

## بهینه‌سازی مسیر و آرایش بندی نوابری ربات‌های متحرک در ساختار رهبر پیرو با استفاده از الگوریتم تکاملی ARO

صابری آرمان<sup>۱</sup>، مدیری مهدی<sup>۲</sup>، صبوری زاده احمد رضا<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد برق کنترل دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران arman.saberi.ngo@gmail.com

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران mmodiri@ut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد نقشه برداری دانشکده جغرافیایی- تهران- ایران a.saboorzadeh@gmail.com

### چکیده:

این مقاله به بررسی مسیر بهینه برای یک ربات غیر هولونومیک با استفاده از روش‌های (IHS) Improved Harmony Search و Asexual Reproduction Optimization (ARO) پرداخته است. برنامه‌ریزی حرکت ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از روش میدان پتانسیل مورد توجه قرار گرفته است. با تعمیم این موضوع به یک مسئله دستگاه‌های چند عامله، مسیر حرکت بهینه همراه با موانع برای چند ربات که در ساختار رهبر-پیرو آرایش بندی منظم دارند، به دست آمد. همچنین این تحقیق، روشی بر اساس روش میدان پتانسیل جهت کنترل آرایش بندی ربات‌ها ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بر روی ربات‌های e-Puck، عملکرد مناسب روش کنترل پیشنهادی در برنامه‌ریزی حرکت و آرایش بندی ربات‌ها را نشان می‌دهد. روش‌های ارائه شده با هم مقایسه شدند و عملکرد بهتر و سرعت و دقت بالاتر روش مبتنی بر ARO نسبت به روش مبتنی بر IHS، قابلیت مناسب ARO برای استفاده در کاربردهای بلادرنگ را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی حرکت ربات‌ها - آرایش بندی ربات‌ها - ساختار رهبر، پیرو - روش فیلد پتانسیلی - بهینه‌سازی تولیدمثل غیرجنسی

### ۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های چند عامله، استفاده‌های زیادی در صنعت دارند. به‌طور مثال بعضی از مسائل موجود در عملیات اکتشاف و نقشه‌برداری، جستجو و نجات، مطالعات جوی و غیره را می‌توان به‌صورت سیستم‌های چند عامله مدل‌سازی و شبیه‌سازی کرد. در این راه محققان همواره با مشکلات و محدودیت‌هایی روبرو بوده‌اند. این مشکلات شامل مواردی چون: آرایش ربات‌ها، جابه‌جایی یا حرکت گروهی آن‌ها، حفظ آرایش مطلوب، عبور از موانع، حفظ پایداری با از دست دادن یک عامل و افزایش قدرت تشخیصی عامل‌ها است.

در آرایش بندی ربات‌ها ممکن است یک یا چند رهبر در گروه موجود باشد درحالی‌که دیگر ربات‌ها، آن‌ها را پیروی می‌کنند. در سیستم‌های چند عامله هر عامل خود دارای توانایی‌های حسی و محاسباتی است و به‌طور کلی اطلاعات سراسر برای هر ربات در دسترس نیست بنابراین از کنترل‌کننده متمرکز استفاده نمی‌شود. طراحی کنترل‌کننده برای هر ربات باید بر اساس اطلاعات محلی انجام پذیرد [۳]. در پیشینه این موضوع، فن‌های کنترلی مختلفی برای آرایش بندی

در سال‌های اخیر کنترل سیستم‌های چند عامله اهمیت بسیاری در علم مهندسی پیدا کرده است و این به خاطر نیاز به کنترل آرایش و حرکت گروهی سیستم‌های چند عامله به‌صورت های زمینی، مانند ربات‌های سیار، هوایی مانند هواپیماها، بالگردها و یا به‌صورت دریایی مانند زیردریایی‌ها است [۱]. عملکرد گروهی ربات‌ها نسبت به عملکرد فردی دارای مزیت‌های بیشتری است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲]: (۱) انجام کارهایی که انجام آن برای یک عامل سخت یا غیرممکن باشد. (۲) افزایش کارایی و بهبود عملکرد سیستم. (۳) کاهش هزینه‌ها، نیازی نیست تا با صرف هزینه کلان امکان پردازش سنگینی برای یک عامل فراهم کنیم. بلکه می‌شود چندین عامل با قدرت پردازشی کمتر همان کار را حتی سریع‌تر انجام دهند. (۴) این سیستم به‌راحتی موازی می‌شود و پردازش موازی را آسان می‌کند؛ و نهایت (۵) تحمل پذیری در برابر خطا.

