

## روش مبتنی بر اتوماتای سلولی برای طرح مسیر ربات‌های متحرک بهبودیافته با مکانیزم برگرفته از اجتماع مورچگان

عادل اکبری مجد<sup>۱</sup>، اکبر حسن‌زاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل- ایران

akbarimajd@uma.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

akbar.hassanzade@gmail.com

**چکیده:** در طرح ریزی مسیر ربات‌های متحرک وجود موانع مقعر چالشی اساسی به شمار می‌آید. به ویژه در طرح ریزی زمان-واقعی که بازنمایی کاملی از نقشه محیط در دست نیست، این چالش بیشتر جلوه می‌کند. در چنین شرایطی، وجود کمینه‌های محلی و هزینه محاسباتی زیاد مهمترین مشکلات پیش رو هستند. در این مقاله، به منظور کاهش هزینه محاسباتی، اتوماتای سلولی به عنوان یک روش محاسباتی توزیع شده با قابلیت پردازش موازی به عنوان ابزار طرح‌ریزی مسیر به کار گرفته می‌شود. محیط ربات به صورت یک اتوماتای دو بعدی با چهار حالت مدل می‌شود و قواعد تکاملی اتوماتا برای انجام طرح ریزی مسیر ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی برای سیستم‌های تک رباتی و چند رباتی مناسب است. در ادامه، روش پیشنهاد شده با یک مکانیزم الهام گرفته از اجتماع مورچگان بهبود می‌یابد تا برای موانع مقعر هم قابل استفاده باشد. مزیت اصلی روش پیشنهاد شده در این مقاله، قابلیت انجام زمان-واقعی طرح‌ریزی مسیر ربات‌های متحرک در محیط‌هایی با موانع محدب و مقعر است، بدون آنکه نیازی به بازنمایی محیط باشد.

**کلید واژه‌های کلیدی:** اتوماتای سلولی، الگوریتم اجتماع مورچگان، ربات‌های متحرک، سیستم‌های چند رباتی، طرح ریزی مسیر

### ۱- مقدمه

روش‌های متعددی وجود دارد که این روش‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند [2][3]: روش‌های تفکیک سلولی<sup>۱</sup>، روش‌های طرح جاده<sup>۲</sup> و روش‌های میدان پتانسیل. در روش‌های تفکیک سلولی فضای وضعیت به صورت شبکه‌ای از سلول‌ها تقسیم بندی می‌شود و سپس با اتصال سلول‌های مجاور یک گراف اتصال ایجاد می‌شود. با جستجو در این گراف مسیری از وضعیت اولیه به وضعیت نهایی پیدا خواهد شد. روش‌های طرح جاده فضاهای آزاد متصل به هم فضای وضعیت را به صورت شبکه یک بعدی از راه‌های استاندارد مدل می‌کنند که مسیر ربات باید درون این شبکه جستجو شود. در روش‌های میدان پتانسیل ربات به صورت یک جسم متحرک باردار درون یک میدان

مسئله طرح ریزی مسیر<sup>۱</sup> یک ربات متحرک عبارت است از یافتن یک مسیر آزاد بدون تصادم بین دو نقطه مشخص از فضای وضعیت ربات [0]. ربات باید از بین موانع عبور کند و به موقعیت هدف برسد. برای حل مسئله طرح مسیر ربات‌های متحرک در محیط‌های با موانع محدب

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۴/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۳

نام نویسنده مسؤول: عادل اکبری مجد

نشانی نویسنده مسؤول: ایران- اردبیل- دانشگاه محقق اردبیلی

- دانشکده فنی - گروه مهندسی برق و کامپیوتر

اجتماع مورچگان [0]، بهینه سازی اجتماع ذرات [0] و الگوریتم ژنتیک [9] از جمله این روش‌ها هستند.

اتوماتاهای سلولی به عنوان سیستم‌های توزیع شده<sup>۷</sup> با گسترش فضایی<sup>۸</sup> در ابتدا به وسیله فان نیومن ابداع شدند [10] و به وسیله بورکس گسترش یافتند [0][0]. اتوماتای سلولی مجموعه‌ای از سلول‌ها است که در شبکه‌ی  $d$ -بُعدی قرار گرفته‌اند؛ به طوری که حالت هر سلول به صورت تابعی از حالت‌های سلول‌های همسایه و مبتنی بر مجموعه‌ای از قواعد به روز رسانی می‌شود. سلول‌ها در اتوماتای سلولی عناصر ساده‌ای با اتصالات محلی هستند که مجموعه این سلول‌ها توانایی انجام محاسبات پیچیده را با درجه بالایی از قوام و کارایی دارند. همچنین اتوماتای سلولی را به عنوان سیستم‌های دینامیکی می‌توان جایگزینی برای معادلات دیفرانسیل در نظر گرفت [0]. به این دلایل اتوماتای سلولی به طور وسیع در فناوری، علوم رایانه، ریاضیات و علوم طبیعی به کار رفته است. پردازش تصویر [0]، ربات‌های خود شکل پذیر مجدد [0]، ترکیب اسیدهای آمینه [0] و مدلسازی فرآیندهایی مانند رشد جوامع شهری [0]، زمین لرزه [0] و تشکیل کهکشان‌ها [0] مثال‌هایی از کاربردهای اتوماتای سلولی هستند. اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سریع مدل‌های علمی و انجام عملیات محاسباتی نیز به کار رفته است [20].

