخه را با استفاده از روش معادلات دیفرانسیل بررسی کردند. در این روش می‌بایست فرضیاتی را در نظر می‌گرفتند که نادرستی آنها مشخص بود. هر نوع تأثیرات فضایی بین مولکولها نادیده گرفته می‌شد. نتایج آنها نشان می‌داد که فوق‌چرخه‌ها همیشه سیستمهای پایداری نیستند و در برابر مولکولهای گونه پارازیت آسیب‌پذیر هستند.

Boerlijst و Hogeweg در سال ۱۹۹۱ یک روش مبتنی بر اتوماتای سلولی را برای مطالعه تکامل فوق‌چرخه‌ها ارائه کردند [۳][۴]. آنها مشاهده کردند که بعد از مدتی مولکولهای فوق‌چرخه ساختارهای مارپیچی تشکیل می‌دهند. این ساختارها دارای حرکات موجی هستند که برای همیشه ادامه دارد و موجب می‌شود ساختارهای مارپیچی در مقابل مولکولهای پارازیت مقاوم باشد.

برای تعامل مولکولهای فوق‌چرخه در تکامل قبل از حیات، می‌توان فرضیات معقولی را در نظر گرفت و نتایج شبیه‌سازی را با وجود این فرضیات بررسی کرد [۵]. Boerlijst و Hogeweg در سال ۱۹۹۵ با استفاده از روش مبتنی بر اتوماتای سلولی، تکامل فوق‌چرخه‌های دارای تعامل منفی را بررسی کردند [۶]. آنها فرض کردند که عمل کاتالیز کردن برای مولکولهای کاتالیزور هزینه دارد؛ یعنی مولکولهای یک گونه باعث تضعیف مولکولهای گونه کاتالیزور خود می‌شوند. همچنین در طول فرایند کاتالیز کردن، مولکولهای کاتالیزور توانایی تکثیر نخواهند داشت. در حقیقت، سرعت بخشیدن به تکثیر مولکولها برای مولکولهای کاتالیزور، باعث کوتاهتر شدن زمان زندگی و کاهش قدرت تکثیر آنها می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی نشان داد که مارپیچهای حاصل از تکامل فوق‌چرخه با تعامل منفی، شامل همه گونه‌های مولکولی فوق‌چرخه نمی‌باشند.

در این مقاله ما فرض جدیدی را برای مولکولهای یک فوق‌چرخه مطرح می‌کنیم. با توجه به این فرض، همسایگی با مولکولهای کاتالیزور و همنوع، باعث افزایش مدت زندگی یک مولکول می‌شود. این فرض کاملاً معقول است؛ زیرا وجود

مولکولهای گونه کاتالیزور و همچنین مولکولهای همنوع یک مولکول، می‌تواند باعث تقویت آن مولکول شود. برای مشاهده نتایج وجود این فرض برای مولکولهای فوق‌چرخه، از روش معمول مبتنی بر اتوماتای سلولی نمی‌توان استفاده کرد؛ زیرا در مدل اتوماتای سلولی، اطلاعاتی در مورد اتفاقات گذشته وجود ندارد. ما روشی با استفاده از مدل اتوماتای یادگیر سلولی را برای شبیه‌سازی تکامل فوق‌چرخه‌ها پیشنهاد می‌کنیم. نتیجه شبیه‌سازی یک فوق‌چرخه با استفاده از این روش نشان می‌دهد در ابتدا ساختارهایی همانند نتایج مدل اتوماتای سلولی تشکیل می‌شود؛ ولی در ادامه شبیه‌سازی، ساختارهای مارپیچی ثابتی در محیط شکل می‌گیرد که می‌تواند نشان‌دهنده بوجود آمدن موجودات و شکل‌گیری حیات باشد. بر خلاف روش مبتنی بر مدل اتوماتای سلولی برای یک فوق‌چرخه در حالت عمومی، که در آن مولکولها دارای حرکات منظم بی‌پایان هستند، در روش مبتنی بر مدل اتوماتای یادگیر سلولی، حرکات مولکولها سرانجام به تشکیل تدریجی الگوهای منظم ثابت منجر می‌شود.

ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. در بخشهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به معرفی اتوماتای سلولی، اتوماتای یادگیر و اتوماتای یادگیر سلولی خواهیم پرداخت. در بخش ۵ مدل اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه‌سازی فرایند تکاملی بررسی می‌شود. در انتهای مقاله نیز نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲. اتوماتای سلولی (Cellular Automata)

اتوماتای سلولی [۷][۸][۹] یک مدل ریاضی برای سیستم‌هایی است که در آنها چندین مؤلفه ساده برای تولید الگوهای پیچیده‌تر با هم همکاری می‌کنند. اتوماتاهای سلولی در حقیقت سیستم‌های پویا و گسسته‌ای هستند که رفتارشان کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. در اتوماتای سلولی یک مجموعه منظم از سلولها وجود دارد که هر کدام می‌توانند با چند مقدار مختلف مقداردهی شوند. این سلولها به صورت همگام و در زمانهای گسسته بر طبق یک قانون محلی، بهنگام‌رسانی می‌شوند. در تعیین مقدار جدید برای هر سلول، مقادیر سلولهای همسایه نیز تأثیرگذار است. شبکه مربوط به سلولها می‌تواند به صورت یک‌بعدی، دوبعدی و بیشتر باشد. انتخاب قوانین مختلف برای بهنگام‌رسانی، انواع متفاوتی از اتوماتای سلولی را بوجود آورده است. این قوانین می‌توانند به صورت قطعی و یا احتمالی بیان شوند.

برای هر سلول یک همسایگی از سلولها در نظر گرفته می‌شود. اگر اتوماتا را دوبعدی در نظر بگیریم، می‌توان دو همسایگی پرکاربرد زیر را در نظر گرفت:

۱. ون نیومن: چهار سلول بالا، پایین، چپ و راست.
۲. مور: علاوه بر همسایه‌های ون نیومن، سلولهای همسایه قطری هم در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی همه هشت سلول اطراف سلول مورد نظر. (شعاع همسایگی برابر با ۱ می‌باشد.)

یک اتوماتای سلولی به صورت یک شبکه بزرگ از ماشینهای حالت‌دار متناهی یکسان (سلولها) تعریف می‌شود. هر ماشین توسط یک سه‌تایی <I,S,W> مشخص می‌شود، که در آن I مجموعه ورودیها، S مجموعه حالتها و W تابع حالت بعدی است که بر روی جفتهای تشکیل‌شده از ورودی و حالت فعلی تعریف می‌شود. (مجموعه‌های I و S معمولاً اعضای کمی دارند.) ورودیها حالتهای فعلی سلولهای همسایه هستند.

۳. اتوماتای یادگیر (Learning Automata)

مهمترین ویژگی سیستم‌های یادگیرنده، این است که می‌توانند کارایی خود را در طی زمان بهبود دهند. از دیدگاه کاملاً ریاضی، هدف یک سیستم یادگیرنده، بهینه کردن تابعی است که ممکن است کاملاً شناخته شده نباشد. اتوماتای یادگیر [۱۰][۱۱] در محیطی احتمالی (تصادفی) عمل می‌کند و می‌تواند بر اساس ورودیهای دریافت شده از محیط، احتمال انجام

عملیات خود را بروز درآورد تا کارایی خود را بهبود دهد. این ماشین تعداد محدودی عمل (Action) را می‌تواند انجام دهد؛ هر عملی که انجام می‌دهد، توسط محیطی احتمالی ارزیابی می‌گردد و پاسخی به آن داده می‌شود. اتوماتا از این پاسخ استفاده نموده و عمل بعدی را انتخاب می‌کند. در طی این فرایند، اتوماتا یاد می‌گیرد که چگونه بهترین عمل را انتخاب نماید.

هدف اتوماتای یادگیر این است که بتواند از بین یک سری اعمال مجاز، عمل بهینه را تعیین کند. عمل بهینه عملی است که احتمال دریافت پاداش از محیط را به حداکثر برساند. کارکرد اتوماتای یادگیر را می‌توان به صورت چرخه‌های بازخورد تکراری دید که در آن اتوماتا با محیط تعامل می‌کند. در هر چرخه، اتوماتا یک عمل را انجام می‌دهد که باعث دریافت یک پاسخ از محیط می‌شود. این پاسخ می‌تواند پاداش و یا جریمه باشد. اتوماتا از این پاسخ به عنوان دانشی برای تعیین عمل بعدی استفاده می‌کند. به این ترتیب اتوماتا خود را با محیط سازگار می‌کند.

