# مروری بر رباتیک جمعی و جایگاه آن در سیستم‌های چندرباته

**فائزه میرزائی[1]  علی‌اکبر پویان[2]**

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی شاهرود- سمنان- ایران

fmirzaei@shahroodut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات- دانشگاه صنعتی شاهرود- سمنان- ایران

apouyan@shahroodut.ac.ir

**چکیده: علم رباتیک جمعی با الهام از طبیعت و تلفیق هوش جمعی و رباتیک پا به عرصه‌ی وجود گذاشت. ویژگی‌های خاص این سیستم‌ها از جمله انعطاف، مقاومت و مقیاس‌پذیری، مزایای زیادی به همراه داشته و این سیستم را از دیگر سیستم‌های رباتیک متمایز می‌نماید. در این مقاله سعی شده است که علاوه بر معرفی منابع الهام رباتیک جمعی، تعریفی دقیق به همراه ویژگی‌های خاص این سیستم‌ها ارائه گردد. معرفی دامنه‌ی کاربردهای رباتیک جمعی و مرور پروژه‌ها و محیط‌های شبیه‌سازی رایج در این زمینه نیز از دیگر مطالب مندرج در این مقاله می‌باشد. علاوه‌براین، مروری بر انواع روش‌های مدل‌سازی و الگوریتم‌های ارائه شده در این حوزه انجام شده است. الگوریتم‌های معرفی شده بر اساس دامنه‌ی کاربردشان در انجام وظایف مختلف دسته‌بندی گشته و در نتیجه تعدادی از وظایف رایج در این حوزه نیز جمع‌آوری شده است. چالش‌ها و مسائل باز علم رباتیک جمعی نیز در پایان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انتظار می‌رود که با مطالعه‌ی این مقاله، دید جامعی نسبت به علم رباتیک جمعی در ذهن محققین ایجاد شود.**

**واژه های کلیدی:** سیستم‌های چندرباته، سیستم‌های چندرباته متعاون ، رباتیک جمعی، هوش جمعی، الگوریتم‌های جمعی

---

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۳۹۵/۱۰/۱۳

**تاریخ پذیرش مشروط مقاله:** ۱۳۹۶/۰۶/۱۵

**تاریخ پذیرش مقاله :** ۱۳۹۶/۰۸/۱۷

**نام نویسنده‌ی مسئول:** دکتر علی‌اکبر پویان

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** ایران، شاهرود، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، آزمایشگاه هوش مصنوعی و سیستم‌های توزیع شده

## ۱- مقدمه

امروزه رباتیک جمعی[۱] (SR) یکی از مشهورترین موضوعات تحقیق در تکنولوژی رباتیک است که حوزه‌های هوش مصنوعی، تئوری کنترل، رباتیک، مهندسی سیستم و بیولوژی را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد. برخی از محققان علم رباتیک، از هوش انسان و برخی دیگر از رفتار حیوانات در طبیعت الهام می‌گیرند. رباتیک جمعی نیز در تلاش است تا نه تنها ذهن حیوانات، بلکه رفتار آن‌ها در موقعیت‌های مختلف و در محیط زندگیشان را تقلید نماید. حیوانات و موجوداتی که به صورت اجتماعی زندگی کرده و دارای هوش جمعی[۲] هستند، جرقه‌ی اولیه‌ی رباتیک جمعی را در ذهن پژوهشگران ایجاد کرده‌اند. این موجودات رفتار خود سازمانده[۳] دارند؛ به عنوان مثال، دسته‌ی پرندگان مهاجر، کلونی مورچه‌ها، دسته‌ی ماهی‌ها، اجتماع زنبورها، موریانه‌ها، باکتری‌ها و تک سلولی‌ها چند نمونه از این موارد هستند [۱]. شکل نمونه‌ای از حیواناتی که به صورت اجتماعی زندگی می‌کنند را نشان می‌دهد.

**شکل (۱): نمونه‌ای از اجتماع حیوانات. بنای نشان داده شده در تصویر توسط موریانه‌ها ساخته شده است [۲, ۳]**

هر یک از اعضای[۴] اجتماعات مورد اشاره به تنهایی توانایی‌های ارتباطی[۵]، محاسباتی و شناختی[۶] اندکی دارند ولی در کنار هم و با استفاده از هوش جمعی قادرند ماموریت‌های بزرگی را به خوبی انجام دهند [۴]. اجتماعات حیوانات اندازه‌های متفاوتی دارند، هرچه تعداد اعضا کم‌تر باشد، نقش هر یک از آن‌ها پیچیده تر بوده و توانایی بیشتری دارند. کلونی مورچه‌ها[۷] می‌تواند به راحتی هزارپا یا ملخی با جسه‌ی ده برابر یک مورچه را شکست داده و یا طعمه‌ای بزرگ را حمل نماید؛ آن‌ها با استفاده از تماس، صدا و فرومونی[۸] که ترشح می‌کنند با یکدیگر در ارتباط هستند [۵]. موریانه‌ها قادرند بناهای تپه‌ای بسیار پیچیده بسازند. حشرات می‌توانند به راحتی در محیطی ناشناخته و بزرگ، به صورت گروهی به جستجوی منابع غذایی بپردازند. دسته‌ی ماهی‌ها در کنار یکدیگر حرکت می‌کنند بدون اینکه به یکدیگر برخورد نمایند؛ آن‌ها قادرند شکل اجتماع خود را تغییر داده و در مواقع حمله‌ی دشمنان از خود مراقبت نمایند [۶]؛ وجود چشم ماهی‌ها در دو طرف سرشان و نشانه‌ای که بر بالهای آن‌هاست به هماهنگی آن‌ها کمک می‌کند. پرندگان در هنگام مهاجرت با آرایش خاصی پرواز کرده و با استفاده از حس بویایی، قطب نمای خورشیدی، محاسبات زمانی و میدان مغناطیسی، مقصد خود را می‌یابند [۷].

نکته‌ی قابل توجه درباره‌ی اجتماع حیوانات، عدم وجود رهبر و هماهنگ کننده است. مطمئنا در چنین سازمان هوشمندی، مکانیزم کشف نشده‌ای وجود دارد که وظایف اصلی را به قسمت‌های ساده تقسیم کرده تا اعضا بتوانند آن‌ها را انجام دهند و سپس نتیجه‌ی کار آن‌ها را ترکیب نموده و موجب چنین رفتار تجمعی[۹] شگفت انگیزی شود. هدف از علم رباتیک جمعی و هوش جمعی نیز شناخت این مکانیزم است.

موجودات اجتماعی از حالت سراسری کلونی خود اطلاعی ندارند. دانش آن‌ها در بین افراد توزیع شده است؛ به شکلی که هر یک از اعضا نمی‌تواند بدون کمک بقیه، وظیفه‌ی اصلی را کامل کند. اعضا می‌توانند تبادل اطلاعات داشته باشند و منبع غذا یا خطر حمله را به دیگران اطلاع دهند. این اطلاعات به صورت محلی جابجا شده و دانشی از موقعیت کلی وجود ندارد. از طرفی، حشرات می‌توانند رفتار خود را با توجه به تغییراتی که مابقی اعضای دسته در محیط داده‌اند، وفق دهند. به عنوان مثال، موریانه‌ها پس از تغییر ساختار خانه‌شان، متفاوت عمل می‌کنند [۸].

در سال‌های اخیر عبارت رباتیک جمعی به عنوان کاربرد هوش جمعی در سیستم‌های چندرباته مطرح شده است [۹]. عباراتی مانند رباتیک تجمعی[۱۰] [۱۰]، رباتیک توزیع شده[۱۱] [۱۱] و کلونی ربات‌ها[۱۲] [۱۲] نیز وجود دارند که برای سیستم‌های چندرباته به کار می‌روند و تفاوت‌ها و اشتراکاتی دارند. ویژگی‌های خاص رباتیک جمعی در کنار تعریف آن می‌تواند تمایزی بین این حوزه و دیگر موارد ایجاد نماید. رباتیک جمعی، مطالعه‌ای بر چگونگی طراحی اجتماعی از ربات‌ها است؛ به گونه‌ای که با استفاده از تعاملات ربات‌ها و تعامل ربات‌ها و محیط، رفتار تجمعی داشته باشند. تعاملات در کلونی انتشار یافته و بدین ترتیب اعضای کلونی در کنار یکدیگر قادر به انجام اموری خواهند بود که دستیابی به آن برای یک ربات ممکن نیست. این رفتار تجمعی، تحت عنوان خودسازماندهی شناخته می‌شود. تئوری خودسازماندهی از علوم فیزیک و شیمی گرفته شده است. خودسازماندهی مبتنی بر ترکیب چهار قانون پایه است: «واکنش مثبت[۱۳]»، «واکنش منفی[۱۴]»، «تصادفی بودن[۱۵]» و «تعاملات چندگانه[۱۶]» [۸].

تعریف دقیق‌تر رباتیک جمعی توسط [۱۳] ارائه شده است؛ طبق این تعریف، رباتیک جمعی، مطالعه‌ی چگونگی طراحی ربات‌های ساده و قابل تعاملات فیزیکی است به گونه‌ای که با استفاده از تعاملات بین رباتی و بین ربات و محیط بتوانند رفتار تجمعی داشته باشند. در کنار این تعریف، مشخصاتی نیز برای رباتیک جمعی مطرح شده است که در ادامه تشریح خواهند شد.

در این مقاله سعی شده است که علاوه بر معرفی رباتیک جمعی و مروری بر ویژگی‌های آن، مقایسه‌ای بین این سیستم و سیستم‌های رباتیک تک‌رباته و چندرباته صورت پذیرد. بنابراین ابتدا به معرفی سیستم‌های چندرباته و انواع طبقه‌بندی‌های آن پرداخته و سپس جایگاه رباتیک جمعی را در این طبقه‌بندی مشخص نموده‌ایم. کاربردهای رباتیک جمعی، انواع روش‌های مدل‌سازی و خلاصه‌ای از الگوریتم‌های ارائه شده در انجام وظایف مختلف نیز در این مقاله گردآوری شده‌اند. چالش‌ها و آینده‌ی تحقیقاتی این حوزه نیز در پایان مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

در بخش دوم این مقاله، سیستم‌های چندرباته، طبقه‌بندی‌های ارائه شده برای آن و رباتیک جمعی معرفی شده و سپس رباتیک جمعی با دیگر سیستم‌های چندرباته و تک‌رباته مقایسه گردیده است. کاربردهای رباتیک جمعی در بخش سوم مطرح گشته است. در بخش چهارم، تعدادی از ربات‌های مورد استفاده و محیط‌های شبیه‌سازی رباتیک جمعی معرفی شده‌اند. پس از آن در بخش پنجم انواع روش‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ششم، مروری کوتاه بر الگوریتم‌های مختلف ارائه شده در انجام وظایف مختلف انجام گرفته است. بخش هفتم به معرفی چالش‌ها و آینده‌ی این حوزه اختصاص داده شده است. در پایان نیز نتیجه‌گیری صورت گرفته است.

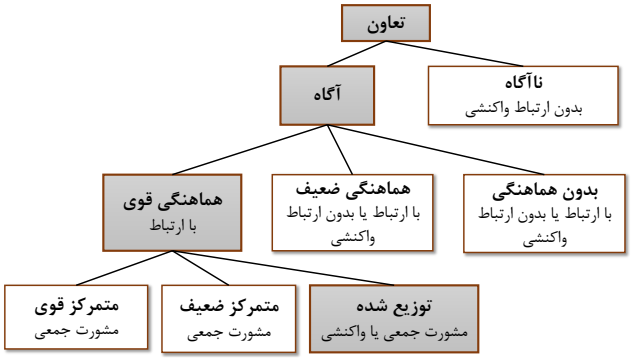
## ۲- سیستم‌های چندرباته و رباتیک جمعی

رباتیک جمعی زیر مجموعه‌ی خاصی از رباتیک تجمعی است و به طور کلی به دلیل وجود بیش از یک ربات در سیستم، نوعی از سیستم‌های چندرباته محسوب می‌شود. در ادامه به معرفی سلسله مراتب وراثت در سیستم‌های چندرباته به عنوان پدر علم رباتیک جمعی پرداخته شده است.

### ۲-۱- سیستم‌های چندرباته

سیستم‌های چندرباته به دلیل توانایی اندک ربات‌های منفرد در پردازش اطلاعات و موارد دیگری که ربات‌ها به تنهایی قادر به انجام آن‌ها نیستند، پا به عرصه‌ی وجود گذاشتند. ربات‌های موجود در سیستم باید با یکدیگر همکاری و تعاون داشته باشند تا بتوانند وظایف بزرگ را مدیریت نمایند. سیستم‌های چندرباته قادرند وظایفی چون ماموریت‌های جستجو و نجات، شکار، نظارت بر محیط و کاوش فضا را با موفقیت و بسیار بهتر از قبل انجام دهند.

سیستم‌های چندرباته را می‌توان به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی نمود. برای نمونه، طبقه‌بندی مطرح شده در [۱۴] از چهار سطح تشکیل شده است: «تعاون[۱۷]»، «دانش[۱۸]»، «هماهنگی[۱۹]» و «سازمان‌دهی[۲۰]». علاوه بر آن، به دو ویژگی «ارتباطات» و «ترکیب‌بندی[۲۱]» نیز اشاره شده است که به صورت عمود بر طبقه‌بندی اصلی قابل تعریف هستند. در سطح اول طبقه‌بندی، «تعاون» قرار دارد. ربات‌ها در انجام وظایف سراسری به شکلی همکاری می‌نمایند که آن وظیفه توسط یک ربات منفرد قابل انجام نباشد یا با انجام کار گروهی، کارایی سیستم ارتقا یابد. در این مقاله، تنها به سیستم‌های چندرباته متعاون پرداخته شده است؛ در این سیستم‌ها یک هدف سراسری برای کل اعضا وجود دارد. سیستم‌هایی که ربات‌های آن در یک محیط مشترک به انجام امور متفاوت می‌پردازند (غیر متعاون)، در این مقاله مورد بحث قرار نگرفته‌اند. شکل (۲) طبقه‌بندی مطرح شده در [۱۴] را نشان می‌دهد.




**شکل (۲): طبقه‌بندی سیستم‌های چندرباته. ویژگی‌های رباتیک جمعی در این طبقه‌بندی با رنگ خاکستری متمایز شده‌اند [۱۴]**

مهم‌ترین ویژگی در یک سیستم متعاون، اطلاع از وجود دیگر هم‌تیمی‌ها است. در سیستم‌های ناآگاه، ربات‌ها از وجود یا عدم وجود دیگر ربات‌ها اطلاعی ندارند. این ویژگی، سطح دوم طبقه‌بندی با عنوان «دانش» را ایجاد می‌نماید. تعاون در سیستم‌های ناآگاه ضعیف‌ترین نوع تعاون است. به عنوان مثال در عملیات هل دادن یک جعبه، ربات‌ها می‌توانند در کنار یکدیگر بدون اطلاع از حضور دیگر ربات‌ها به همکاری و انجام یک هدف مشترک بپردازند.

سطح سوم طبقه‌بندی، «هماهنگی» نام دارد. در سیستم‌های هماهنگ، تعاون ربات‌ها به گونه‌ای است که هر ربات برای انجام هر عمل، عملکرد دیگر ربات‌ها را در نظر می‌گیرد. بنابراین عملیات به شکل منسجم و با کارایی بالا به اتمام می‌رسد. هماهنگی الزاما از ویژگی سیستم‌های متعاون نیست؛ در واقع سیستم‌های هماهنگی وجود دارند که متعاون نیستند. به عنوان مثال هماهنگی در بین ربات‌های صنعتی که ابزار آلات را به اشتراک می‌گذارند لازم است؛ با اینکه ربات‌ها متفاوتند و اهداف مشترکی ندارند. هماهنگی در این سیستم‌ها از بروز تداخل جلوگیری می‌کند. واضح است که سیستم‌های ناآگاه نمی‌توانند هماهنگی داشته باشند؛ زیرا ربات‌ها از وجود یکدیگر اطلاعی ندارند.