با توجه مزیت در پردازش‌های موازی و ویژگی محاسبات محلی، اتوماتای سلولی می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای انجام طرح‌ریزی مسیر ربات‌ها به صورت سریع و مطمئن به کار رود. در [0] یک الگوریتم ساده طرح‌ریزی مسیر ربات‌های متحرک در محیط‌هایی که فقط دارای موانع محدب هستند، ارائه شد. ژیوناس و همکارانش یک الگوریتم طرح‌ریزی مسیر بدون تصادم را برای یک ربات لوزی شکل معرفی کردند [0]. الگوریتم آنها مبتنی بر تصویر فضای آزاد به روی یک گراف وورونی<sup>۹</sup> بود که این گراف از تکامل زمانی یک اتوماتای سلولی ساخته می‌شد. این روش تنها برای ربات‌های با شکل خاص لوزی قابل اعمال بود. در [0] نشان داده شد که اتوماتای سلولی می‌تواند امکان انجام محاسبات کارآمد به منظور طرح‌ریزی حرکت یک ربات منفرد در محیطی انباشته از موانع را فراهم آورد.

مغناطیسی مدل می‌شود. در این میدان مغناطیسی بار غیر همنام با ربات به نقطه هدف و بار همنام با ربات به موانع تخصیص داده می‌شود؛ در نتیجه ربات به سوی هدف کشیده می‌شود و از اطراف موانع دفع می‌شود. تمامی این رویکردها به یک بازنمایی<sup>۴</sup> کامل از فضای وضعیت ربات نیاز دارند که این امر مستلزم انجام طرح مسیر در زمان غیر واقعی<sup>۵</sup> و صرف هزینه محاسباتی زیاد است. به طور کلی، پیچیدگی محاسباتی با افزایش درجات آزادی ربات و ابعاد فضای وضعیت به صورت نمایی افزایش می‌یابد [4]. از طرفی، هر کدام از فرضیات زیر نیز موجب افزایش پیچیدگی مسأله طرح مسیر می‌شوند:

۱- محیط‌های چند رباتی - چند هدفی؛

۲- محیط‌های دینامیک (با موانع متحرک)؛

۳- محیط‌های با موانع مقعر.

پیدا کردن یک روش زمان-واقعی<sup>۶</sup> طرح مسیر با کارایی مناسب در چنین محیط‌هایی همواره یک بحث چالش برانگیز بوده است.

هیچ‌کدام از روش‌های موجود (بخش بعد را ببینید) در این زمینه روش‌های همه جانبه‌ای نیستند که هم برای موانع مقعر و محدب کاربرد داشته باشند، هم در محیط‌های چند رباتی قابل استفاده باشند و هم برای محیط‌های با موانع متحرک مناسب باشند. ما در این مقاله یک روش طرح مسیر مبتنی بر ترکیبی از روش اتوماتای سلولی و یک روش الهام گرفته از اجتماع مورچگان معرفی می‌کنیم که فقط اطلاعات محلی محیط را به کار می‌گیرد و نیاز به بازنمایی کامل محیط ندارد. این روش برای سیستم‌های چند رباتی، سیستم‌های با موانع مقعر و موانع متحرک قابل اعمال است.

## ۲- تحقیقات مرتبط

توسعه روش‌های طرح مسیر کم هزینه (از نظر محاسباتی) مبتنی بر بازنمایی محلی فضای کار همواره مورد توجه بوده است. به دلیل پیچیدگی مسأله، تکنیک‌های مختلف هوش محاسباتی برای طرح مسیر ربات‌های متحرک به کار رفته‌اند. الگوریتم ABC [0]، سیستم‌های فازی [0]،

### ۳- روش طرح ریزی مبتنی بر اتوماتای

#### سلولی

#### ۳-۱- اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی متشکل از شبکه‌ای  $d$ -بعدی از سلول‌هاست [0]. هر سلول یک ماشین حالت-محدود است که با نمایه  $n$  نمایش داده می‌شود ( $n=1, \dots, N$ ). برای مثال در یک شبکه دوبعدی  $I \times J$  داریم:  $N=I \times J$ . هر سلول می‌تواند در یکی از حالت‌های متناهی قرار داشته باشد و می‌تواند به طور زمان-واقعی با سلول‌های مجاور تعامل کند تا حالت خود را به روز نماید. تکامل اتوماتای سلولی بر مبنای یک قاعده محلی که برای همه سلول‌ها یکسان است انجام می‌شود [0][0]. حالت‌های اتوماتا می‌تواند با تعدادی عدد صحیح یا تعدادی نماد بیان شود. حالت سلول  $n$  در لحظه  $t$  به صورت  $S_n^t$  نشان داده می‌شود. قاعده به روز رسانی اتوماتا حالت جاری یک سلول و سلول‌های مجاور را به عنوان ورودی می‌گیرد و حالت بعدی آن سلول را به عنوان خروجی به دست می‌دهد. قواعد اتوماتای سلولی می‌توانند به صورت جدول یا به صورت تابع بیان شوند. مفهوم همسایگی یک مفهوم کلیدی در اتوماتای سلولی است. برای آرایه یک بُعدی تعریف همسایگی ساده است؛ اما برای آرایه دو بُعدی تعریف‌های مختلفی برای همسایگی وجود دارد. همسایگی نیومن و همسایگی مور<sup>۱۰</sup> از مشهورترین آنها هستند. همسایگی نیومن هر هشت سلول موجود در مجاورت سلول وسط را به عنوان همسایگی در نظر می‌گیرد در حالی که همسایگی مور فقط سلول‌های بالا، پایین، چپ و راست را به عنوان همسایگی تعریف می‌کند. ما در این مقاله از مفهوم همسایگی نیومن استفاده می‌کنیم.

شکل (۱) یک اتوماتای سلولی یک بُعدی با حالت‌های دودویی و تعریف همسایگی به شعاع یک ( $r=1$ ) را نشان می‌دهد. شبکه و قواعد به روز رسانی آن به همراه دو وضعیت متوالی شبکه در شکل نشان داده شده‌اند.

