یک روش توزیع‌شده مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب برای ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های خودمختار

فهیمه دباغی‌زرندی[۱]، دانشجوی دکتری، زینب موحدی[۲]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران -f.dabaghi@vru.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران -zmovahedi@iust.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش استفاده از اینترنت، میزان انرژی مصرفی زیرساخت‌های شبکه‌های ارتباطی و به‌تبع‌آن هزینه‌های اقتصادی و دی‌اکسیدکربن تولید شده به‌میزان قابل‌توجهی افزایش یافته‌است. ازاین‌رو، امروزه مسئله مخابرات سبز در راستای کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلودگی‌های زیست‌محیطی موردتوجه ویژه قرار گرفته‌است. در این مقاله یک روش توزیع شده مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب پیشنهاد شده است که تعدادی از گره‌ها و لینک‌های شبکه را در ساعات کم‌ترافیک به‌منظور ذخیره سازی انرژی خاموش می‌کند. با توجه به پیچیدگی مدیریت و سربار ترافیکی و محاسباتی لازم جهت کسب و استفاده از دانش ترافیک شبکه، روش پیشنهادی ضمن لحاظ معیارهای کارایی شبکه، به هیچ دانشی از ترافیک شبکه برای خاموشی مؤلفه‌ها نیاز ندارد و تنها از اطلاعات ارسال‌شده توسط پروتکل‌های مسیریابی وضعیت-لینک استفاده می‌کند. به‌این منظور، روش پیشنهادی براساس مسئله پوشش رأسی و رخداد مؤلفه‌ها در شبکه، تعدادی از گره‌ها را برای خاموشی انتخاب می‌کند. سپس، تعدادی از لینک‌های کم‌رخداد به شرط عدم‌ایجاد افزایش قابل‌توجه در میانگین رخداد لینک‌ها در صورت خاموشی، از گراف شبکه حذف می شوند. روش پیشنهادی از مزایایی همچون عمل‌کرد کاملا توزیع شده، عدم‌نیاز به دانش ترافیک شبکه، سربار حداقلی انتشار اطلاعات، صرفه‌جویی انرژی قابل توجه به‌علت خاموشی هر دو مولفه گره و لینک، توجه به حفظ کارآیی شبکه و پیچیدگی محاسباتی پایین بهره می‌برد. نتایج به‌دست‌آمده حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از سناریوی شبکه واقعی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ضمن ذخیره‌سازی انرژی قابل‌توجه، کارایی شبکه‌ای بالاتری را نسبت به روش‌های مشابه تضمین می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: مخابرات سبز، زمان‌بندی خواب، آگاهی از انرژی، بهینه‌سازی انرژی، رخداد لینک و گره، پوشش رأسی.

A Distributed Sleep-Scheduling Energy-Saving Method in Autonomous Systems

F. Dabaghi-Zarandi[1], PhD student, Z. Movahedi[2], Assistant professor

1- Faculty of Computer Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. Email:f.dabaghi@vru.ac.ir
2- Faculty of Computer Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. Email:zmovahedi@iust.ac.ir

Abstract: In recent years, due to the increase in internet usage, the energy consumption of communication networks' infrastructures has been significantly augmented, resulting in the increase of monetary costs and carbon pollution caused by ICT. To address this challenge, green communication is investigated in order to reduce economic costs and environment pollution of ICT section. In this paper, we propose a distributed sleep-scheduling method which switches off some network links and nodes in order to save energy during low traffic periods. In order to avoid the management complexity as well as the network and computational overhead of traffic-aware approaches, the proposed scheme takes care of network performance without any knowledge of network traffic matrix. To this end, the proposed approach selects switching-off nodes based on vertex cover problem and the occurrence of their related links. Then, some low-occurrent links in the new topology are switched off if their removal does not cause a significant increase in average network links' occurrence. The proposed approach does not depend on any central controller and imposes minimum computing and network traffic overload since it does not use the network matrix and profits from the information already provided by link-state protocols. In addition, it can achieve significant energy saving by switching off both nodes and links while minimum negative impact on network performance metrics can be ensured. Simulation results performed on real network scenarios show that our proposed technique allows higher network performance compared to other green alternatives, while significant amount of energy conservation is achieved.

Keywords: green communication, sleep-scheduling, energy awareness, energy efficiency, link and node occurrence, vertex cover.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

نام نویسنده مسئول: زینب موحدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران- دانشکده مهندسی کامپیوتر.