هماهنگی به دو نوع قوی و ضعیف قابل تقسیم است؛ هماهنگی قوی بر اساس قوانین از پیش تعیین شده یا یادگرفته شده است. این قوانین و پروتکل‌ها چگونگی تعامل دو یا بیشتر ربات با یکدیگر را تعیین می‌نمایند. هماهنگی ضعیف به پروتکل وابسته نیست و به خطای ارتباطی مقاوم‌تر است. ولی توانایی‌های سازمانی کم‌تری نسبت به هماهنگی قوی دارد. هر چه محیط پویاتر و هدف پیچیده‌تر باشد، هماهنگی قوی برای رسیدن به هدف کارآمدتر است. هماهنگی همیشه

یک ویژگی لازم در سیستم‌های متعاون نیست. با این حال انعطاف سیستم را با فراهم کردن امکان استفاده بهتر از منابع مشترک، افزایش می‌دهد. مزیت سیستم‌های ناهماهنگ، طراحی ساده‌تر آن‌ها است که منجر به ریسک خطای کم‌تر می‌شود؛ ولی این ویژگی به دلیل تداخل-های ممکن در عملکرد ربات‌ها باعث اتلاف منابع خواهد شد.

سازمان‌دهی نام چهارمین سطح طبقه‌بندی است که وجود و عدم وجود تمرکز[۲۲] در سیستم را تعیین می‌نماید. در سیستم‌های توزیع شده، ربات‌ها کاملا خودمختار[۲۳] بوده و رهبر وجود ندارد. تمرکز می-تواند دارای ساختار سلسله مراتبی باشد و هر رهبر توسط رهبری دیگر مدیریت شود. در حالت تمرکز قوی، تصمیمات توسط یک رهبر گرفته می‌شود و این رهبر تا پایان عملیات تعویض نمی‌شود. تمرکز ضعیف هنگامی رخ می‌دهد که امکان تعویض رهبر در حین عملیات وجود داشته باشد و بر اساس تغییرات محیط یا شکست رهبر قبل، نقش رهبری به ربات دیگر انتساب یابد. مشکل تمرکز قوی وابستگی شدید به ارتباطات است؛ اگر خطایی رخ دهد یا رهبر دچار مشکل شود، کل سیستم شکست می‌خورد. مزیت سیستم‌های متمرکز امکان وجود رهبری توانا و مناسب است که بتواند به راحتی داده‌ها را پردازش کرده و تصمیات را اتخاد نماید. در این سیستم‌ها، بقیه‌ی اعضای تیم وظایف ساده‌تری را انجام می‌دهند. سیستم‌های توزیع شده مشکلات بالا را ندارند، زیرا هر ربات در تصمیم‌گیری خودمختار است؛ ولی برای تشخیص هماهنگی بین اعضا پیچیدگی بیشتری لازم است.

در این طبقه‌بندی دو فاکتور دیگر نیز وجود دارد که به صورت عمود بر نمودار قابل تفسیر است: «ارتباطات» و «ترکیب‌بندی» سیستم. تعاون بین ربات‌ها معمولا توسط مکانیزم ارتباطی صورت می-گیرد که اجازه می‌دهد ربات‌ها تبادل اطلاعات داشته باشند. در طبقه-بندی معرفی شده در [۱۴]، هماهنگی قوی حتما باید ارتباط داشته باشد. در دسته‌ی هماهنگی ضعیف و یا ناهماهنگ، تبادل اطلاعات می‌تواند وجود داشته یا نداشته باشد. سیستم‌های ناآگاه ارتباط ندارند. بسته به روش تبادل اطلاعات، دو نوع ارتباط وجود دارد: ارتباط مستقیم و غیرمستقیم. در ارتباط مستقیم، با استفاده از سخت افزار، سیگنالی قابل فهم به دیگر ربات‌ها ارسال می‌شود. در ارتباط غیرمستقیم که به آن نشانه‌گذاری[۲۴] نیز گفته می‌شود، نشانه یا تاثیری بر محیط گذاشته شده و به این ترتیب بقیه‌ی ربات‌ها نشانه را تفسیر می‌نمایند؛ همانند فرومونی که مورچه‌ها در محیط برجا می‌گذارند.

دو روش نشانه‌گذاری کنش‌گر[۲۵] و کنش‌پذیر[۲۶] وجود دارد. در روش کنش‌گر، ربات محیط را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که بر روی ورودی حسگر رباتی دیگر تاثیر بگذارد. در روش کنش‌پذیر، عمل ربات محیط را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که تاثیر عمل رباتی دیگر تغییر نماید. ارتباط مستقیم راحت‌ترین و قدرتمندترین راه تبادل اطلاعات در سیستم است؛ ولی با توجه به نویز یا خطای سخت افزاری، اغلب دچار خسران می‌گردد. روش‌های نشانه‌گذاری برای مقابله با این مشکلات استفاده می‌شوند؛ این سیستم ارتباطی مقاومت بیشتری دارد ولی به طراحی پیچیده‌تری نیاز دارد. زیرا هر ربات باید محیط را تفسیر نماید و اطلاعات کم‌تری را می‌توان به این روش منتقل کرد.

فاکتور «ترکیب‌بندی» خود به دو نوع «همگن[۲۷]» و «ناهمگن[۲۸]» تقسیم می‌شود. در ساختار همگن تمامی ربات‌های سیستم از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزار کنترلی، یکسان هستند. اگر سیستم همگنِ قطعی باشد، ربات‌های مختلف در ازای دریافت ورودی یکسان، خروجی یکسان تولید می‌کنند. ربات‌ها تنها در صورتی که موقعیت‌شان در محیط متفاوت باشد و یا سیستم غیرقطعی باشد، متفاوت عمل می-نمایند. در سیستم‌های ناهمگن، سخت‌افزار یا نرم‌افزار کنترلی ربات‌ها متفاوت است. در یک سیستم همگن، به دلیل رفتار یکسان ربات‌ها در صورتی که رباتی با مشکل مواجه شود، وظیفه‌ی او توسط یک ربات دیگر مدیریت می‌شود؛ در نتیجه تحمل‌پذیری خطا و مقاومت این سیستم‌ها بالاتر است. ضعف سیستم‌های همگن در «وفق‌پذیری[۲۹]» پایین آن‌هاست؛ زیرا تفاوتی بین ربات‌ها وجود ندارد. سیستم‌های ناهمگن در موقعیت‌های جدید و محیط‌های پویا راحت‌تر وفق می‌یابند. سیستم‌های ناهمگن در محیط‌های پویا و شرایط پیش‌بینی نشده، تحمل‌پذیری خطای بالاتری دارند؛ زیرا در صورتی که رباتی با مشکل مواجه شود، ربات دیگری وظیفه‌ی او را انجام می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که در سیستم‌های ناهمگن نیز ربات‌های متفاوت می‌توانند وظیفه‌ی مشابه‌ای را انجام دهند.

دو ویژگی دیگر سیستم‌های رباتیک ، «مشورت اجتماعی[۳۰]» و «واکنشی[۳۱]» نام دارند. در رفتار مشورت اجتماعی، به تیم اجازه داده می‌شود تا با تغییرات محیط هماهنگ شوند. وظایف تیم توسط استراتژی‌هایی مشخص می‌شود تا از تمامی منابع در دسترس برای رسیدن به هدف استفاده گردد. در رفتار واکنشی، هر یک از اعضا با استفاده از استراتژی منفرد خود با تغییرات محیط هماهنگ شده و سعی بر اتمام وظیفه‌ی خود دارد. تفاوت اصلی این دو ویژگی، نحوه‌ی برخورد با شرایط پیش‌بینی نشده است. در حالت مشورت اجتماعی، یک نقشه‌ی بلند مدت با در نظر گرفتن استفاده از تمامی منابع در دسترس برای رسیدن به هدف اصلی طراحی می‌گردد. در حالت واکنشی، نقشه‌ای برای مشکل موجود توسط رباتی که به مشکل برخورده است طراحی می‌شود. معماری واکنشی بدون تاثیر بر سازمان کل سیستم چندرباته، سریعا به تغییرات محیط واکنش می‌دهد. فرض کنید سه ربات بخواهند دری را باز کرده و وارد اتاقی شوند. ربات اول وظیفه‌ی باز کردن در و رفتن به داخل را دارد و دو ربات دیگر باید جلو رفته و در صورت باز بودن در، وارد اتاق شوند. حال اگر مانعی بر سر راه ربات اول باشد، در رفتار واکنشی، ربات اول سعی می‌کند از مانع عبور نماید و درگیر مقابله با آن می‌شود؛ و در صورتی که موفق به عبور از مانع نشود، تا هنگامی که یکی دیگر از ربات‌ها برای رهایی از این مشکل در را باز نماید، دو ربات دیگر پشت در بسته می‌مانند. در این روش توزیع مجدد وظایف وجود ندارد. در رفتار مشورت اجتماعی ممکن است برای مقابله با این مشکل، تقسیم وظایف و سازمان سیستم

تغییر کرده و استراتژی جدیدی دنبال شود. در طبقه‌بندی ارائه شده در مرجع [۱۴]، همه‌ی سیستم‌هایی که هماهنگ قوی نیستند، به صورت واکنشی عمل می‌نمایند. ممکن است هر دو روش در سیستم-های هماهنگ قوی استفاده شود. در سیستم‌های توزیع شده، می‌توان به صورت واکنشی یا مشورت اجتماعی عمل نمود. رهبر گروه در دو حالت تمرکز قوی و ضعیف، استراتژی را تغییر داده و رفتار سیستم را تعیین می‌کند.

طبقه‌بندی دیگری توسط [۱۵] مطرح شده است (جدول ). در این طبقه‌بندی سیستم‌های چندرباته با توجه به ویژگی‌هایی همچون «اندازه‌ی اجتماع[۳۲]»، «بازه‌ی ارتباطی[۳۳]»، «توپولوژی ارتباطی[۳۴]»، «پهنای باند ارتباطی[۳۵]»، «تغییرات پیکربندی اجتماع[۳۶]»، «توانایی محاسباتی[۳۷]» و «ترکیب‌بندی اجتماع» دسته‌بندی می‌شوند. در ادامه هر یک از این ویژگی‌ها مختصرا توضیح داده می‌شود.

**جدول (۱): طبقه‌بندی سیستم‌های چندرباته [۱۵]. ویژگی‌های رباتیک جمعی در طبقه‌بندی پیشنهادی با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند**

| نام ویژگی | انواع حالات | | | |
|---|---|---|---|---|
| اندازه‌ی اجتماع | SIZE-ALONE | SIZE-PAIR | SIZE-LIM | SIZE-INF |
| بازه ارتباطی | COM-NONE | COM-NEAR | COM-INF | - |
| توپولوژی ارتباطی | TOP-BROAD | TOP-ADD | TOP-TREE | TOP-GRAPH |
| پهنای باند ارتباطی | BAND-INF | BAND-MOTION | BAND-LOW | BAND-ZERO |
| پیکربندی مجدد اجتماع | ARR-STATIC | ARR-COMM | ARR-DYN | - |
| توانایی محاسباتی | PROC-SUM | PROC-FSA | PROC-PDA | PROC-TME |
| ترکیب‌بندی اجتماع | CMP-IDENT | CMP-HOM | CMP-HET | - |

منظور از اندازه‌ی اجتماع، تعداد ربات‌های موجود در سیستم است که می‌تواند چهار حالت مختلف داشته باشد؛ SIZE-ALONE به معنی یک ربات منفرد است. SIZE-PAIR به دو ربات اشاره داشته و در SIZE-LIM تعداد ربات‌ها در محدوده‌ی کوچکی می‌تواند متفاوت باشد. SIZE-INF بیانگر تعداد بی‌نهایت ربات است.

بازه‌ی ارتباطی، بیشینه‌ی فاصله‌ی دو ربات که ارتباط بین آن‌ها ممکن باشد را نشان می‌دهد. این ویژگی سه حالت دارد؛ COM-NONE به معنی عدم اجازه‌ی ارتباط مستقیم است. در COM-NEAR هر ربات فقط با ربات‌های نزدیک خود ارتباط دارد. در COM-INF ربات می‌تواند بدون محدودیت با هر ربات دیگری ارتباط داشته باشد. فاصله در اینجا به صورت اقلیدسی یا بر اساس توپولوژی محاسبه می‌گردد.

توپولوژی ارتباطی نیز به چهار دسته تقسیم می‌شود؛ در TOP-RROAD ربات‌ها نمی‌توانند به ربات خاصی پیام دهند و پیام‌ها برای همه‌ی ربات‌ها ارسال می‌شوند. در TOP-ADD هر ربات می‌تواند با استفاده از نام یا آدرس ربات دیگر به او پیام دهد. در TOP-TREE ربات‌ها در یک ساختار درختی قرار داشته و ممکن است فقط بتوانند به پدران یا فرزندانشان پیام دهند. این نوع از توپولوژی‌ها در سیستم-های نظارتی و کنترلی کاربرد دارد. در TOP-GRAPH ربات‌ها به شکل یک گراف با یکدیگر در ارتباط هستند. این روش نسبت به توپولوژی درختی مقاوم‌تر است زیرا وجود لینک‌های بیشتر منجر به قطع نشدن راحت رابطه‌ی بین اعضای اجتماع می‌گردد. استراتژی‌های ارتباطی مانند درخت یا آدرس به شکست ربات‌ها حساس هستند؛ شکست یک ربات، باعث توقف کار ربات دیگر در سمت دیگر ارتباط می‌شود.

پهنای باند ارتباط می‌تواند یکی از چهار نوع زیر باشد؛ در BAND-INF ارتباط آزاد است؛ در این حالت، پهنای باند به اندازه‌ای بزرگ است که محدودیتی در ارسال اطلاعات وجود ندارد. در BAND-MOTION هزینه‌ی ارتباطات با هزینه‌ی جابجایی ربات بین مکان‌های مختلف یکسان است؛ این مسئله را می‌توان الهامی از رقص زنبورهای عسل دانست؛ رقص زنبور توسط زنبورهای نزدیکش دیده و تفسیر می‌شود. در BAND-LOW هزینه‌ی ارتباط بسیار زیاد بوده و از هزینه‌ی جابجایی ربات‌ها بیشتر است. در این شرایط بهتر است ربات‌ها مستقل باشند. استفاده از BAND-LOW هنگامی قابل پذیرش است که هدف از چندرباته بودن سیستم، افزایش فراوانی ربات‌ها باشد نه افزایش بهینگی[۳۸] سیستم. در BAND-ZERO ارتباط مجاز نیست و ربات‌ها نمی‌توانند یکدیگر را احساس کنند؛ در طبقه-بندی پیشین، این سیستم‌ها «ناآگاه» نامیده شدند.

به نرخی که اجتماع بتواند خود را بازسازماندهی کند، پیکربندی مجدد اجتماع گویند. در واقع نرخی که هر عضو بتواند نسبت به دیگران حرکت کند. به عنوان مثال، زنبورها می‌توانند به سرعت با توجه به حرکت دیگری، حرکت خود را تغییر دهند ولی خودروها در یک بزرگراه نمی‌توانند. در ARR-STATIC چیدمان[۳۹] ایستا و توپولوژی ثابت است. در ARR-COMM چیدمان مجدد به صورت هماهنگ شده صورت می‌گیرد و در واقع ربات تنها با اعضایی که ارتباط دارد، تغییر چیدمان انجام می‌دهد. ARR-DYN به چیدمان پویا اشاره دارد که در آن پیوند اعضای اجتماع می‌تواند تغییر کند.

در ویژگی توانایی پردازش هر یک از اعضا، به هر یک از ربات‌ها مدل محاسباتی بخصوصی نسبت داده می‌شود. می‌توان برای هر ربات یک مدل محاسباتی ساده‌تر و ضعیف‌تر از ماشین تورینگ[۴۰] استفاده نمود. با این حال، مدل ترکیبی کل اجتماع ممکن است قدرتمند و پیچیده شود. برای سادگی بیشتر تنها مدل‌های ترتیبی ساده در فضای گسسته عنوان شده‌اند. PROC-SUM واحد ساده‌ای است که برای شبیه‌سازی شبکه عصبی استفاده می‌شود ولی ممکن است به علت

سادگی زیاد برای مدل کردن یک ربات مناسب نباشد. در PROC-FSA از ماشین حالت متناهی برای مدل‌کردن محاسبات هر ربات استفاده می‌شود. PROC-PDA نیز از آتاماتای پشته‌ای[41] برای مدل کردن بهره می‌برد. PROC-TME معادل ماشین تورینگ است. اغلب سیستم‌ها از این نوع مدل محاسباتی استفاده می‌نمایند.

