فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شماره یک، بهار 1400

کنترل پوشش در شبکه های حسگر متحرک ناهمگن براساس نظریه بازی

الهام گل‌رسان*[1]، حسین شیرازی[2]، کوروش داداش تبار احمدی[3]

تاریخ دریافت: 1399/08/13 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/27

چکیده

یکی از مسائل اساسی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تأمین پوشش ناحیه به منظور انجام یک کار خاص است. این مقاله به مسئله پوشش شبکه ناشناخته پیش فرض توسط گروهی از گره‌های حسگر با قابلیت‌های پوشش و ارتباطی غیر یکسان می‌پردازد. حسگرها متحرک هستند و ناحیه مورد نظر را بصورت توزیع شده کشف می‌کنند و پوشش بهینه را برقرار می‌کنند. ابتدا ما مسئله بهینه‌سازی پوشش را بصورت بازی چند نفره تکراری مدل می‌کنیم که در آن یک تابع سود برای در نظر گرفتن کیفیت پوشش فرموله شده است. سپس، یک الگوریتم یادگیری مبتنی بر سود توزیع شده را پیشنهاد می‌کنیم که در آن هر حسگر سعی می‌کند با جابجایی به سمت موقعیت‌های بدون پوشش، تابع سود خود را به حداکثر برساند. نتایج شبیه‌سازی کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: پوشش ناحیه، شبکه‌های حسگر متحرک، حسگرهای ناهمگن، نظریه بازی، الگوریتم یادگیری.

[1]* دکتری، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، نویسنده مسئول، ایمیل egolrasan@yahoo.com

[2] دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایمیل shirazi@mut.ac.ir

[3] استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایمیل dadashtabar@mut.ac.ir

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

1. مقدمه

در بسیاری از شبکه های حسگر بی‌سیم (WSN)، یک کار معمول ارائه برخی خدمات در شبکه از طریق حسگرهای توزیع شده با قابلیت‌های محدود است. این خدمات ممکن است اشکال مختلفی از جمله امنیت، نگهداری، تحویل یا دسترسی به برخی منابع را به خود اختصاص دهد [1, 2]. یک راه ممکن برای دستیابی به چنین وظیفه‌ای برای یک گروه از حسگرها، تقسیم شبکه به مناطق مسئولیت پذیر است و به هر حسگر اجازه می-دهد تا از منطقه خود مراقبت کند. این روش در ابتدای کار به مسئله پوشش توزیع شده در شبکه تبدیل می‌شود.

مسئله پوشش توزیع شده برای ساختارهای پیوسته [3-5] به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، در حالی که تعدادی پژوهش در فضاهای گسسته [6, 7] نیز انجام شده است. همچنین در شبکه های حسگر بی سیم ادبیات غنی در مورد مسائل مرتبط با بهینه سازی ترکیبی از قبیل مکان تخصیص، خوشه بندی شبکه و مجموعه پوشش وجود دارد. این مسائل مربوط به کارهایی از قبیل تخصیص بهینه تعدادی از حسگرها در شبکه، تقسیم گره‌ها به تعدادی از اجتماعات با حداقل ارتباط متقابل یا انتخاب حداقل تعداد از زیر مجموعه های گره است که اجتماع آن‌ها تمام اهداف یک شبکه را پوشش می‌دهد. بررسی دقیق مسائل بهینه سازی در شبکه های حسگر بی‌سیم را می توان در [8] و منابع موجود در آن یافت.

در این مقاله، مسئله پوشش شبکه توزیع شده را بررسی می-کنیم، که در آن گروهی از حسگرهای متحرک با قابلیت‌های ارتباطی و حسگری متفاوت در ناحیه مورد نظر مستقر شده‌اند. در ابتدا حسگرها ممکن است به طور تصادفی روی شبکه پراکنده شوند، یا ممکن است در یک مکان مشخص باشند. حسگرها با کاوش همزمان شبکه و پوشش نواحی در فاصله کمتر از محدوده حسگری خود، پوشش ناحیه را به حداکثر می-رسانند. یک حسگر تنها در صورتی می‌تواند عملکرد حسگرهای دیگر را مشاهده کند که در محدوده ارتباطی آن‌ها باشد. مسئله پوشش شبکه توزیع شده با توجه به اینکه شبکه ناشناخته است و پیکربندی اولیه حسگرها اختیاری است، مقدار زیادی از عدم اطمینان را ایجاد می‌کند. برای مقابله با چالش‌های این مسئله، یک رویکرد نظری بازی را اتخاذ می‌کنیم و از یادگیری در بازی ها استفاده می‌کنیم. ما روش پیشنهادی را استقرار حسگرهای ناهمگن متحرک[2](MHSD) می‌نامیم.

روش‌های تئوری بازی برای تجزیه و تحلیل بسیاری از مسائل مرتبط مانند تعیین وضعیت وسیله نقلیه [9]، بهینه سازی پوشش در شبکه های حسگر استاتیک [10] یا مسیریابی کارآمد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم [11] استفاده شده است. در [12] نویسندگان ارتباط بین رویکردهای نظریه بازی و مسائل کنترل مشارکتی مانند پوشش و اجماع برقرار کردند. استفاده از بازی-های پتانسیل و انواع یادگیری لگاریتمی-خطی[3]در حل مسائل چند عامله [13] ارائه شده است. نویسندگاه در [14] از یادگیری در بازی‌ها برای دستیابی به پوشش فضای گسسته شده توسط حسگرهای دارای قابلیت‌های محدود استفاده می کنند.

در این مقاله، مسئله پوشش شبکه توزیع شده را بصورت نظریه بازی مدل می‌کنیم. به طور دقیق‌تر، ما یک بازی پتانسیل برای این مسئله طراحی می کنیم و از یک نوع یادگیری لگاریتمی-خطی برای به حداکثر رساندن پوشش استفاده می-کنیم. در طول حرکت، هر حسگر فقط گره‌های در محدوده پوشش خود را می‌پوشاند و می‌تواند تنها در صورتی عملکرد حسگرهای دیگر را مشاهده کند که در محدوده ارتباطی آن‌ها باشد. علاوه بر این، حسگرها عملکرد خود را بصورت محلی بروزرسانی می‌کنند، یعنی در هر مرحله از زمان، هر حسگر یا موقعیت خود را حفظ می‌کند یا به سمت گره همسایه حرکت می‌کند. ما نشان می‌دهیم که تحت این شرایط، طرح پیشنهادی در سطح سراسری تعداد گره‌های پوشیده شده را به حداکثر می-رساند.

در ادامه ، سهم اصلی مطالعه ما ارائه شده است.

- مسئله پوشش شبکه توزیع شده را به عنوان یک بازی تکراری چند نفره که در آن هر حسگر به عنوان یک بازیکن سعی می‌کند تابع سود خود را به حداکثر برساند، فرموله می‌کنیم. تابع سود به گونه‌ای طراحی

[2]Mobile heterogeneous sensors deployment

[3]Log-linear learning

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

می‌شود که نشان دهنده‌ی ناحیه‌ی تحت پوشش توسط حسگرها است.

- ما یک الگوریتم یادگیری مبتنی بر سود توزیع شده را معرفی می‌کنیم که به یک نمایه عملکرد کارا همگرا می‌شود.
- عملکرد الگوریتم پیشنهادی ما از طریق شبیه‌سازی ارزیابی شده و با روش های قبلی مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی ما از نظر معیار پوشش می‌تواند بهتر از برخی الگوریتم‌های موجود با پارامترهای مشابه عمل کند.

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش 2 پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و کارهای مرتبط انجام می‌شود. بخش 3 مسئله پوشش توزیع شده در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه می‌کند. بخش 4 فرمول بندی نظریه بازی و راه حل پیشنهادی را ارائه می‌کند. برخی از نتایج شبیه سازی در بخش 5 ارائه شده است. سرانجام، بخش 6 مقاله را نتیجه‌گیری می‌کند.