۱- مقدمه

با توجه به رشد روزافزون استفاده از اینترنت در سال‌های اخیر، مصرف انرژی زیرساخت‌های شبکه و درنتیجه‌ی آن دی‌اکسیدکربن تولیدشده به‌صورت فزاینده‌ای افزایش یافته‌است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۷ انرژی الکتریسیته مصرفی توسط بخش تکنولوژی ارتباطات و اطلاعات (ICT[1]) ۱/۳٪ از انرژی الکتریسیته مصرفی کل جهان می‌باشد، که این درصد در سال ۲۰۱۲ به ۱/۸٪ رسیده‌است [۱، ۲، ۳]. دراین‌راستا، مقدار زیادی از انرژی ICT در مؤلفه‌های شبکه مصرف می‌شود که تقریباً ۳۰ تا ۳۷ درصد از گازهای گلخانه‌ای تولیدشده توسط ICT را شامل می‌شوند [۲]. بنابراین، مخابرات سبز[2] با روی‌کرد کاهش انرژی مصرفی و آلودگی‌های زیست‌محیطی مولفه‌های شبکه به‌عنوان یک حوزه مهم در تحقیقات و صنایع شبکه در سال‌های اخیر به شمار می‌رود.

یکی از زمینه‌های هدررفت انرژی در شبکه‌های کامپیوتری ناشی از بیش-فراهمی[3] منابعی ازقبیل پهنای باند، توان پردازشی و حافظه مؤلفه‌های شبکه به‌منظور فراهم‌کردن امکان پاسخ‌گویی در مواقع پرترافیک می‌باشد، درحالی‌که تنها ۳۰ تا ۴۰ درصد از این منابع در ساعات کم‌ترافیک مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۷-۴]. درنتیجه، با خاموش‌کردن مؤلفه‌های کم‌مصرف میانی شبکه اعم از گره‌ها و لینک‌ها در ساعات کم‌ترافیک می‌توان به ذخیره‌سازی قابل‌توجهی در انرژی دست یافت [۸، ۱۳]. در این مقاله، روش به‌خواب‌بردن مؤلفه‌های اضافی در زمان‌های کم‌ترافیک با عنوان زمان‌بندی خواب[4] ذکر می‌شود و ایده پیشنهادی براساس این روش مطرح می‌گردد.

تاکنون تعدادی روش سبز مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب برای کاهش مصرف انرژی در شبکه‌ها مطرح شده‌است [۱۶-۱۰، ۸]. با توجه به تغییر طول کوتاه‌ترین مسیرها تحت‌تأثیرخاموشی مولفه‌های شبکه و تأثیر آن برکیفیت سرویس‌های در حال اجرا، روش‌های موجود تلاش می‌کنند مؤلفه‌های مناسب جهت خاموشی را به‌گونه‌ای انتخاب نمایند که کم‌ترین تأثیر را در کارایی شبکه ایجاد کند. دراین‌راستا، هدف پیداکردن کوچک‌ترین زیرگراف همبند از گراف شبکه است به‌طوری‌که تاحدممکن محدودیت‌های کیفیت سرویس را تضمین کند. این مسئله با توجه به موقعیت گرافی شبکه و محدودیت‌های کیفیت سرویس می‌تواند توسط یک مسئله ILP مدل سازی شود و در سال ۲۰۱۴ اثبات شده‌است که مسئله بهینه سازی انرژی در شبکه‌ها در دسته مسائل ان‌پی-کامل قرار دارد [۹]. درنتیجه، روش‌های پیشنهادی در این حوزه عموماً به‌صورت حریصانه عمل می‌کنند. در این میان، بسیاری از روش‌های موجود تنها به خاموشی لینک می‌پردازند. در حالی که خاموشی گره‌های کم‌تراستفاده شده در شبکه علاوه‌بر لینک‌ها می‌تواند انرژی بیش‌تری را ذخیره کند. علاوه‌براین، بسیاری از پروتکل‌های سبز به یک کنترل‌گر مرکزی وابسته هستندکه این روش‌ها از مشکلاتی ازجمله تحمیل بار اضافه قابل‌توجه به شبکه، تنها نقطه شکست[5] و پیچیدگی مدیریت رنج می‌برند.

