

Modeling and evaluation of some criteria in RPLs using Colored Petri Nets

Mohammad Pishdar*, Younes Seifi**

*Computer engineering department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

**ICT Research Institute, Teran, Iran

Abstract:

The Internet of Things is a novel idea which is widely used to connect objects through communication technologies. The problem adapting with previous technologies has, in recent years, been one of the most challenging subjects in this regard. The RPL, since its inception in 2012, has served as a solution to routing of the Internet of Things, which is increasingly used by many researches and hardware manufactures. The current research aims to propose a modular and readable RPL model to evaluate some of the criteria in its structure using Colored Petri Net capabilities. This evaluation includes an examination of protocol discontinuation, multi-transmission of a message through a specific channel (loop condition), and reaction against various inputs. Besides structural examination, some major functional parameters including energy consumption, rates of packages received at the destination and level of control messages were investigated.

Keywords:

Colored Petri nets, Internet of Things (IoT), Routing Protocol for LLNs (RPL)

مدلسازی و ارزیابی برخی معیارها در پروتکل مسیریابی RPL به وسیله شبکه های پتری رنگی

محمد پیشدار^{*}، یونس سیفی^{**}

^{*} فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فناوری اطلاعات، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^{**} استادیار پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

اینترنت اشیا یک ایده جدید و پرکاربرد با هدف اتصال اشیاء از طریق فناوری های ارتباطی است. مشکل سازگاری با فناوری پیشین در طول سال های گذشته همواره یکی از چالش برانگیزترین موضوعات این حوزه بوده است. پروتکل RPL از سال ۲۰۱۲ به عنوان راه حلی برای مسیریابی اینترنت اشیا توسط دانشمندان مطرح گردید. این پروتکل تا کنون مورد استفاده بسیاری از محققان و شرکت های تولیدی سخت افزاری در حوزه فناوری مذکور قرار گرفته است. پژوهش جاری ضمن ارائه یک مدل ماژولار و خوانا از پروتکل RPL به ارزیابی برخی معیارها در ساختار آن با قابلیت های موجود در شبکه های پتری رنگی می پردازد. این ارزیابی شامل بررسی شرایط توقف پروتکل، عبور چند باره پیام از یک مسیر خاص (شرایط حلقه)، چگونگی واکنش در برابر ورودی های مختلف است. در کنار بررسی ساختاری برخی پارامترهای مهم عملکردی نیز شامل میزان مصرف انرژی، نرخ بسته های دریافتی در مقصد و میزان پیام های کنترلی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: شبکه های پتری رنگی، IOT، اینترنت اشیا، پروتکل مسیریابی RPL، مدلسازی

۱- مقدمه

های جدید RPL^۲ نام داشته که دانشمندان به دلیل وجود مدل ترافیکی خاص در اینترنت اشیا و همچنین محدودیت های موجود، اقدام به طراحی آن برای شبکه های کم توان با نرخ بالای گم شدن^۴ بسته ها نمودند [۱] و [۲].

مدلسازی و ارزیابی پروتکل مسیریابی RPL با توجه به استقبال گسترده پژوهشگران می تواند بسیار پرکاربرد باشد [۳]. بر این اساس بر آن شدیم تا به ارائه یک مدل مناسب برای پروتکل مذکور و

ایده اینترنت اشیا^۲ سال ها پیش با پیشرفت های اخیر در حوزه شبکه های بیسیم با هدف اتصال اشیا و فناوری های ارتباطی ایجاد شد. وجود برخی ویژگی های خاص از جمله توان پردازشی و منبع انرژی محدود در میکروکنترلرهای مورد استفاده در این فناوری دانشمندان را به سمت تطبیق روش های موجود با اینترنت اشیا و یا ایجاد پروتکل های جدید سوق داد [۱] و [۲]. یکی از این پروتکل

^۱ نویسنده مسئول: محمد پیشدار@mohamadpishdar@gmail.com

^۲ Internet of Things (IOT)

^۳ Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

^۴ Low-Power and Lossy Networks

پیوندها سازگار است [۴] تا [۶].

موقعیت هر گره در درخت به وسیله مقدار RANK به صورت رابطه معکوس با فاصله از ریشه نشان داده می شود. در واقع هر چه از درخت دور شویم مقدار RANK نیز افزایش خواهد یافت. چگونگی تشکیل درخت DODAG در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. در بخش a این شکل گره های N1 الی N5 دیده می شود که قرار است یک درخت DODAG با محوریت گره ریشه N1 تشکیل دهند. گره ریشه در بخش b این شکل شروع به ارسال یک پیام DIO (شامل اطلاعات لازم نظیر مقدار Rank، نسخه درخت و مقدار کمینه افزایش مقدار Rank در هر گام) به صورت همه پخشی در محدوده بیسیم خود کرده که تنها گره N2 در این محدوده قرار داشته و آن را دریافت می کند. این کار در بخش c شکل ۱ توسط گره N2 تکرار شده و پیام DIO با بروزرسانی مقدار Rank به سایر گره ها خواهد رسید که آنها نیز این فرآیند را تکرار می کنند تا درخت به صورت بهینه کامل شود. در نهایت بخش d این شکل تصویر کامل درخت مذکور را نمایش می دهد که هر کدام از گره ها مقدار Rank و بهترین والد خود را مشخص کرده اند.

در پروتکل RPL گره ها علاوه بر پیام DIO به وسیله پیام دیگری به نام DAO^۵ اطلاعات مربوط به خود یا زیر درخت مربوطه را به سمت بالای درخت منتشر می کنند [۴] تا [۶]. پس از تشکیل درخت با توجه به تنظیمات موجود در پیام DIO به دو صورت اطلاعات مربوط به مسیرها می تواند ذخیره گردد [۴].

۱- ذخیره تمام اطلاعات در ریشه: در این حالت تمام پیام ها جهت یافتن مقصد به ریشه ارسال و سپس توسط ریشه مسیریابی می گردند.

۲- ذخیره ای اطلاعات به صورت توزیع شده و به شکل بردار فاصله ای^۶: در این حالت هر گره در درخت دارای دید محلی خود بوده و در صورت وجود مسیری به مقصد، پیام را به سمت پایین درخت و برگ ها ارسال می کند. در صورت عدم وجود مسیر نیز پیام به سمت ریشه ارسال و سپس توسط آن مسیریابی خواهد شد.

پروتکل RPL طوری طراحی شده است که هنگام وقوع ناسازگاری شرایط را به حالت صحیح بازگرداند. این فرآیند به وسیله تعمیر

ارزیابی آن پردازیم. مدلی که دارای شرایطی مناسب از جمله طراحی ماژولار (در سطح مناسب)، انعطاف پذیری، کاربرپسندی، قابلیت توسعه و بررسی مناسب باشد. وجود برخی از ویژگی های برجسته مدلسازی و ارزیابی در شبکه های پتری رنگی مانند قابلیت گرافیکی مناسب و ابزارهای تحلیل و تشخیص خطای قدرتمند می تواند پاسخی کارا و مفید برای این نیاز باشد. لازم به ذکر است که پارامترهای اصلی ارزیابی پروتکل های مسیریابی نظیر معیارهایی مانند میزان مصرف انرژی، میزان پیام های دریافتی و سربار پیام های کنترلی در بررسی RPL بسیار مورد توجه هستند. در این مقاله از بررسی با جزئیات موارد مذکور به علت دور شدن از موضوع اصلی یعنی شبکه های پتری رنگی صرف نظر شده است. در ادامه ابتدا به تعریف مفاهیم مهم و به دنبال آن بررسی کارهای پیشین پرداخته شده است. سپس فرآیند مدلسازی و نتایج ارزیابی مدل مذکور ارائه خواهد گردید.

۲- مفاهیم مهم

در این قسمت به شرح مفاهیم مهم این پژوهش پرداخته می شود.