مارچز یک الگوریتم واکنشی مبتنی بر محاسبات چند لایه را برای انجام طرح ریزی مسیر ربات‌های متحرک غیرهولونومیک پیشنهاد کرد [0]. او پس از آن برای یک سیستم چندرباتی متشکل از ربات‌هایی با شکل‌ها و اندازه‌های متعدد و کینماتیک متفاوت، یک روش طرح‌ریزی مسیر سریع را ارائه کرد [0]. در روش‌های پیشنهادی مارچز، ربات‌ها باید اطلاعات اولیه‌ای را درباره شکل و اندازه موانع بدانند و در واقع به یک بازنمایی جزئی اولیه از محیط نیاز دارند. به عنوان کارهای پیش زمینه برای این مقاله در [0] یک روش غیر زمان-واقعی مبتنی بر اتوماتای سلولی برای طرح‌ریزی مسیر یک ربات متحرک پیشنهاد گردید که این روش در [0] برای موانع مقعر هم تعمیم یافت.

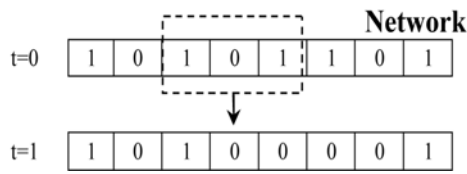
در هیچکدام از کارهای فوق روشی برای طرح ریزی زمان-واقعی ربات‌های متحرک که قابلیت استفاده در سیستم‌های تک رباتی و چند رباتی را داشته باشد و در عین حال مناسب محیط‌های با موانع مقعر و محدب بوده و به بازنمایی اولیه نقشه محیط هم نیاز نداشته باشد، ارائه نشده است.

اولین هدف این مقاله، توسعه یک روش مبتنی بر اتوماتای سلولی است. استفاده از اتوماتای سلولی امکان طرح ریزی سریع و بدون نیاز به بازنمایی محیط را فراهم می‌آورد. یک چالش مهم در طرح مسیر ربات‌های متحرک عبور از موانع مقعر است؛ چرا که به علت وجود کمینه محلی در الگوریتم جستجو، ربات ممکن است درون تفرع موانع به دام افتد. مکانیزم‌های اجتماع مورچگان با توجه به مزیت‌شان در حل مسائل پیچیده با فضای جستجوی بزرگ [0][0] می‌توانند نامزدهای خوبی برای حل مشکل موانع مقعر در طرح مسیر ربات‌ها باشند. بنابراین در این مقاله، به عنوان هدف دوم، یک الگوریتم الهام گرفته از اجتماع مورچگان پیشنهاد می‌شود تا روش طرح مسیر مبتنی بر اتوماتای سلولی را برای استفاده در محیط‌های با موانع مقعر تعمیم دهد.

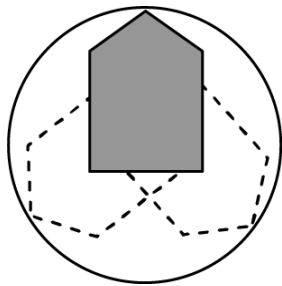
در نهایت، مزیت اصلی روش پیشنهاد شده در این مقاله قابلیت انجام زمان-واقعی طرح‌ریزی مسیر ربات‌های متحرک در محیط‌هایی با موانع محدب و مقعر است، بدون آنکه نیازی به بازنمایی محیط باشد.

## ۳-۲- الگوریتم طرح مسیر

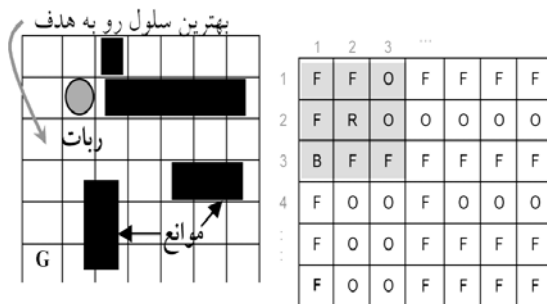
Rule Base	
Neighborhood	000 001 010 011 100 101 110 111
Output	0 1 1 0 1 0 0 1



شکل (۱): یک اتوماتای سلولی یک بُعدی و قاعده به روزرسانی آن



شکل (۲): ربات (با در نظر گرفتن جهت گیری های مختلف) می تواند درون یک دایره محاط شود و به صورت یک ربات دایره‌ای دیده شود.



شکل (۳): فضای کاری ربات را می توان به صورت یک اتوماتای سلولی دو بعدی با چهار حالت  $\{F, O, R, B\}$  مدل کرد. در شکل سمت راست سلول هدف با  $F$  پررنگ نشان داده شده است.

در این بخش یک تکنیک طرح مسیر ربات‌های متحرک را مبتنی بر اتوماتای سلولی ارائه می‌کنیم. این تکنیک اطلاعات محلی فضای وضعیت را به کار می‌گیرد و نیاز به بازنمایی کلی محیط ندارد. فرض می‌شود که ربات بردار موقعیت هدف  $\vec{P}_g = [x_g, x_g]^T$  را می‌داند و قادر است که در هر گام زمانی بردار موقعیت خود  $\vec{P}_r = [x_r, x_r]^T$  را به دست آورد (مثلاً از طریق GPS یا DR<sup>(۱)</sup>). همچنین فرض می‌شود که ربات فقط یک سیستم حسگری با برد کوتاه نیاز دارد تا مشخص کند که سلول‌های مجاور خالی هستند یا نه. این امر مثلاً با نصب هشت حسگر ثابت اولتراسونیک (یا یک حسگر گردان) بر روی ربات ممکن می‌شود. برای سادگی مدل‌سازی، ربات با در نظر گرفتن تمام جهت گیری‌های ممکن آن مطابق شکل (۲) درون یک دایره محاط می‌شود و به صورت یک ربات همه‌سویه در نظر گرفته می‌شود. فضای وضعیت هم به صورت یک شبکه متشکل از سلول‌های مربعی تقسیم بندی می‌شود به گونه‌ای که ربات بتواند به طور کامل درون یک سلول قرار گیرد. در این شبکه تعدادی از سلول‌ها حاوی ربات هستند (یک سلول در سیستم تک رباتی)، درون تعدادی از سلول‌ها مانع قرار دارد و سایر سلول‌ها آزاد هستند. اکنون شبکه‌ای از سلول‌ها داریم که هر یک از سلول‌ها می‌تواند سلول ربات ( $R$ )، سلول مانع ( $O$ ) یا سلول آزاد ( $F$ ) باشد. می‌توان این شبکه را یک اتوماتای سلولی با سه حالت ممکن  $\{F, O, R\}$  تعبیر کرد. تعریف مناسب قواعد تکامل اتوماتا می‌تواند به یک اتوماتای سلولی طرح‌کننده مسیر منجر شود. برای ایجاد قواعد مورد نظر مفهوم «بهترین سلول رو به هدف»<sup>(۲)</sup> را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