از دیدگاه توجه به حفظ کارآیی شبکه، برخی از روش‌های سبز با لحاظ یک ماتریس ترافیک برون‌خط یا برخط، معیارهای کیفیت سرویس شبکه را در حین زمان‌بندی خواب بررسی می‌نمایند. این روش‌ها پارامترهای متفاوتی ازقبیل بیشینه بهره‌وری لینک، پهنای باند و تراکم را برای ارضای محدودیت‌های کیفیت سرویس در نظر می‌گیرند. با وجود مزایای محدودکردن بیشینه بهره‌وری لینک موردقبول جهت زمان‌بندی خواب، ممکن است کیفیت سرویس نهایی با توجه به وابستگی به عامل‌های دیگری ازقبیل طول مسیر و طول صف هر مؤلفه در مسیر ارضا نگردد. برخی دیگر از روش‌ها برای تضمین کارایی، در هر مسیر پهنای باند مؤلفه‌ها را در نظر می‌گیرند در صورتی که ممکن‌است چنین مسیری موجود نباشد. علاوه‌بر چالش‌های ذکر شده در روش‌های آگاه از ترافیک، این روش‌ها از مشکلاتی ازجمله پیچیدگی بالا و سربار قابل‌ملاحظه جهت کسب دانش ترافیک شبکه یا محاسبه معیارهای کیفیت سرویس رنج می‌برند. درمقابل، برخی از روش‌ها بدون هیچ‌گونه آگاهی از ترافیک شبکه به زمان‌بندی خواب می‌پردازند. این امر ممکن است در صورت عدم‌توجه به تأثیر زمان‌بندی خواب بر سربار ترافیکی تحمیل شده بر شبکه باقی‌مانده، منجربه افول معیارهای کارایی شبکه گردد. به‌منظور حفظ کارآیی شبکه، برخی از این روش‌ها حداکثر افزایش ایجادشده توسط الگوریتم زمان‌بندی خواب در طول کوتاه‌ترین مسیرها را محدود می‌کنند. درحالی‌که ممکن است بسیاری از مؤلفه‌های شبکه به‌صورت مکرر در کوتاه‌ترین مسیرهای متفاوتی مورداستفاده قرار بگیرند و لذا بهره‌وری بخشی از لینک‌ها و گره‌های شبکه بسیار بالا رود.

برای پاسخ‌گویی به چالش‌های مطرح شده، در این مقاله، یک روش جدید برای زمان‌بندی خواب ارائه شده‌است که تعدادی از لینک‌ها و گره‌های شبکه را در ساعات کم‌ترافیک شبکه به‌منظور کاهش مصرف انرژی خاموش می‌کند.با توجه به پیچیدگی مدیریت و سربار محاسباتی یا ترافیکی لازم جهت کسب و لحاظ دانش ترافیک شبکه، روش پیشنهادی ضمن لحاظ معیارهای کارایی شبکه،به هیچ دانشی از ترافیک شبکه برای خاموشی مؤلفه‌ها و کاهش مصرف انرژی نیاز ندارد. به این منظور، با استفاده از اطلاعات موجود در پیام‌های LSA[6] فراهم شده توسط پروتکل‌های مسیریابی ازقبیل OSPF[7]، میزان استفاده از لینک‌ها را در تصمیم‌گیری خود لحاظ می‌کند. علاوه‌برآن، روش پیشنهادی به صورت کاملاً توزیع شده عمل می‌کند که براین‌اساس از مزایایی ازقبیل عدم‌انتشار هیچ‌گونه اطلاعات و سربار اضافی در شبکه و کاهش پیچیدگی زمانی بهره می‌برد. همچنین، روش پیشنهادی به منظور حفظ کارایی شبکه از معیار رخداد مولفه‌ها در کوتاه‌ترین مسیرها استفاده می‌کند و تاحدممکن لینک‌ها و گره‌های پررخداد را در شبکه حفظ می‌کند. بدین‌صورت، از تحمیل ترافیک مولفه‌های پررخداد به سایر نقاط شبکه و افول معیارهای کارآیی جلوگیری می‌نماید. علاوه براین، روش پیشنهادی اجازه نمی‌دهد که میانگین رخداد مولفه‌ها از یک میزان ازپیش‌تعیین‌شده بیش‌تر شود. بنابراین، به‌صورت

غیرمستقیم، بیشینه بهره‌وری لینک در شبکه دست‌خوش تغییر کم‌تری قرار می‌گیرد و از بروز تراکم در شبکه جلوگیری می‌شود.