ترکیب‌بندی اجتماع نیز پیش‌تر توضیح داده شد. در CMP-IDENT اعضای اجتماع از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری همگن هستند. در CMP-HOM اعضا از نظر ویژگی‌های فیزیکی همگن می‌باشند. در CMP-HET ربات‌ها از نظر فیزیکی یکسان نیستند و در نتیجه رفتار متفاوتی خواهند داشت.

## ۲-۲- رباتیک جمعی

در سال ۲۰۰۰ برای اولین بار پروژه‌ی رباتیک جمعی ایجاد شد [۱۶]. مارکو دوریگو[42] مخترع روش کلونی مورچه‌ها (ACO) این پروژه را با هدف مطالعه‌ی روش‌های جدید طراحی و پیاده‌سازی خودسازماندهی و خود اتصالی[43] اشیا تعریف نمود. دوریگو در [۱۷] علاوه بر ارائه‌ی تعریفی از رباتیک جمعی، بیان نمود که اجتماع ربات‌ها باید به گونه‌ای باشد که ربات‌های بسیار کوچک و ارزان قیمت در کنار یکدیگر وظایفی را انجام دهند که یک یا چند ربات پیچیده قادر به انجام آن‌ها باشند. از طرفی، طراحی ربات‌ها (از دو جنبه‌ی فیزیکی و رفتارهای کنترلی) باید به شیوه‌ای باشد که رفتار تجمعی از تعاملات بین ربات‌ها و ربات‌ها و محیط ایجاد گردد [۱۸].

دوریگو پس از آن قیودی را به منظور تفکیک رباتیک جمعی از دیگر سیستم‌های چندرباته مطرح نمود [۱۹]. در این بخش به «استقلال[44]»، «تعداد زیاد[45]»، «توانایی محدود»، «مقیاس‌پذیری[46]»، «مقاومت[47]»، «انعطاف[48]» و «هماهنگی توزیع‌شده[49]» اشاره می‌شود.

- **استقلال:** ربات‌ها در این سیستم باید بتوانند به صورت فیزیکی با محیط تعامل داشته باشند و بر آن اثر بگذارند. به عنوان مثال، شبکه‌ی حسگرها، قدرت تعامل با محیط ندارند؛ بنابراین این سیستم‌ها، رباتیک جمعی به حساب نمی‌آیند. در این سیستم‌ها رهبر کنترل کننده وجود ندارد.
- **تعداد زیاد:** تعداد ربات‌های موجود در سیستم باید زیاد باشد. همان‌گونه که در اجتماعات حیواناتی مانند مورچه یا زنبور شاهد چند صد تا چند هزار حشره در دسته هستیم. ممکن است بسته به نیاز مسئله، چند گروه از ربات‌ها وجود داشته و هر گروه شامل چندین ربات باشد. در رباتیک جمعی تعداد گروه‌ها کم و اعضای هر گروه زیاد است.
- **توانایی محدود:** توانایی‌های هر یک از ربات‌ها باید کم باشد؛ به گونه‌ای که توانایی انجام وظایف بزرگ را به تنهایی نداشته باشند. این مسئله به کاهش هزینه‌ی ربات نیز کمک می‌کند که از قیود اصلی رباتیک جمعی است.
- **مقیاس‌پذیری:** سیستم باید با افزایش تعداد ربات‌ها به درستی عمل کند و حتی در شرایط مناسب، کارایی کل مجموعه ارتقا یابد.
- **انعطاف:** ربات‌ها توانایی تولید راه‌حل‌های ماژوله برای وظایف مختلف را دارند. به این معنی که برای انجام عملیات مختلف، نیاز به تنظیمات سخت‌افزاری زیاد یا تغییر سکو[50]های نرم‌افزاری نباشد. مورچه‌ها با وجود ساختار ثابت در شرایط شکار، یافتن غذا و تشکیل زنجیره، متفاوت عمل می‌کنند؛ در حالت شکار، با ایجاد ارتشی قوی و همکاری، شکار بزرگ را به لانه می‌برند و در یافتن غذا، هر مورچه به صورت منفرد به جستجوی غذا می‌رود و با استفاده از قرار دادن فرومون روی محیط با یکدیگر هماهنگ می‌شوند.
- **مقاومت:** سیستم ربات‌ها در شرایطی که تعدادی از ربات‌ها دچار خسارت شوند یا محیط آشوبی شود، باید به کار خود ادامه دهد؛ حتی اگر لازم باشد مقداری از کارایی کم شود. در واقع با وجود فراوانی[51] در این سیستم‌ها، خسارت یک ربات، توسط ربات‌های دیگر جبران می‌شود.
- **هماهنگی توزیع‌شده:** در سیستم رباتیک جمعی، هماهنگی بین ربات‌ها توزیع شده است و هر ربات حسگرها و ارتباطات محدود و محلی دارد.
- **همگن بودن:** در رباتیک جمعی، تعداد محدودی گروه وجود دارد که ربات‌های هر گروه از نظر فیزیکی و نرم‌افزاری مشابه‌اند و نقش یکسان در عملیات دارند. ربات‌های گروه‌های مختلف ممکن است از نظر رفتار یا نرم افزار کنترلی متفاوت باشند.

در بخش پیش دو نوع طبقه‌بندی برای سیستم‌های چندرباته معرفی شد. در این‌جا موقعیت رباتیک جمعی در این دو طبقه‌بندی بیان می‌شود. ویژگی‌های رباتیک جمعی با رنگ خاکستری در شکل (۲) و جدول متمایز شده‌اند. رباتیک جمعی یک سیستم متعاون و آگاه (ربات‌ها از وجود یکدیگر مطلع هستند) با هماهنگی قوی بین اعضا است که به صورت توزیع شده و بدون رهبری عمل می‌نمایند. اندازه‌ی اجتماع در رباتیک جمعی می‌تواند در محدوده‌ی بسیار بزرگی متغیر باشد و این مقیاس‌پذیری این سیستم‌ها را نشان می‌دهد. ارتباط در این سیستم‌ها محلی است یعنی ربات‌ها تنها توانایی ارتباط با ربات‌هایی که در نزدیکی آن‌هاست را دارند. توپولوژی ارتباطی بین ربات‌ها از نوع گراف بوده و هزینه‌ی ارتباطی بین ربات‌ها معادل هزینه‌ی جابجایی آن‌ها است. ربات‌ها به طور کلی قادرند چیدمان خود با ربات‌هایی که با آن‌ها در ارتباط هستند را تغییر دهند؛ این تغییر چیدمان می‌تواند از نوع پویا نیز باشد. مدل محاسباتی ربات‌ها از نوع ماشین تورینگ است. ترکیب‌بندی ربات‌ها نیز به صورت همگن می‌باشد. علت انتخاب نکردن حالت CMP-IDENT، امکان وجود گروه‌های مختلف با نرم‌افزار کنترلی و رفتارهای متفاوت است. ولی در هر گروه ربات‌ها به صورت CMP-IDENT بوده و از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کاملا یکسان می‌باشند.

### ۲-۲-۱- مقایسه رباتیک جمعی و تک‌رباته‌ها

سیستم‌های تک‌رباته با الهام از انسان و رباتیک جمعی با الهام از حیوانات اجتماعی ایجاد شده‌اند. شبیه‌سازی تعاملات انسان با استفاده از تکنولوژی‌های موجود، سخت‌تر از شبیه‌سازی رفتار حیوانات است. بنابراین امید است که رباتیک جمعی بتواند در انجام وظایف پیچیده و با ابعاد وسیع، بهتر عمل نماید. به منظور اتمام یک وظیفه‌ی مشخص، یک ربات منفرد باید با ساختار و ماژول‌های کنترلی پیچیده طراحی شود و در نتیجه هزینه‌ی طراحی، ساخت و نگهداری بالایی خواهد داشت. از طرفی، سیستم تک‌رباته آسیب‌پذیری بالایی دارد؛ شکستن بخشی از ربات منجر به توقف کار ربات خواهد شد؛ و این دست اتفاقات قابل پیش‌بینی نیز نیستند. رباتیک جمعی با استفاده از هماهنگی‌های درون گروهی می‌تواند وظایف یک سیستم تک‌رباته را بر عهده گرفته و هزینه‌ی ساخت و نگهداری کمتری داشته باشد. از دیگر مزایای رباتیک جمعی، موازی بودن فرایندها است. وجود تعداد زیادی ربات درون این سیستم کمک می‌کند تا در یک محیط بزرگ بتوان اهداف[۵۲] زیادی را در زمان کم جستجو نمود.

خاصیت مقیاس‌پذیری رباتیک جمعی باعث می‌شود که در کاربردهای دنیای واقعی، بدون نیاز به تغییر در سخت افزار و نرم‌افزار و بدون کاهش کارایی سیستم بتوان تعداد ربات‌ها را کاهش یا افزایش داد. مزیت دیگر آن خاصیت انعطاف‌پذیری است؛ در رباتیک جمعی نیازی به تغییرات تنظیمات سخت‌افزاری برای انجام وظایف مختلف نیست.

ویژگی «مقاومت» از دیگر مزایای استفاده از رباتیک جمعی در مقایسه با یک ربات است. به جای صرف هزینه‌ی بالا برای تهیه‌ی یک ربات پیچیده که با شکستش کل سیستم دچار خسارت می‌شود؛ تعدادی ربات ارزان قیمت خریداری شده که با شکست تعدادی از آن‌ها، بقیه‌ی ربات‌ها به کار خود ادامه می‌دهند و هدف اصلی سیستم را دنبال می‌کنند. این ویژگی در ماموریت‌های خطرناک، ارزش زیادی دارد.

به دلیل کوچک و ساده بودن ربات‌ها در رباتیک جمعی، مصرف انرژی آن‌ها در مقایسه با ربات‌های منفرد بسیار اندک است. طول عمر باتری‌های رباتیک جمعی با وجود اندازه‌ی کوچک‌تر، بیش‌تر است؛ بنابراین در محیط‌هایی که امکان شارژ ربات‌ها نیست و سیم‌کشی الکتریکی وجود ندارد، رباتیک جمعی بسیار مفیدتر از ربات منفرد است.

کنترل هواپیماهای بدون سرنشین[۵۳]، عملیات نجات پس از وقایع طبیعی، استخراج معدن، کاربردهای نظامی و حمل و نقل گروهی، نمونه‌ای از کاربردهای رباتیک جمعی است. ربات‌ها در این ماموریت‌ها با همکاری و هماهنگی می‌توانند وظایف را به خوبی به پایان برسانند. در حالی یک ربات منفرد توانایی انجام این عملیات‌ها را ندارد [۲۰].

به طور کلی افزایش کارایی با استفاده از موازی‌سازی، توانایی انجام عملیات و وظایف پیچیده‌تر، حسگرهای توزیع شده، عملیات توزیع شده و تحمل‌پذیری خطا از مزایای سیستم‌های چندرباته نسبت به سیستم‌های رباتیک منفرد است. تداخل ربات‌ها با یکدیگر، عدم اطمینان از عملکرد دیگر ربات‌ها و هزینه‌ی بالای تهیه‌ی سیستم از جمله معایب سیستم‌های چندرباته است. در صورتی که ربات‌ها از عملکرد دیگر ربات‌ها اطلاعی نداشته باشند، ممکن است به جای همکاری به رقابت بپردازند.

**جدول (۲): مقایسه رباتیک جمعی و دیگر سیستم‌ها**

| | رباتیک جمعی | سیستم‌های چندرباته | شبکه حسگرها | سیستم‌های چند عامله |
|---|---|---|---|---|
| اندازه جمعیت | متفاوت در محدوده بزرگ | کوچک | ثابت | در محدوده کوچک |
| کنترل | غیر متمرکز و مستقل | متمرکز یا از راه دور | متمرکز یا از راه دور | متمرکز یا سلسله مراتبی یا شبکه |
| همگن/ناهمگن | همگن | معمولا ناهمگن | همگن | همگن یا ناهمگن |
| انعطاف | بالا | پایین | پایین | متوسط |
| مقیاس‌پذیری | بالا | پایین | متوسط | متوسط |
| محیط | ناشناخته | شناخته یا ناشناخته | شناخته | شناخته |
| حرکت | بله | بله | نه | به ندرت |
| کاربردهای معمول | عملیات خطرناک، عملیات نظامی، عملیات جستجو و نجات | حمل و نقل، حسگر، فوتبال ربات‌ها | نظارت، مراقبت پزشکی، محافظت از محیط | مدیریت منابع شبکه، کنترل توزیع شده |

جدول سیستم رباتیک

### ۲-۲-۲- مقایسه رباتیک جمعی و سیستم‌های چندرباته

سیستم‌هایی مانند شبکه‌ی حسگرها و یا سیستم‌های چند عامله[۵۴] با الهام از طبیعت و حیوانات ممکن است با رباتیک جمعی اشتراکاتی داشته باشند؛ ولی ویژگی‌های خاص رباتیک جمعی تمایز محسوسی بین این سیستم و بقیه‌ی سیستم‌های چندرباته ایجاد می‌کند. علاوه بر ویژگی‌هایی که پیش‌تر توضیح داده شد، جمعی را با سیستم‌های چندرباته، شبکه حسگرها و سیستم‌های چند عامله مقایسه می‌نماید [۲۰]. استقلال موجود در رباتیک جمعی و توانایی تعامل آن‌ها با محیط برگرفته از اجتماعات حیوانات است. مسئله‌ای که در شبکه‌ی حسگرها وجود ندارد. ارتباطات درون رباتیک جمعی، محلی و محدود است. ارتباطات سراسری باعث کاهش مقیاس‌پذیری و انعطاف گشته و با افزایش تعداد ربات‌ها، هزینه‌ی ارتباطات به صورت نمایی افزایش می‌یابد. [۲۱, ۲۲] دو نمونه از سیستم‌های

چندرباته هستند که داری تفاوت‌های ذکر شده با رباتیک جمعی می‌باشند. در سیستم‌های توسعه یافته توسط این مراجع، جمعیت ربات‌ها کم و توان پردازشی ربات‌ها بیش از حد قابل قبول در رباتیک جمعی است. از طرفی مراجع [۲۳, ۲۴] فاصله بسیار نزدیکی با رباتیک جمعی دارد. این دو مرجع که به پیاده‌سازی کنترل تشکیل گروه ربات‌ها پرداخته‌اند، تنها قید جمعیت ربات‌ها را رعایت نکرده‌اند.

## ۳- کاربردهای رباتیک جمعی

تکنولوژی‌های مدرنی همچون رباتیک جمعی به دلیل فاکتورهایی مانند خودسازماندهی، مقاومت و انعطاف، دامنه‌ی کاربردهای وسیعی دارند. در ادامه چند مورد از این کاربردها نام برده خواهد شد. در هر حوزه، کاربردهای مشابهی نیز وجود دارد که از بیان موردی آن‌ها خودداری شده است.

- **وظایفی که یک ناحیه را پوشش می‌دهند.** به دلیل توزیع شدگی سیستم‌های رباتیک جمعی، در مواقعی که نیاز به پوشش یک منطقه است می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. به عنوان مثال می‌توان به سیستم‌های نظارت محیط و تشخیص سریع خطراتی مانند نشتی مواد شیمیایی اشاره نمود. مزیت رباتیک جمعی در مقایسه با شبکه‌ی حسگرها، در مواجهه با نشتی این است که اولا به دلیل توانایی حرکت ربات‌ها، محل نشتی به صورت دقیق قابل تشخیص است. دوما ربات‌ها می‌توانند چینش خود را به شکلی تغییر دهند که جلوی نشتی را بگیرند. از دیگر مثال‌های این حوزه، نقشه‌کشی[۵۵] منطقه، کاوش سیاره-های دیگر، جستجوی سنگ معادن و یا یافتن یک منبع خاص مانند بو است.
- **وظایفی که خطرناک هستند.** یکی از قابلیت‌های سیستم‌های رباتیک جمعی، غیرضروری بودن هر یک از اعضاست. در صورتی که یکی از اعضا از بین برود، بقیه‌ی اجتماع به درستی به کار خود ادامه می‌دهند. این ویژگی باعث استفاده از رباتیک جمعی در کاربردهای خطرناکی همچون استخراج معدن و مین‌روبی می‌گردد. در حالی که استفاده از یک ربات پیچیده و گران قیمت در این کاربرد عاقلانه نیست.
- **وظایفی که مقیاس آن‌ها در طول زمان بزرگ یا کوچک می-شود.** نشت نفت از یک کشتی غرق شده را در نظر بگیرید. در صورتی که مخزن کشتی شکسته شود، مقیاس نشتی بزرگ‌تر می‌گردد. رباتیک جمعی در این مواقع می‌تواند با اعزام تعداد زیادی نیرو به راحتی نشتی را کنترل و محیط را تمیز نماید.
- **وظایفی که نیاز به تعداد زیادی نیرو دارد.** حضور در میادینی همانند میدان جنگ، علاوه بر خطرناک بودن به تعداد زیادی نیرو نیاز دارد. در صورتی که تعدادی از نیروها از بین بروند، سایر اعضا می‌توانند به وظیفه‌ی سراسری‌شان ادامه دهند.

