Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 11, Number 4, Winter 2023, pp. 89-101
Received: 09/13/2022, Revised: 03/19/2023, Accepted: 05/01/2023

Modeling energy consumption in IoT systems using stochastic reward nets

Arman Sanahmadi[1], Mohammad Abdolahi Azgomi[2*] and Shidrokh Goudarzi[3]
1- School of Computer Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2*- School of Computer Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- School of Computing and Engineering, University of West London, London, UK.
[1]arman_sanahmadi@comp.iust.ac.ir, [2*]azgomi@iust.ac.ir, and [3]shidrokh.goudarzi@uwl.ac.uk

Corresponding author address: Mohammad Abdollahi Azgomi, Room 308, School of Computer Engineering, Iran University of Science and Technology, Hengam St., Resalat Sq., Tehran, Iran, Postal Code: 16846-13114.

Abstract- Today, internet of things (IoT) is widely used in various fields, such as health control, smart city, smart buildings, and so on. One of the severe concerns in IoT-based systems is the issue of energy consumption and its management. The IoT-based systems have limited resources. It is also difficult to access them in many situations; so, their energy sources must be appropriately consumed and managed. In order to design and build IoT systems, many factors, such as the usable chips, the type of communication protocols, the timing of data transfer, and so on, directly affect the system's energy consumption. Therefore, in the design phase of these systems, it is necessary to model and evaluate their energy consumption and their compliance with the requirements. In this paper, a stochastic reward nets (SRN) model is introduced for modeling and quantitative evaluation of energy consumption in IoT-based systems. In this method, first the modeling of the energy source and the influencing factors are explained, then the entire system is modeled using these basic models, Then, by changing the configuration of the system, the influencing factors on energy consumption are studied and measured, and the most suitable configuration is selected using the results. This method can lead to a significant reduction in the costs of a system before its operation. Using this model, a case study has been investigated and the effects of various factors, such as the number of nodes connected to the cluster head, the existence of sleep/wake mode, and different transmission rates on system performance and energy consumption are investigated. In this paper the effect of the system configuration on the amount of energy consumption has been evaluated and it has been shown that the packet delay increases with the increase in the number of nodes connected to the cluster head, and in order to reduce the number of packets in the buffer by 75% and reduce the end-to-end delay of the packets, a transmitter with a transmission rate of 0.037 should be used.

Keywords- Internet of things, power management, modeling and evaluation, stochastic reward nets

مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱ ، صفحه ۸۹-۱۰۱
دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

مدل‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های اینترنت اشیاء با استفاده از شبکه‌های پاداش تصادفی

آرمان سان احمدی[۱]، محمد عبداللهی ازگمی*[۲]، شیدرخ گودرزی[۳]
۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
*۲- دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
۳- دانشکده رایانش و مهندسی، دانشگاه لندن غربی، لندن، انگلستان.
[1]arman_sanahmadi@comp.iust.ac.ir, [2*]azgomi@iust.ac.ir, [3]shidrokh.goudarzi@uwl.ac.uk

* نشانی نویسنده مسئول: محمد عبداللهی ازگمی، تهران، میدان رسالت، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی کامپیوتر، اتاق ۳۰۴.

چکیده- سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT)، امروزه در حوزه‌های مختلفی اعم از کنترل سلامت، شهر هوشمند، ساختمان‌های هوشمند و غیره کاربرد فراوانی دارند. یکی از نگرانی‌های جدی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء، مصرف انرژی و نحوه مدیریت آن است. این سیستم‌ها منابع محدودی در اختیار داشته و در بسیاری از مواقع دسترسی به آنها دشوار است، بنابراین لازم است که منبع انرژی آنها به‌طور بهینه مصرف و مدیریت شود. به‌منظور طراحی و ساخت سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء موارد متعددی مانند تراشه‌های قابل استفاده، نوع پروتکل ارتباطی، زمان‌بندی انتقال داده‌ها و غیره نیاز به تصمیم‌گیری مناسب دارد که بر مصرف انرژی سیستم تأثیر مستقیم می‌گذارد، بنابراین، در فاز طراحی این سیستم‌ها، مدل‌سازی و ارزیابی مصرف انرژی و مطابقت آنها با نیازمندی‌ها امری لازم و ضروری است. در این مقاله یک مدل مبتنی بر شبکه‌های پاداش تصادفی (SRNs) برای مدل‌سازی و ارزیابی کمّی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء پیشنهاد شده است. در این روش ابتدا چگونگی مدل‌سازی منبع انرژی و عوامل تأثیرگذار بر روی آن توضیح داده شده است سپس با استفاده از این مدل‌های پایه، به مدل‌سازی کل سیستم مورد مطالعه پرداخته می‌شود، در نهایت با تغییر پیکربندی سیستم، به مطالعه عوامل تأثیرگذار بر مصرف انرژی و اندازه‌گیری آنها پرداخته می‌شود و با استفاده از نتایج، مناسب‌ترین پیکربندی انتخاب می‌شود. این روش می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های یک سیستم قبل از عملیاتی نمودن آن شود. در این مقاله یک مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر عوامل مختلف، نظیر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه، وجود حالت خواب/بیداری و نرخ ارسال‌های متفاوت بر عملکرد سیستم و مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع تأثیر پیکربندی سیستم بر روی میزان مصرف انرژی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که با افزایش تعداد گره‌های متصل به سرخوشه، به‌منظور کاهش ۷۵ درصدی تعداد بسته‌های داخل بافر و کاهش تأخیر انتها به انتهای بسته‌ها، باید از فرستنده با نرخ ارسال ۰.۰۳۷ استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اینترنت اشیاء، مدیریت انرژی، مدل‌سازی، ارزیابی کمّی، شبکه‌های پاداش تصادفی

۱- مقدمه

در دنیای امروز میلیاردها دستگاه و سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء[۱] (IoT) وجود دارد و این تعداد روز به‌روز بیشتر خواهد شد. یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء از گره‌های متفاوتی تشکیل شده است که این گره‌ها معمولاً از طریق یک پروتکل سبک‌وزن[۲] با همدیگر در ارتباط هستند. با توجه به پیشرفت فناوری‌هایی همچون شبکه نسل پنجم (5G) و افزایش تعداد گره‌ها، بحث

مدیریت داده‌ها و انرژی در این سیستم‌ها به چالش اصلی تبدیل شده است [۱]. سیستم‌های IoT در حوزه‌های مختلفی همچون کنترل سلامت، شهر هوشمند، خانه هوشمند و غیره کاربرد فراوانی دارند و اکثر این کاربردها معمولاً وابسته به یک منبع انرژی[۳] محدود یا غیرقابل اعتماد است که این مسئله نشان می‌دهد مدیریت مصرف انرژی در این سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲].

کارکرد یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌تواند به این صورت باشد که به صورت قابل اطمینان و بر روی یک بستر قابل اطمینان داده‌ها را جمع‌آوری کند و سپس این داده‌ها را به یک گره مرکزی برای جمع‌آوری داده‌ها و پردازش داده‌ها ارسال کند و گره مرکزی بر اساس پردازش داده‌ها تصمیماتی برای انجام فعالیت‌هایی در محیط می‌گیرد. در بحث میزان مصرف انرژی یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء، عوامل مختلفی اعم از، نوع سخت‌افزار استفاده‌شده، نرم‌افزار استفاده‌شده، پروتکل ارتباطی انتخاب‌شده و غیره تأثیرگذار خواهد بود و این عوامل باید به صورت توأمان درنظر گرفته شود؛ چرا که تغییر در یکی از عوامل، سایر عوامل را نیز تحت تاثیر قرار خواهد داد. سیستم‌های IoT برای انجام کارهای مختلف مانند پردازش داده‌ها، ارسال/دریافت داده‌ها و تغییر وضعیت کاری به انرژی نیاز دارند که البته بیشترین انرژی مصرفی مربوط به بخش ارسال و دریافت داده‌ها است. بنابراین به منظور مدیریت انرژی یک سیستم IoT ابتدا باید به شناسایی نقاط مصرف انرژی و لحاظ کردن این نقاط در ارزیابی و مدیریت انرژی پرداخت. [۱][۳].

یکی دیگر از مفاهیم مورد توجه در حوزه مدیریت مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء. حالت‌های کاری گره در زمان‌های مختلف و شرایط کاری متفاوت گره است. عملکرد گره به این صورت است که دارای حالت‌های عملکردی متفاوتی نظیر خواب، روشن و خاموش، است که این حالت در شرایط مختلف می‌تواند تغییر کند [۴].