۱- کارشناس ارشد برق، ۰۹۱۲۵۷۵۵۵۰۷ arman.saberi.ngo@gmail.com (نویسنده مخاطب)

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۰۲۱۸۸۴۰۰۱۱۱ mmodiri@ut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد نقشه‌برداری 02188400111 a.saboorzadeh@gmail.com

ربات‌ها ارائه شده است که می‌توان به روش‌هایی مانند رهبر-پیرو [۴]، ساختار مجازی [۵] و فن‌های مبتنی بر رفتار [۶] اشاره کرد.

در ساختار رهبر-پیرو، رهبر مسیر مطلوب را می‌داند که می‌تواند به کل سیستم کمک کند و دیگر عامل‌ها بر اساس اطلاعاتی که از محیط و رهبر می‌گیرند، از رهبر پیروی می‌کنند [۴]. در این روش رهبر از ربات‌های پیرو، هیچ فیدبکی دریافت نمی‌کند که ممکن است منجر به ناپایداری سیستم شود [۷]. روش‌های مختلفی مانند روش‌های مبتنی بر سیستم‌های غیرخطی و تئوری لیاپانوف [۸]، سیستم‌های فازی [۹] شبکه عصبی [۱۰] میدان پتانسیل [۳] برای پیاده‌سازی آرایش بندی ارائه شده است. برنامه‌ریزی حرکت، یا به عبارتی یافتن مسیری برای ربات است که به هدف برسد، بدون آن‌که با موانع موجود در محیط برخورد کند [۱۱]. روش‌های گوناگونی برای برنامه‌ریزی حرکت ربات‌ها ارائه شده که می‌توان به روش‌های فازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچگان، میدان پتانسیل، شبکه‌های عصبی اشاره کرد [۱۲].

روش میدان پتانسیل برای تعقیب هدف متحرک استفاده می‌شود [۱۳]. مهم‌ترین مشکل روش میدان پتانسیل امکان گیر افتادن در مینیمم‌های محلی در زمان حضور موانع و حرکت نکردن به سمت هدف است. علاوه بر مشکل ذکر شده، میدان پتانسیل محدودیت‌های دیگری نیز دارد که عبارت‌اند از: ۱- نیافتن مسیر در حضور موانع نزدیک به هم. ۲- نوسان در نزدیکی موانع. ۳- نوسان در مسیرهای باریک. ۴- عدم رسیدن به هدف در صورت وجود موانع در نزدیکی هدف [۱۴]. روش‌های مختلفی برای غلبه بر این مشکلات و مشکل مینیمم‌های محلی ارائه شده است که یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری و فرا ابتکاری است. الگوریتم جستجوی هارمونی یک روش فرا ابتکاری بهینه‌سازی هست که از فرآیند ساخت یک قطعه موسیقی عالی الهام گرفته شده است. هارمونی در موسیقی مشابه به بردار راه‌حل‌های بهینه‌سازی است و نوازندگان بداهه مشابه به طرح‌های جستجوی محلی و سراسر در فن‌های بهینه‌سازی هستند. الگوریتم جستجوی هارمونی بهبود یافته یا IHS (Improved Harmony Search) سرعت و دقت همگرایی را در روش جستجوی هارمونی بهبود می‌بخشد [۱۵].

روش بهینه‌سازی تولیدمثل غیرجنسی یا ARO، یک روش بهینه‌سازی فردی و بدون نیاز به مدل‌سازی است. ARO توانایی عالی یافتن نقطه مینیمم سراسر یک تابع هزینه با چند نقطه مینیمم محلی را در زمان مناسبی را دارد. این روش با استفاده از خاصیت تطبیقی انکشافی و انقباضی، ویژگی‌های هر دو روش فردی و جمعیتی را دارا است و برخلاف روش‌های دیگر بهینه‌سازی نیازی به تنظیم متغیرهای مختلف ندارد و دارای سرعت همگرایی بالایی است. در نتیجه ARO روشی مناسب، برای کاربردهای بلادرنگ هست [۱۶].