2. کارهای انجام شده

هدف اصلی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تبادل داده بین گره-ها است. لذا باید بین تمام گره‌ها در شبکه اتصال کامل برقرار بوده و هر گره حسگر حداقل در محدوده ارتباطی یک یا چند گره حسگر قرار گیرد، به گونه‌ای که اگر اتفاقی در یک نقطه از شبکه رخ دهد، حسگرها با اطمینان کامل بتوانند داده‌های مربوط به آن رخداد را پردازش و جهت اقدامات بعدی تصمیم‌گیری نمایند. به همین دلیل پوشش یکی از مسائل مهم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است و در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [15, 16]. در این بخش، ما به طور خلاصه کارهای تحقیقاتی انجام شده در مورد پوشش در شبکه های حسگر بی‌سیم را مرور می‌کنیم. مسئله پوشش معمولاً به سه دسته تقسیم می شود [16-18] :

- پوشش منطقه‌ای

در این روش از پوشش حسگرها را به صورت تصادفی یا دستی طوری توزیع می‌کنند، که ناحیه مورد نظر را پوشش کامل دهند. این مدل پوشش اغلب برای ناحیه‌ای استفاده می‌شود که احتمال رخداد پدیده در تمامی مختصات آن وجود دارد. همچنین وجود گره های افزونه در این مدل موجب پوشش چندگانه نیز می‌گردد که از یک شبکه با چگالی بالا برخوردار است.

- پوشش نقطه‌ای

در این روش تعدادی از اهداف با جایگاه مشخص که باید مورد کنترل قرار گیرند، در نظر گرفته می‌شوند. تعداد متوسطی از حسگرها به صورت تصادفی در نزدیکی اهداف پخش می-شوند تا بر طبق زمان‌بندی‌های خاص نسبت به انجام وظایف و تشخیص اهداف از پیش تعیین شده فعال گردیده و اطلاعات به دست آمده را به گره پردازشگر مرکزی بفرستند.

- پوشش مرزی

این مدل از پوشش یک مدل مناسب برای کاربردهای تشخیص تجاوز (نفوذ) می‌باشد. در پوشش مرزی عملیات پوشش به گونه‌ای است که اگر نفوذی از عرض ناحیه تحت پوشش صورت گیرد آن را بتوان تشخیص داد.

حبیبی و همکاران [19] یک استراتژی مبتنی بر ورونی را برای به حداکثر رساندن پوشش حسگری در یک شبکه حسگر متحرک پیشنهاد کردند. در این الگوریتم، هر حسگر از طریق یک روش بهینه‌سازی غیر خطی مبتنی بر گرادیان حرکت می‌کند و درون سلول ورونی خود قرار می‌گیرد.

محمدی و همکاران [20] دو الگوریتم حریصانه برای پوشش هدف در شبکه‌های حسگر جهت دار با دامنه سنجش قابل تنظیم پیشنهاد کردند. آنها از هر دو روش زمان بندی و تنظیم محدوده حسگری برای تشکیل مجموعه‌های پوششی برای پوشش دادن همه اهداف در شبکه و به حداکثر رساندن طول عمر شبکه استفاده کردند.

در [21]، نویسندگان یک الگوریتم مبتنی بر ژنتیک برای حل مسئله MNLAR[4] (حداکثر کردن طول عمر شبکه با دامنه های قابل تنظیم) ارائه دادند. الگوریتم مبتنی بر ژنتیک مجموعه حسگرهای جهت دار با دامنه های سنجش مناسب را تشکیل می‌دهد.

[4] Maximum Network Lifetime with Adjustable Ranges

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

یو و همکاران [16] به مسئله پوشش k تایی در شبکه های حسگر بی‌سیم با پروتکل‌های متمرکز و توزیع شده پرداختند. پروتکل‌ها مفهوم جدیدی از منطقه مشارکت در پوشش(CCA)[5] را معرفی کردند. بر اساس این مفهوم، تراکم مکانی حسگر کمتری ارائه شد. علاوه بر این، پروتکل‌ها انرژی های باقی مانده حسگرها را در نظر گرفتند. بنابراین، پروتکل‌های پیشنهادی طول عمر شبکه را افزایش می‌دهند.

یک مدل گراف به نامCA-Net[6] توسط ونگ و همکاران [18] برای ساده‌سازی مسئله پوشش مرزی k تایی در حالی که پیچیدگی محاسبات را کاهش می‌دهد، پیشنهاد شد. بر اساس CA-Net توسعه یافته، دو الگوریتم توزیع شده به نام‌های BCA و TOBA با هدف تعادل انرژی و حداکثر کردن طول عمر شبکه ارائه شده است.

مصطفایی و همکاران [17] الگوریتم نظارت مرزی توزیع شده به نام DBS برای پوشش مرز و کاهش مصرف انرژی حسگرها پیشنهاد دادند. DBS حداقل تعداد حسگرها را برای افزایش طول عمر شبکه با استفاده از اتوماتهای یادگیری انتخاب می‌کند.

در [22] روی پوشش k تایی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم سه بعدی مانند شبکه‌های زیر آبی کار شده است .در این روش، هر گره حداقل توسط k حسگر تحت پوشش قرار گرفته و مقدار kدرجه پوشش نامیده می‌شود. در این مقاله یک روش برای چینش حسگرها ارائه شده تا عدد k حسگر قابل حصول باشد که این مسئله در جاهایی که امکان چینش دستی گره‌ها وجود ندارد امکان پذیر نیست.

اخیراً ، رویکردهای نظری بازی برای حل مسئله پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs) مورد توجه قرار گرفته است [23-26]. در [26] ، نویسندگان الگوریتمی مبتنی بر نظریه بازی برای مسئله حداکثر کردن پوشش و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد دادند. آنها نشان دادند که راه حل مطلوب در این مدل یک نمایه استراتژی تعادل نش است.

در [27] نویسندگان الگوریتم پوشش کامل نظری بازی را پیشنهاد داده اند. این الگوریتم برای اطمینان از پوشش کل شبکه به طور عمده از طریق تنظیم دامنه پوشش گره ها و کنترل افزونگی شبکه استفاده می شود. روش کنترل نظریه بازی دارای مزایای بسیاری از جمله مقاومت در برابر خرابی ها و اختلالات محیطی ، کاهش نیازهای ارتباطی و بهبود مقیاس پذیری است. هدف اصلی رویکردهای مبتنی بر نظریه بازی، طراحی قوانینی است که وجود و کارآیی یک تعادل ناش را تضمین می‌کنند [28].

توابع سود مناسب و روش‌های یادگیری تقویتی برای بازی پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در [29, 30] طراحی شده-اند. در این الگوریتم‌ها، هر بازیکن باید به مقادیر سود اقدامات متناوب خود دسترسی داشته باشد. در [31] پوشش یک محیط ناشناخته توسط روبات ها مورد بررسی قرار گرفت. یک بازی پتانسیل مبتنی بر حالت برای کنترل عملکرد روبات ها طراحی شده است. پاداش حس کردن مناطق و مجازات مصرف انرژی به دلیل حرکت حسگرها در تابع سود در نظر گرفته شده است. سنسورها با استفاده از الگوریتم یادگیری توزیع شده نمایه عملکرد خود را به روز کردند که در آن حسگرها باید برآورد نتیجه اقدامات آینده خود را بدانند. از این رو، یک الگوریتم EM بهبوده یافته برای تخمین تعداد اهداف و پارامترهای توزیع احتمالاتی معرفی شد. لیستی از کارهای انجام شده در زمینه پوشش شبکه‌های حسگر بی‌سیم بر مبنای نظریه بازی در جدول 1 بصورت خلاصه آورده شده است.