**تعریف:** بهترین سلول رو به هدف سلولی است که در بین سلول‌های خالی در همسایگی سلول ربات، نزدیکترین سلول به هدف باشد.

اگر بهترین سلول رو به هدف را با  $B$  نمایش دهیم، اتوماتای سلولی دارای چهار حالت خواهد بود:  $\{F, O, R, B\}$  شکل (۳) یک نمای شماتیک از محیط شبکه بندی یک ربات و سلول‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

$$\mathbf{K} = \left\{ k \in \{1, \dots, 8\} \mid \frac{\langle \bar{D}_k, \bar{P}_g - \bar{P}_r \rangle}{|\bar{D}_k|} = \max \left( \frac{\langle \bar{D}_k, \bar{P}_g - \bar{P}_r \rangle}{|\bar{D}_k|} \right) \right\}$$

if  $\bar{K} > 1$

$$\mathbf{K} = \{ k \in \mathbf{K} \mid \bar{D}_k(2) = \min(\bar{D}_k(2)) \}$$

if  $\bar{K} > 1$

$$\mathbf{K} = \{ k \in \mathbf{K} \mid \bar{D}_k(1) = \max(\bar{D}_k(1)) \}$$

Number of best goal directing cell =  $k \in \mathbf{K}$

شکل (۶): شبه کد پیدا کردن بهترین سلول رو به هدف.  $\bar{K}$  کاردنا لیته (تعداد اعضا) مجموعه  $\mathbf{K}$  را نشان می‌دهد.

R2	F	F
F	R1	O
F	F	O

الف-قبل از اعمال قاعده اتوماتا

R2	F	F
F	B1	O
F	R1	O

ب-پس از اعمال قاعده اتوماتا

شکل (۷): ربات‌ها در محیط چند رباتی با هم برخورد نخواهند کرد.

از زاویه بین بردار  $\bar{P}_g - \bar{P}_r$  و بردارهای جهت مذکور پیدا کرد. ( $\bar{P}_r$  و  $\bar{P}_g$  بردارهای موقعیت هدف و ربات هستند). زاویه بین این بردارها را می‌توان به مفهوم ضرب برداری آنها نسبت داد. از بین هشت سلول همسایگی، سلولی که مرتبط با بزرگترین مقدار ضرب برداری باشد، به عنوان بهترین سلول رو به هدف تعیین و با  $B$  نشان گذاری خواهد شد. شبه کد شکل (۶) برای پیدا کردن بهترین سلول رو به هدف نوشته شده است.

#### ۴- محیط‌های چند رباتی

روش ارائه شده در بخش قبل را می‌توان به آسانی با افزایش تعداد حالت‌ها برای محیط‌های چند رباتی هم تعمیم داد. برای مثال، در یک محیط دو رباتی هر سلول می‌تواند دارای یکی از حالت‌های ششگانه  $\{F, O, B1, BI, R1, R2\}$  باشد. به سادگی می‌توان نشان داد که با اعمال پی در پی الگوریتم شکل (۳) به سلول‌های ربات، طرح مسیر ربات‌های سیستم چند رباتی با موفقیت انجام خواهد شد:

- برای نزدیک شدن هر ربات به هدف خود، استدلال قبلی برقرار است.

```

while Robot cell (R) ≠ Goal Cell (G) do
  for n=1:N
    if  $S_n^t == R$ 
      find best goal directing cell:  $S_j^t = B$ 
     $S_n^t = R$ ;
     $S_n^t = F$ ;
    elseif  $S_n^t \neq R$ 
       $S_n^{t+1} = S_n^t$ 

```

شکل (۴): شبه کد برنامه تکامل اتوماتای سلولی

$\bar{D}_1 = [-1, -1]^T$	$\bar{D}_2 = [-1, 0]^T$	$\bar{D}_3 = [-1, 1]^T$
$\bar{D}_4 = [0, -1]^T$	Robot Cell	$\bar{D}_5 = [0, 1]^T$
$\bar{D}_6 = [1, -1]^T$	$\bar{D}_7 = [1, 0]^T$	$\bar{D}_8 = [1, 1]^T$

شکل (۵): بردارهای جهت در اطراف سلول ربات

اکنون قواعد اتوماتا را بر مبنای این اصل ساده بنام می‌کنیم که در هر گام سلول ربات  $R$  باید به بهترین سلول رو به هدف  $B$  منتقل شود و یک سلول آزاد  $F$  بر جای گذارد. این قاعده با استفاده از شبه کد شکل (۴) قابل پیاده سازی است. برای مثال اگر این قاعده را بر روی شبکه شکل (۳) اعمال کنیم، همسایگی نشان داده شده با رنگ خاکستری به صورت زیر به روز می‌شود:

F	F	O
F	R	O
B	F	F

→

F	F	O
F	F	O
R	F	F

و حالت سایر سلول‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. در واقع در یک محیط تک رباتی در هر گام زمانی فقط حالت یکی از سلول‌ها تغییر می‌کند.