## ۲- روش‌های حل مسئله ناوبری ربات

سه نگرش کلی برای هدایت ربات وجود دارد: الگوریتم‌های سلسله مراتبی<sup>۱</sup> یا طرح مسیر سرتاسری<sup>۲</sup>، الگوریتم‌های واکنشی<sup>۳</sup> یا مبتنی بر رفتار<sup>۴</sup> یا طرح مسیر محلی<sup>۵</sup> و الگوریتم‌های ترکیبی<sup>۶</sup> [۳]. الگوریتم‌های اولیه ناوبری ربات در محیط‌هایی کاملاً شناخته شده، که ربات اطلاعات کاملی در مورد موانع و شکل هندسی آن‌ها در دست داشت، توسعه یافتند. لذا در این حالت، ربات در زمان غیرحقیقی تصمیم‌های لازم را جهت رسیدن به هدف و برخورد نکردن با موانع اتخاذ

کرده و سپس به سمت هدف حرکت می‌کند. در این الگوریتم‌ها مطلوب، یافتن مسیری بهینه بین نقطه شروع اولیه و هدف در مرحله طراحی و سپس هدایت ربات در آن مسیر در مرحله اجرا است. این گونه روش‌های طرح مسیر سرتاسری تا هدف تنها جهت تعیین مسیر به صورت غیر لحظه‌ای مناسب‌اند و برای پرهیز از مانع به صورت بلادرنگ که یکی از موضوعات مهم در محیط‌های پویا است، کافی به نظر نمی‌رسند. اگر یک مانع متحرک ظاهر شود مسیر می‌بایست تغییر کند، یعنی دوباره محاسبه شود که ممکن است زمان زیادی نسبت به حرکت مانع بگیرد؛ بنابراین رفتار ربات به اندازه کافی واکنشی نیست. دنبال کردن مسیری از پیش محاسبه شده راهی مؤثر برای رساندن ربات به موقعیت هدف است اگر دو شرط برقرار باشند: فرضیات به کاررفته هنگام محاسبه مسیر هنوز در زمان اجرا معتبر باشند (برای مثال محیط به طور صحیح مدل شده باشد و بعد از آن تغییر نکرده باشد)؛ ربات قادر باشد به طور قابل اطمینانی موقعیت خود را نسبت به مسیر به دست آورد. در این روش‌ها محققین تلاش کرده‌اند با طراحی دقیق مکانیک و حسگرهای ربات یا مهندسی محیط و یا هر دو این‌ها بر بعضی از مشکلات ناوبری ربات غلبه کنند. مهندسی دقیق ربات و محیط هزینه‌ها را افزایش می‌دهد، خودمختاری ربات را کاهش می‌دهد و نمی‌تواند برای تمامی محیط‌ها به کار رود.

هر الگوریتم برای کنترل یک سامانه نیازمند دانش یا مدلی از آن سامانه تحت کنترل است. در مورد ربات این سامانه از خود ربات به علاوه محیطی که در آن فعالیت می‌کند تشکیل شده است. گرچه مدلی از خود ربات به طور معمول می‌تواند به دست آید، در مورد محیط‌های ساخت نیافته دنیای واقعی متأسفانه شرایط متفاوت است. همان‌طور که اشاره شد این محیط‌ها با حضور فراگیر عدم قطعیت‌ها توصیف می‌شوند. چالش اصلی رباتیک خودمختار امروز ساخت الگوریتم‌های قدرتمند طراحی مسیر است که علی‌رغم عدم قطعیت‌ها وظایف پیچیده را به طور قابل اطمینانی انجام دهند. یک استراتژی معمول برای کنار آمدن با این مقدار وسیع عدم قطعیت، رها کردن ایده‌ی مدل کردن کامل محیط در مرحله‌ی طراحی است و اینکه به ربات این قابلیت داده شود که این مدل را خودش و به صورت برخط بسازد. دسته‌ی دوم الگوریتم‌های ناوبری برخلاف دسته‌ی اول محیط را ناشناخته فرض کرده و واحد تصمیم‌گیری ربات را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که بتواند در زمان حقیقی رفتار صحیح را تشخیص داده و ربات را به سمت هدف مورد نظر هدایت کند. به علت تفاوت مهمی که در دو نگرش فوق در مورد هدایت یک ربات وجود دارد، الگوریتم‌هایی که برای اجرای این دو نگرش پیاده‌سازی می‌شوند با دو نام مختلف شناخته شده و در مقالات به آن‌ها اشاره می‌شود. در مورد دسته اول اصطلاح مسیریابی و در مورد دسته دوم اصطلاح ناوبری استفاده می‌شود. در روش ناوبری مبتنی بر رفتار، رفتارهای پیچیده با ترکیب برخی اجزای رفتاری قابل حل و ساده‌تر مانند رفتارهای جستجوی هدف و دوری از موانع به دست می‌آید. در الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار مسیر به صورت محلی و نه سرتاسری طرح می‌شود. روش طرح مسیر محلی نیازمند هیچ مرحله پیش محاسبه سنگینی پیش از شروع جستجوی مسیر نیست. روش‌های طرح مسیر محلی اطلاعات کنونی حسگر را به صورت بلادرنگ به دست می‌آورند تا ربات را از موانع محلی دور نگاه‌دارند. به دلیل آنکه الگوریتم‌های محلی هیچ‌گاه قسمت‌های مختلف مسیر را از پیش محاسبه نمی‌کنند. [۱۸]