ادامه مقاله بدین شرح می‌باشد. در بخش ۲، دسته‌بندی موجود و کارهای پیشین در زمینه روش‌های سبز مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب شرح داده می‌شوند. در بخش ۳، روش پیشنهادی در این مقاله ارائه می‌گردد. در بخش ۴، شبیه سازی و ارزیابی روش سبز پیشنهادی در مقایسه با کارهای مشابه موردبررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۵، بحث و بررسی الگوریتم پیشنهادی براساس پیچیدگی محاسباتی و ارزیابی عملکرد انجام می‌گردد. درنهایت، در بخش ۶، نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آتی بیان می‌شود.

۲- دسته‌بندی و کارهای پیشین

با توجه به اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی در شبکه‌های کامپیوتری تاکنون روش‌های مختلفی برای کاهش مصرف انرژی در زیرساخت‌های شبکه مطرح شده‌است. با توجه به ادبیات موجود، برخی روش‌ها در طراحی اولیه عناصر شبکه تغییراتی اعمال می‌کنند که از نظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری انرژی کم‌تری مصرف کنند [۱۷، ۱۸]. برخی دیگر، بر این باورند که عناصر انتهایی شبکه در ساعات بیکاری می توانند خاموش شوند و وظایف ارتباطی آن‌ها به سایر عناصر کم‌توان در شبکه منتقل شود [۲۱-۱۹]. برخی دیگر از روش ها به تطبیق انرژی[۸] مولفه‌های شبکه می‌پردازند. براین‌اساس، لینک‌ها براساس جریان عبوری از آن تطبیق داده می شود [۱۰]. برای نمونه، چندین نرخ انتقال برای هر لینک در نظر گرفته می‌شود و با توجه به ترافیک جاری یکی از این نرخ‌ها انتخاب می‌شود [۵]. درنهایت، در روش زمان‌بندی خواب، تعدادی از عناصر شبکه (گره یا لینک) برای خاموش‌شدن انتخاب می‌شوند. بنابراین انرژی مصرفی این عناصر درحالتی‌که غیرفعال هستند ذخیره می‌شود [۱۱، ۱۴].

همان‌گونه‌که ذکر شد، تنها روش مهند سی مجدد به کاهش انرژی مصرفی یک مؤلفه شبکه مستقل از سایر عناصر می‌پردازد و سایر روش‌های موجود در طی فرایند کاهش مصرف انرژی، بهره‌وری سایر مؤلفه‌های شبکه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. در این بین، روش‌های دسته اول، تنها به کاهش مصرف انرژی در عناصر انتهایی شبکه می‌پردازند و بهینه‌سازی انرژی روی عناصر میانی انجام نمی‌پذیرد. ازطرف‌دیگر، مدیریت پیچیدگی روش متناسب با توان مشکل‌ساز می‌باشد [۲۲، ۲۳]. علاوه‌برآن، مطالعات اخیر نشان داده‌است که کاهش مصرف انرژی در روش تطبیق توان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از کاهش مصرف انرژی در روش زمان‌بندی خواب می‌باشد [۴]. درنتیجه، در این مقاله به‌طور خاص روی روش‌های سبز مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب تمرکز شده‌است.

در مقاله [۱۳]، روش های سبز موجود از دیدگاه روند اجرای زمان‌بندی خواب، به دو دسته افزایشی و کاهشی تقسیم شده‌اند. در روش افزایشی،یک زیرگراف حداقل از گراف شبکه در نظر گرفته می شود که شرط اتصال بین کل مؤلفه‌های شبکه را دارا باشد به‌طوری‌که این زیرگراف می‌تواند یک درخت پوشا از شبکه را شامل گردد. البته درمواردی با ورود اولین درخواست ترافیکی، با ایجاد مسیر مربوطه برای سرویس‌دهی به این درخواست، زیرگراف حداقل اولیه تشکیل می‌شود. پس از تشکیل گراف حداقل، تعدادی از مؤلفه‌های شبکه به‌منظور تضمین معیارهای کیفیت سرویس به آن اضافه می‌شوند. پس از رسیدن به‌میزان موردتأیید کیفیت سرویس، تمام مؤلفه‌هایی که در توپولوژی انتخاب‌شده، وجود نداشته‌باشند، به‌حالت خاموش انتقال داده می‌شوند.در روش کاهشی، الگوریتم مربوط به زمان‌بندی خواب از کل گراف شبکه شروع کرده و گام‌به‌گام مؤلفه‌هایی از شبکه را با حفظ شرط حفظ اتصال و/یا کارایی شبکه انتخاب کرده و به‌حالت خاموشی انتقال می‌دهد همان‌گونه‌که مشخص است، اولویت اصلی روش‌های افزایشی به‌دست‌آوردن بیش‌ترین میزان صرفه‌جویی انرژی می‌باشد. این درحالی‌است‌که روش‌های کاهشی کارایی شبکه را در اولویت قرار می‌دهند.

