



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Qualitative Evaluation of Clusters in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic

Peyman Neamatollahi*

1. Computer Engineering Department, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University.

*Corresponding Author: p.neamatollahi@hsu.ac.i

PAPER INFO

Paper history:

Received: 07 June 2022

Revised: 15 December 2022

Accepted: 12 February 2023

Keywords:

Clustering,
Fuzzy logic,
Energy efficiency
Network lifetime,
Sensor network.

ABSTRACT

In most applications of wireless sensor networks, it is not possible to charge the nodes' batteries, so the protocols designed for these networks must be as energy-efficient as possible. Clustering is one of the main approaches to designing energy-efficient and scalable protocols for wireless sensor networks. The use of clusters reduces the communication overhead caused by data transmission as well as energy consumption and wave interference between nodes. Despite the importance of clustering in wireless sensor networks, no criteria have yet been proposed to evaluate the quality of clusters derived from clustering algorithms. This paper defines several criteria for evaluating the quality of clusters formed in different clustering protocols. Then, these criteria are combined using fuzzy logic. With the help of the resulting fuzzy criterion, the quality of clusters formed in different clustering algorithms can be better compared. Finally, the correctness and feasibility of this fuzzy evaluation criterion have been verified by simulating three applied protocols and comparing the metrics evaluation results with what is actually happening. © 2013 Published by Semnan University Press. All rights reserved.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27404.2289>

How to cite this article:

Neamatollahi, P. (2023). Qualitative Evaluation of Clusters in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic. Journal of Modeling in Engineering, 21(73), 93-102. doi: 10.22075/jme.2023.27404.2289

ارزیابی کیفی خوشه‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از منطق فازی

پیمان نعمت‌الهی*

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳</p>	<p>در اغلب کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم امکان شارژ کردن باتری گره‌ها وجود ندارد، بنابراین پروتکل‌های طراحی شده برای این شبکه‌ها باید حتی المقدور انرژی-کارآمد باشند. خوشه‌بندی، یکی از رویکردهای اصلی برای طراحی پروتکل‌های انرژی-کارآمد و مقیاس‌پذیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. استفاده از خوشه‌ها سربار ارتباطی ناشی از ارسال داده‌ها و در نتیجه مصرف انرژی و تداخل امواج بین گره‌ها را کاهش می‌دهد. علی‌رغم اهمیت خوشه‌بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تاکنون معیارهایی برای ارزیابی کیفیت خوشه‌های حاصل از الگوریتم‌های خوشه‌بندی ارائه نشده است. در این مقاله، پس از ارائه چندین معیار برای ارزیابی کیفیت خوشه‌های تشکیل شده در پروتکل‌های خوشه‌بندی مختلف، این معیارها با استفاده از منطق فازی ترکیب می‌شوند. با کمک معیار فازی حاصل بهتر می‌توان کیفیت خوشه‌های تشکیل شده در الگوریتم‌های مختلف خوشه‌بندی را با هم مقایسه کرد. در پایان، درستی و امکان‌پذیری بودن این معیار ارزیابی فازی، با شبیه‌سازی سه پروتکل کاربردی و مقایسه نتایج ارزیابی معیارها با آنچه در واقعیت اتفاق افتاده است صحت سنجی می‌شود.</p>
<p>واژگان کلیدی: خوشه‌بندی، منطق فازی، کارآمدی انرژی، طول عمر شبکه، شبکه حسگر بی‌سیم.</p>	

۱- مقدمه^۱

پیشرفت‌های اخیر در زمینه الکترونیک و مخابرات بی‌سیم، توانایی طراحی و ساخت حسگرهایی با توان مصرفی پایین، اندازه کوچک، قیمت مناسب و کاربردهای گوناگون را بوجود آورده است. این حسگرهای کوچک که توانایی انجام اعمالی چون دریافت اطلاعات مختلف محیطی بر اساس نوع حسگر، پردازش و ارسال آن اطلاعات را دارند، موجب پیدایش ایده‌ای برای ایجاد و گسترش شبکه‌هایی موسوم به شبکه‌های حسگر بی‌سیم شده‌اند. این شبکه‌ها که کنترل مطمئن از راه دور را فراهم می‌کنند، اساساً شبکه‌های جمع-آوری داده هستند و کاربر نهایی نیازمند توصیف سطح بالا از محیطی است که حسگرها در آن قرار دارند [۱]. در این شبکه‌ها معمولاً امکان شارژ باتری گره‌ها وجود ندارد، بنابراین پروتکل‌های به کار رفته باید انرژی-کارآمد باشند

[۲]-[۴]. خوشه‌بندی [۵]، یکی از رویکردهای اصلی برای طراحی پروتکل‌های انرژی‌کارآمد و مقیاس‌پذیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم است باشند [۶]-[۸]. استفاده از خوشه‌ها سربار ارتباطی را کاهش داده و در نتیجه مصرف انرژی و تداخل امواج بین گره‌ها را کاهش می‌دهد. در بسیاری از کاربردها، ساماندهی خوشه یک راه منطقی برای گروه‌بندی کردن گره‌های نزدیک به هم به منظور استفاده از داده‌های مرتبط و حذف داده‌های افزونه است. از طریق تجمیع^۲ و ترکیب^۳ داده‌های گره‌ها در سرخوشه حجم کلی داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه بطور قابل توجهی کاهش یافته و در مصرف انرژی و منابع شبکه صرفه‌جویی می‌شود باشند [۹]-[۱۱].

بیشتر الگوریتم‌های خوشه‌بندی از دو تکنیک استفاده می‌کنند که عبارتند از انتخاب سرخوشه‌های با انرژی بیشتر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: p.neamatollahi@hsu.ac.ir
 استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری.