[5]Coverage Contribution Area

[6]Cover Adjacent Net

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

جدول 1. لیستی از راه حل‌های مبتنی بر نظریه بازی و روش پیشنهادی آن‌ها

مقاله	روش
Ai et al [32]	مسئله حداکثر کردن پوشش و تقسیم بندی گروهی را بصورت یک بازی پتانسیل مدل کردند و با اعمال الگوریتم تپه نوردی[7] به بازی پوشش اجازه دادند هر گره به یک تعادل نش تقریبی همگرا شود.
Zhang et al [33]	پوشش کل شبکه را عمدتا از طریق تنظیم محدوده پوشش گره ها و کنترل افزونگی شبکه تنظیم می‌کند.
Li et al [34]	جابجایی حسگرها بصورت یک بازی پتانسیل مدل شده است. در هر گام از تکرار، گره‌ها با استفاده از الگوریتم یادگیری بدون حسرت[8] پوشش خود را بهینه کرده و مصرف انرژی حرکتی را کاهش دادند.
Marden et al [28]	پوشش حسگری بصورت یک بازی عام المنفعه[9] مدل شده است. در این بازی سود هر بازیکن به منابعی که انتخاب می‌کند و تعداد بازیکنانی که همان منبع را انتخاب می‌کنند بستگی دارد. استفاده از قوانین توزیع مناسب، وجود تعادل نش را تضمین می‌کند.
Zhu et al [14]	مسئله بهینه‌سازی پوشش بصورت یک بازی پتانسیل دقیق مدل شده است. دو الگوریتم یادگیری مبتنی بر سود برای این بازی پوشش پیشنهاد شد و اثبات شد این الگوریتم‌ها با احتمال زیاد به مجموعه‌ای از تعادل‌های نش محدود همگرا می‌شوند.
Hasanbeig et al [31]	مسئله حسگری مناطق ارزشمند و کاهش مصرف انرژی ناشی از حرکت حسگرها در تابع سود مدل شده است. ربات‌ها هیچ اطلاعاتی در مورد مکان و همچنین تعداد اهداف ندارند. الگوریتم EM برای تخمین تعداد اهداف و سایر پارامترهای توزیع احتمالی معرفی شده است.
Fan et al [35]	مسیرهای مرزی شبکه با یک گراف پوشش مدل شده است، و مسئله پوشش مرزی پویا با استفاده از الگوریتم توزیع شده براساس بازی پتانسیل حل شده است.

3. پوشش شبکه توزیع شده

در این بخش، مسئله پوشش شبکه توزیع شده[10] (DNC) را معرفی می‌کنیم. هدف حداکثر کردن تعداد گره‌های تحت پوشش حسگرهای متحرک با قابلیت‌های پوشش و ارتباطی محدود می‌باشد. در ابتدا برخی از مقدمات نظری را ارائه می‌کنیم.

3-1. فضای مأموریت

یک ناحیه‌ی معین دو بعدی را در نظر می‌گیریم که به یک شبکه مربعی تقسیم می‌شود. فرض می‌کنیم که هر مربع از شبکه ابعاد واحد دارد. هر مربع با مختصات مرکز آن $v = (v_x . v_y)$ نشان داده می‌شود. مجموعه مختصات مرکز مربع‌ها با V نشان داده می‌شود. ناحیه به طور کامل پوشیده است، اگر مرکز تمام مربع‌های شبکه بطور کامل پوشیده شده باشد. اکنون شبکه را بصورت یک گراف بدون جهت $\mathcal{G} = (V.E)$ تعریف می‌کنیم. گراف بدون جهت $\mathcal{G} = (V.E)$ از مجموعه گره V و مجموعه لبه $E \subseteq V \times V$ تشکیل شده است. مجموعه لبه از جفت گره‌های $(v.v')$ تشکیل شده است اگر و تنها اگر فاصله بین دو گره برابر 1 باشد، یعنی $|v_x - v'_x| + |v_y - v'_y| = 1$ برای $(v_x . v_y).(v'_x . v'_y) \in V$ که نشان دهنده این است که گره‌های v و v' همجوار هستند. برای هر دو گره v و v'، فاصله بین گره‌ها $d(v.v')$، تعداد لبه‌ها در کوتاهترین مسیری است که آن‌ها را به هم وصل می‌کند. اگر فاصله بین هر جفت گره محدود باشد، گراف متصل می شود.

مجموعه گره های حاوی گره v و تمام گره های مجاور v را همسایگی v می‌نامند و به صورت N_v مشخص می شود. به

[7] Hill climbing

[8] No regret learning

[9] welfare game

[10] Distributed Network Coverage

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

طور مشابه، برای هر $\delta \geq 0$، δ-همسایگی از v، N_v^δ، مجموعه گره‌هایی است که حداکثر در فاصله δ از v قرار دارند، یعنی

$$N_v^\delta = \{v' \epsilon V \mid d(v'.v) \leq \delta\} \quad (1)$$

2-3. فرمول‌بندی مسئله

شبکه را در نظر بگیرید که بصورت یک گراف غیرجهت‌دار متصل $\mathcal{G} = (V.E)$ نشان داده شده است، و مجموعه ای از m حسگر متحرک $P = \{p_1.p_2.\ldots.p_m\}$ در بعضی از گره‌های $\mathcal{G}$ قرار دارند. هر حسگر متحرک p_i تعدادی $C_i \subset V$ را برای $i = 1.2.\ldots.m$ پوشش می‌دهد. C_i همان مجموعه پوشش p_i نامیده می‌شود. بنابراین مجموعه گره‌های پوشیده شده $C \subseteq V$، بصورت زیر است:

$$C = \bigcup_{i=1}^{m} C_i \quad (2)$$

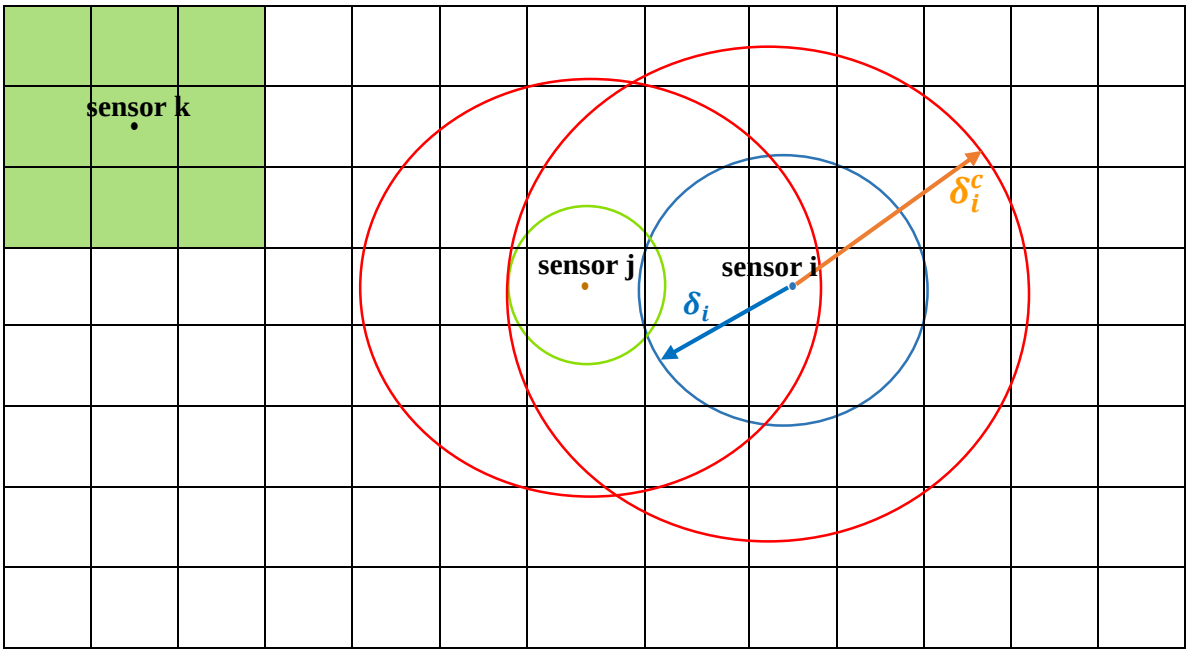
به طور کلی، حسگرهای متحرک ممکن است در مکانیسم های حسگری و حرکتی خود ناهمگن باشند که منجر به قابلیت-های پوشش متفاوت می‌شود. ما فرض می‌کنیم که هر حسگر p_i دارای محدوده پوشش δ_i است، و می‌تواند گره هایی را که حداکثر در فاصله δ_i از موقعیت فعلی خود $v_i \in V$ قرار دارند پوشش دهد. به این ترتیب، مجموعه پوشش هر p_i، δ_i-همسایگی از v_i است، یعنی