اتوماتای یادگیر به دو نوع با ساختار ثابت و با ساختار متغیر تقسیم می‌شود. با توجه به استفاده‌ای که در این مقاله صورت گرفته است، توضیح مختصری در مورد نوع با ساختار متغیر می‌دهیم.

۳-۱. اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر

اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر، توسط ۴ تایی $\{\alpha, \beta, p, T\}$ نشان داده می‌شود که در آن $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_r\}$ مجموعه عملهای اتوماتا، $\beta \equiv \{\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m\}$ مجموعه ورودیهای اتوماتا، $p \equiv \{p_1, p_2, \cdots, p_r\}$ بردار احتمال انتخاب هر یک از عملها و $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$ الگوریتم یادگیری می‌باشد. در این نوع از اتوماتاها، اگر عمل α_i در مرحله n-ام انتخاب شود و پاسخ مطلوب از محیط دریافت نماید، احتمال $p_i(n)$ افزایش یافته و سایر احتمالها کاهش می‌یابند و برای پاسخ نامطلوب، احتمال $p_i(n)$ کاهش یافته و سایر احتمالها افزایش می‌یابند. در هر حال، تغییرات به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا حاصل جمع $p_i(n)$ ها همواره ثابت و مساوی یک باقی بماند. الگوریتم زیر یک نمونه از الگوریتمهای یادگیری خطی در اتوماتای با ساختار متغیر است.

هنگام دریافت پاسخ مطلوب از محیط، افزایش احتمال عمل انجام شده و کاهش احتمال سایر اعمال، با توجه به روابط (۱) و (۲) انجام می‌شود.

$$p_i(n+1) = p_i(n) + a[1 - p_i(n)] \tag{۱}$$

$$p_j(n+1) = (1-a)p_j(n) \quad \forall j \;\; j \neq i \tag{۲}$$

هنگام دریافت پاسخ نامطلوب از محیط، کاهش احتمال عمل انجام شده و افزایش احتمال سایر اعمال، با توجه به روابط (۳) و (۴) انجام می‌شود.

$$p_i(n+1) = (1-b)p_i(n) \tag{۳}$$

$$p_j(n+1) = \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(n) \quad \forall j \;\; j \neq i \tag{۴}$$

در روابط فوق، a پارامتر پاداش و b پارامتر جریمه می‌باشد.

۴. اتوماتای یادگیر سلولی (Cellular Learning Automata)

اتوماتای یادگیر سلولی [۱۲][۱۳][۱۴][۱۵] که به تازگی مطرح شده است، مدلی برای سیستم‌هایی است که از اجزاء ساده‌ای تشکیل شده‌اند و رفتار هر جزء بر اساس رفتار همسایگانش و نیز تجربیات گذشته‌اش تعیین و اصلاح می‌شود. اجزاء ساده تشکیل دهنده این مدل از طریق کنش و واکنش با یکدیگر می‌توانند رفتار پیچیده‌ای از خود نشان دهند. هر اتوماتای یادگیر سلولی از یک اتوماتای سلولی تشکیل شده است و هر سلول آن به یک یا چند اتوماتای یادگیر مجهز می‌باشد که

وضعیت این سلول را مشخص می‌سازد. همانند اتوماتای سلولی، قانون محلی در محیط حاکم است و این قانون تعیین می‌کند که آیا عمل انتخاب شده توسط یک اتوماتا در یک سلول، بایستی پاداش بگیرد و یا جریمه شود. عمل دادن پاداش و یا جریمه، منجر به بروز درآوردن ساختار اتوماتای یادگیر سلولی به منظور رسیدن به یک هدف مشخص می‌گردد.