۲-۱- پروتکل مسیریابی RPL

RPL از مهم ترین پروتکل های ارائه شده برای فرآیند مسیریابی در اینترنت اشیا می باشد [۱] و [۲]. در این پروتکل توپولوژی شبکه به صورت یک درخت بدون دور^۱ در نظر گرفته شده است [۲] تا [۴]. شکل گیری این درخت به صورتی است که ابتدا گره ریشه با ارسال یک پیام DIO^۲ اطلاعات مربوط به پیکربندی درخت را منتشر می کند. سایر گره ها با دریافت این پیام به درخت ملحق شده و یک زمان سنج را برای انتشار مجدد اطلاعات تنظیم می کنند. در واقع هر گره با سر رسیدن مقدار زمان سنج مذکور یک پیام DIO جدید را با بروزرسانی موقعیت خود در درخت و همچنین نسخه اطلاعات دریافتی برای سایر گره ها (به صورت همه پخشی) ارسال می کند. با تکرار این عمل اطلاعات تا برگ ها رسیده و ساختار درخت شکل خواهد گرفت [۴، ۵].

هر گره با دریافت یک پیام DIO جدید، لیست پدران خود در درخت را جهت تغییرات بررسی کرده و بهترین آنها را (از نظر هزینه) برای ارسال پیام ها به ریشه انتخاب می کند. فرآیند انتخاب بر اساس یک تابع هدف^۳ در پروتکل RPL صورت می گیرد. این تابع با معیارهای مختلفی نظیر تعداد گام های باقیمانده تا مقصد یا وضعیت لحظه ای

⁴ Links

⁵ Destination Advertisement Object

⁶ Distance Vector

¹ DODAG (Destination Oriented Directed Acycle Graph)

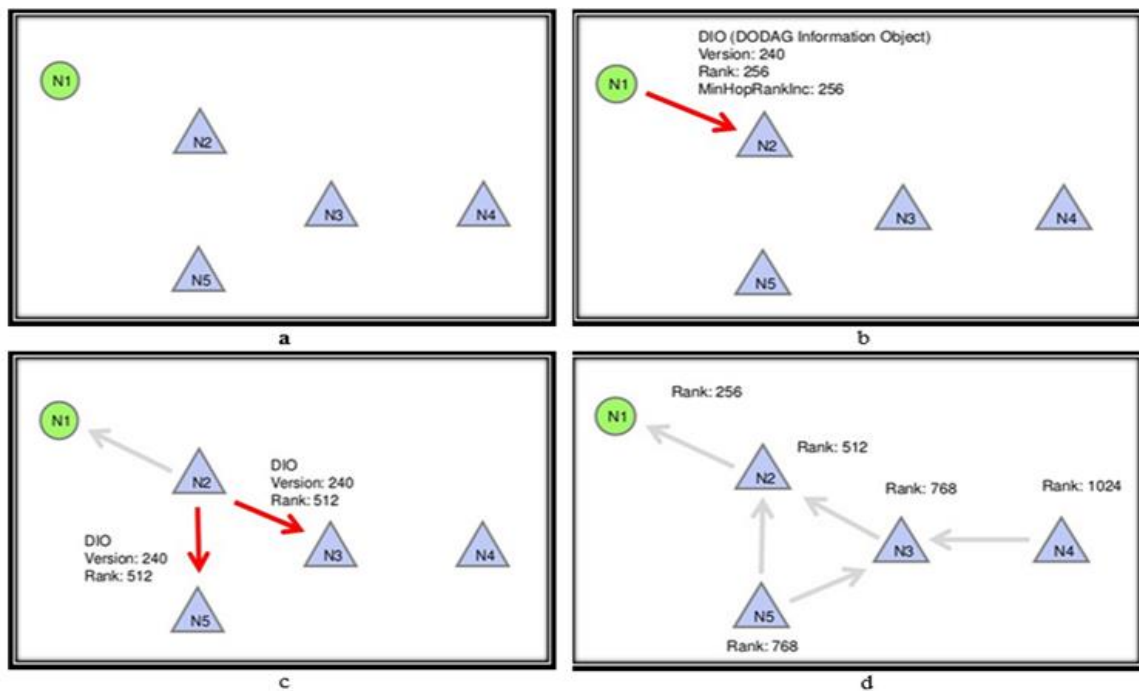
² Dag Information Object

³ Objective Function

۲-۲- شبکه‌های پتری رنگی^۲

شبکه‌های پتری رنگی ابزاری قدرتمند جهت مدلسازی، به خصوص در سیستم‌های همروند و همزمان می‌باشد [۷] و [۸]. یکی از ویژگی‌های برجسته این شبکه‌ها، محیط گرافیکی آن بوده که از نسخه قدیمی‌تر آن یعنی شبکه‌های پتری بر جای مانده است. در شبکه‌های پتری رنگی از مفاهیم گرافیکی زیر استفاده می‌شود [۷].
 ۱- وضعیت^۳: نشان دهنده‌ی یک وضعیت در سیستم بوده که با دایره نمایش داده می‌شود. هر وضعیت تنها از نشانه‌هایی با نوع مشخص پشتیبانی می‌کند.

محلی و یا همگانی^۱ صورت می‌پذیرد. در تعمیر محلی با وقوع هر گونه خطا هنگام ارسال پیام‌ها یا در ساختار آن‌ها (وقوع ناسازگاری) سعی بر انتخاب مسیری دیگر خواهد شد. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد ناسازگاری‌ها به یک آستانه مشخص فرآیند تعمیر همگانی آغاز می‌گردد. در تعمیر همگانی، ریشه درخت شروع به ارسال یک پیام DIO با افزایش شماره نسخه اطلاعات می‌نماید. دریافت این پیام در یک گره به معنی پایان اعتبار درخت فعلی و نیاز به تشکیل ساختار درختی جدید است. بر این اساس گره مربوطه اطلاعات ذخیره شده خود را حذف و پروتکل RPL را از ابتدا اجرا می‌نماید. با اجرای مجدد پروتکل توسط تمام گره‌ها درخت از نو و با حذف ناسازگاری‌ها بازسازی خواهد شد [۴].



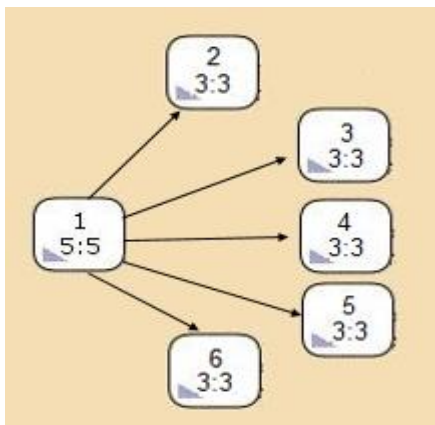
شکل ۱: نحوه‌ی ایجاد درخت DODAG در چهار مرحله [۵]

مورد نیاز آن فرآیند مصرف شده و پس از پردازش مربوطه نتیجه مجدداً در قالب نشانه به بخش دیگر تبدیل منتقل می‌شود (دو طرف هر تبدیل وضعیت‌ها قرار دارند).
 ۴- کمان^۶: جهت حرکت نشانه‌ها را در مدل با پیکان‌ها نشان می‌دهد.

۲- نشانه^۴: اطلاعات به وسیله نشانه‌ها در این شبکه‌ها مدل می‌گردند. نشانه‌ها در شبکه‌های پتری رنگی به وسیله‌ی دایره‌ی توپر کوچک نشان داده می‌شوند.
 ۳- تبدیل^۵: انجام‌دهنده یک فرآیند در سیستم بوده که با مستطیل‌ها نمایش داده می‌شود. با اجرای هر تبدیل نشانه‌های

⁴ Token
⁵ Transition
⁶ Arc

¹ Global
² Colored Petri Net
³ Place



شکل ۲: نمونه ای از فضای حالت

۲-۲- اهمیت شبکه های پتری رنگی در طراحی

پروتکل های مسیریابی

استفاده از یک بستر مدلسازی و ارزیابی هنگام طراحی پروتکل ها برای مقابله با اشتباهات طراحی و اعمال بهینه سازی ها از اهمیت بالایی برخوردار است. پروتکل های مسیریابی ماهیتی گسسته و توزیع شده داشته که رویداد همزمان اتفاقاتی نظیر فرآیند مسیریابی در چند بخش آن کاملاً قابل تصور است. شبکه های پتری رنگی اساساً برای طراحی و بررسی چنین پدیده هایی ایجاد شده و استفاده از آن می تواند در این راستا بسیار مفید باشد. برخی از قابلیت های کلیدی شبکه های پتری رنگی که آن را جهت به کارگیری در طراحی بعضی پروتکل ها قابل توجه می کند در لیست زیر آورده شده است [۷].