² Aggregation

³ Fusion

می‌شود. این دسته از راه‌حل‌ها عمدتاً توزیع شده نیستند و معمولاً الگوریتم مربوطه را بصورت متمرکز اجرا می‌کنند. در این مقاله، ابتدا چندین معیار برای سنجش کیفی خوشه-بندی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیان شده که عبارتند از: مرکزیت سرخوشه در خوشه، توزیع سرخوشه‌ها در محیط، بار خوشه، و نهایتاً عضویت گره‌ها در نزدیک‌ترین سرخوشه. سپس، این معیارها را با استفاده از منطق فازی ترکیب کرده و یک معیار فازی ارائه می‌شود تا ملاکی برای سنجش کیفیت خوشه‌های ایجاد شده در الگوریتم‌های مختلف باشد. در نهایت، این مقاله با انجام شبیه‌سازی روی چندین پروتکل به تحلیل و اعتبارسنجی معیارهای ارائه شده می‌پردازد. هرچه این پروتکل‌ها با معیارهای خوشه‌بندی همخوانی بیشتری داشته باشند خوشه‌های بهتری شکل می‌گیرند و در نتیجه به افزایش طول عمر شبکه کمک خواهد کرد. به عبارت دیگر، هرچه مقدار معیار فازی برای یک پروتکل بزرگتر باشد، آن پروتکل خوشه‌های بهتری ایجاد می‌کند و در نتیجه طول عمر بیشتری در قیاس با سایر پروتکل‌ها دارد.

ادامه مقاله شامل بخش‌های زیر است: در بخش ۲ به معرفی سه پروتکل می‌پردازیم که در شبیه‌سازی به کار رفته‌اند، بخش ۳ معیارهای ارزیابی خوشه‌ها را بیان می‌کند، بخش ۴ معیار فازی را توصیف می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ ارائه شده است و در پایان مقاله نتیجه‌گیری آمده است.

۲- معرفی پروتکل‌های مورد استفاده

۲-۱- پروتکل LEACH

این پروتکل خوشه‌ها را با استفاده از یک الگوریتم توزیع‌شده تشکیل می‌دهد که در آن، گره‌ها بدون هیچ کنترل متمرکزی و به طور مستقل برای سرخوشه شدن تصمیم می‌گیرند. با چرخش تصادفی مکان سرخوشه‌ها بار انرژی سرخوشه بودن بین گره‌ها تقسیم می‌شود و در نتیجه طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. در ابتدا، هر گره بر اساس درصد سرخوشه‌های پیشنهادی شبکه (که از قبل تعیین شده است) و شماره آخرین دوره‌ای که آن گره سرخوشه شده است تصمیم می‌گیرد که آیا برای دوره جاری سرخوشه بشود یا نه. این تصمیم‌گیری برای هر گره به این صورت است که یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ انتخاب می‌کند. اگر آن عدد از مقدار آستانه‌ای کمتر باشد گره برای دوره جاری سرخوشه می‌شود. به طور خلاصه، مزایای پروتکل LEACH [12] عبارتند از:

و چرخش سرخوشه‌ها بطور متناوب برای تعدیل مصرف انرژی گره‌های حسگر در شبکه. عملیات این پروتکل‌ها غالباً به دوره‌هایی تقسیم می‌شود. هر دوره شامل فاز راه‌اندازی و فاز حالت پایدار است که فاز راه-اندازی در شروع هر دوره انجام می‌شود. مکانیزم چرخش متناوب سرخوشه‌ها اولین بار در پروتکلی با عنوان LEACH [۱۲] ارائه شد که در آن، چرخش‌ها تصادفی و توزیع‌شده انجام می‌شد. در الگوریتم خوشه‌بندی توزیع‌شده‌ای بنام HEED [۱۳] معیارهای انرژی باقی‌مانده گره و هزینه ارتباطی برای گزینش سرخوشه‌ها در نظر گرفته شد که در آن، سرخوشه‌ها در یک روال تکراری و بصورت احتمالی انتخاب می‌شوند. از طرفی HEED-NPF [۱۴] تلاش دارد بوسیله ترکیب دو پارامتر با منطق فازی [۱۵]، [۱۶] طول عمر شبکه (بازه زمانی که گره‌ها انرژی لازم برای انجام کارهایشان را دارند) را بهبود بخشد.

برخی الگوریتم‌ها عمل خوشه‌بندی مجدد را بگونه‌ای زمانبندی می‌کنند که سربار عملیات خوشه‌بندی کاهش یافته و از این طریق طول عمر شبکه افزایش یابد. بعنوان نمونه، الگوریتم DHRP [۱۰] انجام خوشه‌بندی سراسری را زمانبندی می‌کند و برای اینکار میزان انرژی باقیمانده گره‌ها را ملاک عمل قرار می‌دهد. بدین صورت که هرگاه درصد از پیش تعیین شده‌ای از انرژی سرخوشه‌ای تخلیه شد، گره‌های شبکه آماده انجام خوشه‌بندی در ابتدای دوره بعدی خواهند شد. الگوریتم دیگری به نام HCSP [۱] عمل خوشه‌بندی را بصورت سلسله‌مراتبی زمانبندی می‌کند، یعنی با کمک این الگوریتم سعی شده خوشه‌بندی تا حد ممکن بصورت محلی انجام شود و فقط در شرایط خاص خوشه‌بندی سراسری انجام می‌گیرد. این موضوع می‌تواند به کاهش قابل توجه میزان اتلاف انرژی گره‌ها در زمان خوشه‌بندی بیانجامد. نویسندگان در [۱۷] تلاش کردند از منطق فازی برای تعیین زمان خوشه‌بندی مجدد استفاده کنند. در این الگوریتم، پس از هر عمل خوشه‌بندی، زمان خوشه‌بندی بعدی مشخص گردیده و از این طریق در مصرف انرژی گره‌ها صرفه‌جویی می‌شود.