یک اتوماتای یادگیر سلولی به صورت پنج‌تایی $< L, V, Q, \Omega, \Phi >$ نشان داده می‌شود. $L = \{l_1, l_2, ..., l_n\}$ مجموعه سلولهای موجود در اتوماتای یادگیر سلولی می‌باشد که در یک شبکه کارتزین قرار گرفته‌اند. $V = \{v_i, i \in L\}$ مجموعه سلولهای همسایه یک سلول، در اتوماتای یادگیر سلولی است. $Q = \{q_1, q_2, ..., q_k\}$ مجموعه اعمال مجاز یک اتوماتای ساکن در یک سلول و $\Omega = \{x : L \rightarrow Q\} = Q^N$ فضای حالت و Φ قانون حاکم بر اتوماتای یادگیر سلولی می‌باشد.

عملکرد اتوماتای یادگیر سلولی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. در هر لحظه هر اتوماتای یادگیر در اتوماتای یادگیر سلولی، یک عمل از مجموعه اعمال خود را انتخاب می‌کند. این عمل می‌تواند بر اساس مشاهدات قبلی و یا به صورت تصادفی انتخاب شود. عمل انتخاب شده، با توجه به اعمال انتخاب شده توسط سلولهای همسایه و قانون حاکم بر اتوماتای یادگیر سلولی، پاداش داده و یا جریمه می‌شود. با توجه به اینکه عمل انتخاب شده، پاداش گرفته و یا جریمه شده است، اتوماتا رفتار خود را تصحیح می‌کند و ساختار داخلی اتوماتا بهنگام می‌گردد. معمولاً عمل بروز درآوردن تمام اتوماتاها، به صورت همزمان انجام می‌شود. بعد از بروز درآوردن، هر اتوماتا در اتوماتای یادگیر سلولی، دوباره یک عمل از مجموعه اعمال خود را انتخاب کرده و انجام می‌دهد. فرایند انتخاب عمل و دادن پاداش و یا جریمه، تا زمانی که سیستم به حالت پایدار برسد و یا یک معیار از قبل تعریف شده‌ای برقرار شود، ادامه می‌یابد.

۵. مدل اتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه‌سازی فوق‌چرخه

برای مولکولهای فوق‌چرخه می‌توان فرض جدیدی را مطرح کرد که با توجه به آن، همسایگی با مولکولهای کاتالیزور و همنوع، باعث افزایش مدت زندگی یک مولکول می‌شود. برای مشاهده نتایج وجود این فرض برای مولکولها، از روش مبتنی بر مدل اتوماتای سلولی که روش رایج مدل‌سازی فوق‌چرخه است، نمی‌توان استفاده کرد؛ زیرا در مدل اتوماتای سلولی اطلاعاتی در مورد اتفاقات گذشته وجود ندارد. در این بخش، ما مدل اتوماتای یادگیر سلولی را به عنوان یک روش جدید برای شبیه‌سازی ظرف مولکولهای فوق‌چرخه پیشنهاد می‌کنیم. برای این کار از یک اتوماتای یادگیر سلولی با یک شبکه مربعی ۲۰۰*۲۰۰ از سلولها استفاده می‌کنیم که در آن، اتوماتاهای یادگیر به طور همزمان عمل بعدی را انتخاب می‌کنند. عمل انتخابی اتوماتای یادگیر مستقر در یک سلول، در حقیقت انتخاب گونه مولکولی موجود در آن سلول می‌باشد. ۹ گونه مولکولی را برای فوق‌چرخه در نظر می‌گیریم که با رنگ از یکدیگر متمایز می‌شوند. با توجه به اینکه یک سلول می‌تواند محتوی یک گونه مولکولی و یا خالی باشد، اتوماتای یادگیر مستقر در هر سلول دارای ۱۰ عمل انتخابی خواهد بود. مثلاً یک سلول می‌تواند عمل گونه ۱ یا عمل خالی را انتخاب کند. اتوماتاهای یادگیر دارای ساختار متغیر می‌باشند و از الگوریتم یادگیری خطی که در بخش ۳ ذکر شد، استفاده می‌کنند. پارامتر پاداش و جریمه را یکسان و برابر با ۰٫۹ قرار می‌دهیم.

در ابتدا ظرف مولکولها را به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌کنیم؛ به این صورت که ابتدا نیمی از سلولها به طور تصادفی انتخاب شده و دارای حالت خالی می‌شوند و برای بقیه سلولها به طور تصادفی با احتمال یکسان، یکی از ۹ گونه مولکولی را در آنها قرار می‌دهیم. بردارهای احتمال اتوماتاهای یادگیر در ابتدا دارای مقادیر مساوی احتمال برای همه اعمال می‌باشند.