<sup>4</sup> behavior based

<sup>5</sup> local path planning

<sup>6</sup> hybrid

<sup>1</sup> heirarcicle

<sup>2</sup> global path planning

<sup>3</sup> reactive

با این حال الگوریتم‌های طرح مسیر محلی یافتن مسیر بهینه را تضمین نمی‌کند. ممکن است موقعیت‌هایی پیش بیاید (کمینه‌های محلی) که الگوریتم‌های طرح مسیر محلی دریافتن موقعیت هدف شکست بخورد. اگر تعداد موانع به‌طور محسوسی کم باشد، ممکن است ثابت شود که این روش‌ها بهترین راه‌حل را ارائه می‌دهند. هر دو روش طرح مسیر سرتاسری و محلی می‌توانند برای وظایف متعددی مناسب باشند و مزایا و معایب خاص خود را دارا هستند؛ اما به‌منظور تعیین مسیر در محیط‌های پویا هیچ‌کدام راه‌حلی کارآمد ارائه نمی‌دهند. دسته سوم الگوریتم‌های ناوبری ربات، ترکیبی از روش‌های طرح مسیر سرتاسری و مبتنی بر رفتار می‌باشند. در این روش‌ها از مازول طرح مسیر سرتاسری برای رسیدن به هدف و از مازول مبتنی بر رفتار برای پاسخ به وقایع محیط، مانند دوری از موانع، بهره گرفته می‌شود.

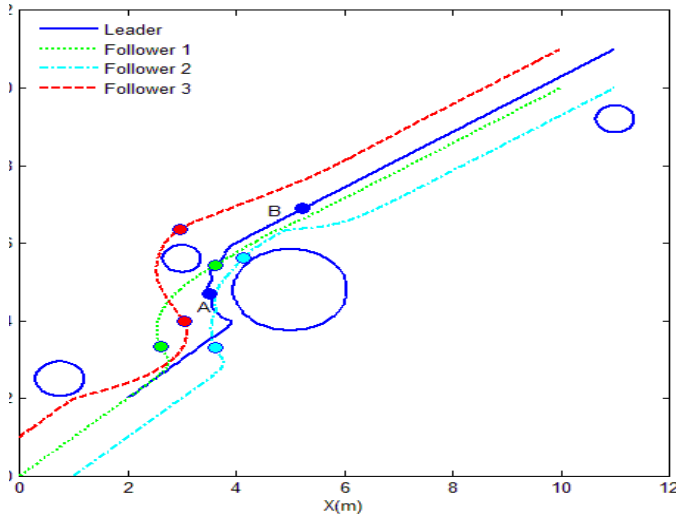
### ۳- روش میدان پتانسیل

در این روش تابع پتانسیل فضای آزاد به‌صورت جمع پتانسیل‌های جاذب که ربات را به سمت موقعیت هدف می‌رانند و پتانسیل‌های دافع که آن را از موانع دور می‌کنند، تعریف می‌شود؛ و در هر تکرار نیرویی مصنوعی که توسط تابع پتانسیل در موقعیت فعلی القا می‌شود به‌عنوان جهت مناسب حرکت در نظر گرفته می‌شود. از مزیت‌های روش پتانسیل، قابلیت تعمیم آن در فضاهای با ابعاد بالاتر است، اما امکان افتادن در مینیمم‌های محلی و مشکلات تعریف درست موانع از نواقص آن است. امروزه از این روش در ترکیب روش‌های دیگر استفاده می‌شود [۱۶].