- طراحی پروتکل های توزیع شده
- پوشش اتفاقات همزمان
- ارائه مدلسازی به صورت خوانا، ماژولار و سلسله مراتبی (در این نوع مدلسازی زیرمدل های دارای جزئیات بیشتر برای شکل گیری سطوح انتزاعی با یکدیگر ترکیب می شوند)
- ارائه ابزارهای مناسب برای بررسی های فرمال
- امکان اندازه گیری تغییرات مقادیر موجود در مدل
- سادگی در طراحی و یا تغییر

۳- کارهای پیشین

Bartolozzi و همکاران در پژوهش [۹] و [۱۰] پروتکل RPL را به شبیه ساز NS3 اضافه کرده و عملکرد آن را از منظر ایجاد ساختار

در شبکه های پتری رنگی انواع داده متناظر با رنگ های مختلف در نظر گرفته می شود. در این شبکه ها هر کمان تنها می تواند نشانه های هم رنگ با وضعیت ورودی و یا خروجی خود را منتقل کند [۷] و [۸]. از ویژگی های دیگر شبکه های پتری رنگی می توان به قابلیت مدلسازی پیمانه ای اشاره کرد (طراحی سلسله مراتبی^۱) [۷]. علاوه بر این در شبکه های پتری رنگی ابزارهای مهمی جهت تحلیل و بررسی مدل، از جمله "بررسی فضای حالت" وجود دارد. فضای حالت^۲ شرایط سیستم و چگونگی رسیدن به وضعیت های مختلف در یک مدل را برای تمام حالات ممکن نمایش می دهد (اجرای یک تبدیل وضعیت سیستم را تغییر می دهد). نمایش این فضا به صورت یک گراف جهت دار بوده که هر گره آن نماینده یک وضعیت متفاوت در سیستم است. جهت آشنایی بیشتر در شکل شماره ۲ نمونه ای از فضای حالت نمایش داده شده است [۷]. در این شکل:

۱. مربع ها نشان دهنده وضعیت های مختلف یک مدل هستند (مربع شماره ۱ نقطه ی شروع است).
۲. پیکان ها وضعیت تبدیل به وضعیت دیگری در سیستم را از طریق رخداد یک یا چند تبدیل نشان می دهند.
۳. عدد میان هر مربع شماره آن گره در فضای حالت را نشان می دهد. اعداد زیر این شماره نیز به ترتیب از چپ به راست برابر با درجه ورودی و خروجی آن گره در گراف جهت دار فضای حالت است. به عنوان مثال از گره شماره ۱ می توان به پنج وضعیت مختلف در فضای حالت رسید (وضعیت های ۲ الی ۶) و همچنین از پنج وضعیت مختلف نیز امکان بازگشت به گره شماره ۱ وجود دارد.

فضای حالت می تواند اطلاعات مناسبی را در مورد هر وضعیت مدل تولید کند (به عنوان مثال موجودی نشانه ها در وضعیت ها). علاوه بر این برخی اطلاعات تحلیلی از اجرای کلی مدل را می توان به کمک این فضا به دست آورد. از جمله این موارد می توان به بررسی امکان وقوع بن بست (وضعیتی که دیگر هیچ تبدیلی قابل اجرایی نداشته باشد) در سیستم اشاره کرد [۷].

² State Space

¹ Hierarchy Colored Petri Net

پیاده‌سازی شامل کنترل ناسازگاری‌ها، شرکت در تعمیرات مختلف (محلی و همگانی) و مدیریت صحیح بسته‌های کنترلی و داده می‌باشد. در این مدل‌سازی از مجموعه رنگ‌های موجود در شکل شماره ۳ برای تعریف انواع داده استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای هر کدام از موارد زیر نوعی رنگ در نظر گرفته شده است.

۱. انواع بسته‌های کنترلی مورد استفاده در پروتکل RPL

(پیام‌های DAO، DIO و DIS)

۲. فیلدهای مورد استفاده در ساختار هر بسته کنترلی

```

▼ colset Type=INT;
▼ colset Flags=record R:INT*O:INT*F:INT;
▼ colset Ip=product STRING*STRING*STRING*
STRING*STRING*STRING*STRING;
▼ colset Rank=INT;
▼ colset Version=INT;
▼ colset Dtsn=INT;
▼ colset DaoSeq=INT;
▼ colset RplPacket=record types:Type*flags:Flags
*ips:Ip*rank:Rank*version:Version*
dtsn:Dtsn*daoseq:DaoSeq*ipd:Ip;
▼ colset RplPackets=list RplPacket;
▼ colset Id=INT;
▼ colset Dao_Parent=product Id*Ip*Ip*Rank;
▼ colset Dio_Parent=product Id*Ip*Ip*Rank;
▼ colset Dao_Parents=list Dao_Parent;
▼ colset Dio_Parents=list Dio_Parent;
    
```

شکل ۳. ColorSet ها در پروتکل RPL

در کنار رنگ‌های تعریف‌شده در شکل شماره ۳ از توابع جدول شماره ۱ نیز در جهت مدل‌سازی رفتاری پروتکل RPL استفاده شده است. در این جدول با صرف نظر از کدهای مربوط به هر تابع تنها عملکرد مربوط به هر مورد مشاهده می‌گردد.

در شکل شماره ۴ انتزاع اول مدل‌سازی گره‌ها در پروتکل RPL قابل مشاهده است. بر اساس شکل هر گره از زیرماژول‌های زیر تشکیل شده است:

۱- ارسال پیام (Send): در این ماژول برای هر پیام گام بعدی در فرآیند مسیریابی مشخص و فرآیند ارسال صورت می‌گیرد.

۲- تعمیر (Repair): در صورت وجود ناسازگاری‌ها در پروتکل، نیاز به تعمیر و بازگردانی وضعیت فعلی به شرایط عادی است. این کار بر عهده زیرماژول تعمیر می‌باشد.

صحیح درختی و فرآیند تعمیر مورد ارزیابی قرار دادند. در این شبیه‌سازی (حتی در آخرین ویرایش آن) دشواری اعمال تغییرات و سطح نامناسب پیاده‌سازی ماژولار به خوبی قابل مشاهده است. در واقع کلاس‌های ماژول RPL در NS3 وابستگی زیادی به یکدیگر داشته و بسیاری از فرآیندها در آن مستقل نیست. از دیگر مشکلات این شبیه‌سازی می‌توان به واسط گرافیکی نامناسب و خوانایی پایین اشاره نمود. در این پژوهش همچنین به ارزیابی عملکرد RPL نیز پرداخته نشده است. در پژوهش دیگری Karsadiz و همکاران بخشی از پروتکل RPL را در بستر ابزار JSim مورد مدل‌سازی قرار دادند [۱۱]. در این مدل‌سازی نیاز به توسعه گرافیکال و طراحی ماژولار کاملاً مشهود بوده که سبب خوانایی پایین مدل شده است. علاوه بر این ارزیابی خاصی از پروتکل RPL نیز صورت نگرفته است. در پژوهش [۱۲] RPL به کمک ابزار OMNET مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار گرفته است. در این بررسی معیارهای مختلف کارایی از جمله اندازه جداول ذخیره‌سازی در گره‌ها و سربر پیام‌های کنترلی مورد تحلیل قرار گرفته که البته هیچگونه توجهی به ارزیابی فرآیند مسیریابی RPL نشده است. در پژوهش [۱۳] تنها الگوریتم قطره‌چکان RPL در ابزار TOSSIM شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش تاثیر زیربخش مذکور بر تاخیر ارسال پیام در ساختار RPL مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