با توجه به هزینه‌بر بودن فاز ساخت در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء و دسترسی سخت و ناممکن در بعضی از سناریوها به این سیستم‌ها، یکی از کارهایی که در مرحله طراحی سیستم IoT و قبل از عملیاتی کردن آن باید مورد توجه قرار بگیرد، بحث ارزیابی مدیریت مصرف انرژی است که بسیاری از هزینه‌های سیستم را در محیط عملیاتی می‌تواند کاهش دهد. یکی از راه‌های بررسی و ارزیابی مصرف انرژی در سیستم‌های محاسباتی، استفاده از روش‌های مدل‌سازی صوری و ارزیابی کمّی است [۵][۶] که در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است. در این روش قبل از استفاده از سیستم در محیط عملیاتی، به مدل‌سازی طرح اولیه پرداخته خواهد شد و بررسی می‌شود که آیا سیستم با نیازمندی‌های مورد نیاز از آن تطابق دارد یا خیر. یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از مدل‌سازی، بررسی تغییر پارامترها و تأثیر آن بر عملکرد بخش‌های مختلف سیستم است.

در این مقاله به ارائه یک روش مبتنی بر شبکه‌های پتری برای مدل‌سازی و ارزیابی کمّی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء پرداخته شده است. روش مدل‌سازی بر پایه شبکه‌های پاداش تصادفی (SRNs)[۴] ارائه شده است که این بسط یکی از بسط‌های مهم و منعطف شبکه‌های پتری تصادفی (SPNs)[۵] است.

این مقاله به این صورت سازماندهی شده است: بخش ۲ به بررسی کارهای مرتبط پرداخته شده است. در بخش ۳ مفاهیم پایه توضیح داده شده است. در بخش ۴ روش پیشنهادی توضیح داده شده است. در بخش ۵ مورد مطالعاتی آورده شده است، در بخش ۶ ارزیابی مورد مطالعاتی با روش پیشنهادی ارائه شده است. در نهایت، در بخش ۷ و ۸ مقایسه و نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- کارهای مرتبط

در این بخش، به‌طور مختصر به بررسی کارهای انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی و ارزیابی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء پرداخته شده است.

در مقاله [۷] به مدل‌سازی و ارزیابی یک الگوریتم آگاه از انرژی[۶] با استفاده از مدل TCPN[۷] پرداخته شده است. با استفاده از TCPN تأثیر چگونگی خاموش/روشن شدن گره‌ها در زمان‌های مختلف بر مصرف انرژی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل ارائه شده خاص‌منظوره و برای ارزیابی یک الگوریتم آگاه از انرژی بر پایه بلوتوث[۸] انجام گرفته است.

در مقاله [۸] به ارائه روشی برای مدل‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم[۹] پرداخته شده است. در این مقاله به منظور ارزیابی مصرف انرژی معیارهای مختلفی همچون، وضعیت کاری پردازنده، نحوه ارتباط گره‌ها با یکدیگر، نوع بار کاری گره‌ها و وضعیت کلی سیستم در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده خاص شبکه‌های حسگر بی‌سیم است و یکی از مواردی که در آن در نظر گرفته نشده است عدم مدل‌سازی مؤلفه[۱۰] باطری و نحوه شارژ و تخلیه آن است که بر روی عملکرد سیستم تأثیر مستقیم می‌گذارد.

در مقاله [۹] به مدل‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با در نظر گرفتن توأمان تأخیر شبکه[۱۱] و میزان مصرف انرژی پرداخته شده است. تمرکز روش ارائه شده بر نحوه خاموش/کردن گره‌ها است که در نتیجه آن هم تأخیر شبکه در یک بازه معقول باشد و هم میزان مصرف انرژی سیستم. در این مقاله از مدل GSPN[۱۲] برای مدل‌سازی و ارزیابی استفاده شده است.

در مقاله [۱۰] به مدل‌سازی مصرف انرژی با توجه به مؤلفه‌های شبکه پرداخته شده است. یکی از مشکلات این روش، عدم در نظر گرفتن پارامترهایی همچون کانال ارتباطی و شرایط محیطی است. در مقاله [۱۱] نیز به مدل‌سازی مصرف انرژی و اتلاف بسته[۱۳] پرداخته شده است که در این مقاله نیز وضعیت کانال در نظر گرفته نشده است.

در مقاله [۱۲] به بررسی تأثیر اتلاف بسته بر روی مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته شده است. مدل استفاده شده در این روش مدل DSPN[۱۴] است. در این مقاله فقط تأثیر اتلاف بسته بررسی شده است و سایر عوامل لحاظ نگردیده است.

در مقاله [۵] به مدل‌سازی مصرف انرژی یک سیستم مبتنی بر LPWAN[۱۵] پرداخته شده است در این مقاله از SPN[۱۶] استفاده شده است و تمرکز نویسندگان آن بر روی انرژی مصرفی در زمان ارسال و دریافت داده‌ها با توجه به سایز بسته‌ها است.

در مقاله [۴] به ارزیابی دسترس‌پذیری، کارایی و مصرف انرژی در سیستم های مبتنی بر اینترنت اشیا با استفاده از مدل تحلیلی پرداخته شده است. در این مدل حالت‌های مختلفی همچون خواب/روشن بودن گره، خرابی گره، خرابی کانال ارتباطی در نظر گرفته شده است. همچنین عوامل مختلف مصرف انرژی مانند ارسال بسته، دریافت بسته، روشن بودن و غیره در مدل اعمال شده است. نتایج با استفاده از دو رویکرد مختلف به دست آمده است که عبارتند از روش حل گسترش طیفی و سیستم معادلات خطی همزمان. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از دو روش حل تحلیلی مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی با حداکثر اختلاف کمتر از ۰.۱ درصد دارد. علاوه بر این، با مدل‌های توسعه‌یافته، نشان داده شده است که با استفاده از طرح زمان‌بندی خواب بر حسب تقاضا، می‌توان تا ۷۰ درصد در مصرف انرژی در حالت بیکار صرفه‌جویی کرد.

در مقاله [۱۳] و [۱۴] به ارائه روشی برای مدل‌سازی مصرف انرژی و برداشت انرژی از محیط در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پرداخته شده است. در این مقاله به بررسی عواملی همچون تأثیر برداشت انرژی‌های متفاوت در فصول مختلف پرداخته شده است در مقاله دوم به بررسی وجود حالت خواب دو سطحی با ایجاد تفاوت زمان خواب در روز و شب پرداخته شده است و نشان داده شده است با در نظر گرفتن این عوامل مدل ارائه شده به نتایج دنیای واقعی نزدیک‌تر خواهد شد. در واقع در این مقاله ابتدا یک مدل ساده از سیستم ایجاد شده است، سپس با اضافه کردن جزییات به مدل و تکرار ارزیابی، نتایج مدل‌سازی را به دنیای واقعی نزدیک کرده است که این جزییات شامل اضافه کردن فصول مختلف به مدل و تغییر زمان خواب گره‌ها است.

در مقاله [۱۵] یک چارچوب تحلیلی جهت به دست آوردن مرز پایین مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء که دارای شبکه‌های سلولی هستند ارائه شده است. این مقاله با استفاده از سه مدل هندسی، اثرات منظم بودن شبکه را بر روی مرز مصرف انرژی فرموله می‌کند. اندازه‌گیری‌های تداخل و شبیه‌سازی‌های مونت کارلو برای تأیید اعتبار چارچوب تحلیلی پیشنهادی ارائه شده‌اند، که نتایج نشان می‌دهد عملکرد زیرساخت‌های شبکه فعلی بین دو مدل هندسی شدید محدود می‌شود.

در مقاله [۱۶] به مدل‌سازی مصرف انرژی دستگاه‌های خودران با استفاده از xHPN که یک توسعه از شبکه پتری هیبرید است پرداخته شده است. در این روش به‌جای کمّی‌سازی مصرف و شارژ منبع انرژی از یک مفهوم پیوسته استفاده شده است و نتایج بر روی دستگاه‌هایی در کشور الجزایر با قابلیت شارژ از طریق انرژی خورشیدی ارائه شده است.

در مقاله [۱۷] یک مدل‌سازی بر پایه شبکه‌های پتری تصادفی را برای توصیف مسیر طی شده توسط بسته‌ها برای رسیدن به ایستگاه پایه از هر گره حسگر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد می‌کند. این فرمول حالتی را بررسی می‌کند که در آن شبکه از خوشه‌های ساختار یافته تشکیل شده است و هر خوشه شامل دو رهبر شامل یک سرخوشه و یک جمع‌کننده است که برای مسیریابی بسته ها از مبدا به نقطه پایانی همکاری می‌کنند. هدف این پیکربندی صرفه جویی در انرژی با متعادل کردن آن از طریق شبکه است.