رویکرد بالا به پایین در مازول تصمیم‌گیری مشخصه مهم معماری سلسله مراتبی است که در آن محدودیت‌های سطح بالا به فرمان‌ها سطح پایین شکسته می‌شوند. این معماری می‌تواند اهداف و محدودیت‌های چندگانه را در یک محیط پیچیده جمع کند [۱۱]. با این وجود، در این روش ناوبری ربات، مدل دقیق محیط برای طرح مسیر سرتاسری کارآمد نیاز است. برای دنبال کردن مسیر طراحی شده بایستی ربات نقشه‌ای از محیط تهیه کند و موقعیت خود را نسبت به محیط بداند. به دست آوردن نقشه از محیط و مکان‌یابی ربات مستلزم داشتن اطلاعات کامل و دقیق از محیط است که همیشه در دسترس نیست یا به دست آوردن آن مشکل است. به‌علاوه برای انجام محاسبات لازم، قابلیت‌های پردازش و حافظه قابل‌توجهی موردنیاز است. همچنین، رویکرد بالا به پایین در تصمیم‌گیری تأخیر ایجاد می‌کند و اگر یکی از مازول‌ها به‌درستی کار نکند تمام سیستم مختل می‌شود. بنابراین، این رویکردها در حضور عدم قطعیت در دنیای پویای واقعی مناسب نیستند. [۲۰]

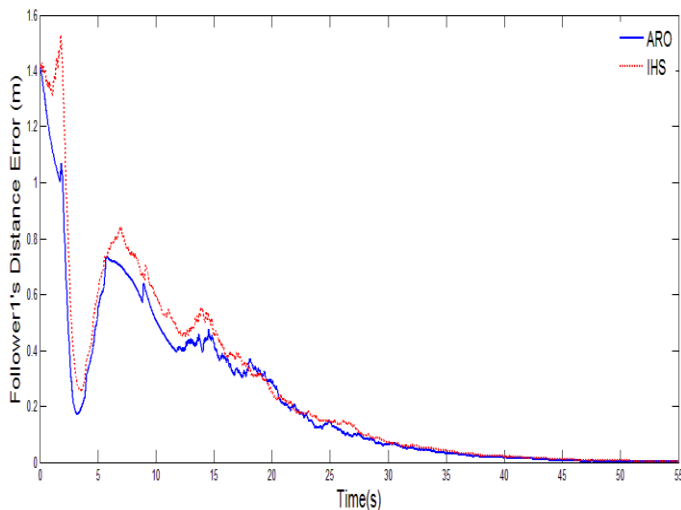
### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله مسئله بهینه‌سازی مسیر چند عامله با در نظر گرفتن ساختار رهبر-پیرو برای ربات‌های با دینامیک دو انتگرال گیر در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که ربات‌های پیرو، سرعت ربات رهبر را نمی‌دانند. روش میدان پتانسیل برای ناوبری ربات‌ها با در نظر گرفتن موانع و همچنین محدودیت‌های غیر هولوномیک استفاده شده است. محدودیت‌هایی مانند بیشترین سرعت خطی و زاویه‌ای نیز در نظر گرفته شده است. سپس مسئله ناوبری ربات‌ها برای یک سیستم چند عامله در ساختار رهبر-پیرو تعمیم داده شده است. در این تحقیق، ربات رهبر به‌عنوان یک هدف متحرک که ربات پیرو آن را در فاصله مشخصی با استفاده از روش میدان پتانسیلی تعقیب می‌کند، شکل ۱ مسیر ربات‌ها مکان موانع در شبیه‌سازی با MATLAB را نشان می‌دهد.