با استفاده از الگوریتم شکل (۴)، سلول ربات در هر گام زمانی جایگزین بهترین سلول رو به هدف می‌شود. از آنجا که تعداد سلول‌های شبکه متناهی است و موانع مقعر نیز در محیط وجود ندارند، توقع می‌رود که سلول ربات در گام‌های زمانی متناهی به سلول هدف برسد.

پیدا کردن بهترین سلول رو به هدف یک مرحله اساسی در قاعده شکل (۴) است. برای انجام این کار بردارهای جهت را طبق شکل (۵) به هر یک از سلول‌های مجاور سلول ربات نسبت می‌دهیم. بهترین سلول رو به هدف را می‌توان با استفاده

یافته با تکنیک اجتماع ذرات را نشان می‌دهد که در آن هنگامی که سلول ربات یک سلول داخل ناحیه تععر را ترک می‌کند، حالت آن سلول به  $P$  (سلول فرمون) تغییر می‌یابد. برای توضیح بیشتر مطالب، شرایط شکل (۹) را در نظر بگیرید که در آن سلول هدف پایین‌ترین سلول در سمت چپ شبکه است. با اعمال قواعد به روز رسانی اتوماتا، سلول ربات روی مسیر نشان داده شده در شکل (۹-الف) حرکت می‌کند و بین سلول‌های  $C_1$  و  $C_2$  گیر می‌افتد. در صورتی که قاعده بهبود یافته را برای این شرایط اعمال کنیم، هنگامی که اتوماتا در سلول  $C_1$  با بلوک  $\begin{bmatrix} R & O \\ O & O \end{bmatrix}$  مواجه شود، سلول ربات ( $R$ ) هنگام ترک سلول  $C_1$  مقداری فرمون به جای خود قرار می‌دهد. در گام‌های بعدی زمانی عامل‌ها (ربات‌ها) سلول  $C_1$  را به عنوان  $B$  انتخاب نمی‌کنند و به آن منتقل نمی‌شوند.

با اعمال این قاعده بهبود یافته مسیر نشان داده شده در شکل (۹-ب) ایجاد می‌شود. در این شکل سلول‌های فرمون با رنگ خاکستری نشان داده شده‌اند. مشخص است که با اعمال قاعده بهبود یافته شکل (۶) ربات توانسته از ناحیه تععر خارج شود و به سمت هدف حرکت کند.

عملکرد این روش طرح‌ریزی در سیستم‌های چند رباتی بهتر هم خواهد بود. اگر اجتماعی از عامل‌های رباتی را در نظر بگیریم که حرکت خود را با یک تاخیر زمانی معین نسبت به همدیگر شروع می‌کنند، در حالی که هر کدام به طور مستقل الگوریتم بهبود یافته شکل (۸) را اجرا می‌کنند، مسیر ایجاد شده حتی هموارتر هم خواهد بود. برای مثال، شرایط شکل (۱۰) را در نظر بگیرید که در آن ربات  $R1$  قبلاً ناحیه تععر را پس از علامت گذاری آن ترک کرده است. ربات  $R2$  به سلول‌های فرمون وارد نخواهد شد و بدون ورود به داخل ناحیه تععر به سمت هدف حرکت خواهد کرد. در طرح ریزی غیر زمان-واقعی سیستم‌های تک رباتی هم می‌توان با استفاده از تعدادی عامل (ربات) مجازی، اجتماع ربات‌ها را تشکیل داد و مسیر همواری برای ربات ایجاد کرد.

• برای ارزیابی این که ربات‌ها به یکدیگر برخورد نخواهند کرد، بدون از دست رفتن کلیت دو ربات شکل (۷) را در نظر بگیرید. اگر قاعده اتوماتا ابتدا به ربات  $R1$  در شکل (۷-الف) اعمال شود، سلول ربات به سلول  $B1$  نقل مکان خواهد شد (مثلاً سلول وسط در شکل). اکنون در شکل (۷-ب)، سلول  $B$  قبلی دیگر یک سلول آزاد نیست و  $R2$  به آن سلول نخواهد رفت.

## ۵- مکانیزم برگرفته از اجتماع مورچگان برای عبور از موانع مقعر

الگوریتم طرح مسیر مبتنی بر اتوماتای سلولی که در بخش‌های قبل ارائه شد، موانع محیط را محدب در نظر می‌گیرد. با استفاده از یک روش الهام گرفته از اجتماع مورچگان می‌توان الگوریتم را به منظور استفاده در موانع مقعر توسعه داد.

در این اجتماع چندین عامل (ربات) در محیط همکاری می‌کنند؛ عامل‌های پیشرو نواحی تععر موانع را شناسایی و برای عامل‌های بعدی علامت گذاری می‌کنند. برای شناسایی ناحیه تععر در هر گام زمانی ربات پیشرو حالت سه سلول نزدیکتر به هدف را در همسایگی خود چک می‌کند اگر هر سه سلول مانع باشند، ربات سلول جاری را با ریختن مقدار معینی از فرمون علامت گذاری می‌کند. ربات‌های بعدی سلول‌های

```

while Robot cell (R) ≠ Goal Cell (G) do
  for n=1:N
    if  $S_n^t == R$ 
      find best goal directing cell:  $S_j^t = B$ 
       $S_n^t = R$ ;
      if cell n is in the concave area
         $S_n^t = F$ ;
      else
         $S_n^t = P$ ;
    elseif  $S^t \neq R$ 

```

شکل (۸): شبه کد برنامه تکامل اتوماتای سلولی بهبود یافته به وسیله تکنیک برگرفته از اجتماع مورچگان. در این الگوریتم ربات هنگام ترک یک سلول ناحیه تععر، فرمون برجای می‌گذارد.