اما ما در ادامه مقاله حاضر، به ارائه یک روشی جامع بر پایه شبکه‌های پاداش تصادفی (SRNs) برای مدل‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌پردازیم. در این مدل مفاهیم، منبع انرژی و عوامل مصرف و شارژ منبع انرژی در ابتدا مدل‌سازی شده است، سپس به مدل‌سازی سیستم و ویژگی‌های

دیگر گره شامل خرابی گره، خرابی کانال و غیره پرداخته شده است، در ادامه با تغییر پارامترهای سیستم به ارزیابی و بررسی معیارهای مختلف سیستم پرداخته شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۳- مفاهیم پایه

در این بخش مفاهیم پایه‌ای مورد استفاده در مقاله به‌طور مختصر مرور می‌شود.

۳-۱- اینترنت اشیاء

مفهوم اینترنت اشیاء (IoT) اولین بار توسط اشتون در سال ۱۹۹۹ ارائه شد. در این تعریف اینترنت اشیاء مجموعه‌ای از اشیاء متصل به هم از طریق RFID[۱۷] است که هر شئ دارای یک هویت منحصر به فرد است. تعریف عمومی اینترنت اشیاء به‌صورت «یک زیرساخت پویا شبکه جهانی که دارای قابلیت خودپیکربندی براساس استانداردها و پروتکل‌های قابل تعامل است؛ اشیاء دارای شناسه و هویت هستند و قادر به استفاده از رابط‌های هوشمند و یکپارچه شدن به عنوان یک شبکه اطلاعاتی هستند.» [۱] .

معمولاً معماری یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء به صورت یک معماری خدمت‌گرا[۱۸] ارائه می‌شود که از چهار لایه تشکیل شده است. هر یک از این چهار لایه عبارتند از [۴]:

- **لایه حسگر**[۱۹]: شامل اشیاء سخت‌افزاری است که وظیفه حس نمودن محیط و جمع‌آوری اطلاعات را دارند. چالش‌های این لایه اندازه شئ، هزینه، مصرف انرژی، ناهمگونی اشیاء و نگهداری است.
- **لایه شبکه**[۲۰]: شبکه باسیم یا بی‌سیمی است که وظیفه برقراری ارتباط میان اشیاء را بر عهده دارد. چالش‌های این لایه بهینه‌سازی مصرف انرژی و تنوع پروتکل‌های مختلف است.
- **لایه خدمت**[۲۱]: این لایه وظیفه ایجاد و مدیریت سرویس‌ها براساس نیازمندی‌های کاربر را برعهده دارد. چالش‌های این لایه ترکیب خدمت‌ها، کشف خدمت و مدیریت اعتماد است.
- **لایه رابط**[۲۲]: این لایه رابطی است که ارتباط بین کاربر و خدمت‌ها را فراهم می‌کند.

۳-۲- شبکه‌های پتری

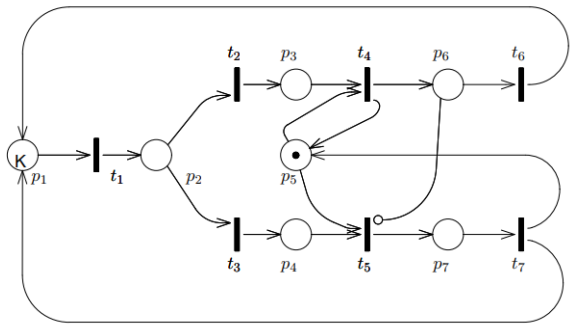
شبکه‌های پتری به صورت گرافیکی توسط یک گراف دوبخشی نمایش داده‌ها می‌شود. این گراف دارای دو نوع گره با نام‌های مکان[۲۳] و گذار[۲۴] است. هر مکان می‌تواند شامل تعدادی نشانه[۲۵] باشد که وضعیت مکان‌ها در هر لحظه وضعیت سیستم را نشان می‌دهد و این وضعیت توسط گذارها می‌تواند تغییر کند [۱۸].

شبکه‌های پتری با استفاده از هشت‌تایی زیر تعریف می‌شود که در ادامه به تعریف هریک از پارامترهای آن پرداخته شده است [۱۹]:

$$M = (P, T, I, OH, PAR, PRED, MP) \qquad (۱)$$

- P یک مجموعه متناهی از مکان‌ها است.
- T یک مجموعه متناهی از گذارها است که $T \cap P = \emptyset$.
- I, O, H یک تابع به صورت $T \to Bag(P)$ است که گذارها را به کیسه‌های مکان‌ها نگاشت می‌کند. برای گذار $t \in T$ این تابع‌ها به‌صورت $\cdot t = \{p \in P : I(t,p) > 0\}$ و $t = \{p \in P : O(t,p) > 0\}$ و $^\circ t = \{p \in P : H(t,p) > 0\}$ مشخص می‌شود. که در این تعریف‌ها I(t)، O(t) و H(t) نشان‌دهنده مجموعه کمان‌های ورودی،خروجی و بازدارنده به گذار t است. و I(t, p)، O(t, p) و H(t, p) نشان‌دهنده عضو p این مجموعه است.
- PAR مجموعه‌ای پارامترها
- PRED مجموعه‌ای از عبارت‌ها که مقادیر پارامترها را محدود می‌کند.
- MP تابعی به صورت $P \to \mathbb{N} \cup PAR$ است که به هر مکان مرتبط می‌شود.

اجزای شبکه پتری در مثال شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: اجزای شبکه پتری [۱۹]

۳-۳- شبکه‌های پاداش تصادفی

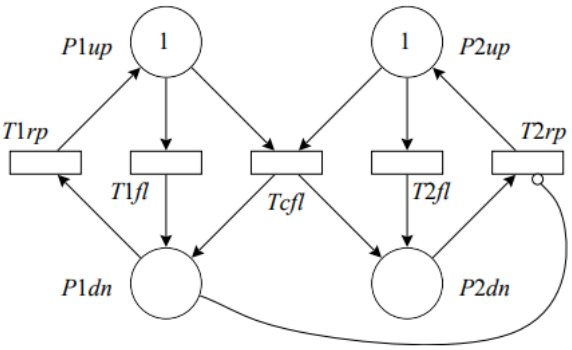
شبکه پاداش تصادفی (SRNs) یک بسط از شبکه‌های پتری تصادفی (SPNs) است که برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌ها استفاده می‌شود [۲۰]. هر گذار توسط یک تابع نگهبان[۲۶] فعال یا غیرفعال می‌شود. گذارها می‌توانند فوری یا زمانی باشند. این صورت‌بندی توسط SPNP پشتیبانی می‌شود [۲۱].

در صورتی که N برابر با مجموعه اعداد طبیعی باشد. یک شبکه پاداش تصادفی به صورت چهارتایی زیر تعریف می‌شود:

$$M = (P, IT, TT, GF) \qquad (۲)$$

- P مجموعه متناهی از مکان‌ها است.
- IT مجموعه متناهی از گذار فوری است.
- TT مجموعه متناهی از گذارهای زمانی است.
- IT مجموعه متناهی از توابع نگهبان است. در صورتی که gf یک عضویی از GF باشد و دارای m ورودی باشد این تابع به صورت $gf: N^m \rightarrow \{true, false\}$ تعریف می‌شود.

مدل ایجاد شده با استفاده از ابزار SPNP قابل حل است. این ابزار به این صورت عمل می‌کند که مدل SRN ورودی را به مدل پاداش مارکوف (MRM)[27] تبدیل می‌کند سپس با حل MRM، معیارهای حالت گذرا، حالت پایدار، تجمعی و حساسیت قابل استخراج است. [۲۲]. در شکل (۳) یک نمونه از مدل SRN نشان داده شده است.



شکل ۲: یک نمونه از مدل SRN [۲۳]

۳-۴- عوامل مصرف انرژی در سیستم

مصرف انرژی در یک گره مربوط به یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء یا شبکه حسگر بی‌سیم در بخش‌های مختلفی ممکن است رخ دهد که در ادامه به توضیح هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

- **ارسال/دریافت بسته:** که برابر است با احتمال فعال بودن فرستنده در میزان مصرف ارسال بسته در نرخ سرویس

$$E_{s/r} = \mathrm{P}_{Active} * Q_{s/r} * \lambda_{r/s} \qquad (۳)$$

- **بیدار شدن گره:** میزان مصرف مورد نیاز برای بیدار شدن گره در نرخ بیدار شدن

$$E_{wakeUp} = Q_{wakeUp} * \lambda_{wakeUp} \qquad (۴)$$

- **بودن در حالت بیکار:** میزان مصرف انرژی در این حالت ضرب در مدت زمانی که گره در این حالت است

$$E_{idle} = Q_{idel} * \lambda_{idel} \qquad (۵)$$

- **بودن در حالت خواب:** میزان مصرف انرژی در این حالت ضرب در مدت زمانی که گره در این حالت است

$$E_{sleep} = Q_{sleep} * \lambda_{sleep} \qquad (۶)$$

- **پردازش بسته:** نرخ پردازش بسته ضرب در میزان مصرف انرژی برای پردازش بسته.