در ادامه، برخی از روش‌های مطرح سبز مبتنی‌بر زمان‌بندی خواب براساس روند کاهشی یا افزایشی اجرای الگوریتم و خصوصیات الگوریتم موردا ستفاده شرح داده می شوند. این خصوصیات شامل نوع مؤلفه زمان‌بندی شده برای خواب (لینک، گره یا هردو)، ساختار تصمیم‌گیری (متمرکز یا توزیع شده)، آگاهی از ترافیک شبکه (ناآگاه از ترافیک، آگاه از ترافیک برون‌خط یا آگاه از ترافیک برخط) و آگاهی از کیفیت سرویس می‌باشند [۱۳].

الگوریتم[۹] DGAS، یک الگوریتم توزیع‌شده‌است که به‌منظور کاهش مصرف انرژی در ساعات کم‌ترافیک شبکه، به‌ترتیب برخی گره‌ها و لینک‌های شبکه را، در دو مرحله خاموش می‌کند [۲۴]. ازآنجایی‌که در خاموشی هر گره، تمامی لینک‌های متصل‌به‌آن نیز خاموش می‌شوند، معیارهای کارایی شبکه بیش‌تر تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین، در مرحله اول برای خاموشی گره‌ها از روش کاهشی استفاده می‌کند به‌طوری‌که اولویت با کارایی شبکه در نظر گرفته شود. در مرحله دوم، با توجه به تأثیر کم‌تر خاموشی لینک نسبت به گره در کارایی شبکه، از یک روش افزایشی برای خاموشی لینک‌ها استفاده می‌کند. به‌علاوه، این الگوریتم به‌منظور کاهش تأثیر خاموشی مولفه‌های شبکه در کارایی آن تنها درصورتی یک مولفه شبکه را خاموش می‌کند که طول کوتاه‌ترین مسیرها در شبکه باقی‌مانده نسبت به شبکه اولیه از یک حد آستانه ازپیش‌تعریف‌شده بیش‌تر نشود.

روش d-EAR[۱۰]، براساس مفهوم صادره[۱۱] کلی برخی از لینک‌های شبکه را بدون درنظرگرفتن ماتریس ترافیک خاموش می‌کند [۲۵]. دراین‌راستا، برخی از مسیریاب‌ها با درجه بالاتر به‌عنوان صادرکننده در نظر گرفته می‌شوند به‌طوری‌که هر صادرکننده درخت کوتاه‌ترین مسیر خود را با همسایگانش (واردکننده) به اشتراک می‌گذارد. بنابراین، برخی از لینک‌ها که روی درخت کوتاه‌ترین مسیر صادرکننده‌ها قرار نداشته باشند، خاموش می‌شوند. الگوریتم EAR یک نسخه متمرکز از d-EAR

می‌باشد که در آن انتخاب صادرکننده‌ها براساس مفهوم *move* انجام می‌شود [۲۶]. هر لینک در گراف می‌تواند به‌عنوان یک *move* درنظر گرفته شود که مبدأ آن به‌عنوان واردکننده و مقصد آن به‌عنوان صادرکننده در نظر گرفته می شود. هدف اصلی این روش این است که بیش‌ترین تعداد *move*ها را پیدا کند که با هم سازگار باشند. الگوریتم ESIR[۱۲] نیز یک نسخه گسترش‌یافته از الگوریتم EAR است که از ترافیک جاری شبکه در تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی خواب استفاده می‌کند [۲۷]. درنهایت، الگوریتم GPE[۱۳] یک نسخه گسترش‌یافته دیگر از الگوریتم EAR است که از یک ماتریس ترافیک برون‌خط در تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی خواب استفاده می‌کند [۲۸]. الگوریتم GPE همانند الگوریتم‌های d-EAR و EAR با استفاده از مفهوم صادره تعدادی از لینک‌ها را برای خاموشی انتخاب می‌کند، با این تفاوت که در این الگوریتم واردکننده در برخی از مسیرها، درخت کوتاه‌ترین مسیر خود را براساس صادرکننده تغییر می‌دهد به‌عبارت‌دیگر یک صادره جزئی انجام می‌شود.