از یک دیدگاه دیگر، در موضوع خوشه‌بندی گره‌های حسگر الگوریتم‌هایی وجود دارند که بجای استفاده از الگوریتم‌های مکاشفه‌ای از ابزارهایی مانند شبکه عصبی و یا الگوریتم‌های فرامکاشفه‌ای استفاده می‌کنند. بعنوان نمونه، در مقاله [۴] از ابزار شبکه عصبی برای انجام خوشه‌بندی بهتر استفاده

درون خوشه می‌بایست سطح توان ارسال یکسانی داشته باشند).

اگر این سطح توان برای گره‌های خوشه یکسان باشد، هزینه ارتباطی می‌تواند با درجه گره (برای توزیع بار میان سرخوشه‌ها) و یا معکوس درجه گره (برای ایجاد خوشه‌های متراکم) متناسب باشد. این بدین معنی است که گره، عضو سرخوشه با کمترین درجه می‌شود اگر نیاز به توزیع بار میان سرخوشه‌ها باشد، یا گره، عضو سرخوشه با بیشترین درجه می‌شود تا خوشه‌های ایجاد شده متراکم باشند. حالتی را فرض کنید که سطوح توان متغیر برای ارتباطات درون خوشه مجاز باشد. $MinPwr_i$ حداقل سطح توان مورد نیاز برای گره v_i است، تا بتواند با یک سرخوشه (مثلاً u)، ارتباط برقرار کند. $AMRP$ ، بعنوان میانگین حداقل سطوح توان مورد نیاز برای تمام M گره درون خوشه بمنظور ارتباط با u در نظر گرفته شده است:

اگر هر گره مجاز به انتخاب سطح مناسبی از توان برای دسترسی به سرخوشه خود باشد، $AMRP$ تخمین خوبی را از هزینه ارتباطی ارائه می‌دهد.

بطور خلاصه می‌توان گفت که این پروتکل از دو فاز راه‌اندازی و حالت پایدار تشکیل شده است و ویژگی‌های زیر را دارد:

- انتخاب سرخوشه در یک روال تکراری انجام می‌شود.
- یک سرخوشه انتخاب شده فقط همسایه‌های خود را مطلع می‌کند.
- در انتهای فاز راه‌اندازی، گره‌های سرخوشه زیرساختی را در شبکه ایجاد می‌کنند تا داده‌ها را از طریق مسیرهای چند گامی^۴ روی سایر گره‌های سرخوشه به ایستگاه پایه ارسال کنند. مزایای پروتکل HEED به شرح زیر می‌باشد:
- احتمال این که دو گرهی که در حوزه ارسالی هم هستند هر دو سرخوشه بشوند، کم است. بر خلاف LEACH، توزیع سرخوشه‌ها در HEED بخوبی انجام می‌شود.
- برای یک حوزه ارسالی مشخص شده برای گره، احتمال انتخاب سرخوشه می‌تواند بگونه‌ای تنظیم شود که اتصالات برون خوشه‌ای^۵ را تضمین کند.

- گره‌ها بصورت تصادفی و با نرخ ثابت می‌میرند.
- LEACH طول عمر شبکه را نسبت به پروتکل‌های پیشین افزایش می‌دهد.
- LEACH کاملاً توزیع شده است و نیاز به داشتن اطلاعات سراسری از کل سیستم نیست.
- علی‌رغم مزایای ذکر شده، محدودیت‌های پروتکل LEACH عبارتست از:
- اگرچه مصرف انرژی یک مسأله حیاتی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است، LEACH انرژی باقی‌مانده گره‌ها را در انتخاب سرخوشه‌ها در نظر نمی‌گیرد.
- ممکن است برخی سرخوشه‌ها در نزدیکی یکدیگر قرار بگیرند و بدین معنی است که سرخوشه‌ها بخوبی در شبکه توزیع نشده‌اند.
- سرخوشه‌ها باید مستقیماً داده‌های خوشه را به ایستگاه پایه ارسال کنند که انرژی زیادی مصرف می‌شود. اگر شبکه ابعاد بزرگی داشته باشد این فرض کاربردی نیست، زیرا ممکن است ایستگاه پایه به دلایلی نظیر وجود موانع، مستقیماً توسط گره‌ها در دسترس نباشد، پس شبکه توسعه‌پذیر نیست.

۲-۲- پروتکل HEED

این الگوریتم با LEACH در نحوه انتخاب سرخوشه‌ها متفاوت است. انتخاب سرخوشه‌ها در HEED [۱۳] بصورت تکراری انجام می‌شود. یک سرخوشه منتخب تنها به همسایگانش اعلام وضعیت می‌کند در حالی که در LEACH کل گره‌های شبکه از سرخوشه شدن یک گره مطلع می‌شوند.

انتخاب سرخوشه بر اساس دو پارامتر صورت می‌گیرد: پارامتر اول برای انتخاب احتمالی مجموعه اولیه سرخوشه‌ها و پارامتر دوم برای انتخاب سرخوشه‌های نهایی. پارامتر اول بر اساس انرژی باقی‌مانده گره است. بنابراین، گره با انرژی باقی‌مانده بیشتر، شانس بیشتری برای سرخوشه شدن دارد. پارامتر دوم، بر اساس هزینه ارتباطی خوشه است. این هزینه ارتباطی تابعی از خصوصیات خوشه مانند اندازه خوشه است و این که آیا سطوح توان ارسال متغیر، مجاز است یا نه (یعنی آیا هر گره داخل خوشه می‌تواند با کمترین سطح توان ارسال خود با سرخوشه ارتباط برقرار کند یا تمام گره‌های

¹⁶ Inter-cluster

⁴ Multi hop

می‌یابد. این مسأله باعث مقیاس‌پذیری^۶ بیشتری در تعداد گره‌ها خواهد شد.

از طرفی توزیع خوب سرخوشه‌ها در محیط باعث می‌شود که داده‌های دریافت شده از سایر گره‌ها در سرخوشه با هم افزونگی داشته و الگوریتم‌های تجمیع و ترکیب بتوانند اندازه‌های نهایی داده‌های ارسالی به ایستگاه پایه را به شکل قابل توجهی در سرخوشه کاهش دهند. اتلاف منابع شبکه ناشی از تداخل امواج سرخوشه‌ها با هم کاهش می‌یابد.