برخی از کاربردها، اشتراکی از وظایف بالا هستند و در دسته‌ی خاصی قرار نمی‌گیرند. به عنوان مثال می‌توان به کنترل هواپیماهای بدون سرنشین (UAV)، عملیات نجات، کاربردهای نظامی، حمل و نقل گروهی[۵۶] ، شکار، مهاجرت، پراکندگی[۵۷] ربات‌ها در منطقه به شکلی که بیشترین فضای ممکن پوشش داده شود، تشکیل الگو[۵۸] یا تغییر موقعیت ربات‌ها، حرکت تجمعی[۵۹]، تقسیم وظایف[۶۰] و خوشه‌بندی اشاره کرد. رفتارهایی چون گردهمایی[۶۱] و حرکت تجمعی، پایه و اساس رفتارهای پیچیده‌تر هستند. به منظور انجام وظایفی چون حرکت تجمعی، تشکیل یک شکل و تبادل اطلاعات، ابتدا ربات‌ها باید گرد هم آیند. در بخش الگوریتم‌های ارائه شده به صورت جامع‌تر به معرفی مراجع مربوط به هر وظیفه پرداخته شده است.

**جدول (۳): معرفی برخی از پروژه‌ها و ربات‌ها.**

| نام | قطر (میلی متر) یا طول × عرض | حسگرها | ارتباط | سازنده |
|---|---|---|---|---|
| Khepera | 55 | هشت حسگر مادون قرمز[۶۲] | ارتباط سیمی | دانشگاه EPFL |
| [۲۵] Khepera III | 120 | ۱۱ حسگر مادون قرمز، پنج حسگر فراصوت[۶۳] | بلوتوث، وای‌فای | K-Team و دانشگاه EPFL |
| Khepera IV | 140 | ۱۲حسگر مادون قرمز، پنج حسگر فراصوت، دوربین رنگی | بلوتوث، وای‌فای | K-Team و دانشگاه EPFL |
| [۲۶] e-puck | 75 | ۱۱ حسگر مادون قرمز، دوربین رنگی، میکروفون | بلوتوث | دانشگاه EPFL |
| [۲۷] Alice | 20×20 | حسگر مادون قرمز، چراغ، دوربین | امواج رادیویی | دانشگاه EPFL |
| [۲۸] Jasmine | 23×23 | هشت حسگر مادون قرمز | امواج مادون قرمز | تولید شده در پروژه‌ی I-swarm |
| I-swarm robot [۲۹] | 3×3 | حسگر نوری[۶۴] | بی‌سیم | تولید شده در پروژه‌ی I-swarm |
| [۳۰] S-bot | 120 | میکروفون، حسگر دما، دوربین | وای‌فای | تولید شده در پروژه‌ی Swarm- bots |
| [۳۱] Kobot | 120 | هشت حسگر مادون قرمز، دوربین رنگی | زیگ‌بی[۶۵] | دانشگاه Middle East Technical |
| [۳۲] Swarmbot | 127×127 | حسگر مادون قرمز، حسگر نوری، دوربین | امواج مادون قرمز | شرکت i-Robot<br>دانشگاه IRIDIA |
| [۳۳] KiloBot | 33 | حسگر نوری، حسگر فاصله | امواج مادون قرمز | دانشگاه Harvard |

## ۴- ربات‌ها و محیط‌های شبیه‌سازی

استفاده از ربات‌های فیزیکی در تحقیقات امر دشواری است. به همین دلیل محیط‌های شبیه‌سازی جهت آزمون ساختار و الگوریتم‌های مورد استفاده طراحی شده‌اند. آزمون در محیط‌های شبیه‌سازی ارزان‌تر و سریع‌تر از محیط‌های واقعی و با استفاده از ربات‌های فیزیکی است. سکوهای شبیه‌سازی زیادی برای علم رباتیک وجود دارند. در این بخش چند مورد از آن‌ها مختصرا معرفی می‌گردند. در جدول نیز به معرفی برخی از پروژه‌ها و ربات‌های پرکاربرد پرداخته شده است؛ نام، اندازه، حسگرها، راه ارتباطی و سازنده مرتبط با هر یک از ربات‌ها در این جدول ارائه شده است.

- **شبیه‌ساز Player/Stage** یکی از معروفترین محیط‌های شبیه‌سازی است [۳۴, ۳۵]. بخش Player، سروری است که دسترسی کامل به حسگرها و اجزای حرکتی[۶۶] ربات را فراهم می‌آورد. بخش Stage نیز شبیه‌سازی است که می‌تواند مقیاس مسئله را تا ۱۰۰۰ ربات افزایش دهد. محیط مورد استفاده در Stage دو بعدی است.
- **Gazebo** شبیه‌ساز توسعه یافته‌ی Stage است که بر روی محیط‌های سه بعدی عمل می‌کند [۳۶]. این محیط علاوه بر واسط کاربری خود، از واسط کاربری Player نیز پشتیبانی می‌نماید. بنابراین کنترل‌کننده‌های نوشته شده در Stage قابل استفاده در Gazebo است و برعکس.
- **Enki** به صورت متن باز و در محیط دو بعدی با زبان C++ نوشته شده است [۳۷]. این محیط توانایی شبیه‌سازی حسگرها، حرکات، تصادم[۶۷] و دوربین‌ها را در سطح صاف دارد. شبیه‌سازی Enki صدها برابر سریع‌تر از ربات‌های دنیای واقعی است. این محیط برای شبیه‌سازی ربات‌هایی چون e-puck و swarmbot نوشته شده است. با این حال کاربران می‌توانند از این محیط برای ربات‌های دیگر استفاده نمایند.
- **Webots** محیطی است برای مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و شبیه‌سازی ربات‌ها که بیش از ده سال از ایجاد آن می‌گذرد [۳۸]. کاربر در این محیط می‌تواند تنظیمات پیچیده‌ای روی ربات انجام دهد. می‌توان یک یا چندین ربات به صورت همگن یا ناهمگن تعریف کرد. تنظیمات اولیه و از پیش تعریف شده‌ی وسیعی بر روی حسگرها و اجزای حرکتی امکان‌پذیر می‌باشد. اشیای محیط می‌توانند توسط کاربر سفارشی‌سازی شوند. امروزه بیش از ۱۰۰۰ دانشگاه از این محیط شبیه‌سازی استفاده می‌کنند. یکی از معایب این محیط کاهش سرعت زیاد در زمان استفاده از بیش از ۱۰۰ ربات است.
- **Breve** محیطی سه بعدی است [۳۹]. رفتار و تعاملات ربات‌ها در این محیط توسط زبان پایتون نوشته می‌شود. کاربر می‌تواند محیط شبیه‌سازی را از هر جهت و موقعیتی ببیند.
- **V-REP** محیطی سه بعدی و متن باز است [۴۰]. این محیط ماژول‌های محاسباتی زیادی همچون حرکت‌سنجی روبه‌جلو و عقب، مسیریابی و محاسبه کمترین فاصله دارد.

هر یک از ربات‌های معرفی شده در جدول در ادامه تشریح شده‌اند. علاقمندان می‌توانند برای بدست آوردن اطلاعات بیشتر در رابطه با هر یک از ربات‌ها به مراجع ارائه شده، رجوع کنند.

- **ربات Khepera** با گذشت زمان در نسخه‌های متفاوتی ارائه شده است [۲۵]. نسخه‌ی اولیه‌ی آن در گذشته بسیار پرکاربرد بوده ولی امروزه از آن استفاده نمی‌شود. جدیدترین نسخه‌ی این ربات Khepera IV است که سنسورهای مادون قرمز آن جهت تشخیص موانع، چهار سنسور دیگر مادون قرمز برای دنبال کردن خط یا جلوگیری از افتادن و سنسورهای مافوق صوت آن برای تشخیص اشیا قرار داده شده‌اند. ویژگی‌های جدیدی چون شتاب‌سنج، دوربین رنگی، سنج، میکروفن و سه LED، دقت این نسخه را بسیار بالاتر برده‌اند. باتری این ربات تا پنج ساعت دوام می‌آورد. محیط‌های شبیه‌سازی همچون V-REP و Webot برای این ربات مناسب هستند.
- **ربات e-puck** دارای سنسور IR برای تشخیص نزدیکی اجسام، میکروفن برای تشخیص صداهای محیط و دوربین رنگی است [۲۶]. باتری این ربات تا ۱۰ ساعت عمر می‌کند و محیط‌های شبیه‌سازی چون Enki و WEbots برای این ربات مناسب هستند.
- **ربات Alice** نیز از IR برای تشخیص موانع استفاده می‌کند [۲۷]. باتری این ربات، عمر ۲۰ ساعته داشته و محیط شبیه‌سازی پیشنهادی برای این ربات Webot است.
- **ربات Jasmine** ارزان و قابل اعتماد است و می‌تواند با تعداد بیش از ۱۰۰ ربات، اهداف رباتیک جمعی را تحقق بخشد [۲۸]. عمر باتری این ربات یک تا دو ساعت است. محیط شبیه‌سازی LaRoSim برای این ربات پیشنهاد می‌گردد.
- **ربات‌های I-swarm** بسیار کوچک هستند و می‌توانند اجتماعی با بیشتر از ۱۰۰ عضو داشته باشند [۲۹]. این ربات‌ها می‌تواند ارتباطی بین میکرو رباتیک و سیستم‌های چندرباته ایجاد نمایند (شکل (۳-الف).
- **ربات S-bot** با حسگر IR و راه ارتباطی WiFi، دارای یک باتری با عمر یک ساعت است [۳۰]. محیط شبیه‌سازی سفارشی Bot3D نیز برای این ربات استفاده می‌گردد (شکل (۳-ب).
- **ربات Kobot** با حسگر IR از برخورد با موانع جلوگیری کرده و از طریق بی‌سیم با اطراف ارتباط برقرار می‌کند [۳۱]. عمر مفید باتری آن ۱۰ ساعت و محیط شبیه‌سازی آن نیز توسط سازنده‌هایش سفارشی‌سازی شده است.
- **ربات Swarmbot** به منظور خودسازماندهی و خودچینشی اجسام در محیط دو بعدی ساخته شده است [۳۲]. پروژه‌ی Swarmanoid ادامه‌ی راه این ربات را در محیط سه‌بعدی به عهده

گرفته است. باتری این ربات‌ها عمری سه ساعته دارند. Swarmbot3D و Enki محیط‌های شبیه‌سازی مناسب برای این ربات می‌باشند.

- **ربات KiloBot** با هدف آزمون رفتارهای تجمعی بر روی صدها یا هزاران ربات ساخته شده است [۳۳]. باتری این ربات از سه تا ۲۴ ساعت عمر دارد. محیط شبیه‌سازی V-REP برای این ربات پیشنهاد می‌گردد.

الف ب

**شکل (۳): الف) میکرو ربات I-Swarm [۴۱] ب) همکاری در ربات‌های S-bot [۴۲].**

## ۵- انواع روش‌های مدل‌سازی

مدل‌سازی[۶۸] روشی است که در برخی از فیلدهای تحقیقاتی جهت فهم بهتر عملکرد درون سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حوزه‌ی رباتیک جمعی نیز مدل‌سازی می‌تواند مفید باشد؛ زیرا مسئله تا صدها یا هزاران ربات قابل گسترش است و هزینه و زمان برای آزمایشات در این سطح محدود هستند. مدل‌سازی مولفه‌ی اصلی الگوریتم همکاری ربات‌ها است که رفتار و تعاملات بین ربات‌ها را کنترل می‌نماید. با توجه به مشخصات رباتیک جمعی، روش‌های مدل‌سازی را می‌توان به چهار نوع تقسیم نمود [۴۳]: «مدل‌سازی مبتنی بر حسگر[۶۹]»، «مدل‌سازی میکروسکپی[۷۰]»، «مدل‌سازی ماکروسکوپی[۷۱]» و «مدل‌سازی بر اساس الگوریتم‌های هوش جمعی».

در مدل‌سازی مبتنی بر حسگر، حسگرها و اجزای حرکتی ربات به عنوان مولفه‌های اصلی سیستم در کنار اشیای موجود در محیط مدل می‌شوند. آنگاه عمل مدل‌سازی تعاملات ربات‌ها به ساده‌ترین شکل ممکن و نزدیک به واقعیت صورت می‌گیرد. این روش مدل‌سازی، قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش به شمار می‌رود. تحقیقات پیشین محدودیت‌های فیزیکی ربات‌های واقعی را در نظر نمی‌گرفتند [۴۴]. امروزه به این محدودیت‌ها بیشتر توجه می‌شود [۴۵].

در مدل‌سازی میکروسکوپی، ربات‌ها و تعاملاتشان به شکل ماشین حالت متناهی مدل می‌شوند. رفتار هر یک از ربات‌ها با تعدادی حالت تعریف می‌گردد و شرط گذار را ورودی حسگرها یا ارتباطات تعیین می‌نماید. از آنجا که مدل بر اساس رفتار هر یک از ربات‌ها است، شبیه‌سازی باید چندین مرتبه اجرا شود تا رفتار میانگین اجتماع بدست آید. در اغلب تحقیقات از مدل میکروسکوپی احتمالاتی استفاده می‌شود؛ زیرا نویز را می‌توان به شکل یک احتمال مدل کرد [۴۶].

مدل‌سازی ماکروسکوپی نقطه‌ی مقابل مدل‌سازی میکروسکوپی است. در این نوع از مدل‌سازی یک حالت از سیستم، میانگین حالت ربات‌ها در آن حالت در زمان مشخص را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت مدل‌سازی میکروسکوپی در سطح ربات‌ها است ولی مدل‌سازی ماکروسکوپی در سطح اجتماع است. بنابراین مدل‌سازی ماکروسکوپی دید سراسری نسبت به اجتماع و مدل‌سازی میکروسکوپی جزئیات رفتار اجتماع را نشان می‌دهند [۴۷]. ماریتونی[۷۲] و سایرین در [۴۸] فریمورکی برای مدل کردن رباتیک جمعی در دو سطح میکروسکوپی و ماکروسکوپی ارائه نموده‌اند. این فریمورک از ماشین حالت متناهی احتمالاتی (PFSM) استفاده می‌کند. نویسندگان این مقاله مطالعه موردی برای برداشتن چوب از زمین توسط ربات‌ها انجام داده‌اند. ماسینک[۷۳] و سایرین در [۴۹] اظهار داشتند که قرار گرفتن دو سطح میکروسکوپی و ماکروسکوپی در کنار هم تناقضاتی دارد. آن‌ها روشی به نام Bio-PEPA[۷۴] ارائه نمود که برای مدل‌سازی واکنش‌های بیوشیمی استفاده می‌شود. این روش رباتیک جمعی را تنها در سطح میکروسکوپی مدل کرده و اعتبارسنجی و آنالیز ویژگی‌های ماکروسکوپی را با استفاده از روش بررسی مدل[۷۵] انجام می‌دهد.

PSO[۷۶] رایج‌ترین الگوریتم هوش جمعی است که در مدل‌سازی استفاده می‌شود و با الهام از پرواز دسته جمعی پرندگان نوشته شده است [۵۰]. علاوه بر این الگوریتم، الگوریتم‌های دیگری نیز در حوزه‌ی رباتیک جمعی استفاده شده‌اند، مانند کلونی مورچه‌ها [۵۱].