شکل ۱ مسیر حرکت ربات‌ها و مکان موانع

ربات‌ها از یک مکان اولیه شروع به حرکت می‌کنند و ربات‌های پیرو در ابتدا خود را به فاصله و زاویه مطلوب می‌رسانند و سپس آرایش بندی را در طول مسیر حفظ می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است در هنگام نزدیک بودن ربات‌های پیرو به موانع ممکن است که آرایش بندی به‌صورت کامل حفظ نشود. در آرایش بندی، ربات‌های رهبر و پیرو باید با یک زاویه یکسان نسبت سطح افق حرکت کنند. همچنین توابع هزینه برای پیاده‌سازی، آرایش بندی و ناوبری توسط هر دو روش IHS و ARO بهینه شده است. عملکرد دو روش در شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزارهای MATLAB و Webots بر روی ربات‌های e-Puck باهم مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش ARO عملکردی بهتری از روش IHS دارد و روشی مناسب‌تری برای کاربردهای کنترل بلادرنگ است. برای مثال در شکل ۲ خطای فاصله آرایش بندی برای یکی از ربات‌های پیرو نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است در روش مبتنی بر ARO خطای فاصله، کمتر است.



شکل ۲ خطای فاصله آرایش بندی پیرو ۱

[10] S. Jagannathan, T. Dierks, "وایپاشگر شبکه عصبی برای آرایش بندی ربات‌های متحرک با استفاده از فیدبکی RISE"، مجله IEEE Trans. Sys. Man, Cyber, جلد ۳۹، ۲۰۰۹.

[11] J.A.P. Kjellander, S. Larsson, "مسیریابی برای اسکن لیزری با استفاده از ربات صنعتی"، مجله Robotics and Autonomous Systems, جلد ۵۶، ص ۶۲۴-۶۱۵، ۲۰۰۸.

[12] S.Dian, L.Tang, "روش جدید میدان پتانسیلی برای برنامه‌ریزی مسیر و پرهیز از مانع ربات‌های متحرک"، مجله IEEE, جلد ۹، ص ۶۳۷-۶۳۳، ۲۰۱۰.

[13] "برنامه‌ریزی سرعت برای یک ربات متحرک برای یک هدف متحرک با استفاده از روش میدان پتانسیل"، مجله Robotics and Autonomous Systems, جلد ۵۷، ۵۵-۶۳، ۲۰۰۹.

[14] J. Borenstein, Y. Koren, "روش میدان پتانسیلی و محدودیت‌های آن برای ناوبری ربات‌های متحرک"، Proceedings. ICRA, جلد ۲، ص ۱۳۹۸-۱۴۰۴، ۱۹۹۱.

[15] E. Damangir, M. Fesanghary, M. Mahdavi, "الگوریتم جستجوی هارمونی بهبود یافته برای حل مسائل بهینه‌سازی"، مجله ApplMathComput, جلد ۱۸۸، ص ۱۵۶۷-۱۵۷۹، ۲۰۰۷.

[16] M Moghadam, M. B. Menhaj, A. Farasat, "یک روش جدید بهینه‌سازی برای کاربردهای بلادرنگ الهام گرفته شده از تولیدمثل غیرجنسی"، مجله Expert Syst. Appl, ص ۴۸۷۴-۴۸۶۶، ۲۰۱۱.

[17] D. Piester, R. Hlavac, J. Achkar, "Alibration of Four European TWSTFT Earth Stations with a Portable Station Through Intelsat", roc. 19<sup>th</sup> European Frequency and Time Forum (EFTF), 21-24 Mar 2005

[18] Hamsen, p' High power very low frequency/low frequency transmitting antennas IEEE, Military Communications Conference, 1990

[19] O.Koudelka, L.Lorini, H.Ressler, "Calibration of Six European TWSTFT Earth Station Using a Portable Station", Proceedings of the 20<sup>th</sup> European Frequency and Time Forum (EFTF), pp 460-467. Braunschweig (Germany), March 2006

[20].R-REC-P.832-2-199907-I' MSW-E.DOC.