۵-۱. مجموعه اعمال متغیر

یک تفاوتی که اتوماتای یادگیر سلولی استفاده شده در این شبیه‌سازی با نسخه استاندارد آن دارد این است که یک مجموعه مرجع از اعمال انتخابی برای اتوماتاهای یادگیر وجود دارد و در هر مرحله، اعمال مجازی که اتوماتای یادگیر مستقر در یک سلول می‌بایست یکی از آنها را انتخاب نماید، از بین اعمال مجموعه مرجع تعیین می‌گردد. بنابراین با اینکه در این شبیه‌سازی، مجموعه اعمالی که به طور کلی برای اتوماتاهای یادگیر وجود دارد، دارای ۱۰ عضو است ولی در هر مرحله، انتخابهای اتوماتای یادگیر مستقر در هر سلول با بقیه سلولها متفاوت و همانطور که در ادامه خواهیم دید حداکثر دارای ۵ عضو می‌باشد. بنابراین در هر مرحله اعمال مجاز برای هر اتوماتا باید مشخص شود. برای این کار به این ترتیب عمل می‌کنیم که اگر سلول پر باشد، یعنی حاوی یک مولکول از یک گونه باشد، اتوماتای یادگیر در آن سلول برای عمل بعدی خود فقط دارای دو انتخاب می‌باشد. عمل اول، عمل خالی است؛ یعنی مولکول موجود در آن سلول در مرحله بعد از بین می‌رود. عمل دوم، عمل گونه فعلی موجود در سلول است؛ یعنی مولکول در مرحله بعد همچنان در سلول به زندگی ادامه می‌دهد. حال اگر سلول خالی باشد، در مرحله بعد سلول می‌تواند خالی باقی بماند و یا اینکه یکی از چهار مولکول موجود در چهار سلول همسایه خود را در خود تکثیر کند. بنابراین اتوماتای یادگیر مستقر در یک سلول خالی، برای مرحله بعد حداکثر از بین پنج عمل باید عمل خود را انتخاب کند.

۵-۲. قانون پاداش و جریمه

بعد از اینکه اتوماتاهای یادگیر، یکی از اعمال مجاز خود را به طور همزمان انتخاب کردند، محیط باید مطلوب و یا نامطلوب بودن عمل انتخاب شده برای هر اتوماتا را تعیین کند. در این مدل به سلولهایی که خالی باشند پاداش و یا جریمه‌ای تعلق نمی‌گیرد. اگر یک سلول پر باشد، مثلاً حاوی یک مولکول از گونه A باشد، به اتوماتای یادگیر مستقر در آن در صورتی پاداش داده می‌شود که یکی از دو حالت زیر برقرار باشد:

۱. همه همسایگان سلول در مدل همسایگی مور، حاوی مولکولی از گونه A و یا خالی باشند.

۲. حداقل یکی از همسایگان سلول در مدل همسایگی مور، حاوی مولکول کاتالیزور گونه A باشد.

اگر هیچ کدام از دو حالت بالا اتفاق نیفتاده بود، به اتوماتای یادگیر جریمه تعلق می‌گیرد.

با توجه به این قانون، مولکولهایی شانس بیشتری برای زندگی و تکثیر دارند که در کنار کاتالیزور و یا همنوعان خود باشند.