برامبیلا[۷۷] و سایرین در [۵۲] روشی با عنوان طراحی ویژگی محور[۷۸] ارائه نمودند. این روش از چهار مرحله تشکیل می‌شود. ابتدا نیازها به صورت فرمال تعیین می‌گردند. در بخش دوم مدل ماکروسکوپی با استفاده از زنجیره‌ی مارکو[۷۹] طراحی و توسط روش بررسی مدل ارزیابی می‌شود. سپس از مدل برای راهنمایی پیاده‌سازی و شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. در بخش پایانی، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی صورت می‌گیرد.

ماشین حالت متناهی احتمالاتی می‌تواند به صورت خودکار تولید گردد. مرجع [۵۳] روشی به نام AutoMoDe-Vanilla[۸۰] برای این منظور ارائه دادند. شبکه پتری[۸۱] روشی دیگر برای مدل کردن نرم‌افزار کنترلی رباتیک جمعی است [۵۴]. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر پتری‌نت از کامپیوتری مرکزی با ربات‌ها در ارتباط هستند؛ در صورتی که در رباتیک جمعی نباید کنترل‌کننده‌ی مرکزی وجود داشته باشد. منطق زمانی[۸۲] نیز برای مدل کردن و آنالیز سیستم‌های رباتیک جمعی استفاده شده است [۵۵]. این روش می‌تواند با روش بررسی مدل ترکیب شده و ارزیابی فرمال سیستم را انجام دهد [۵۶].

کنترل نظارتی[۸۳] به صورت گسترده در خطوط تولید استفاده می‌شود [۵۷, ۵۸] . مرجع [۵۹] از تئوری کنترل نظارتی (SCT) برای مدل کردن رباتیک جمعی استفاده می‌نماید. استفاده از SCT مزایایی همچون تولید خودکار کد از مشخصات مدل شده دارد. کنترل‌کننده-

های مدل شده با این روش را می‌توان در سکوهای مختلف استفاده نمود.

## ۶- مروری بر الگوریتم‌های ارائه شده

تحقیقات در زمینه‌ی رباتیک شناختی همچنان راه درازی را در پیش دارد. به دلیل عدم وجود تعریف دقیق از سیستم رباتیک شناختی و مسائل آن، اغلب الگوریتم‌های موجود برای کاربرد خاص طراحی شده‌اند و الگوریتمی که قابلیت استفاده مجدد در چندین کاربرد را داشته باشد، هنوز ارائه نشده است. مسائل مطرح در حوزه‌ی رباتیک شناختی تنوع بسیار زیادی دارند و تولید توصیف یکتا برای همه‌ی مسائل دشوار است. الگوریتم‌های مختلف را نمی‌توان به راحتی با یکدیگر مقایسه نمود زیرا تاکنون معیار آزمایش[۸۴] مشترکی نیز ارائه نشده است. بنابراین پیشرفت علم رباتیک جمعی تاکنون کند بوده است.

در سال‌های اخیر، تلاش محققان بر الهام از طبیعت و تولید الگوریتم‌هایی بوده است که بتواند رفتار تجمعی را به خوبی شبیه‌سازی نماید. در ادامه به چند مورد از این تحقیقات اشاره می‌گردد. «خودخوشه‌بندی[۸۵]» یکی از اولین رفتارهای تجمعی است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. این رفتار از باکتری‌ها الهام گرفته شده است. در مرجع [۶۰] اعضای اجتماع توسط یک قانون ساده کنترل می‌شوند. امکان پیوستن به یک کلونی یا ترک آن با توجه به چگالی اطراف ربات سنجیده می‌شود. ۱۵۰۰ ربات در این آزمایش بدون کنترل‌کننده‌ی مرکزی و اطلاعات خارجی، به سه دسته تقسیم شده‌اند. روش مشابهی برای شبیه‌سازی رفتار مورچه‌ها در تمیز کردن یک گودال ارائه شده است [۶۱]. وظیفه‌ی ربات‌ها، جمع‌آوری همه‌ی اجسام منطقه با همکاری یکدیگر است. محل قرار گرفتن اجسام از پیش تعیین نشده است. ربات‌ها تنها یک قانون ساده را دنبال می‌نمایند؛ حمل اجسام از مناطق با کم‌چگالی به مناطق پرچگالی. آزمایشات، موفقیت ربات‌ها را در جمع‌آوری ۸۰ جسم بدون ارتباط بین ربات‌ها نشان می‌دهد. از دیگر تلاش محققان برای شبیه‌سازی رفتار همکاری در اجتماع ربات‌ها، می‌توان به حمل چوب اشاره کرد [۴۶]. طول چوب به اندازه‌ای زیاد است که توسط یک ربات قابل حمل نبوده و باید دو ربات با همکاری یکدیگر آن را جابجا کنند. علت انجام این آزمایش، سنجش میزان تلفیق هوش دو ربات (بدون هیچ ارتباطی) برای انجام یک کار جمعی است. هر ربات مدت زمان مشخصی منتظر ربات دیگر برای کمک شده و پس از آن به سراغ چوب بعدی می‌رود.

یکی از الگوریتم‌های اخیر برای تمرکز بر قدرت توزیع رباتیک جمعی، پراکنده شدن یکپارچه ربات‌ها در یک محیط بسته است. الگوریتمی بر روی ربات iRobot در [۲۶] ارائه داده است. این الگوریتم از دو مرحله که به صورت متناوب تکرار می شوند، تشکیل شده است: پراکنده شدن ربات‌ها و تشخیص مرزها. در نهایت ربات‌ها با این قوانین ساده در محیط پراکنده می‌شوند.

به طور کلی الگوریتم‌های رباتیک جمعی دارای پنج ویژگی می‌باشند [۲۰]. «سادگی»، «مقیاس‌پذیری»، «عدم تمرکز»، «محلی بودن» و «موازی بودن» پنج ویژگی الگوریتم‌های موردنیاز رباتیک جمعی است که در ادامه شرح داده می‌شوند. محققان با توجه به این ویژگی‌ها، الگوریتم‌های زیادی ارائه داده‌اند. علاقه‌ی اصلی محققان بر وظایف پایه‌ای همچون کنترل آرایش و اجتناب از موانع است. در آینده باید فریمورک[۸۶] واحدی ارائه گردد تا محققان بتوانند الگوریتم‌های خود را از نظر مقیاس‌پذیری، مقاومت و انعطاف با یکدیگر مقایسه نمایند. آنگاه می‌توان به سراغ وظایف پیچیده‌تر رفت.

- **سادگی:** با توجه به توانایی اندک ربات‌ها، الگوریتم‌ها نیز باید در حد ممکن ساده باشند. الگوریتم ساده به کاهش هزینه‌ی ربات کمک می‌کند. حتی احتساب رفتارهای تجمعی بهینه و پیچیده می‌تواند با طراحی صحیح الگوریتم همکاری ممکن شود. در اغلب موارد ربات‌ها، ماشین حالت متناهی با تعداد حالت اندک در نظر گرفته می‌شوند.
- **مقیاس‌پذیری:** به منظور تحقق ویژگی مقیاس‌پذیری اجتماع، الگوریتم نیز باید در همه‌ی اندازه‌های جمعیت مقیاس‌پذیر باشد. طراح باید پیوستن و ترک پویای هر ربات به جمعیت را در نظر بگیرد.
- **عدم تمرکز:** ربات‌ها در سیستم رباتیک جمعی خودمختار و مستقل هستند، در نتیجه الگوریتم نیز باید این ویژگی‌ها را داشته باشد. الگوریتم باید از هر گونه کنترل مرکزی و خارجی اجتناب نماید؛ حتی در صورتی که رباتی از رفتار ربات دیگر متاثر شد، باید به صورت شخصی تصمیم خود را بگیرد. یک الگوریتم غیرمتمرکز قابلیت مقیاس‌پذیری دارد.
- **محلی بودن:** از دیگر ویژگی‌های رباتیک جمعی تعاملات و ارتباطات محلی است. الگوریتم طراحی شده نیز به منظور ایجاد قابلیت مقیاس‌پذیری باید ویژگی محلی بودن را دارا باشد.
- **موازی بودن:** اجتماع شامل تعداد زیادی ربات است؛ بنابراین الگوریتم باید تا حد ممکن موازی باشد تا ربات‌ها بتوانند به صورت همزمان با چندین هدف مواجه شوند.

همانطور که گفته شد، الگوریتم‌های ارائه شده در حوزه‌ی رباتیک جمعی با توجه به مسائل و وظایف مطرح شده، طراحی شده‌اند. بنابراین در اغلب مطالعات مروری در این زمینه، الگوریتم‌ها را بر اساس وظایف و کاربردها دسته‌بندی می‌نمایند [۹]. در این مقاله نیز یک دسته‌بندی کلی از انواع الگوریتم‌ها، مطرح شده است. برخی از وظایف ارائه شده ممکن است به دلیل اشتراکات زیاد به چند دسته تعلق داشته باشند؛ هدف از این دسته‌بندی، جداسازی کامل وظایف نیست. «گردهمایی»، «تشکیل الگو»، «آرایش زنجیره‌ای[۸۷]» و «خوداتصالی» در دسته‌ی رفتارهای سازماندهی قرار دارند. رفتارهای «حرکتی و جهت یابی[۸۸]» شامل وظایفی چون «کاوش تجمعی[۸۹]»، «حرکت هماهنگ[۹۰]» و «حمل و نقل تجمعی» می‌باشند. «اتفاق نظر[۹۱]» و «تخصیص وظایف» نیز در دسته‌ی «تصمیم‌گیری تجمعی[۹۲]» قرار داده شده‌اند.

## ۶-۱- رفتارهای سازماندهی

### ۶-۱-۱- گردهمایی

تجمع ربات‌ها در منطقه را گردهمایی گویند [۶۲]. این رفتار از تجمع موجوداتی چون باکتری‌ها، سوسک‌ها، زنبورها و پنگوئن‌ها الهام گرفته شده است. تحقیقات زیادی بر روی این وظیفه به صورت منفرد و به صورت پیش‌نیازی برای دیگر وظایف انجام گرفته است. روش‌های مدل‌سازی این رفتار، استفاده از روش‌های احتمالاتی مانند ماشین حالت متناهی، کاربرد نیروی مجازی[۹۳] مانند فیزیک مصنوعی[۹۴] و الگوریتم‌های تکاملی است.

در حوزه‌ی تحقیقاتی فیزیک مصنوعی، رفتار عامل‌ها توسط نیروهای مجازی مدل می‌شود. این نیروها، حرکت عامل‌ها و تعاملات آن‌ها با محیط را تعیین می‌کند. آرایش موجود در بسیاری از حیوانات را می‌توان با استفاده از نیروهای جاذبه (عامل‌ها تمایل دارند در نزدیکی یکدیگر بمانند) و نیروهای دافعه (از تصادم و برخورد عامل‌ها جلوگیری می‌کند) مدل نمود. هر یک از ربات‌ها بر اساس نیرویی که از همسایه‌هایش بر او اعمال می‌شود حرکت می‌کند. این نیروها بر اساس فاصله‌ی بین ربات‌ها تعیین می‌شوند. اگر فاصله‌ی دو ربات از حد مشخصی بالاتر رود، نیروی جاذبه و اگر فاصله از حد مشخص پایین‌تر باشد نیروی دافعه خواهیم داشت.

ربات‌ها به دلیل توانایی حس محلی، دید محدودی نسبت به محیط خود دارند. از طرفی تعیین جهت قرار گرفتن همسایه‌ها هنگامی که از تکنولوژی‌هایی چون مادون قرمز استفاده می‌شود با خطای بالایی مواجه است. به همین دلیل مطالعات محدودی از قوانین فیزیک مصنوعی برای حرکت ربات‌ها استفاده کرده‌اند. مرجع [۶۳] یکی از آن‌ها است که گردهمایی ربات‌ها را با استفاده از فیزیک مصنوعی پیاده‌سازی و آزمایش کرده است. در این مقاله، فاصله و جهت نسبی همسایه‌ها با استفاده از فرکانس رادیویی و تکنولوژی مادون قرمز به دست می‌آیند. علاوه بر آن، یک مکانیزم اجتناب از مانع ارائه شده است که در آن موانع به شکل ربات مجازی تعریف شده‌اند. به منظور اجتناب از نیروی جاذبه بین مانع و ربات، ربات مجازی تنها در صورتی فعال می‌شود که فاصله‌اش با ربات واقعی به گونه‌ای باشد که نیروی دافعه از نیروی جاذبه بیشتر باشد.

در روش‌های احتمالاتی، رفتار ربات‌ها تا حدی به صورت تصادفی و تا اندازه‌ای با توجه به تعامل ربات با محیطش تعیین می‌گردد. در کاربرد گردهمایی، ماشین حالت متناهی با دو حالت حرکت و توقف استفاده می‌شود [۶۴]. برخی از مراجع، حالت حرکت را به دو زیرحالت تقسیم می‌نمایند: حالتی که ربات سعی در نزدیک شدن به ربات دیگر دارد و حالتی که ربات از همسایه‌هایش فاصله می‌گیرد [۶۵]. تصمیم جابجایی بین حالت‌ها ممکن است کاملا به صورت تصادفی و یا با استفاده از نشانه‌های محلی باشد. این نشانه‌ها ممکن است به سادگی حضور ربات دیگر در نزدیکی و یا به شکل‌های پیچیده‌تری باشد [۶۶]. پارامترهای ماشین حالت مانند احتمال جابجایی بین حالت‌ها معمولا به صورت دستی توسط طراح تعیین می‌گردد. با این حال اخیرا روش‌هایی جهت تعیین خودکار پارامترها ارائه شده است [۵۳].

شبکه عصبی و روش‌های تکاملی متنوعی همچون الگوریتم ژنتیک نیز در رابطه با وظیفه‌ی گردهمایی ارائه شده است [۶۷, ۶۸]. شبکه عصبی که ورودی حسگرها را به خروجی اجزای حرکتی ربات متصل کند از رایج‌ترین روش‌ها است. یکی از حالت‌های گردهمایی، حالت آزاد[۹۵] نام دارد؛ حالتی که ربات‌ها پیش‌فرضی درباره‌ی محل جمع شدن نداشته و بتوانند در هر ناحیه‌ای گرد هم آیند. تعداد زیادی از مطالعات با الهام از سوسک‌ها، الگوریتم‌هایی برای حالت آزاد ارائه داده‌اند. سوسک‌ها به صورت تصادفی در محیط حرکت کرده و در برخی نواحی بر اساس تعداد همسایه‌های شناسایی شده توقف می‌نمایند. هرچه تعداد سوسک‌های همجوار بیشتر باشد احتمال توقف سوسک مورد نظر در آن ناحیه بیشتر خواهد بود. از طرفی در هر زمانی ممکن است یک سوسکِ متوقف، شروع به حرکت کرده و دسته‌ی تشکیل شده را ترک نماید. در حالتی که تعداد همسایه‌های سوسک کم‌تر باشد، احتمال ترک او بیشتر خواهد بود. برخی از مقالات از این رفتار ساده الهام گرفته و الگوریتم‌هایی ارائه داده‌اند [۶۹].

در مرجع [۷۰] ربات‌ها توسط یک ماشین حالت سه‌حالته کنترل می‌شوند (حرکت تصادفی، نزدیک شدن و توقف)؛ حالت حرکت تا زمان مشخصی ادامه می‌یابد؛ سپس ربات توسط حسگرهایش به دنبال ربات دیگر می‌گردد. در صورت تشخیص ربات دیگر، وارد حالت نزدیک شدن می‌شود. در این حالت، ربات به سمت نزدیک‌ترین ربات شناخته شده حرکت کرده و به حالت توقف می‌رود. ربات از حالت توقف با استفاده از یک تابع احتمالاتی از پیش تعیین شده دوباره وارد حالت حرکت می‌شود. این حرکتِ دوباره باعث می‌شود تا اجتماعات کوچک مانع ایجاد اجتماعات بزرگ‌تر نشوند. مرجع [۷۱] از جهت نسبی ربات نسبت به اجتماع برای محاسبه‌ی تابع احتمالاتی ترک استفاده می‌نماید. احتمال ترک رباتی که در جهت اجتماع است کم‌تر از رباتی است که در خلاف جهت اجتماع قرار دارد؛ این تابع از حرکت مولکول‌ها الهام گرفته شده است.