[21] Michael A. Lombardi, "Remote Frequency Calibrations The NIST Frequency Measurement and Analysis Service NIST Special Publication 250-29, June 2004

[22].<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/1981>

[23] A MICROCOMPUTER-BASED POSITION UPDATING SYSTEM FOR GENERAL AVIATION UTILIZING LORAN-1997,

همچنین روش پیشنهادی نوسانات ربات بخصوص در هنگام عبور از نزدیکی موانع و مسیرهای باریک را به خوبی کاسته است. مشکل عدم رسیدن به هدف در صورت وجود مانع در نزدیکی هدف حل شده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

وجود شش گزینه زاویه چرخش برای خروجی هر قانون به جای یک مقدار، به الگوریتم تصمیم‌گیری قابلیت وفق پذیری با تغییرات محیطی را می‌دهد. همان‌طور که نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی شده نشان دادند، قوانین با خروجی‌های ثابت انعطاف‌پذیر نبوده و در تمام شرایط مخصوصاً محیط‌های پیچیده پاسخگو نمی‌باشند. حتی اگر فرض شود یادگیری یک خروجی بهینه پاسخگو است، طراحی یک محیط آموزش مناسب همیشه امکان‌پذیر نیست مخصوصاً در مورد محیط‌های ناشناخته. الگوریتم پیشنهادی یک پایگاه قانون پویا تولید می‌کند که خروجی انتخاب شده برای هر قانون ممکن است در بازه‌های زمانی تغییر کند. این امر موجب انعطاف‌پذیری و قابلیت سازگاری با شرایط مختلف محیطی و انواع متنوع موانع می‌شود؛ بنابراین، الگوریتم پیشنهادی عملکردی کارآمد در محیط‌های ساده تا پیچیده رادار است. در طراحی الگوریتم پیشنهادی رویکرد، ایجاد مصالحه میان سادگی و قابلیت پیاده‌سازی آسان الگوریتم و از طرف دیگر دقت قابل قبول بوده است.

## ۶- منابع

[1] Y. S. Choo, B. V. EeHow, Sh.S. Ge, R. Cui, "کنترل آرایش بندی رهبر-پیرو وسایل نقلیه زیر دریایی" مجله Ocean. Eng, جلد ۳۷، ص ۱۴۹۱-۱۵۰۲، ۲۰۱۰.

[2] Andrew B. Kahng, Alex S. Fukunaga, Y. Uny Cao, "ربات‌های متحرک هماهنگ: سوابق و رویکردها،" مجله Autonomous Robots, جلد ۴، ص ۱۹۹۷، ۲۳-۷.

[3] L. E. Barnes, "آرایش بندی ازدحام ربات بر اساس میدان پتانسیلی،" انتشارات UMI, ۲۰۰۸.

[4] A. S. Morse, J. Lin, A. Jadbabaie, "هماهنگی گروه عامل‌های متحرک با استفاده از قوانین نزدیک‌ترین همسایه،" مجله IEEE Trans. Auto. Contr, جلد ۴۸، ۲۰۰۳.

[5] J. Pan, K.D. Do, "کنترل غیرخطی آرایش بندی ربات‌های متحرک unicycle"، مجله ROBOT. AUTON. SYS, جلد ۵۵، ص ۱۹۱-۲۰۴، ۲۰۰۷.

[6] R.C. Arkin, T. Balch, "کنترل آرایش بندی ربات‌ها بر اساس روش مینی بر رفتار،" مجله IEEE Trans. Robot. Automat, جلد ۱۴، ص ۹۲۶-۹۳۹، ۱۹۹۸.

[7] L. Bushnell, G. Chen, Y. Hong, "طراحی مشاهده‌گر غیرمتمرکز برای کنترل آرایش بندی شبکه چند عامله"، مجله Automatica, جلد ۴۴، ص ۸۴۶-۸۵۰، ۲۰۰۸.

[8] Xiaoming Hu, M. Egerstedt, P. Ogren, "وایپاشگر لیاپانوف برای هماهنگی سیستم‌های چند عامله"، مجله IEEE Trans. Robot. Automat, جلد ۱۸، ص ۸۴۷-۸۵۶، ۲۰۰۲.

[9] H. Maaref, A. Bazoula, "وایپاشگر Separation Bearing برای آرایش بندی ربات‌های متحرک"، مجله IEEE Trans. Robot. Automat, جلد ۱، ص ۱۹-۱۴، ۲۰۰۷.