الگوریتم ESOL[۱۴] با استفاده از یک کنترل‌کننده متمرکز، لینک‌های کم‌رخداد را بدون هیچ دانشی از ترافیک شبکه حذف می‌کند [۲۹]. در این الگوریتم رخداد هر لینک براساس تکرار آن لینک در کل کوتاه‌ترین مسیرها، محاسبه می‌گردد و آن لینکی که کم‌ترین رخداد را دارد برای خاموشی انتخاب می شود. پس از خاموشی هر لینک، رخداد همه لینک‌ها مجدداً براساس کوتاه‌ترین مسیرها در گراف باقی‌مانده شبکه، محاسبه می شود. حذف شدن لینک تازمانی‌که به اتصال شبکه صدمه‌ای وارد نشود، ادامه می‌یابد.

روش STB[۱۵] برای ذخیره‌سازی انرژی از درخت اشتینر استفاده می‌کند [۳۰]. STB درخت اشتینر را براساس گره‌های لبه شبکه ایجاد کرده و کلیه مسیرهای شبکه براساس مسیرهای موجود بین گره‌ها در درخت ایجاد می‌شوند. بنابراین تنها گره‌ها و لینک‌هایی از شبکه درحالت روشن قرار می‌گیرند که در درخت وجود داشته‌باشند و مابقی لینک‌ها و گره‌های هسته‌ای که روی درخت قرار ندارند، به‌حالت خاموش تبدیل می‌شوند. اگر مسیرهای موجود در درخت، طول کوتاه‌ترین مسیر را افزایش دهند از گذرگاه‌های فرعی روی درخت استفاده می‌شود.

روش انرژی کارآمد ارائه شده در [۳۱] لینک‌ها و گره‌های کم‌کاربرد شبکه را به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی خاموش می‌کند. این روش براساس ماتریس ترافیک برون‌خط، دو الگوریتم مستقل برای خاموشی لینک‌ها و گره‌های شبکه در نظر می‌گیرد. انتهای هر بازه زمانی تعیین شده لینک‌ها و گره‌ها براساس یک شاخص مشخص‌شده برای خاموشی بررسی می‌شوند. یک گره یا لینک درصورتی خاموش می‌شود که شرایط اتصال و بیشینه بهره‌وری لینک را ارضا کند.

روش سبز پیشنهاد شده در [۳۲] پیکره‌بندی لینک‌های شبکه را براساس موقعیت ترافیکی کنترل می‌کند. این روش از دو مرحله تشکیل شده‌است. در مرحله اول بدون درنظرگرفتن هیچ دانشی از ترافیک شبکه تعدادی از لینک‌ها برای خاموشی انتخاب می‌شوند. در مرحله دوم، با توجه به شرایط ترافیکی شبکه امکان خاموش‌کردن لینک‌های انتخاب شده در مرحله اول را بررسی می‌کند و درصورت نیاز تعدادی از لینک‌های انتخاب‌شده برای خاموشی به‌منظور بهبود وضعیت شبکه روشن می‌شوند.

۳- روش پیشنهادی

برای پاسخ‌گویی به چالش‌های روش‌های موجود، روش پیشنهادی به صورت کاملاً توزیع‌شده عمل کرده و بدون نیاز به ماتریس برخط یا برون‌خط ترافیک شبکه، مصالحه‌ای میان معیارهای کارایی شبکه و میزان ذخیره‌سازی انرژی در نظر می‌گیرد. به‌این‌ترتیب، ضمن حفظ کارایی شبکه، سربار محاسباتی و مدیریتی جهت انتخاب مولفه‌های مناسب برای خاموشی را کاهش می‌دهد. به‌علاوه، روش پیشنهادی به‌منظور کاهش سربار ترافیکی لازم برای انتخاب مولفه‌های مناسب جهت خاموشی تنها از اطلاعات فراهم‌شده توسط پروتکل‌های مسیریابی مبتنی‌بر وضعیت لینک مانند OSPF استفاده می‌کند. به این منظور، براساس اطلاعات موجود در RFC پروتکل OSPF [۳۳]، هر گره با استفاده از پیام‌های LSA دریافتی می‌تواند یک مدل سازی از کل گراف شبکه (گراف یک شبکه خودمختار (AS[۱۶])) در دست داشته‌باشد. دراین‌راستا، گراف شبکه به صورت یک گراف بدون‌جهت $G(V,E)$ مدل می شود که V و E به‌ترتیب، مجموعه گره‌ها و لینک‌های شبکه را شامل می‌شوند. $p=|V|$ و $q=|E|$ نیز به‌ترتیب، تعداد کل گره‌ها و لینک‌های شبکه را نشان می‌دهد.