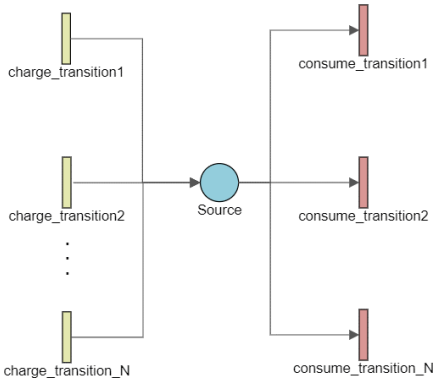
$$E_{Process} = Q_{process} * \lambda_{Process} \qquad (۷)$$

۴- مدل پیشنهادی

به‌منظور مدل‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء، ابتدا به مدل‌سازی منبع انرژی می‌پردازیم.

۴-۱- مدل‌سازی منبع انرژی

برای مدل‌سازی منبع انرژی از عنصر مکان در شبکه‌های پاداش تصادفی استفاده می‌کنیم. هر منبع یک مقدار حداکثر ظرفیت دارد که با C نشان داده‌ها می‌شود. گذارهای مختلف موجود در مدل می‌تواند باعث افزایش/کاهش سطح انرژی موجود در منبع شود. هر نشانه موجود در منبع نشان‌گر یک واحد سطح انرژی است که با توجه به نوع مدل و سیستم این سطح انرژی می‌توانند برابر با X_{ma} باشد. مدل منبع انرژی در شکل (۳) نشان شده است.



شکل ۳: مدل منبع انرژی و نحوه شارژ و خالی شدن آن

۴-۲- مدل‌سازی مصرف و تولید انرژی

به طور کلی دو دسته فعالیت وجود دارد که می‌تواند سطح انرژی موجود در منبع را تحت تأثیر قرار دهد. در هر سیستم فعالیت‌هایی وجود دارد که می‌تواند باعث کاهش سطح انرژی شوند این فعالیت‌ها عبارتند از: گوش دادن به کانال، ارسال بسته، دریافت بسته، بودن در حالت روشن، بیدار شدن و غیره، همچنین فعالیت‌های همچون برداشت انرژی از محیط و شارژ باعث افزایش سطح انرژی خواهد شد. هر یک از این فعالیت‌ها در مدل SRN با یک گذار مدل‌سازی خواهد شد که دو حالت مختلف می‌تواند رخ دهد:

- **گذارهایی که باعث افزایش انرژی سطح منبع خواهند شد:** در این حالت یک یال از گذار به منبع وصل خواهد شد و ضریب این یال برابر با مقدار تأثیرگذاری این گذار بر افزایش انرژی منبع در هر بار شلیک کردن است. همچنین یک تابع نگهبان به گذار اضافه خواهد شد که بررسی می‌کند تعداد نشانه‌های داخل منبع از ظرفیت آن تجاوز نکند.
- **گذارهایی که باعث کاهش انرژی سطح منبع خواهند شد:** در این حالت یک یال از منبع به گذار وصل خواهد شد و ضریب یال برابر با میزان مصرف انرژی در هر بار از شلیک کردن گذار است. گذارهایی که باعث کاهش انرژی سطح منبع می شوند در صورتی که سطح منبع از مقدار نیاز آن گذار کمتر باشد غیرفعال می‌شوند.

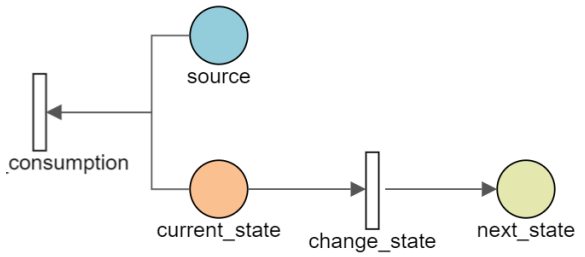
۴-۳- مدل‌سازی حالت‌های سیستمی با مصرف انرژی

بعضی از حالت‌ها در سیستم وجود دارد که بودن سیستم در آن حالت نیازمند انرژی است. این حالت‌ها عبارتند از روشن، خواب و غیره. به‌منظور مدل‌سازی این حالت‌ها مراحل زیر باید انجام پذیرد:

- **گام اول:** ابتدا یک گذار به مدل اضافه می شود که نرخ آن برابر است با نرخ مصرف انرژی سیستم در صورت بودن در آن وضعیت.
- **گام دوم:** یک یال از منبع به گذار وصل می شود و ضریب آن برابر است با میزان مصرف انرژی سیستم در صورت بودن در آن وضعیت.
- **گام سوم:** یک تابع نگهبان اضافه خواهد شد که بررسی می‌کند گذار در صورتی فعال باشد که سیستم دروضعیت مورد نظر قرار گرفته باشد.
- **گام چهارم:** یک گذار دومی اضافه خواهد شد که وظیفه تغییر وضعیت سیستم را در صورت کمبود انرژی را از وضعیت موردنظر به یک وضعیت دیگر را برعهده دارد.
- **گام پنجم:** تابع نگهبان گذار دوم بررسی می‌کند که سیستم در وضعیت مورد نظر باشد و سطح انرژی داخل منبع از مقدار مورد نیاز کمتر باشد.

یک نمونه از نتیجه نهایی مدل بعد از اضافه کردن گذارهای مورد نظر و تغییرات ایجاد شده در مدل در شکل (۴) نشان داده شده است.

سایر بخش‌ها و فعالیت‌های سیستم که دارای وابستگی به منبع نیستند، به صورت عادی مدل‌سازی می‌شوند و به مدل اضافه خواهند شد، این فعالیت‌ها می‌تواند شامل حالت خرابی، کانال، نحوه ارتباط گره‌ها با یک‌دیگر و غیره باشد. در ادامه یک مورد مطالعاتی مورد آزمایش و مدل‌سازی قرار گرفته شده است و نتایج مربوط به آن آورده شده است. ابتدا مورد مطالعاتی و بخش‌های مختلف آن شرح داده شده است سپس مدل SRN مربوط به سیستم آورده شده است.



شکل ۴: یک نمونه از مدل وضعیت سیستم همراه با وابستگی به منبع انرژی

۵- مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی انتخاب شده از مقاله [۴] با مقداری تغییرات برداشته شده است. سیستم انتخابی به این صورت است که یک گره سرخوشه[۲۸] وجود دارد که اطلاعات مورد نیاز را از سایر گره‌ها شامل حسگرها، دریافت کرده سپس این اطلاعات را به گره مرکزی ارسال می‌کند. سیستم مورد نظر دارای دو بخش اصلی است که عبارتند از سرخوشه سیستم و کانال ارتباطی.

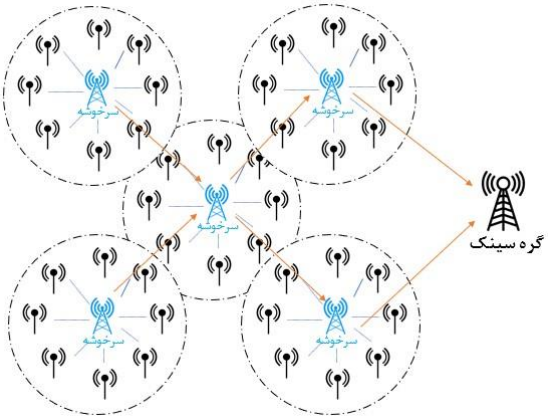
- **کانال ارتباطی:** یکی از مؤلفه‌های اصلی که در سیستم مورد مطالعه وجود دارد کانال ارتباطی بین گره‌ها است. این کانال ارتباطی بستر انتقال پیام‌ها بین تمامی گره‌ها، سرخوشه و مرکز را فراهم می‌کند. کانال ارتباطی دارای دو وضعیت کاری سالم و خراب است. امکان ارتباط و رد و بدل پیام بین گره‌ها در صورتی فراهم است که وضعیت کانال سالم باشد. هروقت کانال دچار خرابی شود، دیگر هیچ پیامی بین گره‌ها رد و بدل نمی‌شود.
- **سرخوشه سیستم:** سرخوشه سیستم، اطلاعات ارسالی از سایر گره‌ها را دریافت می‌کند. گره سرخوشه دارای چهار وضعیت کاری خواب/روشن/خراب/خاموش است که این وضعیت‌ها با نرخ هایی که در ادامه توضیح داده می شود تغییر می‌کند. سرخوشه دارای یک منبع انرژی است که فعالیت‌های دریافت داده، ارسال داده، بیدار شدن، بودن در حالت روشن منجر به مصرف انرژی آن می شود. همچنین منبع انرژی قابل شارژ است که یک گذار باعث شارژ شدن منبع با یک نرخ و مقدار مشخص می‌شود.