همچنین در پروتکل‌هایی که از مسیریابی چندگامی برای ارسال داده‌های تجمیع شده سرخوشه‌ها به ایستگاه پایه استفاده می‌کنند توزیع هر چه بهتر سرخوشه‌ها می‌تواند باعث ایجاد تعداد پرش‌های بیشتر و در نتیجه کاهش بیشتر انرژی مصرفی برای تبادل پیام‌ها شود.

معیار دیگر مرکزیت (centrality) سرخوشه در خوشه است. هر چه مقدار centrality کمتر باشد بدین معنی است که بطور کلی سرخوشه‌ها بیشتر در مرکز خوشه واقع هستند. هر چه سرخوشه به مرکز خوشه نزدیک‌تر باشد، ارتباط سایر گره‌ها با سرخوشه به مصرف انرژی کمتری نیاز دارد، زیرا مصرف انرژی برای ارسال پیام در این شبکه‌ها با مجذور فاصله میان فرستنده و گیرنده ارتباط مستقیم دارد. بنابراین، هرچه این فاصله کمتر باشد مصرف انرژی گره‌ها برای تبادل اطلاعات با سرخوشه کمتر شده و طول عمر شبکه افزایش می‌یابد.

به علاوه، تداخل امواج بین سرخوشه‌ها کاهش می‌یابد. اگر فرض کنیم که سرخوشه‌ها در مرکز خوشه نباشند این احتمال وجود دارد که سرخوشه‌ها در حوزه یکدیگر قرار گرفته باشند و تداخل امواج بوجود آمده موجب اتلاف منابع شبکه شود.

سومین معیار بار (Load) خوشه است. هر چه مقدار Load کمتر باشد بدین معنی است که گره‌ها بطور یکنواخت‌تری در خوشه‌ها دسته‌بندی شده‌اند. بنابراین توزیع بار بهتری در میان سرخوشه‌ها انجام شده است. توزیع بار بهتر در میان سرخوشه‌ها سبب می‌شود که انرژی سرخوشه‌ها بطور یکنواخت مصرف شده و طول عمر شبکه افزایش یابد.

عضویت گره‌ها در نزدیک‌ترین سرخوشه هم آخرین معیاری است که توصیف می‌شود. هر چه این مقدار بیشتر باشد نشان‌دهنده آن است که درصد بیشتری از گره‌های عادی

محدودیت‌های پروتکل HEED به شرح زیر می‌باشد:

- در HEED، سرخوشه‌های موقت بطور تصادفی بر اساس انرژی باقی‌مانده‌شان انتخاب می‌شوند. بنابراین، HEED نمی‌تواند تضمین کند سرخوشه‌های بهینه‌ای بر اساس انرژی انتخاب کرده است. زیرا اولاً از هزینه ارتباطی به عنوان پارامتر دوم برای انتخاب سرخوشه استفاده کرده و ثانیاً این انتخاب احتمالی است.
- در فاز دوم، بسیاری از پیام‌های cluster_head_msg بصورت غیر ضروری ارسال می‌شوند و در نتیجه سربار ارتباطی زیادی را ایجاد می‌کنند.

۲-۳- پروتکل HEED-NPF

این پروتکل توسعه‌ای بر پروتکل HEED محسوب می‌شود. چهار پیشرفتی که این پروتکل بر پروتکل HEED دارد، عبارتند از:

- انتخاب سرخوشه‌ها بصورت غیر احتمالی و فقط بر اساس معیارها انجام می‌شود.
- هزینه ارتباطی با دو معیار درجه گره و مرکزیت گره در خوشه، توسط منطق فازی محاسبه می‌شود.
- پس از محاسبه هزینه ارتباطی توسط هر گره، نیازی به همه‌پرسی آن نیست. زیرا هزینه ارتباطی در قالب پیام-های cluster_head_msg به گره‌های همسایه ارسال می‌شود.

گره‌ها از کنترل توان برای تغییر مقدار توان ارسالی خود استفاده می‌کنند. بدین معنی که سطوح توان ارسالی از قبل تعیین‌شده‌ای ندارند و بر اساس فاصله توان ارسالی خود را تنظیم می‌کنند.

۳- معیارهای ارزیابی

فرض کنید N گره در شبکه حسگر وجود دارند و از میان آن‌ها، برخی گره‌ها بعنوان سرخوشه انتخاب شده‌اند. در ادامه این بخش برخی معیارها برای ارزیابی کیفیت خوشه بندی شبکه‌های حسگر بی‌سیم توصیف می‌شوند.

اولین معیار توزیع (Distribution) سرخوشه‌ها در محیط است. هر چه مقدار این معیار بیشتر باشد، بدین معنی است که بطور کلی سرخوشه‌ها بهتر در محیط توزیع شده‌اند و هر چه سرخوشه‌ها بهتر در محیط توزیع شده باشند، میانگین فاصله هر گره تا سرخوشه‌اش کمتر شده و بنابراین مصرف انرژی گره‌ها برای ارسال پیام به سرخوشه کاهش

⁶ Scalability

است افزایش یکی باعث کاهش دیگری شود. ادغام پارامترهای مختلف بر اساس قوانین از پیش تعریف شده یکی از کاربردهای مهم منطق فازی است. در این بخش، سیستم فازی بکاررفته برای ترکیب چهار معیار ارائه شده در بخش پیشین، معرفی می‌شود. سیستم فازی ارائه شده مشتمل بر فازی‌ساز^۷، قوانین فازی^۸، موتور استنتاج فازی^۹ (شامل ۸۱ قانون جدول ۱) و یک غیرفازی‌ساز^{۱۰} است. یکی از متداولترین سیستم‌های استنتاج فازی به نام روش مددانی^{۱۱} مورد استفاده قرار گرفته است.