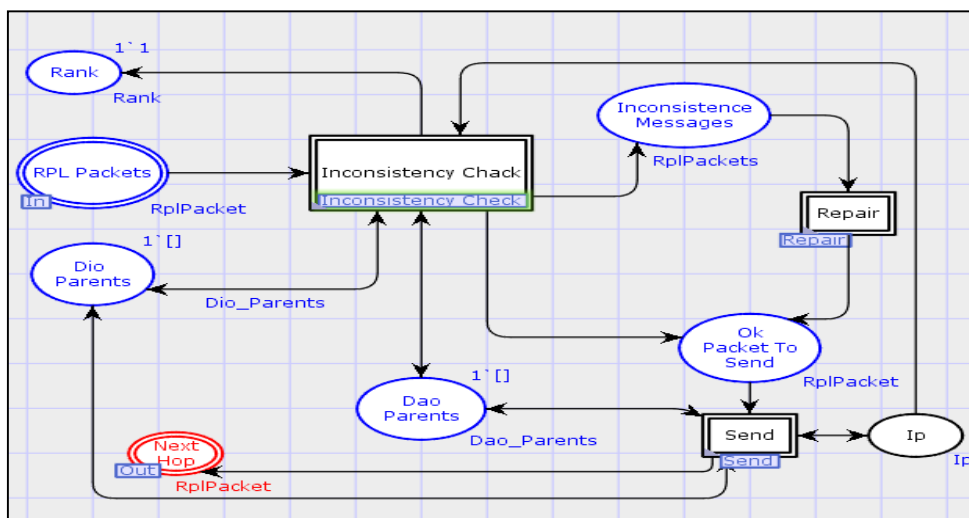
در مرجع [۱۴] محققان از امکانات توسعه گرافیکال شبکه‌های پتری رنگی برای مدل‌سازی پروتکل مسیریابی RPL و تبدیل گام به گام آن به کدهای معادل در Tiny OS (سیستم‌عاملی مخصوص دستگاه‌های بیسیم کم‌توان) استفاده کرده‌اند. این پژوهش دارای جزئیات مناسبی از پروتکل RPL در مدل‌سازی نبوده و تاکید محققان بیشتر بر روی فرآیند تبدیل مدل به کد بوده است.

بر این اساس نوآوری پژوهش جاری را می‌توان موارد زیر دانست:

- ارائه یک مدل ماژولار و خوانا از پروتکل مسیریابی RPL
- بررسی فرآیند مسیریابی در پروتکل RPL
- استفاده از قابلیت‌های شبکه‌های پتری رنگی برای بررسی پروتکل مسیریابی RPL

۴-مدلسازی پروتکل RPL

برای مدل‌سازی این پروتکل در شبکه‌های پتری رنگی ابتدا رفتار هر گره در درخت DODAG مدل‌سازی شده است. رفتار هر گره در این



شکل ۴: سطح اول انتزاع در مدل

جدول ۱: توابع مورد استفاده در مدل

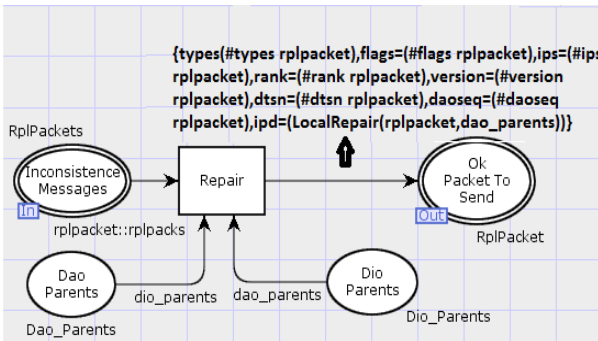
► fun sameip	بررسی یکسان بودن دو آدرس آبی
► fun InconsistencyCheck	بررسی ناسازگاری مربوط به جهت حرکت بسته در درخت و تغییر صحیح مقدار RANK
► fun InconsistencyDaoCheck	بررسی ناسازگاری DAO و DIO از نظر ورژن
► fun InconsistencyDioCheck	بازارسال پیام DIO در صورت عدم وجود ناسازگاری
► fun ForwardDio	بازارسال بسته RPL در صورت عدم وجود ناسازگاری
► fun ForwardPacket	بازارسال پیام DAO
► fun ForwardDao	بررسی وجود یک پدر Dao در لیست پدران Dao
► fun existDao	بازگرداندن بهترین پدر بر اساس مقدار RANK بوسیله ID پدر یا مقدار RANK
► fun BestRankById	بازگرداندن دومین گره در لیست پدران بر اساس مقدار RANK
► fun BestRank	جستجوی یک آدرس IP در لیست پدران بر اساس یک ID
► fun Best2IdByRank	بدست آوردن گام بعدی با توجه به لیست پدران در گره
► fun SearchIpById	تعیین و بروزرسانی مقادیر بسته RPL بر اساس آرگومان های ورودی
► fun NextHop	جستجوی یک مقدار RANK بر اساس مقدار IP در لیست پدران
► fun UpdateRplpacket1	بررسی وجود یک پدر DIO در لیست پدران DIO گره
► fun UpdateRplpacket	بررسی دریافت پیام DIO یا DAO جدید
► fun SearchRankByIp	افزافه کردن یک گره جدید به لیست پدران Dao
► fun existDio	افزافه کردن یک گره جدید به لیست پدران DIO
► fun CheckNewDao	انجام تعمیر همگانی
► fun CheckNewDio	انجام تعمیر محلی
► fun AddDaoParent	
► fun AddDioParent	
► fun GlobalRepairIdRoot	
► fun LocalRepair	

در شکل شماره ۵ مازول ارسال (سطح دوم مدل شکل شماره ۴) نمایش داده شده است. در این مازول هنگام ورود بسته ها ابتدا لیست پدران Dao جهت تشخیص گام بعدی مسیریابی جستجو شده و در صورت عدم وجود گام بعدی در این لیست پیام مربوطه به پدر ارجح جهت مسیریابی (ارسال به یک گام بالاتر در درخت جهت تصمیم گیری) ارسال خواهد شد. لازم به ذکر است که دو وضعیت Dio Parents و Dao Parents برای بروزرسانی آدرس های گام بعدی بسته ها در تابع UpdateRplPacket به این مازول اضافه شده اند. پورت ها در این شکل و انتزاع گره (شکل شماره ۴) کاملا

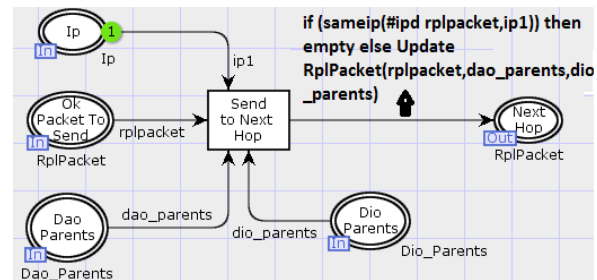
۳- کنترل ناسازگاری (Inconsistency Check): این زیرماژول وظیفه مدیریت صحیح پروتکل RPL و علاوه بر آن کنترل ناسازگاری های احتمالی را دارد.

نشانه های موجود در مربع های مورد استفاده در این انتزاع وضعیت گره ها را در حالت های مختلف نگهداری می کنند. وضعیت های دوخطی موجود در هر سطح از مدل نشان دهنده پورت های اتصال بین دو انتزاع هستند. به عبارت دیگر پورت ها در بخش های مرتبط مدل عینا تکرار شده و تبادل اطلاعات بین دو بخش از طریق آن ها صورت می گیرد.