$$C_i = N_{v_i}^{\delta_i} \quad (3)$$

به طور مشابه، هر حسگر قابلیت ارتباطی محدود دارد و هر حسگر p_j مجموعه پوشش فعلی خود را به حسگرهای داخل محدوده ارتباطی‌اش ، δ_j^c ، انتقال می‌دهد. از ارتباط بین حسگرها استفاده می شود تا حسگرهایی که گره‌های یکسانی را پوشش می دهند، از عملکرد یکدیگر مطلع شوند. به دلیل محدوده ارتباطی محدود، یک حسگر p_i می‌تواند مجموعه پوشش فعلی p_j را مشاهده کند، در صورتی که در فاصله δ_j^c از موقعیت فعلی p_j باشد. به این ترتیب، مجموعه‌ای از عوامل که مجموعه‌های تحت پوشش آنها توسط p_i قابل مشاهده هستند تابعی از موقعیت عوامل است و $O_i(v_1.\ldots.v_m)$ بصورت زیر تعریف می‌شود

$$O_i(v_1.\ldots.v_m) = \{p_j \in P | d(v_i.v_j) \leq \delta_j^c\} \quad (4)$$

که در آن v_i و v_j به ترتیب موقعیت‌های فعلی p_i و p_j را مشخص می‌کنند. با توجه به مجموعه ای از حسگرهای متحرک ناهمگن با قابلیت‌های پوشش و ارتباطی محدود، در مسئله پوشش شبکه توزیع شده هدف تعریف قوانین محلی برای حسگرها است به گونه‌ای که تعداد گره‌های پوشیده شده به صورت مجانبی به حداکثر برسد. یک قانون بصورت محلی قابل اجرا در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که اجرای آن توسط حسگر p_i فقط به اقدامات فعلی حسگر و سایر حسگرهایی که در حال حاضر توسط p_i قابل مشاهده می‌باشند بستگی دارد. فضای مأموریت و مدل حسگر در شکل 1 نشان داده شده است.



فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال پنجم، شمارهٔ یک بهار 1400

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

شکل 1. فضای ماموریت و مدل حسگر. مربع های سایه دار سبز بیانگر اقدامات عملی برای حسگر k است.

تعریف (مسئله پوشش شبکه توزیع شده): فرض کنید m حسگر متحرک $P = \{p_1. p_2. \dots . p_m\}$ ابتدا در یک شبکه متصل ناشناخته مستقر شوند. برای هر p_i، $v_i(t) \in V$ نشان دهنده‌ی موقعیت حسگر در زمان t می‌باشد و مجموعه پوشش آن $C_i(t)$ بصورت رابطه (3) مشخص می‌شود. هدف از مسئله پوشش شبکه توزیع شده (DNC) یافتن برخی از قوانین محلی قابل اجرا برای حسگرها به منظور حداکثر کردن تعداد گره های پوشیده شده $|C(t)|$ بصورت مجانبی به شرط $v_i(t) \in N_{v_i(t-1)}$ برای همه $p_i \in P$ است.

محدودیت در مسئله DNC محلیت را بر روی حرکت حسگرها در شبکه تحمیل می‌کند. به این ترتیب، در هر مرحله از زمان هر حسگر می‌تواند موقعیت خود را حفظ یا به یک گره مجاور حرکت کند.

در مسئله DNC، گروهی از حسگرهای ناهمگن لازم است شبکه ناشناخته را کشف کرده و تا حد ممکن تعداد گره‌های بیشتری را بپوشانند. یک رویکرد ممکن برای حل مسئله DNC استفاده از روش حریصانه توزیع شده است. بر این اساس، عوامل سعی می‌کنند در هر مرحله تعداد گره‌هایی را که پوشش می‌دهند به حداکثر برسانند تا زمانی که هیچ یک از آنها نتوانند پیشرفت بیشتری داشته باشند. با این حال، کارایی حاصل به طور قابل توجهی به ساختار شبکه و استقرار اولیه حسگرها بستگی دارد. اگر عوامل با پوشش اولیه نسبتاً خوب شروع کنند، این روش به سرعت به یک تقریب خوب منجر می‌شود. در مقابل، ممکن است به نتایج بسیار ناکارآمد به ازای ساختار شبکه‌های مختلف و شرایط اولیه دلخواه منجر شود. برای دستیابی به پیکربندی بهینه در مسئله DNC، یک راه حل باید بتواند عدم قطعیت‌های موجود در محیط را برطرف کند. بنابراین، راه حل باید امکان کاوش شبکه به منظور پوشش بهتر را فراهم کند. در این مقاله یک راه حل براساس رویکرد نظریه بازی به نام MHSD ارائه می‌کنیم. به این ترتیب، یک بازی متناظر را طراحی می‌کنیم و از الگوریتم یادگیری در بازی‌ها استفاده می‌کنیم تا حسگرها را به سمت موقعیت مطلوب سوق دهیم. در روش پیشنهادی MHSD، گرچه عوامل با احتمال زیاد فعالیت‌هایی را انتخاب می‌کنند که به صورت محلی باعث بهبود پوشش می‌شوند، اما به منظور اکتشاف بیشتر و جستجوی بهینه سراسری، با احتمال کم اقدامات محلی بدتر را انجام می‌دهند. به طور کلی روش پیشنهادی MHSD در مقایسه با روش های حریصانه کندتر است. با این حال، وضعیت نهائی به احتمال زیاد به یک ساختار بهینه سراسری همگرا می‌شود.

4. روش پیشنهادی

در این بخش، یک راه حل مبتنی بر نظریه بازی به منظور حل مسئله DNC پیشنهاد می‌کنیم. قبل از شروع تجزیه و تحلیل، مقدمات نظری بازی را ارائه می‌کنیم.

4-1. مفاهیم نظریه بازی

یک بازی استراتژیک محدود $\Gamma = (P. A. U)$ شامل 3 مولفه است:

(1) مجموعه‌ای از m عامل (حسگر) $P = \{p_1. p_2. \dots . p_m\}$،

(2) فضای عمل m-بعدی $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m$ که در آن A_i مجموعه عمل بازیکن p_i است،

(3) مجموعه‌ی توابع سود $U = \{U_1. U_2. \dots . U_m\}$، که در آن هر $U_i : A \to \Re$ یک نگاشت از فضای عمل به اعداد حقیقی است.

برای هر نمایه عملکرد $a \in A$، a_{-i} عملکرد همه بازیکنان به غیر از p_i را مشخص می‌کند. با استفاده از این نماد، یک نمایه عملکرد a می‌تواند بصورت $(a_i . a_{-i})$ نمایش داده شود، و ما اغلب در این مقاله از این نمایه استفاده خواهیم کرد.

به مجموعه‌ای از استراتژی‌ها در صورتی که هر بازیکن از تغییر یک جانبه نفعی نمی‌برد در واقع هیچ بازیکنی انگیز ای برای تخطی ندارد، تعادل نش[1]می‌گویند. برای درک بهتر این مفهوم، فرض کنید که هر بازیکن استراتژی بازیکنان دیگر را می‌داند. هر بازیکن از خودش می‌پرسد: دانستن استراتژی‌های بازیکنان دیگر، و بحث کردن در رابطه با استراتژی‌های بازیکنان

[1]Nash equilibrium

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

دیگر به عنوان زیر بنا تعیین می‌شوند، آیا با تغییر استراتژی می‌توانم بهره‌مند بشوم؟ اگر پاسخ هر بازیکن "بله" باشد، پس آن مجموعه استراتژی‌ها تعادل نش نمی‌باشد. اما اگر هر بازیکن هر تغییری را ترجیح ندهد، پس مجموعه‌ی استراتژی‌ها تعادل نش می‌باشد. به این ترتیب، هر استراتژی در تعادل نش بهترین پاسخ به تمام استراتژی‌های دیگر در آن تعادل است.