برای بدست آوردن معیار ارزیابی فازی، مجموعه‌های فازی تعریف شده‌اند. متغیرهایی که در قوانین فازی بکار رفته‌اند عبارتند از: Load، Centrality، Distribution و Proximity

(غیرسرخوشه) عضو نزدیک‌ترین سرخوشه‌شان شده‌اند. اگرگرها در نزدیک‌ترین سرخوشه‌شان عضو شوند، مصرف انرژی آن‌ها برای ارسال پیام به‌دلیل نزدیکی به سرخوشه کمتر می‌شود. همچنین، تداخل امواج آن‌ها با گره‌های خوشه‌های دیگر کاهش می‌یابد.

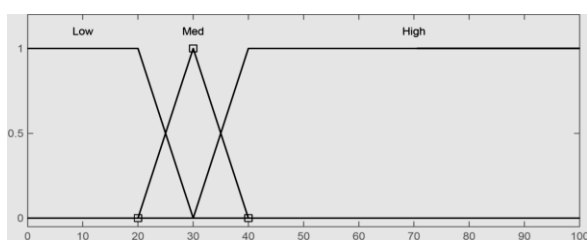
۴- ترکیب معیارهای ارزیابی با منطق فازی

معمولاً پروتکل‌هایی که این معیارها را بطور قابل توجهی برآورده می‌کنند مصرف انرژی کمتر و در نهایت طول عمر شبکه بیشتری دارند. همچنین چنین پروتکل‌هایی قابلیت مقیاس‌پذیری بالاتری نیز دارند.

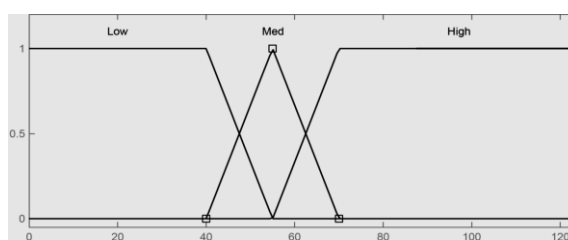
با این حال، بعضاً نمی‌توان تمامی این معیارها را بهینه نگاه داشت زیرا برخی از آن‌ها با هم ناسازگار هستند و ممکن

جدول ۱- قوانین فازی

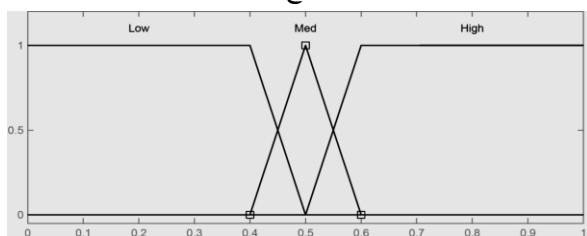
Rule	Distribution	Centrality	Load	Proximity	cost
1-9	High	Low	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Very High (VH)
10-18	High	Medium	Low, Medium, High	High, Medium, Low	High (H)
19-27	High	High	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Rather High (RH)
28-36	Medium	Low	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Medium High (HM)
37-45	Medium	Medium	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Medium (M)
46-54	Medium	High	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Medium Low (LM)
55-63	Low	Low	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Rather Low (RL)
64-72	Low	Medium	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Low (L)
73-81	Low	High	Low, Medium, High	High, Medium, Low	Very Low (VL)



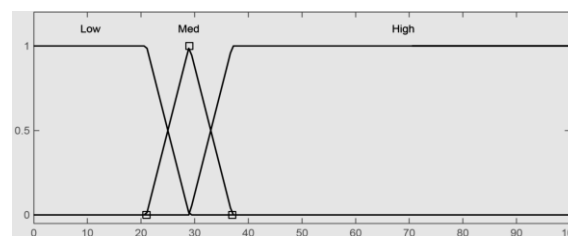
(ج)



(ب)



(د)



(ا)

شکل ۱- مجموعه‌های فازی متغیرهای ورودی: الف) Distribution، ب) Centrality، ج) Load، و د) Proximity

¹⁰ Defuzzifier

¹¹ Mamdani method

⁷ Fuzzifier

⁸ Fuzzy rules

⁹ Fuzzy inference engine

نرم افزار MATLAB انجام شده است.

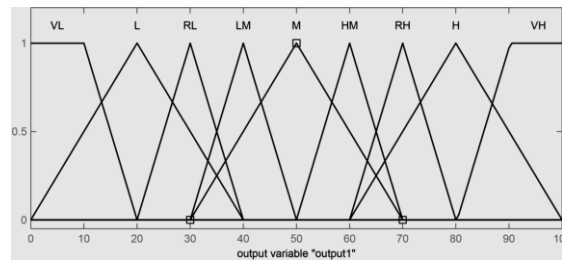
در ابتدا کیفیت خوشه‌های ایجاد شده توسط پروتکل‌های مورد ارزیابی (HEED, LEACH و HEED-NPF) بر اساس معیارهای مختلف تعریف شده و همچنین معیار فازی بررسی شده است. سپس، نشان داده می‌شود که هر پروتکلی در معیارهای ارزیابی ارائه شده برتری دارد، در قیاس با سایرین طول عمر شبکه بیشتری خواهد داشت.

ما در قالب یک آزمایش پروتکل‌ها را با هم مقایسه کردیم. در این آزمایش ۱۰۰ گره بطور تصادفی (اما با توزیع یکنواخت) در محیطی با ابعاد $100\text{m} \times 100\text{m}$ پراکنده‌اند و مرکز اصلی در مختصات (۵۰, ۱۷۵) قرار دارد. نمودارهایی به منظور نمایش معیارهای مورد ارزیابی، تعداد سرخوشه‌ها، تعداد گره‌های زنده در هر دوره و ارزیابی‌های مختلف طول عمر شبکه ارائه شده است. به کمک نتایج این شبیه‌سازی، می‌توان درباره کیفیت خوشه‌بندی پروتکل‌ها اظهار نظر کرد.