فرمون را به عنوان مانع تلقی می‌کنند و از رفتن به آنها اجتناب می‌کنند. شکل (۸) شبه کد مربوط به الگوریتم بهبود

بتوان حالت سلول‌های قرار گرفته در همسایگی ربات را مشخص کرد.

در ابتدا یک محیط با تعدادی مانع محذب در نظر گرفته شد و الگوریتم پیشنهادی برای دو مجموعه از نقاط اولیه و هدف اعمال گردید. مسیرهای ایجاد شده در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. هرچند که مسیرهای ایجاد شده کوتاهترین مسیرهای ممکن نیستند، ولی با توجه به این که روش پیشنهاد شده یک روش زمان-واقعی است و بازنمایی کامل محیط را به کار نمی‌گیرد، طول مسیرها به اندازه قابل قبولی کوتاه هستند. در واقع، به دلیل عدم استفاده از بازنمایی کامل محیط، توقع نمی‌رود که الگوریتم پیشنهادی بتواند مسیر بهینه را پیدا کند و همین که یک مسیر کوتاه با طول معقول برای رسیدن به هدف پیدا شود، برای یک روش زمان-واقعی عملکرد قابل قبول تلقی خواهد شد.

در مرحله بعد یک محیط با موانع مقعر در نظر گرفته شد و الگوریتم بهبود یافته برای دو مجموعه نقطه اولیه هدف اعمال گردید. شکل (۱۲) مسیرهای ایجاد شده توسط الگوریتم و نتایج مربوطه را نشان می‌دهد. این شکل‌ها بر توانایی روش طرح‌ریزی پیشنهادی برای کارایی مناسب در محیط‌های با موانع مقعر دلالت دارد. ربات‌ها توانسته‌اند از تععر موانع بگذرند و درون آنها به دام نیفتند.

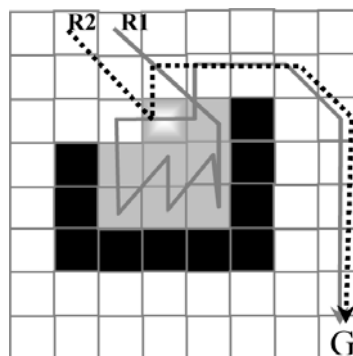
در مرحله سوم آزمایش‌ها، یک محیط دو رباتی مطابق شکل (۱۳) در نظر گرفته شد که در آن نقاط اولیه-هدف دو ربات به گونه ای انتخاب شد که مسیر ربات‌ها با همدیگر تداخل داشته باشند. با اجرای الگوریتم پیشنهادی، ربات‌ها مسیر خود را به شکلی تغییر دادند که بدون برخورد به یکدیگر به اهداف خود برسند. برای بررسی این که ربات‌ها با هم برخورد نکرده‌اند در این شکل برخی گام‌های زمانی ربات‌ها با شماره‌هایی درون دایره‌های سفید و سیاه مشخص شده‌اند که نشان می‌دهند دو ربات در یک لحظه در یک سلول یکسان قرار ندارند. از جنبه دیگر اگر ربات دوم برای ربات اول به عنوان مانع متحرک فرض شود، می‌توان نتیجه گرفت که این روش برای محیط‌هایی با موانع متحرک هم کاربرد دارد.

در واقع با این آزمایش‌ها عملکرد مورد انتظار روش پیشنهادی ارزیابی شده است. لازم است توضیح داده شود که چون برای ربات امکان حرکت مورب وجود نداشت، در آزمایش‌ها هر حرکت مورب به صورت ترکیبی از یک حرکت افقی و یک حرکت عمودی اجرا شده است.



الف- با اعمال قواعد بهبود نیافته اتوماتا ربات درون تععر مانع و میان سلولهای  $C_1$  و  $C_2$  به دام می‌افتد  
ب- با اعمال قواعد بهبود یافته ربات ناحیه تععر را با فرمون علامت گذاری می‌کند و با اجتناب از سلولهای فرمون از ناحیه تععر آن خارج می‌شود.

شکل (۹): تفاوت عملکرد قواعد بهبود نیافته اتوماتا (شکل (۸)) و بهبود یافته اتوماتا (شکل (۹)) در مواجهه با موانع مقعر

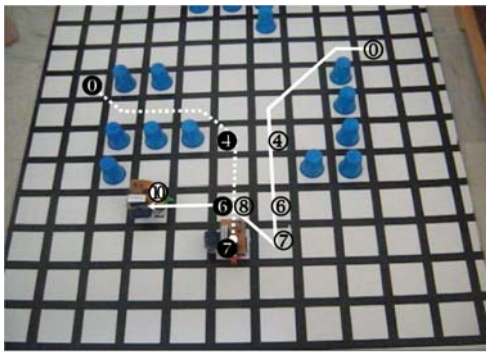


شکل (۱۰): اعمال قاعده بهبود یافته اتوماتا به یک سیستم دو رباتی.  $R1$  ناحیه تععر را قبل از رسیدن  $R2$  ترک کرده است.

باید تاکید شود که هرچند روش پیشنهادی از الگوریتم اجتماع مورچگان الهام گرفته شده است، دو تفاوت با الگوریتم کلاسیک اجتماع مورچگان دارد: اول اینکه در الگوریتم کلاسیک اجتماع مورچگان عامل‌ها علاقمند به حرکت در مسیرهای پُر فرمون هستند در حالی که در روش پیشنهادی عامل‌ها از سلول‌های فرمون اجتناب می‌کنند. دوم اینکه در الگوریتم کلاسیک، مورچه‌ها به طور مداوم روی مسیر حرکت خود فرمون می‌ریزند، در حالی که در روش پیشنهادی ربات‌ها فرمون را فقط در ناحیه تععر می‌ریزند.