به عبارت دیگر یک نمایه عملکرد $a^* \in A$ تعادل نش (NE) گفته می‌شود، اگر برای همه بازیکنان $p_i \in P$،

$$U_i(a_i^*.a_{-i}^*) = \max_{a_i} U_i(a_i.a_{-i}^*) \quad (5)$$

در این مقاله، یک کلاس خاص از بازی‌ها را در نظر خواهیم گرفت که به طور گسترده در مسائل کنترل مشارکتی به نام بازی-های پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بازی‌های پتانسیل، یک تابع پتانسیل $\phi : A \to \Re$ وجود دارد به گونه‌ای که تغییر سود یک بازیکن در صورت تغییر استراتژی از a_i به a_i'، دقیقاً برابر میزان تغییر در تابع پتانسیل به ازای این دو استراتژی می-باشد. بصورت دقیق‌تر برای هر بازیکن p_i، برای هر $a_i.a_i' \in A_i$ و برای همه $a_{-i} \in A_{-i}$

$$U_i(a_i'.a_{-i}) - U_i(a_i.a_{-i}) = \phi(a_i'.a_{-i}) - \phi(a_i.a_{-i}) \quad (6)$$

یعنی مقدار تغییر در سود بازیکن i در صورت عوض کردن استراتژی از a_i به a_i'، دقیقاً برابر میزان تغییر در تابع پتانسیل به ازای این دو استراتژی باشد. وجود تعادل نش در یک بازی پتانسیل تضمین شده است [36]. به آسانی می‌توان ثابت کرد هر نمایه‌ی عملکرد که تابع پتانسیل را بیشینه کند، یک نقطه تعادل نش است. بازی پتانسیل دارای حداقل یک نقطه تعادل نش است.

برای کاربردهای کنترل مشارکتی، معمولاً بازی پتانسیل به گونه‌ای طراحی شده است که تابع پتانسیل ϕ بسته به عملکرد همه عوامل، امتیاز سراسری را نشان می دهد.

2-4. طراحی بازی

به منظور حل مسئله DNC در یک فضای نظری بازی، ابتدا باید بازی متناظر را طراحی کنیم. به طور خاص، ما علاقه‌مند به طراحی بازی پتانسیل $\Gamma_{DNC} = (P.A.U)$ هستیم که به طور مکرر توسط عوامل (حسگرها) بازی خواهد شد. برای بازی‌های پتانسیل، عامل‌ها می‌توانند با دنبال کردن یک الگوریتم یادگیری مانند یادگیری لگاریتمی-خطی [37] تابع پتانسیل مربوطه را حداکثر کنند. از این‌رو، اگر Γ_{DNC} را به گونه ای طراحی کنیم که تابع پتانسیل آن با تعداد گره های تحت پوشش هماهنگ باشد، آنگاه عوامل می‌توانند یک الگوریتم یادگیری مشابه را برای حل مسئله DNC به کار ببرند.

به منظور طراحی بازی در ابتدا مجموعه عملکرد حسگرها را تعریف می‌کنیم. در مسئله پوشش شبکه توزیع شده، مجموعه پوشش هر حسگر با محدوده پوشش δ_i و موقعیت v_i مشخص می‌شود. از آنجا که محدوده پوشش هر حسگر ثابت است، مجموعه پوشش حسگر فقط به موقعیت آن بستگی دارد و به عنوان عملکرد آن تعریف می‌شود. به این ترتیب مجموعه عملکرد هر حسگر برابر است با مجموعه گره V، یعنی

$$A_i = V. \qquad \forall i \in \{1.2.\dots.m\} \quad (7)$$

بر اساس مجموعه عملکردها در (7)، یک نمایه عملکرد a ∈ A برداری از موقعیت فعلی حسگرها است.

در مرحله بعد، برای تکمیل طراحی بازی باید توابع سود را تعریف کنیم. برای به دست آوردن یک بازی پتانسیل که بتواند برای حل مسئله DNC استفاده شود، تابع پتانسیل $\phi(a)$ را بصورت تعداد گره‌های پوشیده شده تعریف می‌کنیم. یعنی

$$\phi(a) = \left|\bigcup_{i=1}^{m} C_i\right| \quad (8)$$

سپس، U را طوری تنظیم می‌کنیم که $\phi(a)$ در (8) یک تابع پتانسیل برای بازی حاصل باشد. این کار را می توان با تنظیم توابع سود عامل بصورت زیر به دست آورد.

$$U_i(a) = \left|C_i \setminus \bigcup_{j \neq i} C_j\right| \quad (9)$$

به عبارت دیگر، برای هر نمایه عملکرد، سود هر عامل برابر است با تعداد گره هایی که فقط توسط آن عامل پوشیده می‌شود. توجه داشته باشید که این سود برابر با سهم حاشیه‌ای عامل p_i در تابع پتانسیل است.

قضیه 1. توابع سود تعریف شده در رابطه (9) منجر به یک بازی پتانسیل $\Gamma_{DNC} = (P.A.U)$ با تابع پتانسیل داده شده در رابطه (8) می‌شود.

اثبات. فرض کنید $a_i = v_i$ و $a_i' = v_i'$ دو عمل ممکن برای عامل p_i باشند، و a_{-i} اقدامات سایر عوامل را نشان دهد. توجه داشته باشید که

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

$$\phi(a) = \left|\bigcup_{i=1}^{m} C_i\right| = \left|C_i \setminus \bigcup_{j\neq i} C_j\right| + \left|\bigcup_{j\neq i} C_j\right| = U_i(a_i.a_{-i}) + \left|\bigcup_{j\neq i} C_j\right| \quad (10)$$

با استفاده از رابطه (10) به دست می‌آوریم

$$\phi(a_i'.a_{-i}) - \phi(a_i.a_{-i}) = U_i(a_i'.a_{-i}) - U_i(a_i.a_{-i}) \quad (11)$$

3-4. الگوریتم یادگیری توزیع شده مبتنی بر سود

در فرمول‌بندی نظری بازی مسئله DNC، با شروع از یک پیکربندی اولیه دلخواه، عامل‌ها بصورت تکراری بازی پوشش Γ_{DNC} را انجام می‌دهند. در هر لحظه از زمان $t \in \{0.1.2.\dots\}$ هر عامل $p_i \in P$ عمل $a_i(t)$ را بازی می‌کند و سود $U_i(a_i(t).a_{-i}(t))$ را دریافت می‌کند. در این جا نقش یادگیری این است که یک قانون به روزرسانی عملکرد را به عوامل ارائه دهد به گونه‌ای که در بازی‌های تکراری، عملکرد عامل‌ها به مجموعه‌ای از نمایه‌های عملکرد مطلوب همگرا شود. برای مسئله DNC ، این مجموعه‌ای از نمایه‌های عملکرد است که در سطح سراسری تعداد گره های پوشیده شده را به حداکثر می‌رساند. برای یک بازی پتانسیل، الگوریتم یادگیری لگاریتمی-خطی (LLL) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد تا یک زنجیره مارکوف غیرتقلیل‌پذیر و غیرمتناوب در فضای عمل القا کند که توزیع ثابت آن دارای ورودی های دلخواه کوچک برای نمایه‌های عملکرد است که تابع پتانسیل $\phi(a)$ را حداکثر نمی‌کند [37]. همچنین LLL فرض می‌کند که هر بازیکن به تمام اقدامات موجود در مجموعه عملکرد A_i و سودی که با بازی آن‌ها حاصل می‌شود، دسترسی دارد. به طور کلی، هنگامی که سیستم روی مجموعه فعالیت‌های محدود عمل کند، یعنی وقتی هر عامل p_i مجاز به انتخاب عملکرد بعدی خود $a_i(t+1)$ فقط از زیر مجموعه‌ای از اقدامات $A_i^c(a_i(t))$ که به عملکرد کنونی آن $a_i(t)$ بستگی دارد باشد، همگرایی به مجموعه حداکثرکننده‌های پتانسیل تضمین نمی شود. توجه داشته باشید که این مسئله در DNC وجود دارد و داریم

$$A_i^c(v) = N_v \quad (12)$$

مسئله مجموعه اقدامات محدود شده در [13] مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد نوع دیگری از یادگیری به نام یادگیری لگاریتمی-خطی دودویی[1] (BLLL) می‌تواند برای دستیابی به همگرایی تضمینی (به احتمال زیاد) به مجموعه نمایه‌های عملکرد حداکثر کننده پتانسیل استفاده شود، اگر مجموعه عملکردها دو ویژگی زیر را برآورده سازد.