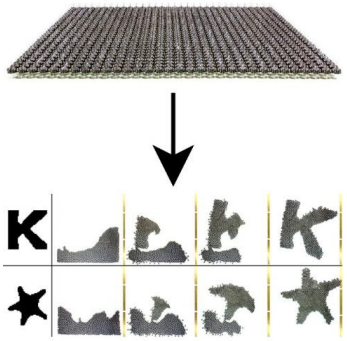
حالت دیگر گردهمایی، متاثر از محیط[۹۶] است. به این معنی که موقعیت مکانی ربات در محیط بر رفتار او تاثیر گذاشته و احتمال ایجاد تجمع در برخی از نواحی بیشتر خواهد بود. در طبیعت نیز زنبورهای عسل ترجیح می‌دهند در مناطقی با دمای بهتر جمع شوند. زنبورها توانایی تشخیص تفاوت دمایی را ندارند. برای مقابله با این محدودیت، به صورت تصادفی حرکت کرده تا به زنبور دیگری برخورد نمایند. پس از برخورد، دمای محیط در آن منطقه را بررسی کرده و برای مدت مشخصی در آن حالت می‌مانند. پس از سپری شدن زمان مشخص، شروع به حرکت کرده تا به زنبور دیگری برخورد نمایند. سوسک‌ها نیز محیط تاریک را ترجیح می‌دهند. آن‌ها علاوه بر تعداد همسایه‌ها، شرایط محیطی را نیز برای توقف لحاظ می‌کنند. محققان زیادی با

الهام از این موجودات روش‌هایی برای گردهمایی ارائه داده‌اند [۶۰, ۶۱].

روش‌های زیادی برای سنجش و تحلیل گردهمایی ارائه شده است. به عنوان مثال نسبت ربات‌هایی که در بزرگترین اجتماعند به کل ربات‌ها [۷۲] یا میانگین اندازه‌ی اجتماعات [۷۳]. در حالت متاثر از محیط، تعداد ربات‌هایی که در یک منطقه‌ی مشخص هستند یا با فاصله‌ی مشخصی از آن قرار دارند معیار مناسبی است [۷۴]. یا حتی می‌توان ارتباط و نسبت فاصله‌ای بین ربات‌ها را در نظر گرفت [۶۸].

### ۶-۱-۲- تشکیل الگو

آرایش ربات‌ها به گونه‌ای که بین آن‌ها فاصله مشخصی باشد و چینش آن‌ها الگوی خاصی را ایجاد نماید را تشکیل الگو می‌نامند [۷۵] (شکل (۴). این رفتار از دو علم بیولوژی و فیزیک الهام گرفته شده است. در علم بیولوژی می‌توان به فرم خاص باکتری‌ها و در علم فیزیک به آرایش مولکول‌ها و کریستال‌ها اشاره نمود. از این وظیفه می‌توان برای سیستم‌های نظارتی استفاده نمود و هر ناحیه را به یکی از ربات‌ها سپرد. در این سیستم‌ها، توزیع ربات‌ها باید به گونه‌ای باشد که هیچ ناحیه‌ی بدون نظارتی باقی نماند. در مرجع [۷۶] هر ربات، دو ربات نزدیک‌تر به خود را در محیط یافته و به شکلی فاصله‌ی خود را با آن‌ها تنظیم می‌نماید که یک مثلث تشکیل دهند. همه‌ی ربات‌ها همین روش را دنبال کرده و در نهایت آرایش ربات‌ها به صورت مش در خواهد آمد. روش مدل‌سازی رایج این رفتار، طراحی مبتنی بر فیزیک مجازی[۹۷] است.



**شکل (۴): نمونه‌ای از خود اتصالی ربات‌ها [۷۷].**

### ۶-۱-۳- آرایش زنجیره‌ای

ایجاد صف زنجیره‌ای شکل از ربات‌ها را آرایش زنجیره‌ای می‌نامند [۷۸]. این زنجیره می‌تواند در کاربردهای جهت‌یابی و نظارت استفاده شود. این رفتار از زنجیره‌ی مورچه‌هایی که به دنبال غذا می‌گردند الهام گرفته شده است. هر ربات با استفاده از دو جهت با دیگر ربات‌ها ارتباط دارد. روش‌های مدل‌سازی رایج، ماشین حالت متناهی، طراحی مبتنی بر فیزیک مجازی و الگوریتم‌های تکاملی هستند.

### ۶-۱-۴- خود اتصالی

اتصال خودکار ربات‌ها به یکدیگر که ممکن است برای ایجاد یک ساختار و شکل خاص باشد را خود اتصالی می‌نامند [۷۹]. این رفتار نیز از مورچه‌ها الهام گرفته شده است که به شکل پل یا یک صفحه شناور به یکدیگر می‌چسبند (شکل (۵). ربات s-bot برای این وظیفه طراحی شده است. از قابلیت خود اتصالی در انجام وظایفی چون اجتناب و عبور از گودال‌ها [۸۰]، حمل و نقل تجمعی اشیا [۸۱] و حرکت در محیط-های ناهموار [۸۲] استفاده می‌گردد. ماشین حالت متناهی و الگوریتم-های تکاملی روش‌های مدل‌سازی پیشنهادی برای این وظیفه هستند. ساختار ساخته شده در این وظیفه باید برای حرکت در محیط از وظیفه‌ی حرکت هماهنگ استفاده نماید.

**شکل (۵): نمونه‌ای از خود اتصالی ربات‌ها [۴۲].**

## ۶-۲- رفتارهای حرکتی و جهت‌یابی

### ۶-۲-۱- کاوش تجمعی

کاوش تجمعی الهام گرفته از کاوش غذا[۹۸]ی دسته جمعی زنبورها و مورچه‌ها است [۸۳]. این موجودات با استفاده از تعاملات محلی بین خود به جستجوی منابع غذا می‌پردازند. در سیستم‌های رباتیک جمعی محل خاصی به عنوان لانه در نظر گرفته می‌شود و وظیفه‌ی ربات‌ها کاوش در محیط و آوردن غذا به لانه است. کاوش تجمعی در واقع بخش اول عملیات کاوش غذاست؛ بنابراین در این بخش الگوریتم کاوش غذا شرح داده می‌شود. کاوش غذای چند منظوره نوعی از کاوش است که ربات‌ها به دنبال اشیای مختلف رفته و هر کدام را به لانه‌ی مخصوص آن می‌برند. عملیات مین روبی و عملیات جستجو و نجات از این نوع وظایف هستند. وظیفه‌ی کاوش غذا را می‌توان به دو زیر بخش تقسیم نمود: جستجوی ربات در محیط و آوردن غذا به لانه. هر کدام از زیر بخش‌ها به همکاری بین اعضای اجتماع نیاز دارد. این همکاری ممکن است توسط حافظه‌ی مشترک، تغییر محلی محیط یا تبادل مستقیم اطلاعات بین عامل‌ها صورت پذیرد. راه حل حافظه‌ی مشترک با مقیاس‌پذیری و سادگی ربات‌ها تناقض دارد؛ بااین‌حال در مطالعات زیادی از آن استفاده شده است [۸۴, ۸۵]. این روش ارتباطی به ربات-ها کمک می‌کند تا از تجربیات دیگران استفاده نمایند. هر ربات پس از یافتن غذا، مسیر خود از شروع حرکت تا منبع غذا را در حافظه‌ی

مشترک ثبت می‌نماید. روش تغییر محلی مانند عملکرد فرومون مورچه‌ها است. مورچه‌ها از فاصله‌ی کمی قادر به تشخیص وجود فرومون در محیط هستند [۸۶]. مورچه‌ها در اطراف محل یافتن غذا مقدار فرومون بیشتری برجا می‌گذارند و این مقدار هرچه از منبع غذا دورتر شده و به لانه نزدیک‌تر شوند، کم و کمتر می‌شود؛ در نتیجه گرادیانی از فرومون‌ها در محیط ایجاد خواهد شد که یافتن مسیر منبع غذا را برای بقیه‌ی مورچه ها آسان می‌نماید. در صورتی که مورچه در راه بازگشت خود منبع دیگری از غذا بیابد، فرمون بیشتری تولید می‌کند. راه تبادل مستقیم اطلاعات در مکان‌هایی مفید است که جمعیت زیاد باشد: مانند اطراف لانه [۸۷].

در صورتی که ربات‌ها برای بردن غذا به لانه همکاری کنند، از ایجاد تداخل و برخورد آن‌ها کاسته می‌شود. آن‌ها می‌توانند با ایجاد یک آرایش زنجیره‌ای و دست به دست کردن غذا آن را به لانه برسانند[۹۹] . در این حالت، ربات‌های حامل غذا با نشانه‌ای مثل چراغ روشن به بقیه اطلاع می‌دهند [۸۸]. در مرجع [۸۹] اگر رباتی که باری بر دوش دارد با رباتی روبرو شود که باری ندارد، غذا را بر زمین گذاشته و در خلاف جهت قبلی شروع به حرکت می‌نماید. در واقع از ربات دیگر می‌خواهد که کار او را ادامه دهد. راه دیگر همکاری، تقسیم وظایف است؛ ربات‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود: گروهی در اطراف لانه فعالیت کنند و گروهی خارج از محدوده‌ی اطراف لانه. ربات‌های گروه دوم پس از یافتن غذا آن را به محدوده‌ی مرزی آورده و دسته‌ی اول آن را به لانه می‌برند [۸۷]. یا اینکه هر ربات به محدوده‌ی خاصی انتساب داده شده و تنها در آن محدوده به دنبال غذا بگردد [۹۰].

روش‌های مدل‌سازی رایج، ماشین حالت متناهی، طراحی مبتنی بر فیزیک مجازی و مسیریابی شبکه[۱۰۰] است. به منظور ارزیابی عملکرد سیستم در کاوش غذا می‌توان از تعداد آیتم‌های جمع شده در زمان مشخص [۹۱] یا زمان لازم برای جمع آوری تعداد آیتم مشخص استفاده نمود [۹۲].

### ۶-۲-۲- حمل و نقل تجمعی

هماهنگی برای حمل یک شی الهام گرفته از حمل گروهی غذا توسط مورچه‌ها می‌باشد [۹۳]. به عنوان مثال ممکن است ربات‌ها بخواهند جعبه‌ای را هل دهند که یک ربات به تنهایی قادر به هل دادن آن نیست. این وظیفه بخش دوم وظیفه‌ی کاوش غذا است که در بخش قبل توضیح داده شد. یکی از نکات قابل توجه در این وظیفه، جهت هل دادن ربات‌ها است که اگر هماهنگ نباشد ممکن است نیروی یکدیگر را خنثی نمایند. ممکن است یک جهت از پیش تعیین شده به ربات‌ها داده شود یا اینکه از نیروهای جاذبه‌ی تعریف شده استفاده گردد. در مرجع [۹۴] در مکان مقصد لامپی روشن است و ربات‌ها قادرند این لامپ روشن را دیده و به سمت آن حرکت نمایند. در مرجع [۹۵] ربات‌ها سیستم بینایی دارند که آن‌ها را قادر به دیدن مکان مقصد می‌کند؛ ارتفاع جعبه به گونه‌ای است که جلوی دید ربات‌ها را نمی‌گیرد. مثالی دیگر از حمل و نقل تجمعی، برداشتن تکه‌های چوب از یک مکان و بردن آن به مکان دیگر است [۴۶]. اندازه‌ی چوب‌ها به گونه‌ای است که دو ربات باید آن را با همکاری یکدیگر حمل نمایند. رباتی که چوب را می‌یابد، یک سر آن را گرفته و به اندازه‌ی مشخصی منتظر می‌ماند. در صورتی که ربات دیگری به سمت او آمد با همکاری یکدیگر چوب را حمل می‌کنند؛ در غیر این صورت، چوب را رها کرده و به دنبال چوب دیگری می‌گردد. از آن‌جا که ربات‌ها محل قرار گرفتن چوب‌ها را نمی‌دانند، کارایی سیستم به تعاملات تصادفی بین ربات‌ها و بین ربات‌ها و محیط بستگی دارد. معیار سنجش عملکرد این رفتار را می‌توان زمان لازم برای حمل یک شی به مقصد در نظر گرفت [۹۶]. روش دیگر استفاده از نسبت طول مسیر بهینه بین مبدا و مقصد و مسیر استفاده شده در سیستم است [۹۵]. روش‌های مدل‌سازی رایج برای این رفتار، ماشین حالت متناهی و الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند.

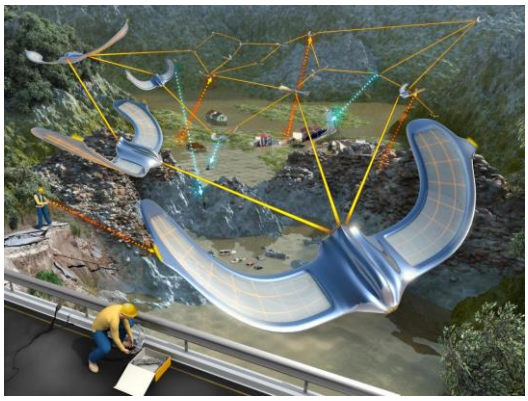
### ۶-۲-۳- حرکت هماهنگ

حرکت هماهنگ ربات‌ها[۱۰۱] همانند اجتماع ماهی‌ها و پرندگانی است که به صورت هماهنگ به سمت هدف مشخصی حرکت می‌کنند (شکل (۶). در سیستم‌های رباتیکی که از این موجودات الهام گرفته‌اند، فرض می‌شود که هر ربات با حداقل یک ربات دیگر که او را به اجتماع متصل می‌نماید همسایه است [۹۷]. موجوداتی که حرکت هماهنگ دارند، دارای توانایی تشخیص موقعیت خود در محیط می‌باشند. سیستم‌های رباتیک نیز به منظور شبیه‌سازی رفتار این موجودات باید از محل هدف مطلع باشند و یا حداقل جهت حرکت را از قبل بدانند. ولی با توجه به ویژگی‌های رباتیک جمعی و نداشتن اطلاعات سراری مشترک از مسئله و محیط این وظیفه امر دشواری است. با این حال مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته و الگوریتم‌هایی ارائه شده‌اند [۹۸].

اگر تعدادی از ربات‌ها یا کلیه‌ی آن‌ها از محل هدف اطلاع داشته باشند، اجتماع ربات‌ها می‌تواند جهت حرکت خود را تشخیص دهد. در صورتی که همه‌ی ربات‌ها از محل هدف اطلاع داشته باشند، از تعاملات محلی می‌توان برای جلوگیری از برخورد و حرکت هماهنگ استفاده نمود. در حالتی که تنها تعدادی از ربات‌ها از محل هدف مطلع باشند، از این تعاملات می‌توان برای انتشار این اطلاعات استفاده کرد [۹۹]. مقالاتی نیز ارائه شده‌اند که فقدان اطلاعات سراسری و آگاهی هر ربات را در نظر گرفته‌اند [۱۰۰].

روش‌های مدل‌سازی رایج، طراحی مبتنی بر فیزیک مجازی و الگوریتم‌های تکاملی است. همه‌ی مدل‌های ارائه شده، بر اساس جاذبه‌ی بین ربات‌ها و اجتناب از تصادم هستند و ممکن است فاکتورهای اضافه همچون هماهنگی سرعت و جهت هدف را نیز داشته باشد (ممکن است تمامی ربات‌ها یا تعدادی از آن‌ها این اطلاعات را داشته باشند). یکی از معیارهای سنجش این وظیفه، محاسبه‌ی میانگین

فاصله‌ی ربات‌ها تا مرکز اجتماع است [۱۰۱]. از دیگر معیارها می‌توان به میزان تفاوت جهت اجتماع از جهت هدف اشاده نمود [۱۰۰].



**شکل (۶): نمونه‌ای از حرکت هماهنگ ربات‌ها [۱۰۲].**

## ۶-۳- تصمیم‌گیری تجمعی

### ۶-۳-۱- اتفاق نظر

مورچه‌ها بر اساس فرومون موجود در محیط، بین کوتاهی دو مسیر نظرسنجی کرده و تصمیم می‌گیرند [۱۰۳]. زنبورها برای محل لانه-سازی و محیط یافتن غذا تصمیم‌گیری می‌کنند. در حوزه‌ی رباتیک نیز ربات‌ها ممکن است در وظایف مختلف ناچار به تصمیم‌گیری شوند. تعیین محل گردهمایی، جهت حرکت هماهنگ، محل خوشه‌بندی اشیا، جهت حرکت در ربات‌های متصل شده به یکدیگر از جمله تصمیمات ربات‌ها است. روش‌های مدل‌سازی می‌توانند به صورت ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم عمل کنند.