شکل مربوط به سیستم مورد نظر در شکل (۵) نشان داده شده است. در اینجا فقط یک خوشه از سیستم همراه با گره مرکزی در نظر گرفته شده است. هر سرخوشه از تعدادی حسگر یا سایر سرخوشه‌ها اطلاعات را دریافت می‌کند که یکسان درنظر گرفتن این دو نوع گره در کلیت مسئله خللی ایجاد نمی‌کند. مدل SRN

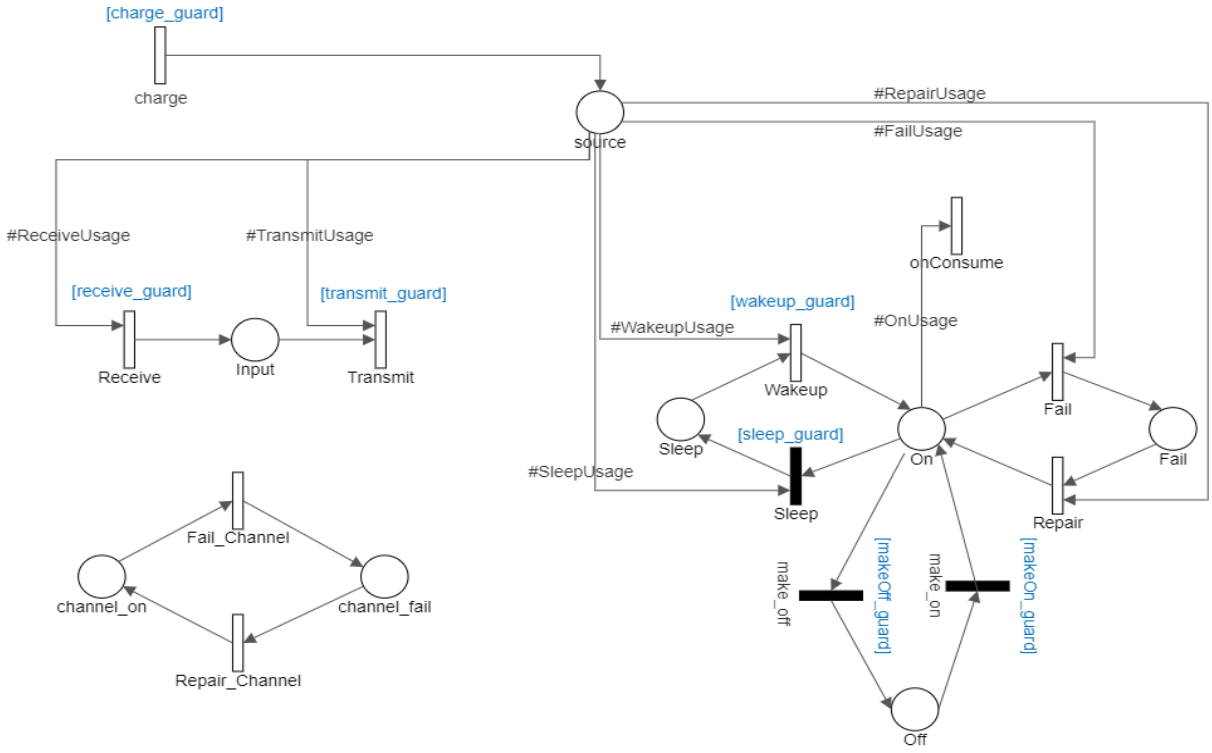
سیستم مورد مطالعه در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین مؤلفه‌های موجود در مدل در جدول (۱) شرح داده شده است

برای درک ساده‌تر مدل و خوانایی آن تعدادی از یال‌های بدیهی نشان داده نشده است. در ادامه وضعیت‌های کاری سرخوشه آورده شده است:

- **روشن:** گره زمانی در این وضعیت قرار دارد که حداقل یک بسته در بافر برای پردازش وجود داشته باشد و همچنین منبع انرژی شارژ کافی برای ارسال این بسته‌ها به گره مرکزی را نیز داشته باشد.
- **خاموش:** هنگامی که منبع انرژی گره خالی شده باشد، به خاطر عدم وجود انرژی گره در وضعیت خاموش قرار می‌گیرد
- **خواب:** گره زمانی در این وضعیت قرار می‌گیرد که هیچ بسته‌ای در بافر برای پردازش وجود نداشته باشد و منبع انرژی دارای شارژ کافی باشد.
- **خراب:** گره هنگامی در این وضعیت قرار می‌گیرد که دچار خرابی شده باشد. هنگامی که گره خراب می‌شود مدتی در این وضعیت می‌ماند تا دوباره تعمیر شود.



شکل ۵: شکل مربوط به سیستم مورد مطالعه [۴]



شکل ۶: مدل SRN مربوط به سیستم مورد مطالعه

جدول ۱: مؤلفه‌های موجود در مدل

نوع مؤلفه	نام مؤلفه	شرح
مکان	source	منبع انرژی گره
	sleep	این مکان نشان دهنده این است که گره در وضعیت خواب است
	On	این مکان نشان دهنده این است که گره در در وضعیت روشن است
	fail	این مکان نشان دهنده این است که گره در در وضعیت خراب است
	input	این مکان بافر ورودی گره را نشان می‌دهد.
	Channel_on	این مکان نشان دهنده این است که کانال ارتباطی سالم است
	Channel_Fail	این مکان نشان دهنده این است که کانال ارتباطی خراب است
گذار	Fail	این گذار حالت گره را از وضعیت روشن به وضعیت خراب شده تغییر می‌دهد
	Repair	این گذار حالت گره را از وضعیت خراب شده به وضعیت روشن تغییر می‌دهد
	Fail_Channel	این گذار حالت کانال را از وضعیت سالم به وضعیت خراب شده تغییر می‌دهد
	Repair_Channel	این گذار حالت کانال را از وضعیت خراب شده به وضعیت سالم تغییر می‌دهد
	charge	این گذار منبع انرژی را شارژ می‌کند.
	Recieve	این گذار بسته ورودی را دریافت می‌کند و در بافر گره قرار می‌دهد. میزان مصرف این گذار RecieveUsage است
	transmit	این گذار بسته موجود در بافر را بر روی شبکه ارسال می‌کند میزان مصرف این گذار RecieveUsage است
	wakeup	این گذار حالت گره را از وضعیت خواب به روشن تغییر می‌دهد میزان مصرف این گذار WakeUpUsage است
	sleep	این گذار حالت گره را از وضعیت روشن به خواب تغییر می‌دهد میزان مصرف این گذار SleepUsage است

موارد آبی رنگ موجود در مدل، توابع نگهبان گذارهای موجود در مدل را نشان می‌دهد که تعاریف هر یک از این توابع نگهبان در جدول (۲) آورده شده است. همچنین مقادیر مربوط به متغیرهای موجود در مدل در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۲: تعاریف توابع نگهبان مدل

نام تابع	تعریف
RecieveGuard	mark("CH_Input") < CH_Buffer_Size && mark("Channel_Work") == 1
sleepGuard	mark("CH_Input") == 0
makeOnGuard	mark("CH_Source") > OnRate && mark("CH_Off") == 1
makeOffGuard	mark("CH_Source") < OnRate && mark("CH_On") == 1
wakeUpGuard	mark("CH_Input") != 0
transmitGuard	mark("CH_On") == 1

۶- آزمایش و نتایج

در این بخش نتایج مربوط به اجرای مدل با سناریوهای مختلف آورده شده است. سناریوهایی که مورد آزمایش قرار گرفته است عبارتند از تأثیر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه، تأثیر وجود حالت خواب بر مصرف انرژی و تأثیر نرخ ارسال بر مصرف انرژی که در ادامه به آن پرداخته شده است. در تمامی آزمایش‌ها از حل حالت پایدار استفاده شده است.