خصوصیت 1 (قابلیت دستیابی) برای هر عامل $p_i \in P$ و هر جفت عمل $a_i^0.a_i^k \in A_i$ ، دنباله‌ای از اقدامات $\{a_i^0.a_i^1 \dots .a_i^k\}$ وجود دارد به طوری که

$$a_i^r \in A_i^c(a_i(r-1)) \;\; for\; all\; r \in \{1.2.\dots.k\}$$

خصوصیت 2 (برگشت پذیری) برای هر عامل $p_i \in P$ و هر جفت عمل $a_i.a_i' \in A_i$ ،

$$a_i' \in A_i^c(a_i) \Leftrightarrow a_i \in A_i^c(a_i')$$

لم 2. در صورت اتصال گراف $\mathcal{G} = (V.E)$، مجموعه اعمال محدود در (12) خصوصیات 1 و 2 را برآورده می‌کند.

اثبات. اگر گراف متصل باشد، یک مسیر با طول محدود $\{v^0.\dots.v^k\}$ بین هر جفت گره $v^0.v^k \in V$ وجود دارد و خصوصیت 1 برقرار می‌شود. بعلاوه، برای گراف‌های بدون جهت، $v' \in N_v$ اگر و فقط اگر $v \in N_{v'}$ باشد. از این‌رو، خصوصیت 2 نیز برآورده می‌گردد.

در BLLL، در هر مرحله از زمان تنها یک حسگر بصورت تصادفی انتخاب می‌شود. حسگر انتخاب شده با فرض ثابت بودن سایر حسگرها، بسته به سود فعلی و سود فرضی که با اجرای یک عمل تصادفی در مجموعه اقدامات محدود خود دریافت می‌کند، فعالیت خود را به روز می‌کند. الگوریتم کلی BLLL ارائه شده در [13] به شرح زیر است.

BLLL Algorithm

1: **Initialization:** $t = 0.T \in \Re^+ small.a(0) \in A$
2: **while (1)**
3: Pick a random $p_i \in P$.
4: Pick a random $a_i' \in A_i^c(a_i)$.
5: $a_j(t+1) = a_j(t)\; for\; all\; p_j \neq p_i$.
6: $\alpha = e^{U_i(a(t))/T}$.
7: $\beta = e^{U_i(a_i'.a_{-i}(t))/T}$.
8: $a_i(t+1) = \begin{cases} a_i(t) & w.p.\ \frac{\alpha}{\alpha+\beta}. \\ a_i' & othewise. \end{cases}$
9: $t = t+1$.
10: **end while**

[1] Binary log-linear learning

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

توجه داشته باشید که انتخاب تنها یک حسگر در هر مرحله از زمان بدون نیاز به هماهنگی عوامل برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام حسگر بروز شود، حاصل می‌شود.

4-4. ارتباطات کافی

اگر همه حسگرها، BLLL را در بازی پتانسیل پیشنهادی $\Gamma_{DNC} = (P. A. U)$ به کار گیرند، مسئله DNC توسط گروهی از حسگرهای متحرک قابل حل است. با این حال، به منظور استفاده از این روش، هر حسگر باید بتواند اطلاعات لازم را از فعالیت حسگرهایی که می‌تواند مشاهده کند (همانطور که در (4) آورده شده) جمع‌آوری نماید. به طور دقیق‌تر، بر اساس عملکرد عوامل در O_i، هر عامل p_i باید بتواند سود حاصل از نمایه عملکرد فعلی و همچنین سودهای فرضی را که ممکن است با انتقال به گره همسایه به دست آورد، محاسبه کند. در صورتیکه محدوده ارتباطی عوامل کافی باشد، این شرط تأمین می شود. به منظور حفظ روند کلی تا حد ممکن، کوچکترین محدوده های ارتباطی را مشخص می‌کنیم که اجرای مناسب الگوریتم را تضمین می‌کند.

لم 3. فرض کنید $P = \{p_1. \dots . p_m\}$ مجموعه‌ای از m عامل است، و فرض کنید هر عامل p_i دارای یک محدوده پوشش δ_i و یک محدوده ارتباطی δ_i^c باشد. برای هر نمایه عملکرد $a \in A$، عامل p_i واقع در گره v_i می‌تواند تعداد عواملی که گره v را می‌پوشانند، اندازه گیری کند اگر

$$d(v_i. v) \leq \min_{j=1\dots.m} (\delta_j^c - \delta_j) \qquad (13)$$

اثبات: ما نشان خواهیم داد که اگر رابطه (13) برقرار باشد، p_i در محدوده ارتباطی هر عامل پوشش دهنده v است، یعنی $d(v_i. v_k) \leq \delta_k^c$ برای هر عامل p_k پوشش دهنده v. p_k یک عامل واقع در گره v_k است و گره v را پوشش می‌دهد. از نامساوی مثلثی داریم

$$d(v_i. v_k) \leq d(v_i. v) + d(v_k. v) \qquad (14)$$

از جایگذاری (4) و (13) در (14) به دست می‌آوریم

$$d(v_i. v_k) \leq \min_{j\in\{1\dots.m\}} \delta_j^c - \delta_j + \delta_k \qquad (15)$$

از آنجا که $min_{j\in\{1\dots.m\}}\ \delta_j^c - \delta_j \leq \delta_k^c - \delta_k$ داریم

$$d(v_i. v_k) \leq \delta_k^c - \delta_k + \delta_k = \delta_k^c \qquad (16)$$

که نشان می‌دهد عامل p_i در محدوده ارتباطی p_k است.

با استفاده از لم 3، محدوده های ارتباطی کافی برای عوامل را مشخص می‌کنیم تا اطلاعات لازم را برای اجرای BLLL جمع آوری کنند.

نتیجه 4. فرض کنید $P = \{p_1. \dots . p_m\}$ مجموعه‌ای از m عامل باشد، و هر عامل p_i دارای یک محدوده پوشش δ_i و یک محدوده ارتباطی δ_i^c باشد. هر عامل p_i برای هر فعالیت $a_i' \in A_i^c(a_i(t))$ می‌تواند سود $U_i(a_i'. a_{-i}(t))$ را محاسبه کند اگر

$$\delta_j^c - \delta_j \geq \delta^* + 1. \quad \forall p_j \in P. \qquad (17)$$

که در آن δ^* حداکثر دامنه پوشش به صورت تعریف شده است.

$$\delta^* = \max_{j\in\{1.2\dots.m\}} \delta_j \qquad (18)$$

اثبات. اگر (17) برقرار باشد ، پس داریم

$$\min_{j=1\dots.m} (\delta_j^c - \delta_j) \geq \delta^* + 1 \qquad (19)$$

لم 3 و (19) با هم نشان می دهد که یک عامل p_i واقع در v_i تعداد عوامل پوشش دهنده هر گره v را می‌شناسد بنابراین

$$d(\ v_i. v) \leq \delta^* + 1 \qquad (20)$$

با توجه به (12)، یک عامل به روزرسانی p_i می‌تواند حداکثر 1 قدم از موقعیت فعلی خود در مرحله بعدی فاصله داشته باشد. از این‌رو، مجموعه پوشش آن در مرحله زمان بعدی فقط می‌تواند شامل گره‌هایی باشد که حداکثر $\delta_i + 1$ از موقعیت فعلی آن فاصله دارند. توجه داشته باشید که برای هر گره v رابطه (20) برقرار است زیرا برای هر عامل p_i داریم $\delta_i \leq \delta^*$. از اینرو عامل p_i برای هر فعالیت $a_i' \in A_i^c(a_i(t))$ می‌تواند سود $U_i(a_i'. a_{-i}(t))$ را محاسبه کند.

قضیه 5. فرض کنید $P = \{p_1. \dots . p_m\}$ مجموعه‌ای از m عامل ناهمگن باشد، که هر کدام دارای یک دامنه پوشش δ_i و یک دامنه ارتباطی δ_i^c باشند و (17) را برآورده کنند. اگر همه عوامل در تکامل اقدامات خود از بین مجموعه اقدامات محدود داده شده در (12) از BLLL پیروی کنند، در این صورت تعداد گره های تحت پوشش در هر بازی تکراری Γ_{DNC} با احتمال زیاد به صورت مجانبی حداکثر می‌شوند.