## ۶- نتایج آزمایش

یک ربات متحرک با چرخ‌های تفاضلی برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی ساخته شد. یک حسگر چرخان اولتراسونیک بر روی ربات نصب شد تا با استفاده از آن



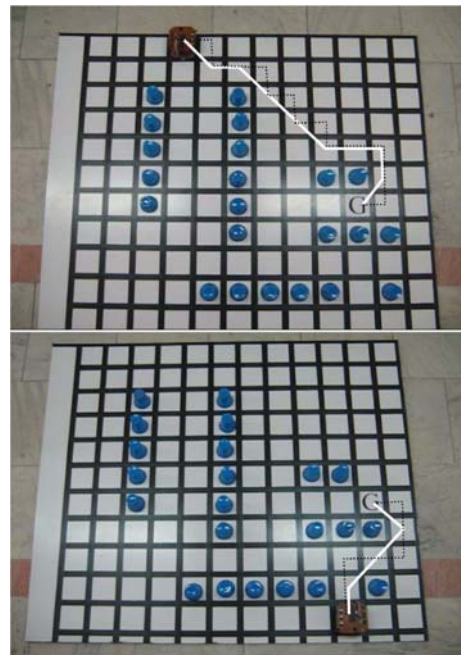
شکل (۱۳): آزمایش‌های مربوط به مسأله طرح ریزی در یک محیط دو رباتی. مسیرهای ربات‌ها به با خطوط پر و نقطه چین نشان داده شده‌اند. برخی گام‌های زمانی ربات‌ها با شماره‌های درون دایره‌های سفید و سیاه مشخص شده‌اند که نشان می‌دهند دو ربات در یک لحظه در یک سلول یکسان قرار ندارند.

#### ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

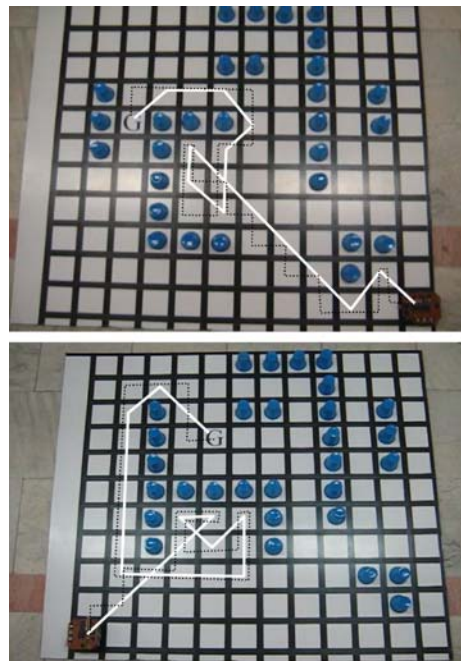
در این مقاله به مسأله طرح ریزی مسیر ربات‌های متحرک پرداخته شده است. به دلیل مزیت در پردازش موازی و قابلیت محاسبات محلی، اتوماتای سلولی به عنوان ابزاری برای ایجاد یک روش طرح ریزی ربات‌های متحرک به کار گرفته شد. برای این منظور، محیط ربات تقسیم بندی شد تا یک شبکه دوبعدی از سلول‌ها با چهار حالت ممکن برای هر سلول تشکیل شود. قواعد به روز رسانی اتوماتا به شکلی تعریف شد که در هر گام زمانی سلول ربات جای خود را با بهترین سلول رو به هدف عوض کند. بهترین سلول رو به هدف نزدیکترین سلول به هدف در میان سلول‌های آزاد همسایگی ربات است.

نشان داده شد که روش طرح ریزی پیشنهادی را می‌توان به سادگی با افزایش تعداد حالت‌ها و اعمال مستقل و بی در پی الگوریتم به تک تک ربات‌ها برای سیستم‌های چند رباتی هم تعمیم داد.

یک تکنیک برگرفته از الگوریتم اجتماع مورچگان به منظور بهبود روش پیشنهادی ارائه شد تا روش طرح ریزی برای محیط‌های با موانع مقعر هم قابل استفاده باشد. در این تکنیک ربات‌های پیشرو نواحی تقعر موانع را شناسایی و با ریختن فرمون علامت گذاری می‌کنند. ربات‌های بعدی از ورود به سلول‌های فرمون و در نتیجه، ورود به نواحی تقعر



شکل (۱۱): آزمایش‌های مربوط به دو مسأله طرح ریزی در یک محیط با موانع محدب. مسیرهای ایجاد شده به وسیله روش پیشنهادی با خط سفید و مسیر طی شده توسط ربات با نقطه چین نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱۲): آزمایش‌های مربوط به دو مسأله طرح ریزی در یک محیط با موانع محدب و مقعر. مسیرهای ایجاد شده به وسیله روش پیشنهادی با خط سفید و مسیر طی شده توسط ربات با نقطه چین نشان داده شده‌اند.



evaluation", Journal of Applied Soft Computing Volume 9, Issue 3, Pages 1102-1110, June 2009

[7] S.H. Chia, K. L. Su, J. H. Guo, C.Y. Chung, "Ant colony system based mobile robot path planning", Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, Shenzhen, China, December 2010

[8] E. Masehian, D. Sedighzadeh,, "Multi-objective PSO- and NPSO-based algorithms for robot path planning ", Advances in Electrical and Computer Engineering, Volume 10, Issue 4, On page(s): 69 – 76, 2010

[9] M. Kapanoglu, M. Ozkan, A. Yazıcı and Osman Parlaktuna, "Pattern-based genetic algorithm approach to coverage path planning for mobile robots", Lecture Notes in Computer Science, Volume 5544, 2009

[10] J von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata (edited and completed by A. W. Burks)*. Urbana, IL: University of Illinois Press. 1966

[11] W. Burks, *Von Neumann's Self-reproducing Automata*. In Burks 1970.