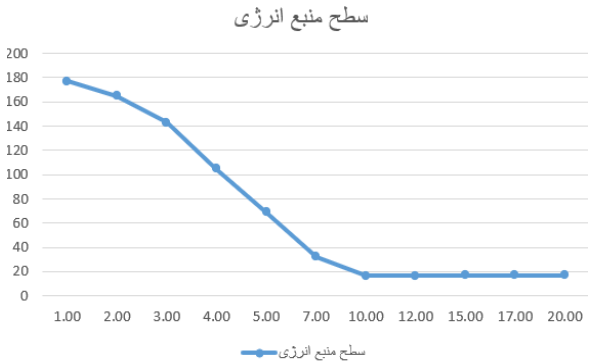
جدول ۳: مقادیر اولیه مربوط به متغیرها

نام متغیر	مقدار
#SensorNode * $2.7E-2$	Receive
$2.7E-2$	Transmit
1	Wakeup
$2.7E-7$	Fail
$1.3E-3$	Repair
$2.7E-7$	ChannelFail
$1.6E-3$	ChannelRepair
$2.7E-2$	ChargeRate
#SensorNode * $2.7E-2$	ReceiveUsage
$2.7E-2$	TransmitUsage
1	WakeUpUsage
$2.7E-7$	ChargeValue

۶-۱- تأثیر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه

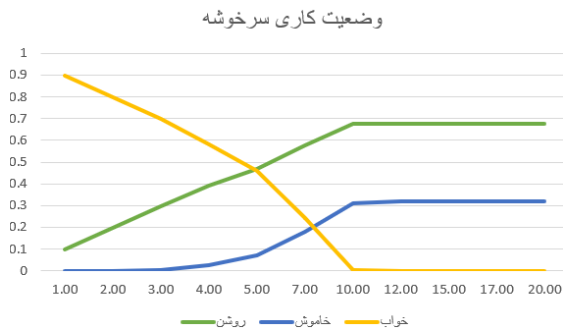
در این بخش تأثیر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه بر معیارهای مختلف که در ادامه توضیح داده شده است بررسی شده است. تعداد گره‌های متصل به سرخوشه از یک گره به ۲۰ گره تغییر پیدا کرده است.. در شکل (۷) سطح منبع انرژی با تغییر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه نشان داده شده است. همان‌طور که

در شکل (۳) مشخص است هنگامی که تعداد گره‌ها از ۱۰ گره بیشتر شود منبع انرژی تقریباً خالی می‌شود و منبع انرژی توانایی تأمین انرژی سیستم را ندارد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که این سیستم با این منبع انرژی و ساختار طراحی، برای تعداد گره‌های بیشتر از ۱۰ گره مناسب نیست.



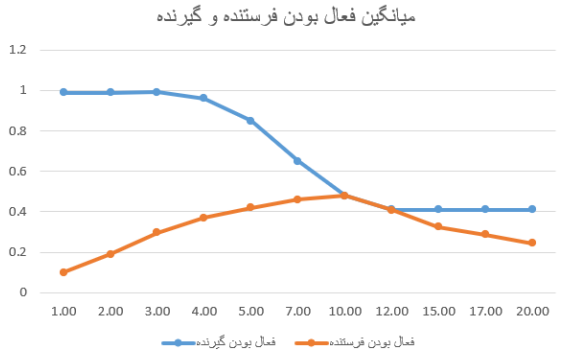
شکل ۷: سطح منبع انرژی با تغییر تعداد گره‌های متصل به سرخوشه

در شکل (۸) وضعیت کاری سرخوشه با توجه به تعداد گره‌های متصل به آن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است در ابتدا سرخوشه حدود ۹۰ درصد مواقع در حالت خواب است ولی با افزایش تعداد گره‌ها به ۱۰ گره و بیشتر این عدد به سمت صفر میل می‌کند. و همچنین با افزایش تعداد گره‌ها، سرخوشه تقریبا در ۷۰ درصد مواقع روشن و ۳۰ درصد خاموش است. دلیل خاموشی گره در این ۳۰ درصد نبود انرژی کافی در منبع انرژی است.



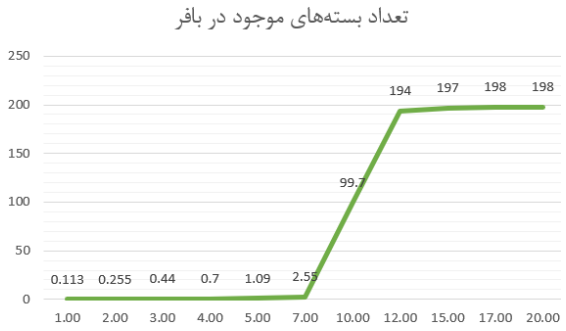
شکل ۸: وضعیت کاری سرخوشه

در شکل (۹) میانگین فعال بودن فرستنده و گیرنده سرخوشه نشان داده شده است. با افزایش تعداد گره‌ها احتمال فعال بودن فرستنده افزایش پیدا می‌کند ولی هنگام افزایش تعداد گره‌ها به ۱۰ و بیشتر این احتمال کاهش پیدا می‌کند و علت آن نبود انرژی کافی در منبع انرژی است. در مورد گیرنده، در ابتدا به طور کامل گیرنده فعال است سپس این مقدار کاهش پیدا می‌کند و بر روی عدد ۰.۴ ثابت می‌شود. علت این کاهش پر بودن بافر ورودی و عدم امکان دریافت بسته جدید است.



شکل ۹: میانگین فعال بودن فرستنده/گیرنده

در شکل (۱۰) تعداد بسته‌های موجود در بافر با افزایش تعداد گره‌های متصل به سرخوشه نشان داده شده است. تعداد بسته‌های موجود در بافر مطابق انتظار با افزایش تعداد گره‌ها و کاهش سطح انرژی منبع افزایش می‌یابد و این افزایش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که بافر به اندازه‌ی ظرفیت آن پر می‌شود. همین اتفاق باعث کاهش میانگین فعال بودن فرستنده در نمودار شکل (۹) شده بود.

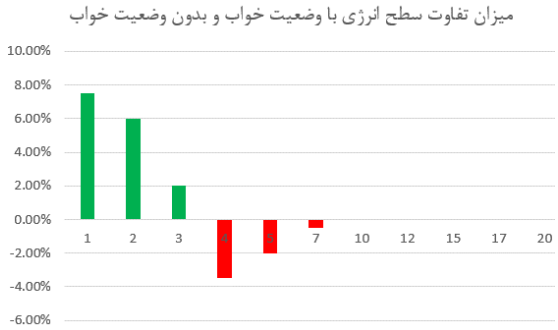


شکل ۱۰: تعداد بسته‌های موجود در بافر

۶-۲- تأثیر وجود حالت خواب

در این بخش تأثیر وجود حالت خواب در مدل دیده شده است. در یک سناریو گره سرخوشه دارای حالت خواب است و هنگامی که بسته‌ای داخل بافر وجود نداشته باشد به حالت خواب می‌رود، و در سناریوی دیگر حالت خواب وجود ندارد و گره تا زمانی که منبع انرژی، توان داشته باشد و گره دچار خرابی نشده باشد در حالت روشن قرار دارد. هنگامی که تعداد گره‌های متصل به سرخوشه کم است بودن حالت خواب از ۸ درصد تا ۲ درصد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، اما با افزایش تعداد گره‌ها به ۴ گره بودن حالت خواب باعث افزایش بیشتر مصرف انرژی نیز می‌شود دلیل این مسئله مصرف انرژی در هنگام بیدار شدن گره

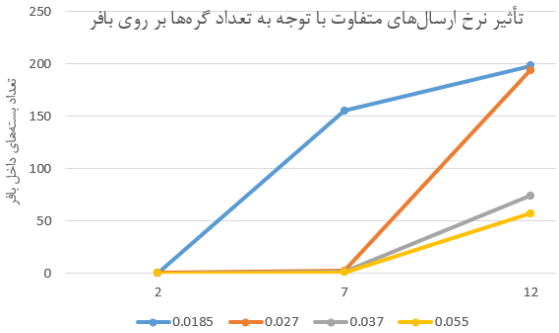
و به خواب رفتن‌های اضافه و بیدار شدن‌های سریع بعد از رسیدن بسته جدید است که باعث می‌شود مصرف انرژی گره نسبت به بیدار نگه داشتن دائم سرخوشه بیشتر باشد. با بیشتر شدن تعداد گره‌ها چون بافر در تمامی دوره زمانی دارای بسته است، عملاً در هر دو حالت گره دائماً روشن است و این اختلاف به سمت صفر میل می‌کند. نمودار مربوط به این سناریو در شکل (۱۱) نشان شده است.



شکل ۱۱: میزان تفاوت سطح انرژی با وضعیت خواب و بدون وضعیت خواب با توجه به تعداد گره‌های متصل به سرخوشه