۵-۱- معیارهای ارزیابی

در شکل (۳) چهار معیار ارزیابی در مورد پروتکل‌های مورد مقایسه نشان داده شده‌اند. شکل (۳-الف) به بررسی توزیع سرخوشه‌ها می‌پردازد. بخوبی از این شکل پیداست که توزیع سرخوشه‌ها در LEACH بدتر از دو پروتکل دیگر انجام شده است. دلیلش این است که در پروتکل‌های HEED و HEED-NPF سرخوشه‌ها پیام‌های تشکیل خوشه را در محدوده شعاع خوشه ارسال می‌کنند. در حالیکه در پروتکل LEACH، گره‌ها سرخوشه شدنشان را به تمام گره‌های دیگر می‌فرستند. همچنین، در این پروتکل سرخوشه‌ها بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، در نتیجه این احتمال وجود دارد که دو سرخوشه در مجاورت یکدیگر قرار گیرند. بنابراین، در قیاس با دو پروتکل دیگر، LEACH توزیع خوب سرخوشه‌ها در محیط حسگری را تضمین نمی‌کند.

شکل (۳-ب) نشان‌دهنده میزان مرکزیت سرخوشه‌ها در خوشه‌هایشان است. همانطور که از این نمودار پیداست HEED-NPF و HEED بهتر از پروتکل LEACH عمل می‌کنند یعنی سرخوشه‌ها بیشتر در مرکزیت خوشه قرار می‌گیرند، زیرا سرخوشه‌ها پیام‌های تشکیل خوشه را در



شکل ۲- مجموعه‌های فازی متغیر خروجی (معیار فازی).

جدول ۲- مقادیر پارامترهای استفاده شده

مقدار	پارامتر
10 pJ/bit/m^2	ϵ_{fs}
$0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$	ϵ_{mp}
50 nJ/bit	E_{elec}
5 nJ/bit/signal	E_{DA}
13.5 mW	توان مصرفی در بیکاری
$15 \text{ } \mu\text{W}$	توان مصرفی در خواب
75 m	حد آستانه فاصله (d_0)
2 J	انرژی اولیه هر گره
20 sec	بازه زمانی هر دوره
5 frame	اندازه بسته داده
100 byte	اندازه بسته کنترلی
25 byte	

مجموعه‌های فازی متغیرهای ورودی و خروجی در شکل‌های (۱) و (۲) توصیف می‌شوند. هرچه مقدار معیار فازی بیشتر بدین مفهوم است که خوشه‌های بهتری شکل می‌یافتند.

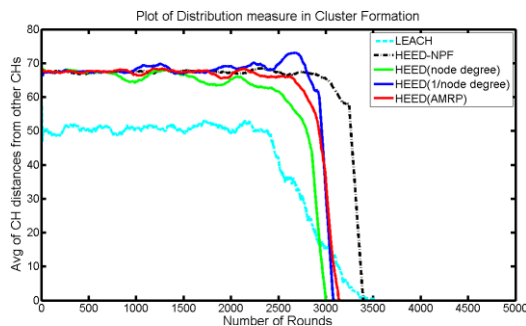
بر اساس متغیرهای فازی مذکور، قوانین فازی جدول ۱ تعریف شده‌اند. بعد از ترکیب نتیجه حاصل از هر قانون، غیرفازی‌سازی یک عدد غیرفازی^۱ را تولید می‌کند. در پیاده‌سازی انجام شده، غیرفازی‌سازی با استفاده از روش مرکز ناحیه^۲ عمل می‌کند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

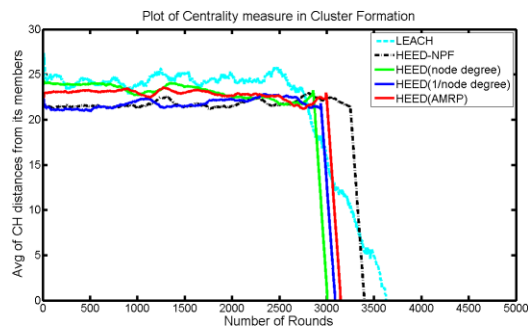
مشابه بسیاری از کارهای شناخته شده و پراچاع در این حوزه (مانند [۱۰]، [۱۸] و [۲۲]) برای مقایسه پروتکل‌های مورد بحث بر مبنای مفروضات جدول ۲، شبیه‌سازی در

² Center of Area

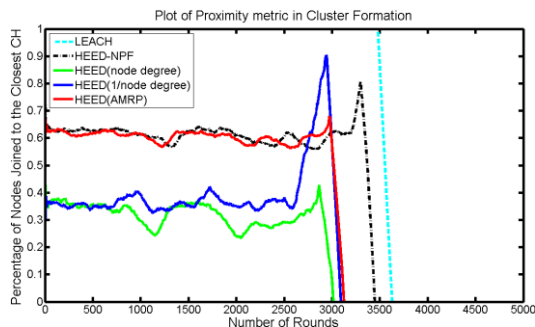
¹ Crisp



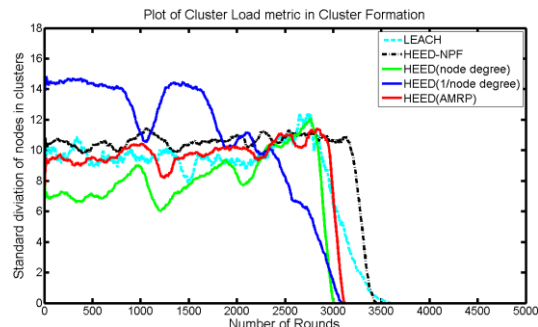
(ب) مرکزیت سرخوشه در خوشه.



(الف) توزیع سرخوشه‌ها در محیط.



(د) نزدیکی گره‌های عضو به سرخوشه‌ها.