الگوریتم پیشنهادی به‌منظور خاموش‌کردن مؤلفه‌های شبکه و درنتیجه کاهش مصرف انرژی، در دو مرحله متوالی اجرا می‌شود. در مرحله اول، به‌منظور اولویت‌دادن به معیارهای کارایی شبکه از یک روش کاهشی برای خاموشی برخی از گره‌های شبکه استفاده می‌کند. در خاموشی گره‌ها از مسئله پوشش رأسی استفاده می‌شود و زیرمجموعه‌ای از گره‌ها که همه‌ی لینک‌های گراف شبکه را پوشش دهند، انتخاب می شوند. دراین‌جا پوشش یک لینک یعنی آن‌که دست کم یکی از گره‌های دوسر لینک در این زیرمجموعه باشد. پس از انتخاب زیرمجموعه پوشش رأسی، تمامی گره هایی که در این زیرمجموعه قرار ندارند به‌همراه لینک‌های متصل به آن‌ها به‌حالت خاموش برده می‌شوند. بنابراین به‌منظور حفظ کارایی شبکه، زیرمجموعه پوشش رأسی به‌نحوی انتخاب می‌شود که پس از خاموشی گره‌های غیرمرتبط به پوشش رأسی، لینک‌های پررخداد تاحدممکن در شبکه باقی‌مانده وجود داشته‌باشند. منظور از رخداد لینک تعداد تکرار آن لینک در کوتاه‌ترین مسیرهای شبکه است. در مرحله دوم، یک روش کاهشی برای خاموشی لینک‌ها استفاده می‌کند و لینک‌های کم‌استفاده با رخداد کم‌تر به شرط برقراری کارایی شبکه به‌ترتیب حذف می‌شوند. در ادامه، الگوریتم پیشنهادی با نام VCGA[۱۷] ذکر خواهدشد.

ازآنجایی‌که فرض شد هر AS در لایه شبکه خود از یکی از پروتکل‌های مسیریابی وضعیت-لینک مانندOSPF استفاده می‌کند، هر گره با استفاده از پیام‌های LSA دریافتی از پروتکل OSPF، می‌تواند یک مدل‌سازی از کل گراف شبکه را در اختیار داشته باشد. بنابراین، اطلاعات موردنیاز برای محاسبه رخداد هر مؤلفه توسط الگوریتم دیجسترا، درهر گره دردسترس می‌باشد. لذا، هر گره قادر است دو مرحله متوالی الگوریتم VCGA را به‌صورت کاملاً مستقل اجرا کند. درنتیجه، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به‌صورت کاملاً توزیع‌شده اجرا گردد. براین‌اساس، رخداد هر مؤلفه در شبکه را در ادامه تعریف می‌شود.

فرض کنید کوتاه‌ترین مسیر بین گره i و j با $SP(i,j)$ نمایش داده شود. براین‌اساس رخداد گره $v \in V$ در $SP(i,j)$ به‌صورت معادله (۱) تعریف می‌شود.

$$o_{(i,j)}(v) = \begin{cases} 1, & v \in SP(i,j) \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (۱)$$

بنابراین رخداد گره v در گراف G می‌تواند به‌صورت معادله (۲) تعریف شود.

$$O_G(v) = \sum_{i=0}^{p} \sum_{j=1, i\neq j}^{p} o_{i,j}(v) \quad (۲)$$

همچنین رخداد لینک $e \in E$ در $SP(i,j)$ به‌صورت معادله (۳) تعریف می‌شود.

$$o_{(i,j)}(e) = \begin{cases} 1, & e \in SP(i,j) \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (۳)$$

بنابراین رخداد لینک e در گراف G می‌تواند به‌صورت معادله (۴) تعریف شود.

$$O_G(e) = \sum_{i=0}^{p} \sum_{j=1, i\neq j}^{p} o_{i,j}(e) \quad (۴)$$

در ادامه، دو مرحله الگوریتم VCGA توصیف می‌گردد. ابتدا الگوریتم مربوط به خاموش‌کردن گره و سپس الگوریتم مربوط به خاموش‌کردن لینک شرح داده می‌شود.