۶-۳- بررسی نرخ ارسال‌های متفاوت

در این بخش تأثیر تغییر نرخ ارسال بر مصرف انرژی و بسته‌های موجود در بافر مورد بررسی قرار گرفته است. در این سناریو تعداد گره‌های متصل به سرخوشه ۲، ۵، ۷ در نظر گرفته شده است و نرخ ارسال بین اعداد نشان داده شده در شکل تغییر کرده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. هنگامی که تعداد گره‌های متصل به سرخوشه کم باشد تعداد بسته‌های موجود در بافر تقریباً نزدیک صفر است و افزایش نرخ ارسال تأثیری بر روی زمان پاسخگویی سیستم ندارد چون با همان نرخ ارسال پایین تقریباً تمام بسته‌ها بدون تأخیر پاسخ داده می‌شوند و افزایش نرخ ارسال صرفاً باعث افزایش مصرف انرژی می‌گردد و بر روی تأخیر نهایی بسته تأثیری ندارد. اما با افزایش تعداد گره‌های متصل به سرخوشه، میانگین تعداد بسته‌های موجود در بافر در هر لحظه افزایش می‌یابد و در نتیجه آن، تأخیر نهایی افزایش می‌یابد. یکی از راهکارها جهت کاهش این تأخیر بالا بردن نرخ ارسال فرستنده سرخوشه است، همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است با افزایش نرخ ارسال می‌توان میانگین تعداد بسته‌های موجود در بافر تا ۷۵ درصد کاهش داد، همچنین این افزایش تأثیر اندکی بر مصرف انرژی سیستم می‌گذارد، در نتیجه هنگام طراحی سیستم در صورتی که گره‌های متصل به سرخوشه زیاد شود می‌توان از ارسال کننده با نرخ بالاتری استفاده کرد که تأخیر نهایی سیستم کاهش یابد. بنابراین با افزایش تعداد گره‌ها این ظرفیت وجود دارد که نرخ ارسال را تا ۰.۰۳۷ افزایش داد که به کاهش تعداد بسته‌ها در بافر کمک می‌کند. اما افزایش دادن بیشتر از این مقدار، دیگر کمکی به این مسئله نمی‌کند و صرفاً باعث مصرف بیشتر انرژی می‌گردد. به طور مثال همانطور که در شکل نشان داده شده است میانگین تعداد بسته‌های موجود در بافر هنگامی که از ارسال کننده با نرخ ۰.۰۵۵ استفاده شده است نسبت به ارسال کننده با نرخ ۰.۰۳۷ تغییر محسوسی نداشته است. بنابراین با توجه به این آزمایش می‌توان به این نتیجه رسید که در صورت افزایش تعداد گره‌های متصل به سرخوشه، استفاده از ارسال کننده با نرخ ۰.۰۳۷ مناسب بوده و استفاده از ارسال کننده با نرخ بالاتر تأثیر چندانی ندارد.



شکل ۱۲: تأثیر نرخ ارسال‌های متفات با توجه به تعداد گره‌ها بر روی تعداد بسته‌های موجود در بافر

۷- مقایسه

در این بخش به مقایسه کار انجام شده در این مقاله با برخی از کارهای مرتبط پرداخته شده است. در مقاله [۴] به ارائه یک مدل تحلیلی پرداخته شده است، یکی از مشکلات این مدل پیچیدگی مدل تحلیلی به‌منظور استفاده در مدل‌سازی و همچنین نیازمندی به دانش ریاضی سطح بالا است، اما با این حال مدل تحلیلی جهت ارزیابی سایر مدل‌ها بسیار ارزشمند است و درستی و صحت سایر مدل‌ها را می‌تواند تایید کند.

در مقاله [۴] به بررسی وجود حالت خواب در سیستم پرداخته است. با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله وجود حالت خواب در سیستم فقط در صورتی مناسب است که بار ترافیکی سیستم کم باشد و در صورتی که تعداد گره‌های متصل به سرخوشه افزایش یابد، وجود حالت خواب می‌تواند باعث هدر رفت انرژی شود که علت این موضوع صرف انرژی برای تغییر حالت مکرر سیستم از خواب به بیداری و برعکس است. در این مقاله نیز با توجه به آزمایشی که گرفته شد و در شکل ۱۱ آورده

شد، نشان داده شد، هنگامی که تعداد گره‌ها افزایش یابد مصرف انرژی سرخوشه نیز با وجود حالت خواب افزایش می‌یابد و بودن این حالت در مجموع مصرف انرژی سیستم را بیشتر می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد مدل ارائه شده در این مقاله در مقایسه با مدل تحلیل ارائه شده در مقاله [4] نتایج درستی ارائه کرده است و مدل ارائه شده صحیح است، همچنین در این مقاله نشان داده شده است که وجود حالت خواب در حالتی که بار ترافیکی سیستم کم است، می‌تواند باعث صرفه‌جویی ۷ درصدی انرژی شود که تقریباً با نتایج ارائه شده با روش ارائه شده در این مقاله مطابقت دارد.

در روشی که در این مقاله انجام شده است یک روش مدل‌سازی ارائه شده است که در مقایسه با کارهای گذشته دارای مزیت‌هایی است که عبارتند از:

- مدل‌سازی مفاهیم پایه مورد نیاز شامل مدل‌سازی مؤلفه منبع و همچنین لحاظ کردن تأثیرپذیری و تأثیرگذاری گذارها بر روی مؤلفه‌های منبع
- ایجاد مدلی که خاص ارزیابی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء باشد که با استفاده از این مدل دیگر مدل‌ساز درگیر جزییات مربوط به این حوزه نمی‌شود و از مفاهیم سطح بالاتر آن در مدل استفاده خواهد کرد.
- روش ارائه شده در این مقاله بر خلاف سایر کارهای ارائه شده در این حوزه به صورت عمومی بوده و خاص یک مورد مطالعاتی خاص نبوده، بنابراین این مدل قابلیت اعمال بر روی موردهای مطالعاتی دیگر را دارد

در مقایسه کار ارائه شده با با کارهای [۱۴]، [۸] و [۹] معمولاً این مدل ارائه شده در این مقاله‌ها، یک مدل خاص منظوره بوده و هدف آن اجرای مدل بر روی یک سناریوی خاص بوده و معیارهای محدودی در نظر گرفته شده است که تمامی عوامل تأثیرگذار بر مصرف و شارژ انرژی سیستم را پوشش نمی‌دهد، اما در این مقاله یک روش جامع برای مدل‌سازی مصرف انرژی سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء ارائه شده است. این جامعیت با ارائه مفاهیم چگونگی مدل‌سازی منبع انرژی و وابستگی‌های رفتاری فعالیت‌های سیستم پوشش داده شده است. در جدول ۴ مقایسه‌ای با برخی از کارهای مرتبط از حیث نوع مدل استفاده شده، خاص/عام منظوره بودن و معیارهای درنظر گرفته شده آورده شده است.

جدول ۴: مقایسه با برخی از کارهای مرتبط

مقاله	مدل	خاص/عام	مدل‌سازی مفاهیم پایه	معیار
	SRN	عام	✓	نرخ دریافت/ارسال – حالات کاری پردازنده – خرابی گره و کانال- برداشت انرژی
[۱۴]	GSPN	خاص	×	تأثیرگذاری عوامل مختلف بر برداشت انرژی
[۴]	تحلیلی	خاص	×	نرخ دریافت/ارسال – حالات کاری – خرابی گره و کانال
[۸]	PN	عام	×	سیاست کاری پردازنده با توجه به بارکاری
[۹]	GSPN	عام	×	اندازه بافر و تأخیر

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به ارائه روشی برای مدل‌سازی و ارزیابی کمّی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء پرداخته شد. در روش ارائه شده ابتدا به مدل‌سازی مفهوم منبع پرداخته شد و سپس به مدل‌سازی فعالیت‌هایی که دارای وابستگی به منبع هستند پرداخته شد و در نهایت سایر فعالیت‌های سیستم مدل‌سازی شد. مدل ارائه‌شده بر روی یک مورد مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت و سناریوهایی مختلفی همچون تأثیرتعداد گره‌های متصل به سرخوشه، تأثیر وجود حالت خواب در سیستم و تغییر در نرخ ارسال مورد ارزیابی قرار گرفت و این نتیجه گرفته شد که منبع انرژی سیستم مدل‌سازی شده با پیکربندی مورد نظر، در صورتی که تعداد گره‌ها از ۱۰ گره بیشتر شود دیگر جوابگو نخواهد بود، همچنین مشخص شد که به منظور کاهش تعداد بسته‌های موجود در بافر و بالا بردن زمان پاسخ و کاهش تأخیر این امکان وجود دارد که نرخ ارسال بسته تا ۰.۰۳۷ افزایش پیدا کند ولی افزایش بیشتر آن تأثیر قابل توجه‌ای ندارد. در مورد وجود حالت خواب نشان داده شد که وجود این حالت هنگامی که تعداد گره‌ها کم باشد به صرفه‌جویی مصرف انرژی کمک می‌کند ولی هنگامی که تعداد گره‌ها از ۴ گره بیشتر شود وجود این حالت تأثیر منفی خواهد داشت. هنگامی که تعداد گره‌ها از ۴ گره بیشتر می‌شود، با توجه به اینکه بافر همیشه پر است وجود این حالت تأثیری در مصرف انرژی سیستم نخواهد داشت و تغییر حالت کاری سیستم منجر به افزایش بیشتر مصرف انرژی نیز می‌گردد. در مورد نورآوری‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شناسایی و مدل‌سازی مفاهیم پایه مورد نیاز

مدل‌سازی مصرف انرژی شامل منبع انرژی و عوامل تأثیرگذار بر آن.

- روش مورد نظر به صورت عمومی بوده و روش ارائه شده وابسته به یک مورد مطالعاتی خاص نیست.
- استفاده از مدل SRN به عنوان مدل پایه که امکان حل و ارزیابی را با استفاده از بسته SPNP را دارد.
- مطالعه مورد مطالعاتی با تغییر پیکربندی سیستم جهت شناسایی بهترین پیکربندی سیستم قبل از عملیاتی نمودن آن که این امر منجر به کاهش هزینه طراحی و اجرایی می‌گردد.