۵-۳. تشکیل ساختارهای مارپیچی

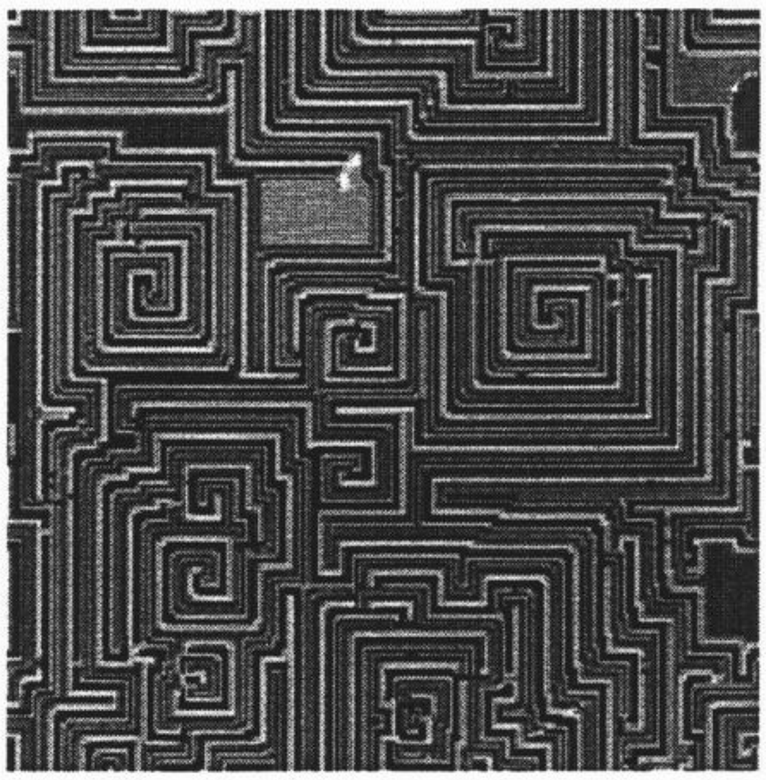
با شروع شبیه‌سازی، مولکولهای یک گونه در کنار مولکولهای کاتالیزور خود تجمع می‌کنند. بعد از شکل‌گیری این تجمعات مشاهده می‌شود که وقتی مولکولهای یک گونه از بین می‌روند، مولکولهای گونه‌ای که توسط آن کاتالیز می‌شود، جایگزین آنها می‌شوند. این مسأله موجب می‌شود مولکولهای یک گونه به سمت مولکولهای کاتالیزور خود حرکت کنند. این حرکات در نهایت منجر به تشکیل ساختارهای مارپیچی می‌شود که دارای حرکات موجی می‌باشند.

هر مارپیچ شامل مولکولهایی از همه گونه‌ها می‌باشد که به ترتیب رابطه کاتالیزوری قرار گرفته‌اند. مارپیچها علاوه بر حرکت موجی به سمت بیرون، چرخش نیز دارند. بیشتر مارپیچها به صورت جفتی هستند؛ یعنی دو مارپیچ در کنار هم قرار دارند که در جهت خلاف یکدیگر می‌چرخند. در ادامه کار، بعضی از مارپیچها از بین می‌روند. در نهایت یک الگوی منظم بر ظرف مولکولها حاکم می‌شود که در آن، مرکز مارپیچها ثابت است و همه آنها دوره زمانی چرخش یکسانی دارند و وسط یک مارپیچ به عنوان مرکز رشد آن عمل می‌کند.

بر خلاف مدل اتوماتای سلولی، حرکت مارپیچها برای همیشه ادامه نمی‌یابد. در ادامه کار مشاهده می‌شود که در مرکز چرخش بعضی از آنها، ساختارهای ثابتی شکل می‌گیرند که به تدریج بزرگتر شده و کل ظرف را فرا می‌گیرند. شکل ۲ (الف) ظرف مولکولها را در مرحله زمانی ۳۰۰ نشان می‌دهد. می‌بینیم که تا این زمان چهار تا از مارپیچها از سمت مرکز به بیرون، در حالی که همچنان به چرخش و حرکت موجی خود ادامه می‌دهند، در حال تشکیل ساختار مارپیچی ثابت هستند. بقیه مارپیچها حرکات خود را ادامه می‌دهند و هنگامی که امواج آنها به یک ساختار ثابت برخورد می‌کند، با تشکیل لایه‌هایی به شکل‌گیری آن کمک می‌کنند.

شکل ۲ (ب) ظرف مولکولها را در مرحله زمانی ۱۰۰۰ و در حالی که کل ظرف از ساختارهای ثابت پر شده است، نشان می‌دهد. این الگو در ادامه کار بدون تغییر باقی می‌ماند و فقط در مرز بین دو گونه مولکولی متفاوت، که رابطه کاتالیزوری با یکدیگر ندارند، خطی از سلولها وجود دارد که به طور متناوب، مولکولی از یکی از دو گونه را در خود جای می‌دهند و هر دو گونه برای پر کردن این خط مرزی شانس مساوی دارند.