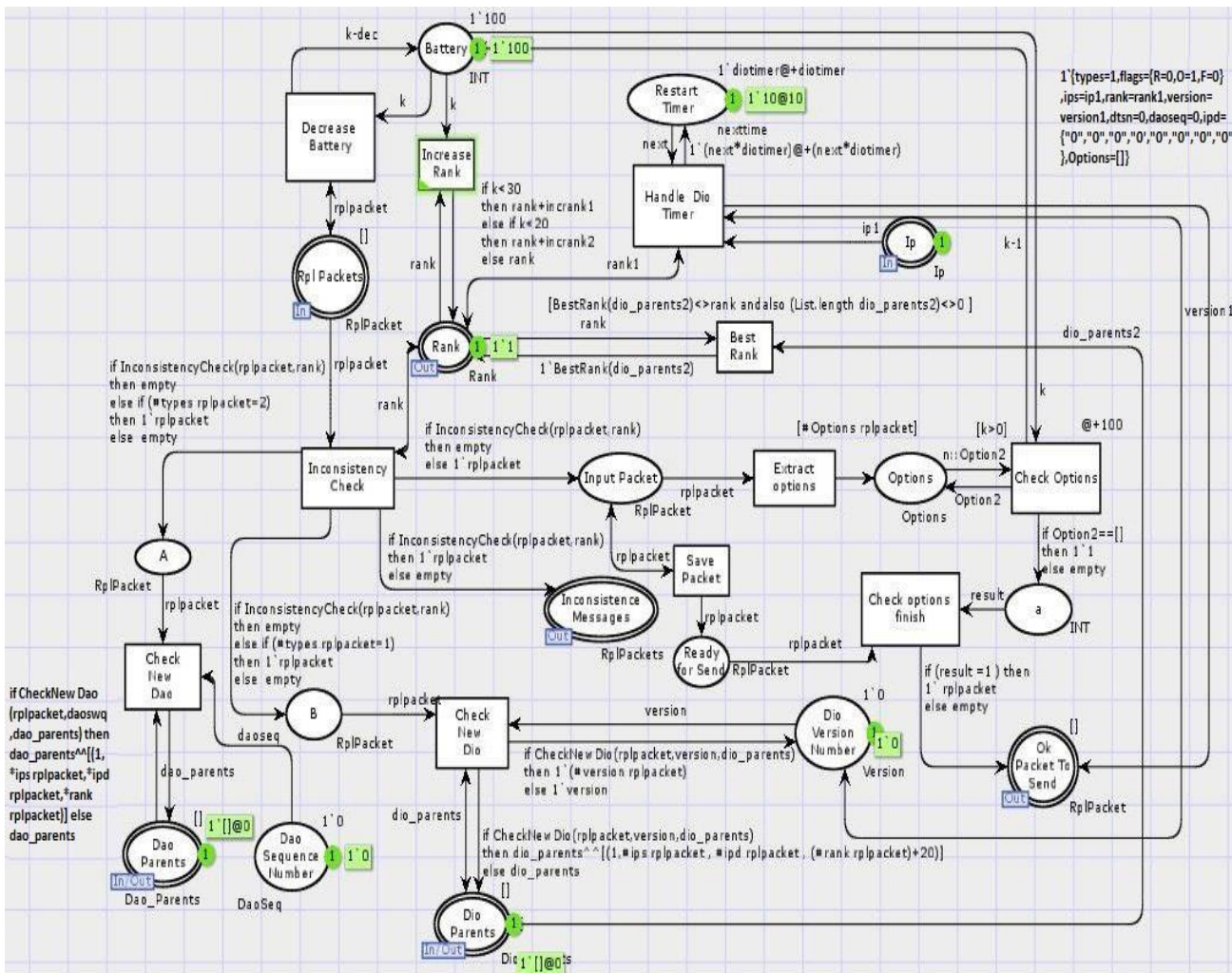
مشخص هستند. از پورت در شبکه‌های پتری رنگی برای اتصال بین دو انتزاع از مدل و تبادل نشانه بین آن‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۶: سطح انتزاع دوم ماژول بررسی تعمیر

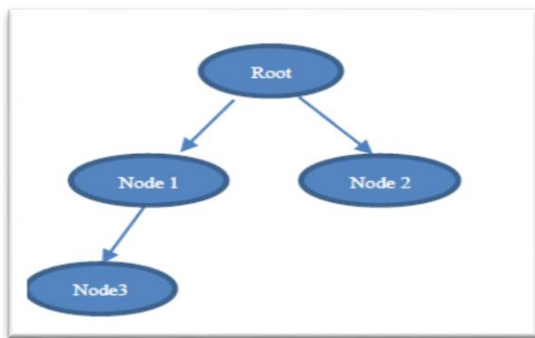


شکل ۵: سطح انتزاع دوم ماژول ارسال



شکل ۷: سطح انتزاع دوم ماژول بررسی ناسازگاری‌ها

شکل شماره ۶ نشان‌دهنده ماژول تعمیر در پروتکل RPL می‌باشد.



شکل ۸: توپولوژی نمونه

۵- ارزیابی پروتکل RPL

پس از مدلسازی پروتکل مسیریابی RPL در شبکه های پتری رنگی، موارد زیر را می توان به کمک قابلیت های این ابزار بررسی کرد. رخداد هر یک از این موارد به معنی نقص در طراحی RPL تلقی می شود.

۱. وضعیت رخداد بن بست (هدف ۳): در صورت اتفاق بن بست عملکرد پروتکل مسیریابی مختل خواهد شد. به عبارت دیگر در این وضعیت فرآیند مسیریابی متوقف شده و دیگر قابلیت اجرایی وجود ندارد.
۲. وضعیت وقوع حلقه (هدف ۱): به دلیل منابع محدود موجود در دستگاه های اینترنت اشیا وقوع یک حلقه می تواند با ایجاد سربار اضافی به حذف برخی گره ها (به علت اتمام انرژی) و یا قطع ارتباط با شبکه بیانجامد. امری که کارایی شبکه را کاهش و یا حتی مختل خواهد کرد.
۳. رفتار متفاوت در مقابل ورودی های متفاوت (هدف ۲): نتیجه یکسان در دو ورودی مختلف نقطه ضعف بزرگی برای پروتکل های مسیریابی محسوب می شود. چرا که خروجی مورد انتظار برای دو ورودی مختلف در یک پروتکل مسیریابی دو مقصد متفاوت می باشد. بر این اساس هدایت دو ورودی مختلف به یک مقصد نوعی خطا در فرآیند مسیریابی است.