### ۶-۳-۲- تخصیص وظایف

به منظور بیشینه کردن کارایی سیستم، وظایف بین ربات‌ها تقسیم می‌شود [۱۰۴]. این رفتار نیز از مورچه‌ها و زنبورها الهام گرفته شده است. به منظور تخصیص وظایف از یکی از دو روش حد آستانه و یا مقادیر احتمالی استفاده می‌گردد. در روش حد آستانه، مقدار پارامتری از محیط در نظر گرفته شده و در صورت گذشتن از یک حد آستانه‌ی مشخص، وظیفه‌ی ربات‌ها تغییر می‌کند. این حد آستانه ممکن است ثابت یا متغیر باشد و پارامتر موردنظر ممکن است محلی (قابل رویت در نزدیکی ربات) یا سراسری (قابل رویت توسط تمامی ربات‌ها) در نظر گرفته شود. هنگامی که پارامتر، سراسری و حد آستانه، ثابت باشد، در سیستم‌های همگن به دلیل یکسان بودن نرم‌افزار کنترلی همه‌ی ربات-ها، همگی تغییر وظیفه می‌دهند و این تغییرات ناگهانی مطلوب نیستند؛ بنابراین پارامترهای محلی و حد آستانه‌ی متغیر ترجیح داده می‌شوند. پارامتر موردنظر و حد آستانه‌ی آن بسته به مسائل مختلف به صورت متفاوتی تعریف می‌شوند [۱۰۵]. در روش احتمالی، رفتار هر ربات در هر زمان به صورت تصادفی و با توجه به تابع احتمالاتی که از مشاهدات محیطی ایجاد می‌شود، ممکن است تغییر نماید. تصادفی و احتمالاتی بودن این روش از تغییر رفتار همزمان تعداد زیاد ربات‌ها جلوگیری می‌نماید [۱۰۶]. روش مدل‌سازی رایج برای این وظیفه، ماشین حالت متناهی است.

## ۷- چالش‌ها و مسائل حل نشده

به دلیل تازگی مطالعات رباتیک شناختی، کاربردها و چالش‌های زیادی وجود دارد که محققان در تلاش برای مقابله با آن‌ها هستند. هنوز سیستم رباتیک کاملی در کاربردهای دنیای واقعی ارائه نشده است و مطالعات همگی در سطح آکادمیک هستند. در این بخش به چند مورد از مسائل باز و چالش‌های این حوزه پرداخته می‌شود.

- انتقال رباتیک جمعی به مقیاس میکرو یا نانو یکی از موضوعات جالب برای تحقیقات آینده است. از کاربردهای نانو رباتیک می‌توان به کاوش فضا، کاوش‌های زیرزمینی و مخازن نفت، انتقال دارو به نقاط مختلف بدن و مبارزه با تومورها اشاره نمود.
- ایجاد سیستمی که قادر به تغییر وظیفه در طول زمان باشد نیز از دیگر موضوعات جالب توجه است. پیاده‌سازی سیستم رباتیکی که بتواند در زمان‌های مختلف بین وظایفی چون گردهمایی، پراکندگی، تشکیل الگو و حمل و نقل گروهی اشیا تغییر وضعیت دهد، امر دشواری است.
- هنوز هم در کاربردهای دنیای واقعی که نیاز به ربات‌های زیاد وجود دارد، همچون مین‌روبی، نظارت بر ناحیه‌ای بزرگ و تمیز کردن ناحیه‌ای که نفت در آن نشت کرده است، سیستم‌های رباتیک کارایی مناسبی ندارد. این مسئله به دلیل هزینه‌ی ربات‌ها و محدودیت‌های سخت‌افزاری است.
- سیستم رباتیک جمعی به کنترل‌کننده‌ها و مکانیزم حسگرهای مناسب نیاز دارد؛ بنابراین برای محققان وجود سکوهای مناسب به عنوان بستر آزمون مهم است. تا به حال معیار آزمایش مشترکی برای همه‌ی وظایف رباتیک جمعی ارائه نشده است.
- ارائه‌ی روش مشترک برای ارزیابی عملکرد سیستم نیز از جمله مواردی است که در آینده می‌تواند به مقایسه‌ی بهتر سیستم‌ها کمک کند.
- مطالعه بر روی امنیت در سطح ربات و در سطح اجتماع نیز از موضوعات باز در زمینه‌ی رباتیک جمعی است.

دسته‌ای از چالش‌ها با عنوان چالش‌های امنیتی شناخته می‌شوند که برخی از آن‌ها در ادامه تشریح شده‌اند.

- حمله‌ی فیزیکی به ربات‌ها. ربات‌ها ممکن است در مناطقی که حیوانات وجود دارند، دچار خسارت شوند. از طرفی در کاربردهای نظارتی ممکن است ربات‌ها توسط انسان‌ها گرفته شده و از بین بروند. به عنوان مثال نظارت بر شکار غیر قانونی در جنگل‌های انبوه.
- تشخیص هویت ربات‌ها. ربات‌ها باید در هنگام تعامل متوجه شوند که ربات دیگر از دسته‌ی آن‌ها است یا نه. تداخل دو دسته ممکن است

باعث اختلال در عملکرد ربات‌ها شود. حتی ممکن است رباتی که وارد دسته می‌شود یک ربات متهاجم بوده و تعامل با او خطرناک باشد. به عنوان مثال هواپیماهای بدون سرنشین و خطر تعامل با هواپیمای دشمن.

- ارتباط و انتقال اطلاعات بین ربات‌ها ممکن است دچار حمله‌ی امنیتی شود. به عنوان مثال سیستم ربات‌ها در کاربردهای نظامی مانند میدان جنگ یا ورود ربات‌های جاسوسی.

## ۸- نتیجه‌گیری

علم رباتیک جمعی از ترکیب هوش جمعی و رباتیک ایجاد شده است. با اعمال هوش جمعی به سیستم‌های چندرباته و الهام از رفتارهای تجمعی حیوانات اجتماعی، رباتیک جمعی تولید خواهد شد. در این مقاله با هدف آشنایی با علم رباتیک جمعی و شناخت مسائل مطرح در این حوزه، پس از معرفی منبع الهامات رباتیک جمعی، سیستم‌های چندرباته و انواع طبقه‌بندی آن‌ها مطرح شد. آنگاه جایگاه رباتیک جمعی در این طبقه‌بندی‌ها مشخص گشت و مقایسه‌ای بین سیستم-های رباتیک جمعی با سایر سیستم‌های تک‌رباته و چندرباته صورت گرفت.

رباتیک جمعی به دلیل تازگی و داشتن ویژگی‌هایی همچون انعطاف، مقیاس‌پذیری و مقاومت، کاربردهای فراوانی دارد. تعدادی از کاربردهای رایج رباتیک جمعی در این مقاله برشمرده شد. سپس تعدادی از پروژه‌های موجود رباتیک جمعی و محیط‌های شبیه‌سازی به همراه ویژگی‌ها و مشخصات هر کدام مطرح گشت. آنگاه، انواع روشهای مدل‌سازی و الگوریتم‌های موجود برای انجام وظایف مختلف شرح داده شد. الگوریتم‌ها بر اساس استفاده در وظایف مختلف دسته‌بندی شدند؛ بنابراین به صورت همزمان مروری بر وظایف رایج در این حوزه نیز انجام گرفت. با وجود پیشرفت‌های روز افزون این علم، هنوز در کاربردهای دنیای واقعی از رباتیک جمعی استفاده نشده است. یکی از دلایل مهم این امر، محدودیت‌های سخت‌افزاری و پردازشی ربات‌ها است. در بخش پایانی مقاله، تعدادی از چالش‌ها و مسائل باز برای مطالعات آینده مورد بررسی قرار گرفتند.

## مراجع


[1] Prasad, S., Rawool, S. "Swarm Robotics : Nature Inspired Systems.", International Journal of Engineering Research and General Science., vol. 4, no. 5, pp. 168–174, 2016.

[2] Wilde, S. "Thoughts Forming in a Fish," [Online] 2013, http://www.stuartwilde.com/2013/02/thoughts-forming-in-a-fish/ (Accessed: 14 October 2017).

[3] Http://blogs.cornell.edu "NEIL LEACH: SWARM URBANISM," [Online] 2015, http://blogs.cornell.edu/arch5302sp15/2015/05/21/neil-leach-swarm-urbanism/ (Accessed: 14 October 2017).

[4] Anderson, C., Theraulaz, G., Deneubourg, J.-L. "Self-Assemblage in Insect Societies.", Insect Sociaux., vol. 49, no. 2, pp. 99–110, 2002.

[5] Şahin, E. "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application.", International workshop on swarm robotics, pp. 10–20, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.

[6] Kaminka, G.A., Schechter-Glick, R., Sadov, V. "Using Sensor Morphology for Multirobot Formations.", IEEE Transactions on Robotics., vol. 24, no. 2, pp. 271–282, 2008.

[7] Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M. "Swarm Robotics : A Review from the Swarm Engineering Perspective.", Swarm Intelligence., vol. 7, no. 1, pp. 1–41, 2013.

[8] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems., Oxford university press, 1999.

[9] Khaldi, B., Cherif, F. "An Overview of Swarm Robotics : Swarm Intelligence Applied to Multi-Robotics.", International Journal of Computer Applications., vol. 126, no. 2, pp. 31–37, 2015.

[10] Turnbull, C.H.S. and D. "Swarm Robotics.", Applied Physics Letters., vol. 10, no. 10, pp. 284–286, 1967.

[11] Chabaud, D., Codron, J.-M. "How to Integrate the Specificities of Some Food Departments into a Retail Store Organization? Lessons and Limits of the Aokian Theory of the Firm.", International Journal of Retail & Distribution Management., vol. 33, no. 8, pp. 597–617, 2005.

[12] Arkin, R.C., Bekey, G.A. "Special Issue on Robot Colonies.", Autonomous Robots., vol. 4, no. 1, pp. 1–153, 1997.

[13] \cSahin, E. "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application.", Swarm robotics, pp. 10–20, 2004.

[14] Iocchi, L., Nardi, D., Salerno, M. "Reactivity and Deliberation: A Survey on Multi-Robot Systems.", Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems, From RoboCup to Real-World Applications., pp. 9–34, 2001.

[15] Dudek, G., Jenkin, M.M., Milios, E., Wilkes, D. "A Taxonomy for Multi-Agent Robotics.", Autonomous Robots., vol. 3, no. 4, 1996.

[16] Dorigo, M., Tuci, E., Groß, R., Trianni, V., Labella, T.H., Nouyan, S., Ampatzis, C., Deneubourg, J.-L., Baldassarre, G., Nolfi, S. "The Swarm-Bots Project.", International Workshop on Swarm Robotics, pp. 31–44, Springer, 2004.

[17] Dorigo, M., Trianni, V., Şahin, E., Groß, R., Labella, T.H., Baldassarre, G., Nolfi, S., Deneubourg, J.-L., Mondada, F., Floreano, D. "Evolving Self-Organizing Behaviors for a Swarm-Bot.", Autonomous Robots., vol. 17, no. 2–3, pp. 223–245, 2004.

[18] Payerle, G. "Swarm Intelligence and Its Applications in Swarm Robotics.", vol. 3, no. 1, pp. 45, 1974.

[19] Dorigo, M., Roosevelt, A.F.D. "Swarm Robotics.", Special Issue", Autonomous Robots, Citeseer, 2004.

[20] Tan, Y., Zheng, Z.-Y. "Research Advance in Swarm Robotics.", Defence Technology., vol. 9, no. 1, pp. 18–39, 2013.

[21] Khosravi, S., Jahangir, M., Afkhami, H. "Adaptive Fuzzy SMC-Based Formation Design for Swarm of Unknown Time-Delayed Robots.", Nonlinear Dynamics., vol. 69, no. 4, pp. 1825–1835, 2012.

[22] Ranjbarsahraei, B., Roopaei, M., Khosravi, S. "Adaptive Fuzzy Formation Control for a Swarm of Nonholonomic Differentially Driven Vehicles.", Nonlinear Dynamics., vol. 67, no. 4, pp. 2747–2757, 2012.

[23] نعمتی اصطهباناتی, ع. "بررسی تجربی حرکت توده ای رباتها.",

دانشگاه صنعتی شریف, ۱۳۸۹.
[24] Sahraei, B.R., Nemati, A., Farshchi, M., Meghdari, A. “ADAPTIVE FUZZY SLIDING MODE CONTROL APPROACH FOR SWARM FORMATION CONTROL OF MULTI-AGENT SYSTEMS.”, 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, pp. 1–6, 2010.
[25] Pugh, J., Raemy, X., Favre, C., Falconi, R., Martinoli, A. “A Fast Onboard Relative Positioning Module for Multirobot Systems.”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics., vol. 14, no. 2, pp. 151–162, 2009.
[26] Mondada, F., Bonani, M., Raemy, X., Pugh, J., Cianci, C., Klaptocz, A., Magnenat, S., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Martinoli, A. “The E-Puck, a Robot Designed for Education in Engineering.”, Proceedings of the 9th conference on autonomous robot systems and competitions, pp. 59–65, 2009.
[27] Caprari, G., Siegwart, R. “Mobile Micro-Robots Ready to Use: Alice.”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3295–3300, 2005.
[28] Kornienko, S., Kornienko, O., Levi, P. “Minimalistic Approach towards Communication and Perception in Microrobotic Swarms.”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2228–2234, 2005.
[29] Valdastri, P., Corradi, P., Menciassi, A., Schmickl, T., Crailsheim, K., Seyfried, J., Dario, P. “Micromanipulation, Communication and Swarm Intelligence Issues in a Swarm Microrobotic Platform.”, Robotics and Autonomous Systems., vol. 54, no. 10, pp. 789–804, 2006.
[30] Mondada, F., Gambardella, L.M., Floreano, D., Nolfi, S., Deneuborg, J.-L., Dorigo, M. “The Cooperation of Swarm-Bots: Physical Interactions in Collective Robotics.”, IEEE Robotics & Automation Magazine., vol. 12, no. 2, pp. 21–28, 2005.
[31] Turgut, A.E., Gokce, F., Celikkanat, H., Bayindir, L., Sahin, E. “Kobot: A Mobile Robot Designed Specifically for Swarm Robotics Research.”, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, METUCENG-TR Tech. Rep., vol. 5, 2007.
[32] Tricks, M.S.R. “A Behavior-Based Distributed Algorithm Library for Programming Swarms of Robots.”, Paper submitted for requirements of BSEE at MIT., 2004.
[33] Rubenstein, M., Cornejo, A., Nagpal, R. “Programmable Self-Assembly in a Thousand-Robot Swarm.”, Science., vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, 2014.
[34] Vaughan, R. “Massively Multi-Robot Simulation in Stage.”, Swarm Intelligence., vol. 2, no. 2–4, pp. 189–208, 2008.
[35] Collett, T.H.J., MacDonald, B.A., Gerkey, B.P. “Player 2.0: Toward a Practical Robot Programming Framework.”, Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation, p. 145, 2005.
[36] Koenig, N., Howard, A. “Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-Robot Simulator.”, Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems., pp. 2149–2154, 2004.
[37] “Homepage of Enki,” .
[38] Michel, O. “WebotsTM: Professional Mobile Robot Simulation.”, arXiv preprint cs/0412052., 2004.
[39] Klein, J., Spector, L. “3d Multi-Agent Simulations in the Breve Simulation Environment.”, Artificial life models in software, pp. 79–106, 2009.
[40] “Homepage of v-Rep Project,” .
[41] Deyle, T. “I-Swarm Micro Robots Realized -- Impressive Full-System Integration,” [Online] 2009, http://www.hizook.com/blog/2009/08/29/i-swarm-micro-robots-realized-impressive-full-system-integration (Accessed: 14 October 2017).
[42] “S-Bot Mobile Robot,” [Online] 2017, https://en.wikipedia.org/wiki/S-bot_mobile_robot (Accessed: 14 October 2017).
[43] Bayindir, L., Şahin, E. “A Review of Studies in Swarm Robotics.”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences., vol. 15, no. 2, pp. 115–147, 2007.
[44] Howard, A., Matarić, M.J., Sukhatme, G.S. “An Incremental Self-Deployment Algorithm for Mobile Sensor Networks.”, Autonomous Robots., vol. 13, no. 2, pp. 113–126, 2002.
[45] Min, H., Wang, Z. “Group Escape Behavior of Multiple Mobile Robot System by Mimicking Fish Schools.”, IEEE International Conference on, Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 320–326, 2010.
[46] Ijspeert, A.J., Martinoli, A., Billard, A., Gambardella, L.M. “Collaboration through the Exploitation of Local Interactions in Autonomous Collective Robotics: The Stick Pulling Experiment.”, Autonomous Robots., vol. 11, no. 2, pp. 149–171, 2001.
[47] Lerman, K., Martinoli, A., Galstyan, A. “A Review of Probabilistic Macroscopic Models for Swarm Robotic Systems.”, Swarm Robotics., vol. 3342, no. i, pp. 143–152, 2005.
[48] Martinoli, A., Easton, K., Agassounon, W. “Modeling Swarm Robotic Systems: A Case Study in Collaborative Distributed Manipulation.”, The International Journal of Robotics Research., vol. 23, no. 4–5, pp. 415–436, 2004.
[49] Massink, M., Brambilla, M., Latella, D., Dorigo, M., Birattari, M. “On the Use of Bio-PEPA for Modelling and Analysing Collective Behaviours in Swarm Robotics.”, Swarm Intelligence., vol. 7, no. 2–3, pp. 201–228, 2013.
[50] Xue, S.D., Zeng, J.C. “Control over Swarm Robots Search with Swarm Intelligence Principles.”, Journal of System Simulation., vol. 20, no. 13, pp. 3449–3454, 2008.
[51] Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T. “Ant Colony Optimization.”, IEEE computational intelligence magazine., vol. 1, no. 4, pp. 28–39, 2006.
[52] Brambilla, M., Brutschy, A., Dorigo, M., Birattari, M. “Property-Driven Design for Robot Swarms: A Design Method Based on Prescriptive Modeling and Model Checking.”, ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems., vol. 9, no. 4, pp. 17, 2015.
[53] Francesca, G., Brambilla, M., Brutschy, A., Trianni, V., Birattari, M. “AutoMoDe: A Novel Approach to the Automatic Design of Control Software for Robot Swarms.”, Swarm Intelligence., vol. 8, no. 2, pp. 89–112, 2014.
[54] King, J., Pretty, R.K., Gosine, R.G. “Coordinated Execution of Tasks in a Multiagent Environment.”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans., vol. 33, no. 5, pp. 615–619, 2003.
[55] Winfield, A.F.T., Sa, J., Fernández-Gago, M.-C., Dixon, C., Fisher, M. “On Formal Specification of Emergent Behaviours in Swarm Robotic Systems.”, International journal of advanced robotic systems., vol. 2, no. 4, pp. 363–370, 2005.
[56] Dixon, C., Winfield, A., Fisher, M. “Towards Temporal Verification of Emergent Behaviours in Swarm