[12] A W. Burks, *Essays on Cellular Automata*, IL: University of Illinois Press, 1970

[13] G. Doolen, *Lattice gas methods: theory, applications, and hardware*, MA: Addison-Wesley, 1996

[14] Paul L. Rosin, "Training cellular automata for image processing", IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 15 Issue: 7, July 2006

[15] S Murata, H Kurokawa, "Self-reconfigurable robots", IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 14, Issue 1, March 2007

[16] X. Xiao, S. Shao, Y. Ding, Z. Huang and K.-C. Chou, "Using cellular automata images and pseudo amino acid composition to predict protein sub cellular location", Journal of Amino Acids, Vol. 30, No 1, pages 49-54 2006

[17] J. Han, Y. Hayashi, X. Cao, H. Imura, "Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China", Journal of Landscape and Urban Planning, Vol. 91, Issue 3, pp 133-141, 2009.

[18] IG Georgoudas, GC Sirakoulis, I Andreadis, "Modeling earthquake activity features using cellular automata", Journal of Mathematical and Computer Modelling, Vol. 46, Issues 1-2, pp 124-137, 2007

[19] J. Maddox, The Universe as a fractal structure. Nature, 329( 17) 195, 1987

[20] T. Gramss, S. Bornholdt, M. Gross, M. Mitchell, and T. Pellizzari, "Computation in cellular a: a selected review", Nonstandard Computation, pp. 95-140. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1998.

[21] C. Shu and H. Buxton, "Parallel path planning on the distributed array processor", Parallel Computing Vol. 21, Issue 11, pp 1749-767, 1995,

[22] P.G. Tzionas, A. Thanailakis, P.G. Tsalides, "Collision-free path planning for a diamond-shaped robot using two-dimensional cellular automata", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, Issue 2, pp 237-250, 1997

اجتناب می‌کنند. در طرح ریزی مسیر ربات‌ها در زمان غیر واقعی و در سیستم‌های تک رباتی می‌توان از ربات‌های مجازی به عنوان ربات پیشرو استفاده کرد اما در طرح ریزی زمان-واقعی سیستم‌های چند رباتی، همه ربات‌ها واقعی خواهند بود.

دستآورد موارد فوق ارائه یک روش طرح ریزی ربات‌های متحرک مبتنی بر اتوماتای سلولی و الگوریتم اجتماع مورچگان است که برای سیستم‌های تک رباتی و چند رباتی کاربرد دارد و قابل استفاده در محیط‌هایی با موانع مقعر و محدب است.

از آنجا که این روش از بازنمایی کلی محیط استفاده نمی‌کند و اطلاعات محلی را برای طرح ریزی به کار می‌گیرد، انتظار نمی‌رود که بتواند مسیرهای بهینه را ایجاد کند و در واقع چنین نیز هست. البته، می‌توان با استفاده از برخی توابع کشف کنندگی<sup>۱۳</sup> جواب‌های نزدیک بهینه را به دست آورد که می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد.

همچنین، در این روش ربات با محاط شدن درون یک دایره، یک ربات همه سویه فرض می‌شود. توسعه این روش برای آنکه بتواند برای ربات‌های غیر هولونومیک هم قابل استفاده باشد، می‌تواند زمینه دیگری برای تحقیقات آینده باشد.

## مراجع

[1] J.Xiao, and L.Zhang, "Adaptive evolutionary planner/navigator for mobile robots", IEEE transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, no. 1, pages. 18-28, April 1997

[2] J. C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Eighth print, 2004

[3] S.M. Lavalle, "Motion planning: the essentials", IEEE robotics and automation magazine, Vol 18, No. 1, March 2011.

[4] J. H. Reif., "Complexity of the mover's problem and generalizations", In Proceedings of the IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, pages 421-427, 1979.

[5] Q. Ma and X. Lei, "Dynamic path planning of mobile robots based on ABC algorithm", Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, Volume 6320/2010, 267-274, 2010.

[6] M.A. Porta Garcia, O. Montiel, O. castillo, R. Sepúlveda, and Patricia Melin, "Path planning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function

- [23] C. Behring, M. Bracho, M. Castro, J. A. Moreno, and Emergente, "An algorithm for robot path planning with cellular automata". in Proceedings of the Fourth Int. Conference on Cellular Automata for Research and Industry, 2000
- [24] F. M. Marchese, "A directional diffusion algorithm on cellular automata for robot path-planning", Future Generation Computer Systems, Vol.18, Issue 7, pp 983 – 994, 2002
- [25] F. M. Marchese, "Multiple mobile robots path-planning with CA", In the Proceeding of Autonomic and Autonomous Systems, 2006. ICAS '06. Silicon Valley, CA, 2006,
- [26] E. Bonabeau, M. Dorigo and G. Theraulaz., *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems.*, New York, NY: Oxford University Press, 1999.
- [27] M. Dorigo, G. Dicaro and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artificial Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137-172, 1999.
- [28] Akbarimajd, C. Lucas, "A new architecture to execute CAS-based path-planning algorithm in mobile robots", in Proceeding of IEEE International Conference on Mechatronics, pp 478 – 482, Budapest, 3-5 July 2006
- [29] Akbarimajd, C. Lucas, "A colony included cellular automata for revolving the concave obstacles in path-planning of mobile robots", Proceeding of International Conference on Advances in Intelligent Systems-Theory and Applications, (AISTA 04), Luxembourg, Nov. 2004

زیرنویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Path planning  
<sup>2</sup> Cell decomposition  
<sup>3</sup> Road map methods  
<sup>4</sup> Representation  
<sup>5</sup> Non real-time  
<sup>6</sup> Real-time  
<sup>7</sup> Distributed  
<sup>8</sup> Spatially extended  
<sup>9</sup> Voroni graph  
<sup>10</sup> Moore  
<sup>11</sup> Dead Reckoning  
<sup>12</sup> Best goal directing cell  
<sup>13</sup> Heuristic