(الف) مرحله زمانی ۳۰۰



(ب) مرحله زمانی ۱۰۰۰

شکل ۲ : ظرف مولکولها در مدل اتوماتای یادگیر سلولی

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله فرض جدیدی را برای مولکولهای یک فوق‌چرخه در تکامل ماقبل حیات مطرح کردیم که بر اساس آن، همسایگی با مولکولهای کاتالیزور و همنوع باعث افزایش مدت زندگی یک مولکول می‌شود. برای شبیه‌سازی یک فوق‌چرخه با این فرض، نمی‌توان از روش معمول مبتنی بر مدل اتوماتای سلولی استفاده کرد. ما روش مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی را به عنوان یک روش جدید برای شبیه‌سازی فوق‌چرخه‌ها در تکامل ماقبل حیات پیشنهاد کردیم. در مدل ارائه شده، تعامل مولکولها پس از مدتی منجر به شکل‌گیری ساختارهای ثابت در ظرف مولکولهای یک فوق‌چرخه می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده بوجود آمدن اجسام و موجوداتی از این مولکولها می‌باشد.

مراجع

[1] M. Eigen, "Self-organization of matter and the evolution of biological macro-molecules", *Naturwissenschaften*, no. 58, 1971, pp. 465-523.

[2] M. Eigen and P. Schuster, "*The Hypercycle: A Principle of Natural Self-Organization*", Springer-Verlag, Berlin, 1979.

[3] M. C. Boerlijst and P. Hogeweg, "Spiral Wave Structure in Pre-Biotic Evolution: Hypercycles Stable Against Parasites", *Physica D*, no. 48, 1991, pp. 17-28.
[4] M. C. Boerlijst and P. Hogeweg, "Self-structuring and selection: Spiral waves as a substrate for prebiotic evolution", *Proceedings of the Second Workshop on Artificial Life*, February 1990 , pp. 255-276.
[5] Kazumasa Oida, "The Birth and Death Processes of Hypercycle Spirals", *Advances in Complex Systems*, vol. 6, no. 4, 2003, pp. 515-535.
[6] M. C. Boerlijst and P. Hogeweg, "Attractors and Spatial Patterns in Hypercycles with Negative Interactions", *J. Theor. Biol.*, no. 176, 1995, pp. 199-210.
[7] S. Wolfram, "Cellular Automata", *Los Alamos Science*, no. 9, Fall 1983, pp. 2-21.
[8] N.H. Packard and S. Wolfram, "Two-Dimensional Cellular Automata", *Journal of Statistical Physics*, no. 38, March 1985, pp. 901-946.
[9] S. Wolfram, "Universality and complexity in cellular automata", *Physica D*, no. 10, January 1984, pp. 1-35.
[10] Narendra K.S. and Thathachar M.A.L., "*Learning Automata: An Introduction*", Prentice Hall, 1989.
[۱۱] محمدرضا خجسته و محمدرضا میبدی، « اتوماتای یادگیر به عنوان مدلی برای همکاری در یک تیم از عاملها»، مجموعه *مقالات هشتمین کنفرانس انجمن کامپیوتر ایران*، ۱۳۸۱، ص ۱۲۶-۱۱۶.
[۱۲] محمدرضا میبدی، حمید بیگی و مسعود طاهرخانی، «اتوماتای یادگیر سلولی»، مجموعه *مقالات ششمین کنفرانس انجمن کامپیوتر ایران*، ۱۳۷۹، ص ۱۶۳-۱۵۳.
[13] Meybodi, M. R. and Kharazmi, M. R. "Cellular Learning Automata and Its Application to Image Processing", *Journal of Amirkabir*, Vol. 14, No. 56A, 2004, pp. 1101-1126.
[14] Meybodi, M. R. , Beigy, H. and M. Taherkhani, M. "Cellular Learning Automata and Its Applications", *Journal of Science and Technology*, University of Sharif, No. 25, Autumn/Winter 2003-2004, pp. 54-77.
[15] Beigy, H., and Meybodi, M. R., "A Mathematical Framework for Cellular Learning Automata", *Advances on Complex Systems*, Vol. 7, No. 3, 2004, pp. 1-25.