(ج) بار کاری تحمیل شده به سرخوشه‌ها

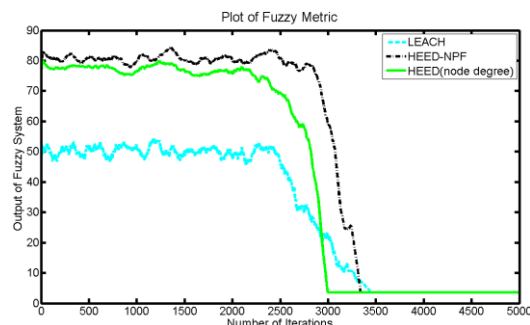
شکل ۳- معیارهای ارزیابی چهارگانه

را در محاسبه معیار انتخاب سرخوشه‌ها در نظر می‌گیرند، این دو پروتکل نیز از سایرین معیار مجاورت بهتری دارند. شکل (۴) معیار فازی حاصل از ترکیب فازی معیارهای چهارگانه را برای سه پروتکل نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده برتری HEED-NPF در قیاس با سایرین است که نشان از تشکیل خوشه‌های بهتر دارد. از آنجائیکه مقادیر معیار فازی برای انواع مختلف تابع هزینه در پروتکل HEED تقریباً برابر بودند یکی از آن‌ها در این شکل نمایش یافته و بقیه حذف شده‌اند.

۵-۲- بررسی درستی معیارهای ارزیابی

در صورتی که پروتکلی به خوبی خوشه‌بندی را انجام دهد، مطمئناً طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. بنابراین، مطابق با معیار فازی که در بخش قبل روی سه پروتکل بررسی شد، HEED-NPF در قیاس با سایر پروتکل‌ها باید طول عمر شبکه بیشتری داشته باشد. در ادامه مطالعه شبیه‌سازی انجام شده، اعتبارسنجی معیار فازی را با استفاده از نمودارهای شکل (۵) انجام می‌دهیم.

شکل (۵-الف) تعداد کل گره‌هایی که در طول عمر شبکه زنده هستند را برای پروتکل‌های مورد مقایسه نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، HEED-NPF از LEACH و HEED طول عمر شبکه بیشتری دارد.



شکل ۴- معیار فازی.

محدوده شعاع خوشه ارسال می‌کنند و همچنین در این دو پروتکل سرخوشه‌ها بخوبی در محیط توزیع شده‌اند.

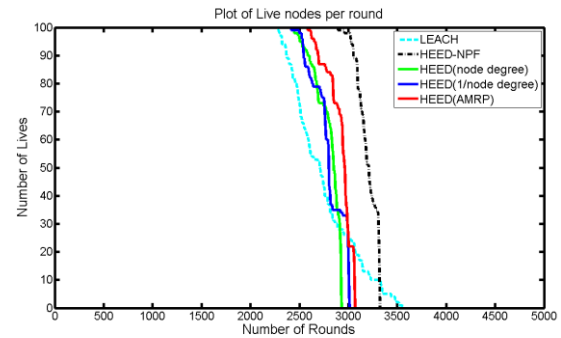
شکل (۳-ج) معیار بار کاری تحمیل شده به سرخوشه‌ها را بررسی می‌کند. شکل گواه این مطلب است که پروتکل HEED-NPF بار کاری یکنواخت‌تری به سرخوشه‌ها تحمیل می‌کند چون خوشه‌های متراکم‌تری (با گره‌های بیشتر) ایجاد می‌کند.

شکل (۳-د) معیار مجاورت را ارزیابی می‌کند، در اینجا LEACH بهتر عمل می‌کند (مقدار برابر یک دارد) زیرا در فرآیند خوشه‌بندی، هر گره عضو نزدیک‌ترین سرخوشه‌اش می‌شود. در حالیکه در دو پروتکل دیگر، هر گره عضو سرخوشه با کمترین هزینه در همسایگی‌اش می‌شود. از آنجائیکه HEED-NPF و HEED (AMRP) عامل فاصله

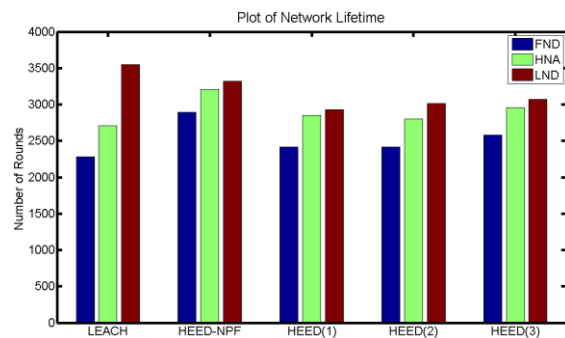
است و گره‌های اندکی زنده هستند. بهمین جهت، اغلب معیارهای FND و HNA مورد توجه هستند. این ارزیابی هم نشان می‌دهد که HEED-NPF در قیاس با سایرین عملکرد بهتری دارد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا چندین معیار ارزیابی (توزیع سرخوشه‌ها، مرکزیت، بار خوشه و مجاورت) برای کیفیت سنجی خوشه‌های تشکیل شده توسط پروتکل‌های خوشه‌بندی مختلف توصیف شدند. سپس معیارها در یک معیار ارزیابی کیفیت خوشه فازی تجمیع شدند. در نهایت، چند پروتکل انرژی-کارآمد متفاوت از لحاظ معیارهای کیفی ارائه شده با هم مقایسه شدند. این موضوع در این پژوهش بوضوح دیده شد که خوشه‌بندی بهتر گره‌های شبکه تاثیر بسزایی در افزایش طول عمر شبکه از طریق کاهش مصرف انرژی گره‌ها دارد. همچنین معیار فازی خوبی می‌تواند پروتکل‌های مختلف را از لحاظ کیفیت خوشه‌های تشکیل شده مورد ارزیابی قرار دهد و نهایتاً انتظار این است که پروتکلی با معیار فازی بهتر طول عمر شبکه بزرگتری نیز داشته باشد. تعریف معیارهای ارزیابی بیشتر می‌تواند دقت معیار فازی را افزایش دهد که بعنوان کار آینده در نظر گرفته شده است. همچنین، در این مقاله تمرکز اصلی بر روی طول عمر شبکه قرار گرفته است در حالیکه بعنوان کار آینده می‌توان اثر کیفیت خوشه‌ها بر میزان از دست رفتن بسته‌ها^۴ یا تحویل داده‌ها^۵ را مورد مطالعه قرار داد.