اثبات. اگر هر عامل محدوده ارتباطی رضایت بخش مطابق با رابطه (17) داشته باشد، نتیجه 4 اشاره دارد بر این که هر عامل بروزرسانی می تواند BLLL را برای انتخاب اقدام جدید خود

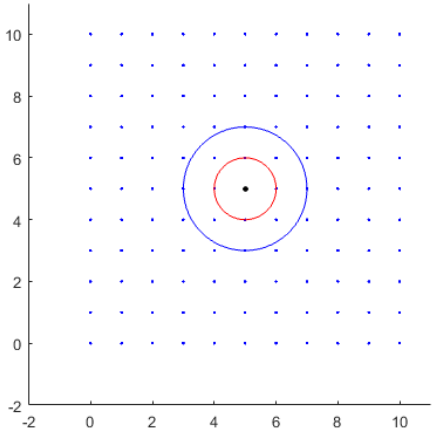
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

از مجموعه اقدامات محدود شده در (12) اجرا کند. با توجه به قضیه 1-5 در [13]، لم 2 تضمین می‌کند که در بازی تکراری Γ_{DNC}، نمایه عملکرد به احتمال زیاد به مجموعه اقداماتی که در سطح سراسری تعداد گره‌های تحت پوشش را حداکثر می‌کند، همگرا می‌شود.

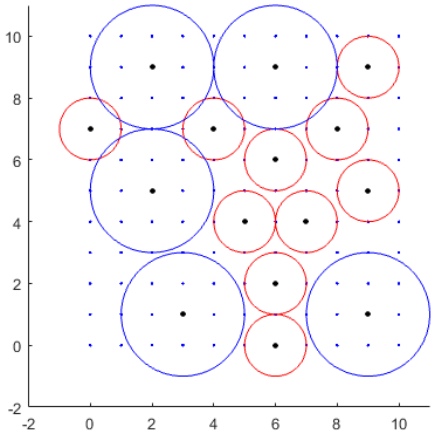
5. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی را ارائه می دهیم. برای ارزیابی عملکرد MHSD چندین آزمایش در متلب انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج الگوریتم‌های FPB، Minmax-vertex و Maxmin-vertex [38] مقایسه می‌شود. در تمام این الگوریتم‌ها ناحیه به سلول‌های ورونی تقسیم می‌شود و سپس روش‌های هندسی متفاوت به منظور یافتن مکان‌های جدید برای حسگرها بکار گرفته می‌شود. الگوریتم‌ها با توجه به پوشش مقایسه می‌شوند. ما کسری از منطقه را که توسط حسگرهای مستقر تحت پوشش قرار می‌گیرد، به عنوان معیار پوشش در نظر می‌گیریم.

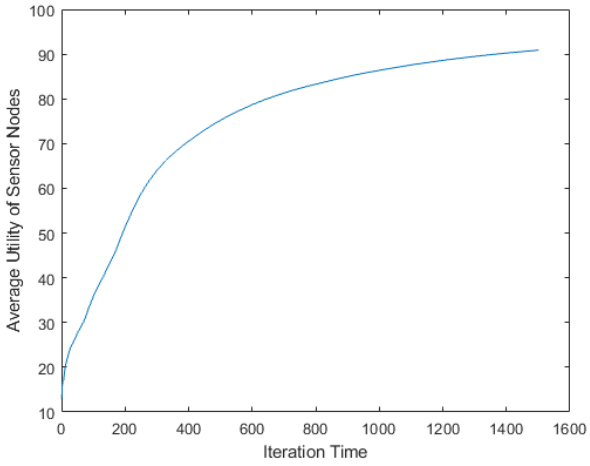
آزمایش 1. در این بخش، برخی از نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی را ارائه می‌کنیم. ما یک ناحیه مربع شکل 15 × 15را در نظر می‌گیریم که در آن 15 حسگر ناهمگن در وسط ناحیه قرار گرفته‌اند. 10 حسگر دارای محدوده پوشش 1 و محدوده ارتباطی 4 هستند، در حالی که 5 حسگر دارای محدوده پوشش 2 و محدوده ارتباطی 5 هستند. شکل 2 پیکربندی اولیه گره‌های حسگر را نشان می‌دهد. حسگرها الگوریتم BLLL را در طی 1500 مرحله زمانی با T=0.1 اجرا می‌کنند. شکل 3 موقعیت نهائی گره‌های حسگر را در تکرار 1500 نشان می‌دهد. میانگین سود گره‌های حسگر در هر تکرار در شکل 4 نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که به طور میانگین گره‌های حسگر سعی می‌کنند تابع سود خود که متناظر با جستجوی موقعیت بهتر است افزایش دهند. اکنون لازم است نشان داده شود که به حداکثر رساندن تابع سود حسگرهای منفرد منجر به حداکثر شدن پوشش کل می‌شود. شکل 5 نشان می‌دهد که پوشش در طول زمان در حال افزایش است.



شکل 2. پیکربندی اولیه گره‌های حسگر

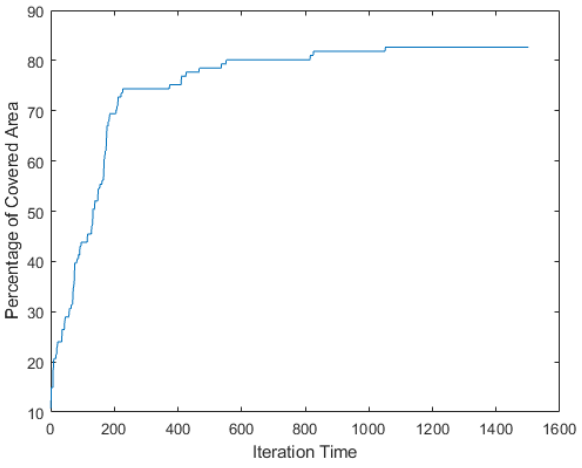


شکل3. پیکربندی نهائی شبکه در تکرار 1500 از الگوریتم MHSD

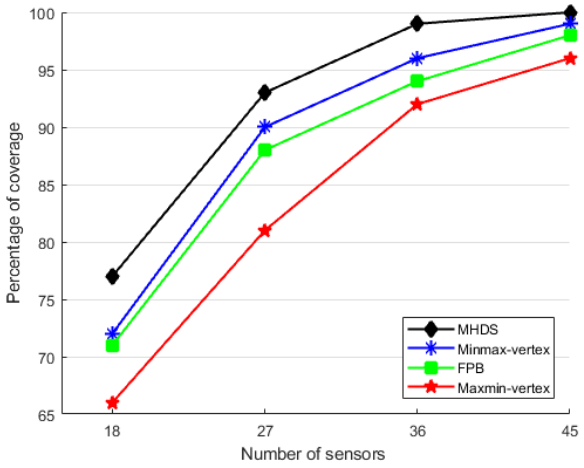


شکل4. میانگین سود گره‌های حسگر در طول زمان

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]



شکل 5. ارزیابی درصد ناحیه پوشیده شده



شکل 6. مقایسه MHSD با الگوریتم های استقرار موجود از نظر پوشش

آزمایش 2. در این آزمایش، از نظر معیار پوشش رفتار الگوریتم پیشنهادی MHDS را با الگوریتم‌های FPB، Minmax-vertex و Maxmin-vertex مقایسه می‌کنیم. گره های حسگر در یک مربع 50 × 50 قرار دارند. این آزمایش برای تعداد 18، 27، 36 و 45 حسگر انجام می‌شود که در ابتدا به طور تصادفی در ناحیه مستقر می‌شوند. در ناحیه، حسگرها به شعاع 6، 5، 7 و 9 با نسبت‌های 5 به 2 به 1 به 1 وجود دارد (به عنوان مثال ، در مورد n = 18 ، 10 حسگر با محدوده حسگری 6 متر ،4 حسگر با محدوده حسگری 5 متر ، 2 حسگر با محدوده حسگری 7 متر و 2 حسگر با محدوده حسگری 9 متر وجود دارد). علاوه بر این فرض می‌شود محدوده ارتباطی هر حسگر 3 برابر بزرگتر از محدوده حسگری آن باشد. مقایسه MHSD با استراتژی‌های استقرار موجود در شکل 6 نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عملکرد MHSD از نظر پوشش بهتر از FPB، Minmax-vertex و Maxmin-vertex می‌باشد.