The International Journal of Robotics Research., pp. 1145–1161, 2014.
[73] Hu, D., Zhong, M., Zhang, X., Yao, Y. "Self-Organized Aggregation Based on Cockroach Behavior in Swarm Robotics.", Sixth International Conference on, Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, pp. 349–354, 2014.
[74] Arvin, F., Turgut, A.E., Bazyari, F., Arikan, K.B., Bellotto, N., Yue, S. "Cue-Based Aggregation with a Mobile Robot Swarm: A Novel Fuzzy-Based Method.", Adaptive Behavior., pp. 189–206, 2014.
[75] Shucker, B., Bennett, J.K. "Scalable Control of Distributed Robotic Macrosensors.", Distributed Autonomous Robotic Systems 6, pp. 379–388, 2007.
[76] Lee, G., Chong, N.Y., Christensen, H. "Adaptive Triangular Mesh Generation of Self-Configuring Robot Swarms.", IEEE International Conference on, Robotics and Automation, pp. 2737–2742, 2009.
[77] Rubenstein, M., Cornejo, A., Nagpal, R. "Programmable Self-Assembly in a Thousand-Robot Swarm.", Science., vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, 2014.
[78] Bayindir, L. "A Review of Swarm Robotics Tasks.", Neurocomputing., vol. 172, pp. 292–321, 2016.
[79] O'Grady, R., Christensen, A.L., Dorigo, M. "SWARMORPH: Multirobot Morphogenesis Using Directional Self-Assembly.", IEEE Transactions on Robotics., vol. 25, no. 3, pp. 738–743, 2009.
[80] Trianni, V., Nolfi, S., Dorigo, M. "Cooperative Hole Avoidance in a Swarm-Bot.", Robotics and Autonomous Systems., vol. 54, no. 2, pp. 97–103, 2006.
[81] Gross, R., Dorigo, M. "Towards Group Transport by Swarms of Robots.", International Journal of Bio-Inspired Computation., vol. 1, no. 1–2, pp. 1–13, 2009.
[82] O'Grady, R., Groß, R., Christensen, A.L., Dorigo, M. "Self-Assembly Strategies in a Group of Autonomous Mobile Robots.", Autonomous Robots., vol. 28, no. 4, pp. 439–455, 2010.
[83] Ducatelle, F., Di Caro, G.A., Pinciroli, C., Gambardella, L.M. "Self-Organized Cooperation between Robotic Swarms.", Swarm Intelligence., vol. 5, no. 2, pp. 73–96, 2011.
[84] Vaughan, R.T., Støy, K., Sukhatme, G.S., Matarić, M.J. "Whistling in the Dark: Cooperative Trail Following in Uncertain Localization Space.", Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents, pp. 187–194, 2000.
[85] Sadat, S.A., Vaughan, R.T. "SO-LOST-An Ant-Trail Algorithm for Multi-Robot Navigation with Active Interference Reduction.", ALIFE, pp. 687–693, 2010.
[86] Hecker, J.P., Letendre, K., Stolleis, K., Washington, D., Moses, M.E. "Formica Ex Machina: Ant Swarm Foraging from Physical to Virtual and Back Again.", International Conference on Swarm Intelligence, pp. 252–259, 2012.
[87] Goldberg, D., Mataric, M.J. "Robust Behavior-Based Control for Distributed Multi-Robot Collection Tasks.", Robot Teams: From Diversity to Polymorphism., 2000.
[88] Steels, L. "COOPERATION BETWEEN DISTRIBUTED AGENTS THROUGH SELF-ORCAMSATION.", proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Cambridge, England, 1990.
[89] Ostergaard, E.H., Sukhatme, G.S., Mataric, M.J. "Emergent Bucket Brigading-a Simple Mechanism for Improving Performance in Multi-Robot Constrained-Space Foraging Tasks.", Autonomous Agents, Citeseer, Robotic Systems.", Towards Autonomous Robotic Systems, pp. 336–347, Springer, 2011.
[57] De Queiroz, M.H., Cury, J.E.R. "Synthesis and Implementation of Local Modular Supervisory Control for a Manufacturing Cell.", Sixth International Workshop on, Discrete Event Systems. Proceedings., pp. 377–382, 2002.
[58] Lopes, Y.K., Leal, A.B., Rosso, R.S.U., Harbs, E. "Local Modular Supervisory Implementation in Microcontroller.", Proc. of the 9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation, 2012.
[59] Lopes, Y.K., Trenkwalder, S.M., Leal, A.B., Dodd, T.J., Groß, R. "Supervisory Control Theory Applied to Swarm Robotics.", Swarm Intelligence., vol. 10, no. 1, pp. 65–97, 2016.
[60] Kulis, A. "Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies.", Scalable Computing: Practice and Experience., vol. 10, no. 4, 2001.
[61] Chatty, A., Kallel, I., Gaussier, P., Alimi, A.M. "Emergent Complex Behaviors for Swarm Robotic Systems by Local Rules.", IEEE Workshop on, Robotic Intelligence In Informationally Structured Space, pp. 69–76, 2011.
[62] Soysal, O., Bahçeci, E., Şahİn, E. "Aggregation in Swarm Robotic Systems: Evolution and Probabilistic Control.", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences., vol. 15, no. 2, pp. 199–225, 2007.
[63] Priolo, A. Swarm aggregation algorithms for multi-robot systems., University of the West of England, Bristol, 2013.
[64] Kernbach, S., Häbe, D., Kernbach, O., Thenius, R., Radspieler, G., Kimura, T., Schmickl, T. "Adaptive Collective Decision-Making in Limited Robot Swarms without Communication.", The International Journal of Robotics Research., vol. 32, no. 1, pp. 35–55, 2013.
[65] Soysal, O., Sahin, E. "Probabilistic Aggregation Strategies in Swarm Robotic Systems.", Proceedings IEEE Swarm Intelligence Symposium., pp. 325–332, 2005.
[66] Fatès, N. "Solving the Decentralised Gathering Problem with a Reaction–diffusion–chemotaxis Scheme.", Swarm Intelligence., vol. 4, no. 2, pp. 91–115, 2010.
[67] Gauci, M., Chen, J., Dodd, T.J., Groß, R. "Evolving Aggregation Behaviors in Multi-Robot Systems with Binary Sensors.", Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 355–367, 2014.
[68] Gomes, J., Urbano, P., Christensen, A.L. "Evolution of Swarm Robotics Systems with Novelty Search.", Swarm Intelligence., vol. 7, no. 2–3, pp. 115–144, 2013.
[69] Correll, N., Martinoli, A. "Modeling Self-Organized Aggregation in a Swarm of Miniature Robots.", IEEE International Conference on Robotics and Automation Workshop on Collective Behaviors inspired by Biological and Biochemical Systems, 2007.
[70] Schmickl, T., Möslinger, C., Crailsheim, K. "Collective Perception in a Robot Swarm.", International Workshop on Swarm Robotics, pp. 144–157, 2006.
[71] Mermoud, G., Brugger, J., Martinoli, A. "Towards Multi-Level Modeling of Self-Assembling Intelligent Micro-Systems.", Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1, pp. 89–96, 2009.
[72] Gauci, M., Chen, J., Li, W., Dodd, T.J., Groß, R. "Self-Organized Aggregation without Computation.",

International Journal of Robotics Research., vol. 29, no. 14, pp. 101–122, 2010.
[106] Ferrante, E., Turgut, A.E., Duéñez-Guzmán, E., Dorigo, M., Wenseleers, T. "Evolution of Self-Organized Task Specialization in Robot Swarms.", PLoS Computational Biology., vol. 11, no. 8, pp. e1004273, 2015.

## زیرنویس‌ها

[1] Swarm Robotic
[2] Swarm Intelligence
[3] Self-Organizing
[4] Individuals
[5] Communication
[6] Cognition
[7] Ant Colonies
[8] Pheromone
[9] Collective Behavior
[10] Collective Robotic
[11] Distributed Robotic
[12] Robots Colony
[13] Positive Feedback
[14] Negative Feedback
[15] Randomness
[16] Multiple Interactions
[17] Cooperation
[18] Knowledge
[19] Coordination
[20] Organization
[21] Composition
[22] Centralization
[23] Autonomous
[24] Stigmergy
[25] Active
[26] Passive
[27] Homogeneous
[28] Heterogeneous
[29] Adaptivity
[30] Social Deliberation
[31] Reactivity
[32] Collective Size
[33] Communication Range
[34] Communication Topology
[35] Communication Bandwidth
[36] Collective Reconfigurability
[37] Processing Ability
[38] Efficiency
[39] Arrangement
[40] Turing Machine
[41] Push Down Automaton
[42] Marco Dorigo
[43] Self-assembling
[44] Autonomy
[45] Large Number
[46] Scalability
[47] Robustness
[48] Flexibility

2001.
[90] Schneider-Fontán, M., Mataric, M.J. "A Study of Territoriality: The Role of Critical Mass in Adaptive Task Division.", From animals to animats IV, Citeseer, 1996.
[91] Hoff, N.R., Sagoff, A., Wood, R.J., Nagpal, R. "Two Foraging Algorithms for Robot Swarms Using Only Local Communication.", Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE International Conference on, pp. 123–130, 2010.
[92] Hoff, N., Wood, R., Nagpal, R. "Distributed Colony-Level Algorithm Switching for Robot Swarm Foraging.", Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 417–430, 2013.
[93] Groβ, R., Dorigo, M. "Evolution of Solitary and Group Transport Behaviors for Autonomous Robots Capable of Self-Assembling.", Adaptive Behavior., vol. 16, no. 5, pp. 285–305, 2008.
[94] Kube, C.R., Bonabeau, E. "Cooperative Transport by Ants and Robots.", Robotics and autonomous systems., vol. 30, no. 1, pp. 85–101, 2000.
[95] Chen, J., Gauci, M., Groß, R. "A Strategy for Transporting Tall Objects with a Swarm of Miniature Mobile Robots.", IEEE International Conference on, Robotics and Automation, pp. 863–869, 2013.
[96] Fujisawa, R., Imamura, H., Matsuno, F. "Cooperative Transportation by Swarm Robots Using Pheromone Communication.", Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 559–570, 2013.
[97] Ferrante, E., Turgut, A.E., Stranieri, A., Pinciroli, C., Birattari, M., Dorigo, M. "A Self-Adaptive Communication Strategy for Flocking in Stationary and Non-Stationary Environments.", Natural Computing., vol. 13, no. 2, pp. 225–245, 2014.
[98] Yasuda, T., Adachi, A., Ohkura, K. "Self-Organized Flocking of a Mobile Robot Swarm by Topological Distance-Based Interactions.", SICE International Symposium on, System Integration (SII), pp. 106–111, 2014.
[99] Antonelli, G., Arrichiello, F., Chiaverini, S. "Flocking for Multi-Robot Systems via the Null-Space-Based Behavioral Control.", Swarm Intelligence., vol. 4, no. 1, pp. 37–56, 2010.
[100] Ferrante, E., Turgut, A.E., Huepe, C., Stranieri, A., Pinciroli, C., Dorigo, M. "Self-Organized Flocking with a Mobile Robot Swarm: A Novel Motion Control Method.", Adaptive Behavior., pp. 1471–1475, 2012.
[101] Hayes, A.T., Dormiani-Tabatabaei, P. "Self-Organized Flocking with Agent Failure: Off-Line Optimization and Demonstration with Real Robots.", IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Proceedings. ICRA'02., pp. 3900–3905, 2002.
[102] "Swarming Micro Air Vehicle Networks (SMAVNET)," [Online] 2008, http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=1594 (Accessed: 14 October 2017).
[103] Gutiérrez, A., Campo, A., Monasterio-Huelin, F., Magdalena, L., Dorigo, M. "Collective Decision-Making Based on Social Odometry.", Neural Computing and Applications., vol. 19, no. 6, pp. 807–823, 2010.
[104] Pini, G., Brutschy, A., Frison, M., Roli, A., Dorigo, M., Birattari, M. "Task Partitioning in Swarms of Robots: An Adaptive Method for Strategy Selection.", Swarm Intelligence., vol. 5, no. 3–4, pp. 283–304, 2011.
[105] Liu, W., Winfield, A. "Modelling and Optimisation of Adaptive Foraging in Swarm Robotic Systems.", The

[49] Distributed Coordination
[50] Platform
[51] Redundancy
[52] Targets
[53] Unmanned Aerial Vehicle(UAV)
[54] Multi Agent Systems
[55] Cartography
[56] Collective Transportation
[57] Dispersion
[58] Pattern Formation
[59] Collective Movement
[60] Task Allocation
[61] Aggregation
[62] Infrared
[63] Ultrasound
[64] Optical Sensor
[65] ZigBee
[66] Actuators
[67] Collision
[68] Modeling
[69] Sensor-based Modeling
[70] Microscopic
[71] Macroscopic
[72] Martinoli
[73] Massink
[74] Biochemical Performance Evaluation Process Algebra
[75] Model Checking
[76] Particle Swarm Optimization
[77] Brambilla
[78] Property-driven Design
[79] Markov Chain
[80] Automatic Modular Design
[81] Petri Net
[82] Temporal Logic
[83] Supervisory Control
[84] Benchmark Test
[85] Self-Organizing Clustering
[86] Framework
[87] Chain Formation
[88] Navigation Behaviors
[89] Collective Exploration
[90] Coordination Motion
[91] Consensus Achievement
[92] Collective Decision Making
[93] Virtual Forces
[94] Artificial Physics
[95] Free Aggregation
[96] Environment-mediated
[97] Virtual Physics Based Design
[98] Foraging
[99] Bucket Brigading
[100] Network Routing
[101] Flocking