با استفاده از این روش مدل‌سازی می‌توان در مرحله طراحی و ساخت یک سیستم، عملکرد سیستم را مورد ارزیابی قرار داد و بررسی کرد که آیا سیستم طراحی شده با نیازهای مورد انتظار از سیستم تطابق دارد یا خیر. در بسیاری از سناریوهای مربوط به سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء دسترسی به سیستم سخت و غیرممکن است و یا اینکه کاربرد سیستم به صورتی است که وجود نقص در عملکرد سیستم می‌تواند خسارات مالی یا جانی فراوانی داشته باشد، بنابراین با مدل‌سازی و بررسی پیکربندی سیستم در مرحله طراحی و ساخت، می‌توان تا حد زیادی از این هزینه‌ها و خسارت‌ها جلوگیری کرد و مناسب‌ترین پیکربندی مطابق با نیاز سیستم را انتخاب کرد و بررسی کرد که سیستم طراحی شده آیا برای مدت زمان مورد نظر و با پیکربندی انتخاب شده می‌تواند مسئولیت خود را به درستی انجام دهد یا نیاز به باز طراحی دارد. از محدودیت‌های این روش عبارتند از: نیاز به شناسایی ویژگی‌های قطعات مختلف سیستم، شناسایی عوامل مصرف انرژی در سیستم، نیاز به چشم‌پوشی کردن از برخی از جزییات و پیچیده شدن مدل و انفجار فضای حالت در پی افزایش حالت‌های مختلف برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده.

۹- کارهای آینده

در این مقاله به ارائه یه مدل بر پایه شبکه پاداش تصادفی به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی مصرف انرژی در سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء پرداخته شد. به عنوان کارهای آینده به دنبال آن هستیم که یک روش مدل‌سازی جامع مبتنی بر شبکه‌های پتری توسعه و ارائه دهیم که با استفاده از این مدل به مدل‌سازی و ارزیابی معیارهای قابل اندازه‌گیری سیستم‌های اینترنت اشیاء از جمله معیارهای مصرف انرژی بپردازیم. مدل ارائه شده مدلی خواهد بود که از مفاهیم پایه مورد نیاز مدل‌سازی مصرف انرژی مانند منبع انرژی و عوامل مصرف انرژی و شارژ آن پشتبانی خواهد کرد. در واقع با استفاده از این مدل، مدل‌ساز دیگر درگیر نحوه مدل‌سازی مفاهیم مصرف انرژی نخواهد شد و این مفاهیم از قبل در مدل وجود خواهد داشت و توسط آن پشتیبانی می‌شود. همچنین یکی دیگر از کارهایی که در آینده باید انجام شود توسعه ابزاری جهت پشتیبانی از مدل ارائه شده است.

مراجع

[1] M. Raval, S. Bhardwaj, A. Aravelli, J. Dofe, and H. Gohel, “Smart energy optimization for massive IoT using artificial intelligence,” *Internet of Things*, vol. 13, Mar. 2021.

[2] K. Georgiou, S. Xavier-de-Souza and K. Eder, "The IoT Energy Challenge: A Software Perspective," in *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 53-56, Sept. 2018.

[3] F. Javed, M. K. Afzal, M. Sharif and B. -S. Kim, "Internet of Things (IoT) Operating Systems Support, Networking Technologies, Applications, and Challenges: A Comparative Review," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2062-2100, 2018.

[4] E. Ever, P. Shah, L. Mostarda, F. Omondi and O. Gemikonakli, "On the performance availability and energy consumption modelling of clustered IoT systems", *Computing*, vol. 101, no. 12, pp. 1935-1970, 2019.

[5] D. Lages, E. Borba, J. Araujo, E. Tavares and E. Sousa, "Energy Consumption Evaluation of LPWAN: A Stochastic Modeling Approach for IoT Systems," *2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, pp. 1-8, 2021.

[6] A. Lekidis and P. Katsaros, “Model-based design of energy-efficient applications for IoT systems,” in: S. Bliudze and S. Bensalem (eds.), Methods and Tools for Rigorous System Design (MeTRiD 2018) EPTCS 272, pp. 24–38, 2018.

[7] M. C. Ruiz, C. Garrido-Hidalgo, D. P. Gruska, T. Olivares, D. Hortelano and L. Roda-Sanchez, "Modeling and Evaluation of a Power-Aware Algorithm for IoT Bluetooth Low Energy Devices," *2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, pp. 28-35, 2019.

[8] A. Shareef and Y. Zhu, "Energy Modeling of Wireless Sensor Nodes Based on Petri Nets," *2010 39th International Conference on Parallel Processing*, pp. 101-110, 2010.

[9] B. Boutoumi and N. Gharbi, "An energy saving and latency delay efficiency scheme for wireless sensor networks based on GSPNs," *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 0645-0650, 2017.

[10] B. Martinez, M. Montón, I. Vilajosana and J. D. Prades, "The Power of Models: Modeling Power Consumption for IoT Devices," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 10, pp. 5777-5789, Oct. 2015.

[11] Ali Shareef, Yifeng Zhu, "Effective Stochastic Modeling of Energy-Constrained Wireless Sensor Networks", *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, pp 67-71, 2012.

[12] A. Berrachedi and M. Boukala-Ioualalen, "Evaluation of the Energy Consumption and the Packet Loss in WSNs Using Deterministic Stochastic Petri Nets," *2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp. 772-777, 2016.

[13] N. Oukas, M. Boulif, H. Hadiouche and C. Bengharabi, "A New Petri Nets for WSNs to Model the Behaviour of Solar-Energy Harvesting Sensors with Double Sleeping Strategy," *2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*, pp. 237-242, 2022.

[14] Oukas, N., Boulif, M. Sensor Performance Evaluation for Long-Lasting EH-WSNs by GSPN Formulation, Considering Seasonal Sunshine Levels and Dual Standby Strategy. *Arab J Sci Eng* (2022)

[15] B. Al Homssi, A. Al-Hourani, S. Chandrasekharan, K. M. Gomez and S. Kandeepan, "On the Bound of Energy Consumption in Cellular IoT Networks," in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 4, no. 2, pp. 355-364, June 2020, doi: 10.1109/TGCN.2019.2960061.

[16] O. Nourredine, D. Abderrezak, A. Karima and H. Mira, "A Fluid Approach to Model and Assess the Energy Level of Autonomous devices in IoT with Solar Energy Harvesting Capability," 2022 5th International Symposium on Informatics and its Applications (ISIA), M'sila, Algeria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISIA55826.2022.9993564.

[17] O. Nourredine and B. Menouar, "A New Stochastic Petri Nets Modeling for Dual Cluster Heads Configuration in Energy-Harvesting WSNs," 2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH), Boumerdes, Algeria, 2021, pp. 142-147, doi: 10.1109/IHSH51661.2021.9378741.

[18] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541-580, April 1989.

[19] M. Ajmone, B. Gianfranco, C. Gianni, D. Susanna, and F. Giuliana, Modeling With Generalised Stochastic Petri Nets. 1998.

[20] J. K. Muppalaa and K. S. Trivedia, "Composite Performance and Availability Analysis Using a Hierarchy of Stochastic Reward Nets,", pp. 335–349, 2010.

[21] C. Hirel, B. Tuffin, and K. S. Trivedi, "SPNP: Stochastic petri nets. Version 6. 0," in Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), vol. 1786, pp. 354–357, 2000.

[22] A. N. Asadi, M. A. Azgomi and R. Entezari-Maleki, "Unified power and performance analysis of cloud computing infrastructure using stochastic reward nets", *Comput. Commun.*, vol. 138, pp. 67-80, 2019.

[23] J. K. Muppalaa and K. S. Trivedia, "Stochastic reward nets for reliability prediction. " Communications in *reliability, maintainability and serviceability*, pp. 9-20, 1994.

پاورقی‌ها:

[1] Internet of Things
[2] Lightweight Protocol
[3] Source
[4] Stochastic Reward Nets (SRNs)
[5] Stochastic Petri nets (SPNs)
[6] Power-aware algorithm
[7] Timed Coloured Petri nets
[8] Bluetooth
[9] Wireless sensor networks
[10] Module
[11] Latency
[12] Generalized Stochastic Petri Nets
[13] Packet lost
[14] Deterministic Stochastic Petri Nets
[15] Low-Power Wide-Area Network
[16] Stochastic Petri Net
[17] Radio Frequency Identification
[18] Service-oriented
[19] Sensing Layer
[20] Network Layer
[21] Service Layer
[22] Interface Layer
[23] Place
[24] Transition
[25] Token
[26] Guard function
[27] Markov Reward Model
[28] Cluster-Head