6. نتیجه گیری

در این مقاله، پوشش توزیع شده یک شبکه ناشناخته توسط حسگرهای متحرک ناهمگن با قابلیت حسگری و ارتباطی محلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این زمینه، حسگرها از نظر قابلیت‌های پوشش و ارتباطی محدودشان، ناهمگن در نظر گرفته می شوند. این مسئله از دیدگاه نظریه بازی حل می‌شود و راه حل با طراحی بازی پتانسیل و به کارگیری یادگیری لگاریتمی-خطی دودویی به دست می‌آید. همانطور که در مقاله نشان داده شده است، اگر عوامل محدوده ارتباطی کافی را داشته باشند، با استفاده از روش پیشنهادی در به روزرسانی محلی اقدامات خود، بصورت مجانبی تعداد گره های تحت پوشش را حداکثر می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. ما نشان دادیم که الگوریتم پیشنهادی بهتر از برخی الگوریتم‌های موجود مانند FPB، Minmax-vertex و Maxmin-vertex با پارامترهای مشابه کار می کند.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

7. مراجع (References)

[1] B. D. Deebak and F. Al-Turjman, "A hybrid secure routing and monitoring mechanism in IoT-based wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, p. 102022, 2020.

[2] K. C. Laudon and J. P. Laudon, *Management information systems*. Pearson Upper Saddle River, 2015.

[3] T. Elmokadem, "Distributed Coverage Control of Quadrotor Multi-UAV Systems for Precision Agriculture," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 30, pp. 251-256, 2019.

[4] M. Huang, A. Liu, M. Zhao, and T. Wang, "Multi working sets alternate covering scheme for continuous partial coverage in WSNs," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 553-567, 2019.

[5] J. Wang, C. Ju, H.-j. Kim, R. S. Sherratt, and S. Lee, "A mobile assisted coverage hole patching scheme based on particle swarm optimization for WSNs," *Cluster Computing*, vol. 22, no. 1, pp. 1787-1795, 2019.

[6] Y. Xu, J. Choi, S. Dass, and T. Maiti, "Efficient Bayesian spatial prediction with mobile sensor networks using Gaussian Markov random fields," *Automatica*, vol. 49, no. 12, pp. 3520-3530, 2013.

[7] S.-k. Yun and D. Rusy, "Distributed coverage with mobile robots on a graph: Locational optimization," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 634-641: IEEE.

[8] C.-W. Tsai, P.-W. Tsai, J.-S. Pan, and H.-C. Chao, "Metaheuristics for the deployment problem of WSN: A review," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 39, no. 8, pp. 1305-1317, 2015.

[9] P. Li and H. Duan, "A potential game approach to multiple UAV cooperative search and surveillance," *Aerospace Science and Technology*, vol. 68, pp. 403-415, 2017.

[10] V. Ramaswamy and J. R. Marden, "A sensor coverage game with improved efficiency guarantees," in *2016 American Control Conference (ACC)*, 2016, pp. 6399-6404: IEEE.

[11] J. Wang, Y. Gao, W. Liu, A. K. Sangaiah, and H.-J. Kim, "Energy efficient routing algorithm with mobile sink support for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 19, no. 7, p. 1494, 2019.

[12] J. R. Marden, G. Arslan, and J. S. Shamma, "Cooperative control and potential games," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 39, no. 6, pp. 1393-1407, 2009.

[13] J. R. Marden and J. S. Shamma, "Revisiting log-linear learning: Asynchrony, completeness and payoff-based implementation," *Games and Economic Behavior*, vol. 75, no. 2, pp. 788-808, 2012.

[14] M. Zhu and S. Martinez, "Distributed coverage games for energy-aware mobile sensor networks," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 51, no. 1, pp. 1-27, 2013.

[15] I. Khoufi, P. Minet, A. Laouiti, and S. Mahfoudh, "Survey of deployment algorithms in wireless sensor networks: coverage and connectivity issues and challenges," *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 341-390, 2017.

[16] J. Yu, S. Wan, X. Cheng, and D. Yu, "Coverage contribution area based $ k $-coverage for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 9, pp. 8510-8523, 2017.

[17] H. Mostafaei, M. U. Chowdhury, and M. S. Obaidat, "Border surveillance with WSN systems in a distributed manner," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3703-3712, 2018.

[18] C.-I. Weng, C.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao, C.-T. Chang, and H. Chen, "On-supporting energy balanced $ k $-barrier coverage in wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13261-13274, 2018.

[19] J. Habibi, H. Mahboubi, and A. G. Aghdam, "A gradient-based coverage optimization strategy for mobile sensor networks," *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 477-488, 2016.

[20] H. Mohamadi, S. Salleh, and M. N. Razali, "Heuristic methods to maximize network lifetime in directional sensor networks with adjustable sensing ranges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 46, pp. 26-35, 2014.

[21] A. Alibeiki, H. Motameni, and H. Mohamadi, "A new genetic-based approach for maximizing network lifetime in directional sensor networks with adjustable sensing ranges," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 52, pp. 1-12, 2019.

[22] H. M. Ammari and S. Das, "A study of k-coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 59, no. 2, pp. 243-257, 2009.

[23] T. AlSkaif, M. G. Zapata, and B. Bellalta, "Game theory for energy efficiency in wireless sensor networks: Latest trends," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 54, pp. 33-61, 2015.

[24] J. R. Marden and J. S. Shamma, "Game Theory and Control," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, no. 0, 2017.

[25] S. Rahili, "Distributed Optimization in Multi-Agent Systems: Game Theory Based Sensor Coverage and Continuous-Time Convex Optimization," UC Riverside, 2016.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]

IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 62, no. 11, pp. 5954-5961, 2017.

[26] S. Rahili, J. Lu, W. Ren, and U. M. Al-Saggaf, "Distributed Coverage Control of Mobile Sensor Networks in Unknown Environment Using Game Theory: Algorithms and Experiments," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 6, pp. 1303-1313, 2018.

[27] M. Movassagh and H. S. Aghdasi, "Game theory based node scheduling as a distributed solution for coverage control in wireless sensor networks," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 65, pp. 137-146, 2017.

[28] J. R. Marden and A. Wierman, "Distributed welfare games," *Operations Research*, vol. 61, no. 1, pp. 155-168, 2013.

[29] J. R. Marden and J. S. Shamma, "Game theory and distributed control," in *Handbook of game theory with economic applications*, vol. 4: Elsevier, 2015, pp. 861-899.

[30] M. Zhu and S. Martínez, "Distributed coverage games for energy-aware mobile sensor networks," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 51, no. 1, pp. 1-27, 2013.

[31] M. Hasanbeig and L. Pavel, "Distributed Coverage Control by Robot Networks in Unknown Environments Using a Modified EM Algorithm," *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, vol. 11, no. 7, pp. 721-729, 2017.

[32] X. Ai, V. Srinivasan, and C.-K. Tham, "Optimality and complexity of pure nash equilibria in the coverage game," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 7, 2008.

[33] L. Zhang, Y. Lu, L. Chen, and D. Dong, "Game theoretical algorithm for coverage optimization in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the world Congress on Engineering*, 2008, vol. 1, pp. 2-4.

[34] J. Li, C. Zhang, W. Liu, and K. Yue, "No Regret Learning for Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks," in *ICICA (LNCS)*, 2011, pp. 216-223: Springer.

[35] F. Fan, Q. Ji, G. Wu, M. Wang, X. Ye, and Q. Mei, "Dynamic barrier coverage in a wireless sensor network for smart grids," *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 41, 2019.

[36] D. Monderer and L. S. Shapley, "Potential games," *Games and economic behavior*, vol. 14, no. 1, pp. 124-143, 1996.

[37] L. E. Blume, "The statistical mechanics of strategic interaction," *Games and economic behavior*, vol. 5, no. 3, pp. 387-424, 1993.

[38] H. Mahboubi, K. Moezzi, A. G. Aghdam, and K. Sayrafian-Pour, "Distributed sensor coordination algorithms for efficient coverage in a network of heterogeneous mobile sensors,"

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-09-06]