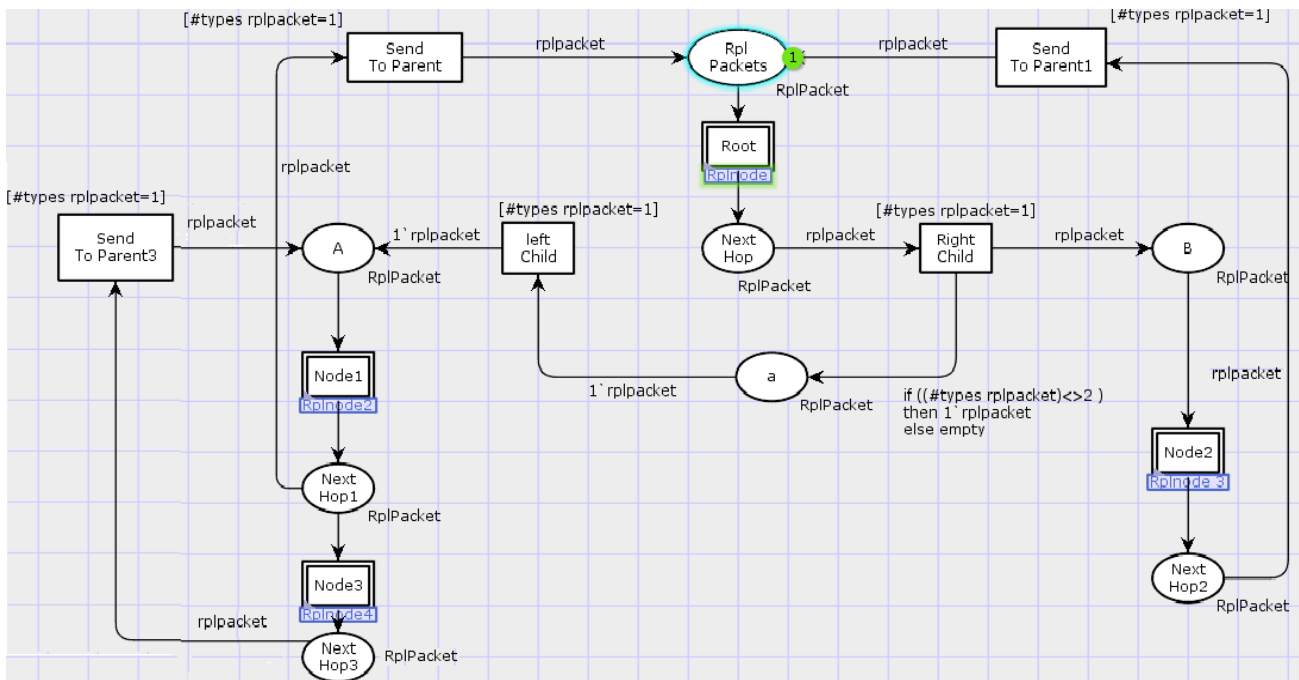
علاوه بر این می توان معیارهای مسیریابی را نیز به راحتی با شبکه های پتری رنگی مورد بررسی قرار داد. برای این منظور در پژوهش جاری معیارهایی نظیر میزان مصرف انرژی، نرخ بسته های دریافتی و میزان استفاده از پیام های کنترلی (پیام های سربار در شبکه) در پروتکل مسیریابی RPL مورد بررسی قرار گرفته است.

در صورت تشخیص ناسازگاری (در یک آستانه مشخص) این ماژول وظیفه تعمیر محلی را بر عهده دارد. لازم به ذکر است که فرآیند تعمیر در این پروتکل تنها خاص این ماژول نبوده و با برخی رخدادهای دیگر نیز صورت می گیرد. به عنوان مثال با کاهش عواملی نظیر انرژی گره، مقدار RANK افزایش یافته که می تواند موجب تغییر پدر ارجح در برخی گره ها گردد. این موضوع خود به منزله تعمیر محلی است. لازم به ذکر است که دو وضعیت Dio Parents و Dao Parents برای انتخاب مسیر جایگزین از طریق تابع LocalRepair به این ماژول اضافه شده اند. تعمیر همگانی نیز تنها توسط گره ریشه شروع و سایر گره ها با دریافت پیام های DIO با نسخه جدیدی از اطلاعات به اجرای تعمیر همگانی می پردازند. البته برای این امر تمام نشانه های ذخیره شده در وضعیت های مختلف گره حذف خواهند شد.

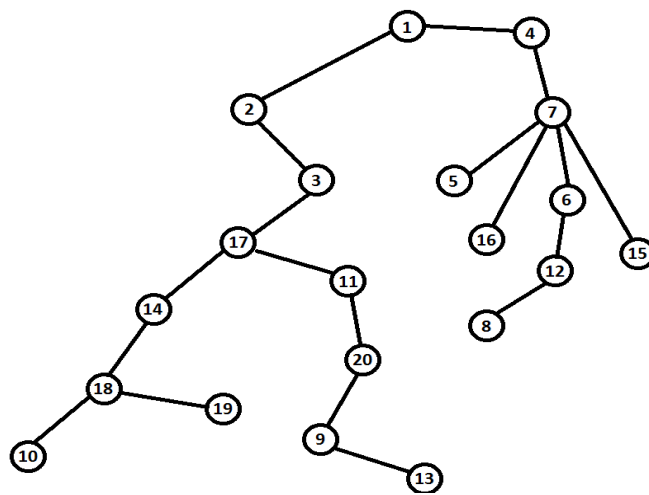
در شکل شماره ۷ ماژول بررسی ناسازگاری ها در پروتکل RPL مشاهده می گردد. از اصلی ترین وظایف این ماژول می توان به بررسی وجود تطابق در جهت حرکت بسته ها با مقدار RANK، بررسی دریافت پیام های تکراری DIO و یا DAO در یک گره و همچنین دریافت پیام DIO با شماره نسخه ناسازگار اشاره کرد.

این ماژول در صورت دریافت پیام DIO و یا DAO جدید، فرستنده را به لیست پدران DIO یا DAO به صورت محلی (لیست مربوط به خود گره جاری) اضافه می کند. گره مذکور در صورت کوچکتر بودن مقدار RANK فرستنده پیام DIO از مقدار RANK محلی، به عنوان پدر ارجح انتخاب خواهد شد. مقدار RANK سپس با در نظر گرفتن والد جدید بر روزرسانی می شود. از دیگر وظایف این ماژول، بازرسی پیام های DAO به پدر ارجح جهت انتشار اطلاعات مسیر-های موجود رو به پایین (مسیرهای از ریشه به سمت برگ های درخت) و همچنین افزایش مقدار Rank هنگام اتمام انرژی باتری (به معنای خروج گره از شبکه) است. ایجاد پایداری در شبکه نیز به کمک ماژول جاری صورت می گیرد. این کار با یک فناوری زمانسنج و از طریق کاهش سرعت انتشار اطلاعات کنترلی به مرور زمان اجرایی می شود [۱].

پس از مدلسازی رفتار گره ها در RPL به مدلسازی درخت DODAG پرداخته خواهد شد. در درخت DODAG هر گره به صورت ماژول شکل شماره ۴ در نظر گرفته شده و سپس ارتباط آن با سایر گره ها برقرار می گردد. به عنوان مثال مدلسازی شکل شماره ۸ بر اساس ماژول های مذکور در شکل شماره ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: توپولوژی مدل شده شکل شماره ۸



شکل ۱۰: توپولوژی پیشنهادی

بتوانند به صورت حلقوی از یکدیگر قابل دسترس باشند. بر این اساس برابری تعداد گره‌های گراف SCC و گره‌های فضای حالت در جدول شماره ۲ (هر دو ۳۶۲۸ گره) به معنی عدم وجود حلقه (زیرمجموعه‌ای از وضعیت‌های مختلف) در مدل پروتکل RPL می باشد.

تایید دیگری برای این موضوع ردیف مشخصه Fairness در جدول شماره ۲ است. امکان اجرای بی‌نهایت بار یک تبدیل به معنی عدم رعایت عدالت در مدلسازی است. شناسایی این نوع تبدیل‌ها در شبکه‌های پتری رنگی به کمک بررسی Fairness صورت می‌گیرد. مقدار هیچ در ردیف مشخصه Fairness جدول شماره ۲ عدم وجود حلقه در پروتکل RPL را تصدیق می‌کند. در واقع حلقه‌ها هستند که در فضای حالت امکان اجرای بی‌نهایت بار حداقل یک تبدیل را فراهم می‌سازند (هدف شماره ۲).

همانطور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌گردد در این مدل وضعیت Home نیز وجود ندارد. این مفهوم در شبکه‌های پتری رنگی به معنی نبود یک نقطه مشخص پایانی برای هر دنباله از وضعیت‌ها در فضای حالت است. به عبارت دیگر با شروع از هر وضعیت فضای حالت و اجرای تبدیل‌های مربوطه نمی‌توان در نهایت به یک وضعیت مشخص در مدل رسید. بنابراین رفتار پروتکل RPL بر اساس پیام‌های کنترلی مختلف دارای خروجی متفاوت می‌باشد. این امر با عدم وجود هیچ وضعیتی در بخش تعداد وضعیت Home جدول شماره ۲ تایید می‌گردد (هدف ۳).