(الف) گره‌های زنده



(ب) طول عمر شبکه

شکل ۵- بررسی طول عمر شبکه با بکارگیری پروتکل‌های مورد مقایسه.

برای مقایسه دقیق‌تر، FND^1 (زمانی که اولین گره می‌میرد)، HNA^2 (زمانی که نیمی از گره‌ها زنده هستند) و LND^3 (زمانی که آخرین گره می‌میرد) در شکل (۵-ب) بررسی شده است. هرچند LND معیار خوبی برای شبکه نیست چون پیش از این زمان تقریباً شبکه از کار افتاده

مراجع

[1] P. Neamatollahi, S. Abrishami, M. Naghibzadeh, M. H. Yaghmaee Moghaddam, and O. Younis, "Hierarchical Clustering-Task Scheduling Policy in Cluster-Based Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 5, May 2018, pp. 1876–1886.

[۲] قاسم میربابایی رکنی، مسعود رادمهر، علیرضا ذکریازاده، "مدلسازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.

[3] P. Neamatollahi, M. Naghibzadeh, and S. Abrishami, "Fuzzy-Based Clustering-Task Scheduling for Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 20, 2017, pp. 6837–6844.

[4] P.-Y. Kong and Y. Song, "Artificial Neural Network Assisted Sensor Clustering for Robust Communication Network in IoT-based Electricity Transmission Line Monitoring," *IEEE Internet Things J.*, 2022, pp. 1–1.

[۵] فرشاد نژادشاه محمد، "ارائه الگوریتم خوشه‌بندی چندمرحله‌ای در مدل‌سازی ریاضی تولید معادن"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۶، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۲۶۷-۲۷۹.

⁴ Packet loss
⁵ Data delivery

¹ First Node Dies
² Half of Nodes Alive
³ Last Node Dies

- [6] A. S. Rostami, M. Badkoobe, F. Mohanna, H. Keshavarz, A. A. R. Hosseinabadi, and A. K. Sangaiah, "Survey on clustering in heterogeneous and homogeneous wireless sensor networks," *J. Supercomput.*, vol. 74, no. 1, Jan. 2018, pp. 277–323.
- [7] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados, "Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 2, Jan 2013, pp. 551–591.
- [8] X. Liu, "Atypical Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 10, Oct. 2015, pp. 5372–5383.
- [9] C. Lin, G. Han, X. Qi, J. Du, T. Xu, and M. Martinez-Garcia, "Energy-Optimal Data Collection for Unmanned Aerial Vehicle-Aided Industrial Wireless Sensor Network-Based Agricultural Monitoring System: A Clustering Compressed Sampling Approach," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 6, Jun. 2021, pp. 4411–4420.
- [10] P. Neamatollahi, M. Naghibzadeh, S. Abrishami, and M.-H. Yaghmaee, "Distributed Clustering-Task Scheduling for Wireless Sensor Networks Using Dynamic Hyper Round Policy," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 2, Feb. 2018, pp. 334–347.
- [11] R. Dogra, S. Rani, H. Babbar, S. Verma, K. Verma, and J. J. P. C. Rodrigues, "DCGCR: Dynamic Clustering Green Communication Routing for Intelligent Transportation Systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2022, pp. 1–9.
- [12] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 1, no. 4, Oct. 2002, pp. 660–670.
- [13] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 3, no. 4, Oct. 2004, pp. 366–379.
- [14] H. Taheri, P. Neamatollahi, M. Naghibzadeh, and M.-H. Yaghmaee, "Improving on HEED protocol of wireless sensor networks using non probabilistic approach and fuzzy logic (HEED-NPF)," in *2010 5th International Symposium on Telecommunications, IST 2010*, 2010, pp. 193–198.
- [۱۵] حسین ناهید تیتکانلو، رکسانا فکری، "عباس کرامتی، مدلسازی عدم قطعیت در فرایند ارزیابی عملکرد کارکنان مبتنی بر تئوری شواهد و تئوری فازی"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۴۱۱–۴۳۲.
- [16] P. Neamatollahi and M. Naghibzadeh, "Distributed unequal clustering algorithm in large-scale wireless sensor networks using fuzzy logic," *J. Supercomput.*, vol. 74, no. 6, Jun 2018, pp. 2329–2352.
- [17] P. Neamatollahi, M. Naghibzadeh, and S. Abrishami, "Fuzzy-Based Clustering-Task Scheduling for Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 20, Oct 2017, pp. 6837–6844.
- [18] S. H. Kang and T. Nguyen, "Distance Based Thresholds for Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 9, Sep. 2012, pp. 1396–1399.
- [19] V. Pal, G. Singh, and R. P. Yadav, "Balanced Cluster Size Solution to Extend Lifetime of Wireless Sensor Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 2, no. 5, 2015, pp. 399–401.
- [20] M. Zhao, Y. Yang, and C. Wang, "Mobile data gathering with load balanced clustering and dual data uploading in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, no. 4, 2015, pp. 770–785.
- [21] M. Tarhani, Y. S. Kaviani, and S. Siavoshi, "SEECH: Scalable Energy Efficient Clustering Hierarchy Protocol in Wireless Sensor Networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 11, Nov. 2014, pp. 3944–3954.
- [22] V. Krishnaswamy and S. S. Manvi, "Trusted node selection in clusters for underwater wireless acoustic sensor networks using fuzzy logic," *Phys. Commun.*, vol. 47, Aug. 2021, p. 101388.