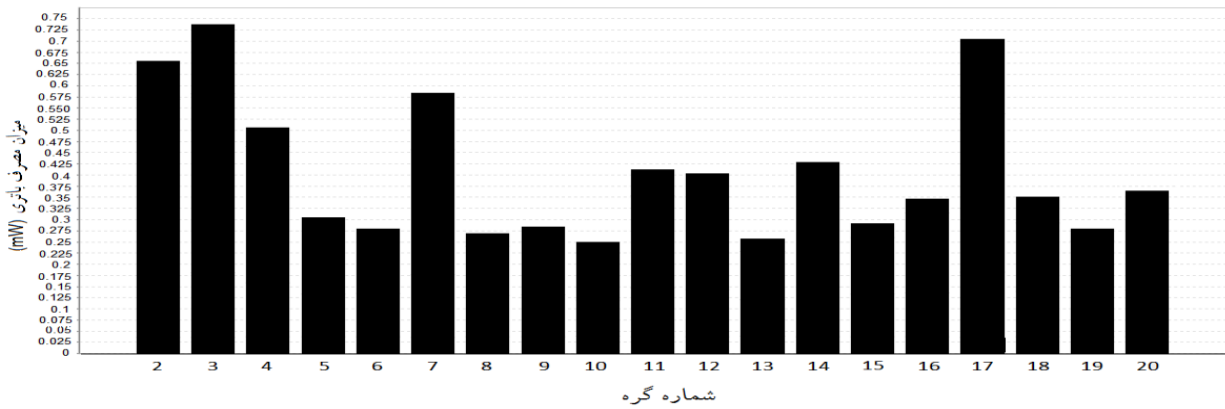
شبکه‌های پتری رنگی در کنار ارائه امکانات مناسب برای بررسی فرمال در فرآیند مدلسازی قابلیت ارزیابی پارامترهای کمی را نیز به خوبی فراهم ساخته است. بررسی این موارد با مشاهده مقادیر نشانه های تعریف شده پس از اجرای مدل ممکن می‌گردد. به عنوان مثال در مدل مربوط به پروتکل RPL مقدار انرژی باتری در هر گره می‌تواند جهت بررسی مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرد. در نمودارهای شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب میزان مصرف انرژی گره ها (گره‌های گراف شکل شماره ۱۰)، میزان ترافیک دریافت شده در ریشه و تعداد پیام‌های کنترلی ارسالی با بررسی مقادیر نشانه‌ها آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این بررسی تداخل رادیویی نیز در نظر گرفته شده است.

در ادامه درخت DODAG شکل ۱۰ را به کمک مدل بخش ۳ و ابزارهای موجود در شبکه‌های پتری رنگی بررسی می‌کنیم. در این شکل گره شماره ۱ یا ریشه مسئول جمع‌آوری اطلاعات سایر گره‌ها است. به عبارت دیگر سایر گره‌ها محیط خود را بررسی کرده و اطلاعات جمع‌آوری شده را بر اساس پروتکل RPL به ریشه ارسال می‌کنند. بررسی فضای حالت این مدل در جدول شماره ۲ آورده شده است. در بخش اول اطلاعات این جدول وضعیت مدل را به صورت کامل نشان می‌دهد (همانطور که مشاهده می‌گردد در این بخش وضعیت فضای حالت مدل برابر با مقدار کامل است). وضعیت کامل بدین معناست که در پروتکل RPL از هر وضعیت می‌توان به وضعیتی دیگر رفته و تمام تبدیل‌ها شرایط اجرایی را دارند. بر این اساس وضعیت رخداد شرایط بن‌بست وجود ندارد. مشخصه Liveness صحت دیگری برای این موضوع است. بخش Liveness در جدول ۲ تبدیل‌های بدون قابلیت اجرا را در فضای حالت مربوط به توپولوژی مذکور نشان می‌دهد. عدم وجود چنین تبدیلی در جدول ۲ از عدم رخداد شرایط بن‌بست (هدف شماره ۱) حکایت دارد.

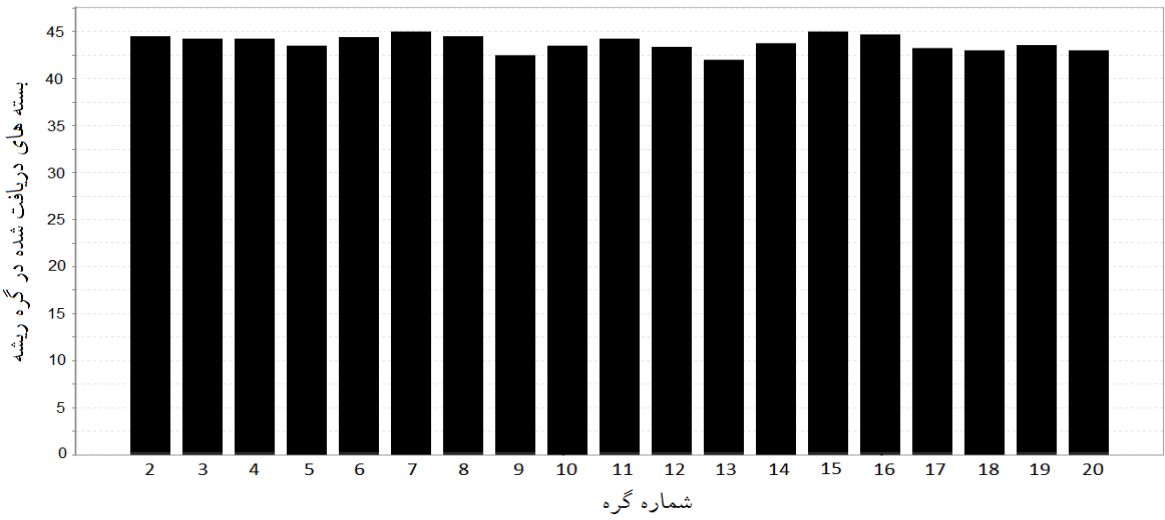
جدول ۲: نتایج فضای حالت

آمار	
فضای حالت	
تعداد مربع‌ها	۳۶۲۸
تعداد پیکان‌ها	۶۸۶۲
وضعیت	کامل
زمان	1 ثانیه
گراف SCC یا گراف همبند قوی	
تعداد مربع‌ها	۳۶۲۸
تعداد پیکان‌ها	۶۸۶۲
زمان	1 ثانیه
اطلاعات فضای حالت	
تعداد وضعیت HOME	هیچ
تبدیل‌های دارای ویژگی Liveness	هیچ
تبدیل‌های دارای ویژگی Fairness	ندارد

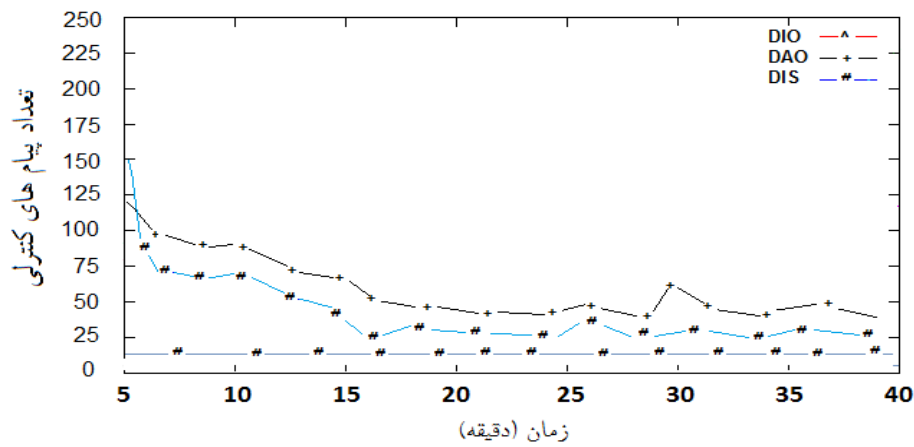
در جدول شماره ۲ در کنار فضای حالت بخش دیگری تحت عنوان SCC وجود دارد. SCC^{۱۴} یا گراف همبند قوی در فضای حالت، زیرمجموعه‌ای از وضعیت‌های مختلف مدل است که همه اعضای آن



شکل ۱۱: مصرف انرژی گره‌های درخت شکل شماره ۱۰



شکل ۱۲: ترافیک دریافت شده در گره ریشه بر اساس گره



شکل ۱۳: سربار پیام‌های کنترلی

sensor network techniques in Internet of Things (IoT).” *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 161-165, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.

- [2] A. E. Omolara, “The internet of things security: A survey encompassing unexplored areas and new insights.” *Computers & Security*, vol. 112, p. 102494, 2022, doi: 10.1016/j.cose.2021.102494.
- [3] H. Lamaazi and N. Benamar, “A comprehensive survey on enhancements and limitations of the RPL protocol: A focus on the objective function.” *Ad Hoc Networks*, vol. 96, p. 102001, 2020, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.102001.
- [4] R. A. Alexander, J. Brandt, J. Hui, K. Pister, P. Thubert, and T. Winter, *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RFC 6550)*. 2012.
- [5] A. Idrees and A. J. Witwit, “Energy-efficient load-balanced RPL routing protocol for internet of things networks.” *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, vol. 11, no. 3, pp. 286-306, 2021.
- [6] P. O. Kamgueu, E. Nataf, and T. D. Ndie, “Survey on RPL enhancements: A focus on topology, security and mobility.” *Computer Communications*, vol. 120, pp. 10-21, 2018, doi: 10.1016/j.comcom.2018.02.011.
- [7] K. Jensen and L. M. Kristensen, *Coloured Petri Nets*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [8] D. A. Zaitsev and T. R. Shmeleva, “Modeling With Colored Petri Nets.” *Automated Systems in the Aviation and Aerospace Industries*, pp. 378-404, 2019, doi: 10.4018/978-1-5225-7709-6.ch014.
- [9] Y. Chen, K. Hou, J. Chanet, and K. GHOLAMI, “A RPL based Adaptive and Scalable Data-collection Protocol module for NS-3 simulation platform.” *NICST 2103 New Information Communication Science and Technology for Sustainable Development: France-China International Workshop*, 2013.
- [10] L. Bartolozzi, T. Pecorella, and R. Fantacci, “ns-3 RPL module: IPv6 Routing Protocol

همانطور که در نمودار شماره ۱۱ مشاهده می شود میزان مصرف انرژی در پروتکل RPL با توجه به ظرفیت باتری های امروزی مناسب بوده و قابلیت اجرایی قابل قبولی را دارد. با توجه به نمودار شماره ۱۲ نیز پروتکل RPL می تواند توازن مناسبی را بین گره های درخت از نظر تعداد پیام های دریافتی در ریشه ایجاد کند. سربار ناشی از پیام های کنترلی نیز بر اساس نمودار ۱۳ یک روند کاهشی را دنبال کرده است. امری که نشان دهنده حرکت RPL به سمت ایجاد پایداری در شبکه می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن ارائه یک مدل ماژولار با خوانایی مناسب برای پروتکل مسیریابی RPL به ارزیابی برخی معیارها در ساختار آن با کمک قابلیت های موجود در شبکه های پتری رنگی پرداخته شد. نتایج حاصل از این بررسی در لیست زیر آورده شده است.

۱- شرایط توقف در اجرای پروتکل RPL وجود ندارد. به

عبارت دیگر امکان وقوع بن بست در فرآیند مسیریابی ممکن نیست.

۲- در پروتکل RPL امکان رخداد حلقه وجود ندارد.

۳- مقادیر ورودی در عملکرد این پروتکل موثر است و

پروتکل به یک وضعیت خاص هدایت نمی گردد (رفتار

متفاوت در مقابل ورودی های متفاوت).

علاوه بر بررسی ساختاری پروتکل RPL برخی پارامترهای مهم در ارزیابی عملکردی آن نیز به کمک مقادیر نشاندهنده در شبکه های پتری رنگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی ضمن نمایش توانایی شبکه های پتری رنگی در بررسی متغیرها، عملکرد مناسب RPL را در مصرف انرژی، ترافیک دریافتی و سربار کنترلی تایید می کند.

لازم به ذکر است که شبکه های پتری رنگی به علت وجود قابلیت های کارآمدی از جمله پوشش گسستگی، پوشش اتفاقات همزمان و قابلیت مدلسازی ماژولار می تواند یک مدلسازی مناسبی را برای پروتکل های مسیریابی که ماهیت گسسته و همزمان دارند ارائه دهد. بر این اساس پژوهش جاری می تواند برای محققان بسیاری مفید باشد.

مراجع

- [1] K. Gulati, R. S. Kumar Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, and G. Saravanan, “A review paper on wireless

- [18] G. Cavone, M. Dotoli, and C. Seatzu, "A Survey on Petri Net Models for Freight Logistics and Transportation Systems." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 1795-1813, 2018, doi: 10.1109/tits.2017.2737788.
- [19] G. P. Bhandari and Ratneshwer, "Dependency-based fault diagnosis approach for SOA-based systems using Colored Petri Nets." *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 480-491, 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2018.12.002.
- [20] H. Kaid, A. Al-Ahmari, Z. Li, and R. Davidrajuh, "Single Controller-Based Colored Petri Nets for Deadlock Control in Automated Manufacturing Systems." *Processes*, vol. 8, no. 1, p. 21, 2019, doi: 10.3390/pr8010021.
- [21] M. Pishdar, Y. Seifi, M. Nasiri, and M. Bag-Mohammadi, "PCC-RPL: An efficient trust-based security extension for RPL." *Information Security Journal: A Global Perspective*, vol. 31, no. 2, pp. 168-178, 2021, doi: 10.1080/19393555.2021.1887413.
- [22] A. Kamble, V. S. Malemath, and D. Patil, "Security attacks and secure routing protocols in RPL-based internet of things: Survey," *2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI)*, 2017.
- [23] V. Adat and B. B. Gupta, "Security in Internet of Things: issues, challenges, taxonomy, and architecture." *Telecommunication Systems*, vol. 67, no. 3, pp. 423-441, 2017, doi: 10.1007/s11235-017-0345-9.
- [24] O. Iova, P. Picco, T. Istomin, and C. Kiraly, "RPL: The Routing Standard for the Internet of Things.. Or Is It?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 16-22, 2016, doi: 10.1109/mcom.2016.1600397cm.
- for Low power and Lossy Networks." *Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2012, doi: 10.4108/icst.simutools.2012.247718.
- [11] P. Karkazis, P. Trakadas, T. Zahariadis, A. Hatziefremidis, and H. C. Leligou, "RPL modeling in J-Sim platform." *2012 Ninth International Conference on Networked Sensing (INSS)*, 2012, doi: 10.1109/inss.2012.6240559.
- [12] J. Tripathi, J. C. De Olive, and J. P. Vasseur, "A performance evaluation study of RPL: Routing Protocol for Low power and Lossy Networks." *2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2010, doi: 10.1109/ciss.2010.5464820.
- [13] M. Becker, K. Kuladinithi, and C. Görg, "Modelling and Simulating the Trickle Algorithm." *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, pp. 135-144, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-30422-4_10.
- [14] L. M. Kristensen and V. Veiset, "Transforming CPN Models into Code for TinyOS: A Case Study of the RPL Protocol." *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*, pp. 135-154, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-39086-4_10.
- [15] L. Wallgren, S. Raza, and T. Voigt, "Routing Attacks and Countermeasures in the RPL-Based Internet of Things." *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9, no. 8, p. 794326, 2013, doi: 10.1155/2013/794326.
- [16] W. Yu, M. Jia, X. Fang, Y. Lu, and J. Xu, "Modeling and analysis of medical resource allocation based on Timed Colored Petri net." *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 368-374, 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.05.010.
- [17] A. Shahidinejad, M. Ghobaei-Arani, and L. Esmaeili, "An elastic controller using Colored Petri Nets in cloud computing environment." *Cluster Computing*, vol. 23, no. 2, pp. 1045-1071, 2019, doi: 10.1007/s10586-019-02972-8.