۳-۱- الگوریتم خاموش‌کردن گره‌ها

همان‌طور که مشخص‌است گراف شبکه از دو نوع گره هسته (میانی) و گره لبه (دسترسی) تشکیل شده‌است. یک گره لبه اطلاعاتی به (از) گره لبه دیگری ارسال (دریافت) می‌کند و از گره‌های هسته برای مسیریابی این انتقالات استفاده می‌کند. بنابراین یک گره لبه نمی‌تواند خاموش شود زیرا خاموشی آن در گراف شبکه عدم‌اتصال ایجاد می‌کند. درنتیجه، الگوریتم خاموش‌کردن گره‌ها برای گره‌های هسته در شبکه طراحی شده‌است.

ازآنجایی‌که در خاموش‌کردن گره، تمام لینک‌های متصل به گره هسته انتخاب‌شده نیز خاموش می‌شوند، خاموش‌کردن گره تأثیر بیش‌تری روی کارایی شبکه خواهدداشت. بنابراین، در مرحله خاموش‌کردن گره، یک الگوریتم مبتنی‌بر پوشش رأسی پیشنهاد شده‌است و در انتخاب زیرمجموعه حداقل پوشش رأسی به‌گونه‌ای عمل می‌شود که هر دو گره مربوط به لینک‌های پررخداد در نظر گرفته شوند. با توجه به این‌که مجموعه پوشش رأسی از نظر پیچیدگی زمانی در لیست مسئله‌های ان‌پی-تمام قرار می‌گیرد [۳۴]، در الگوریتم VCGA، یک روش حریصانه برای انتخاب زیرمجموعه حداقل پوشش رأسی پیشنهاد شده‌است که در ادامه شرح داده می‌شود.

1: **procedure** NODE–SLEEPING
2: **Inputs:** the initial network topology $G(V,E)$
3: Calculate the occurrence of each link $O_G(e)$ in graph G
4: $VC \leftarrow$ All of network edge nodes
5: $LC \leftarrow$ Each network link (i,j) that i or j is included in set of VC
6: $LS \leftarrow$ Sort all network links that are not included in set of LC based on non-increasing order of their occurrences in graph G
7: **for** each link $(i,j) \in LS$ **do**
8: $VC \leftarrow VC \cup \{i,j\}$
9: $LC \leftarrow LC \cup$ {Each network link (v,u) that $v = i$ or $u = j$}
10: **if** $LC == E$ **then**
11: break
12: **end if**
13: **end for**
14: $offNodes \leftarrow V - VC$
15: $G_{res}(V',E') = G(V,E)$
16: **for** each node $v \in offNodes$ **do**
17: Remove v and all its connected link from $G_{res}(V',E')$ satisfying connectivity condition
18: **end for**
19: **Output:** the residual network topology $G_{res} = (V',E')$
20: **end procedure**

شکل ۱: الگوریتم خاموش کردن گره‌ها.

فرایند مربوطه به خاموش‌کردن گره به صورت شبه‌کد در شکل ۱ نمایش داده شده‌است. ورودی الگوریتم گراف اصلی شبکه $G(V,E)$ می‌باشد.در این الگوریتم رخداد هر لینک براساس معادله (۴) محاسبه می شود (خط ۳). با توجه به این‌که گره‌های لبه نباید خاموش شوند و الزاماً باید در مجموعه پوشش رأسی قرار گیرند، در ابتدا کلیه گره‌های لبه در مجموعه پوشش رأسی VC قرار می‌گیرند و تمام لینک‌هایی که به گره‌های لبه متصل می‌باشد در مجموعه LC قرار می‌گیرند (خط ۴-۵).در مرحله بعد، کلیه لینک هایی که در مجموعه LC قرار ندارند براساس ترتیب غیرافزایشی رخداد شان مرتب می شوند و در مجموعه

LS قرار می‌گیرند (خط ۶). سپس در هر تکرار، لینک (i,j) از مجموعه LS با بیش‌ترین رخداد انتخاب می‌شود و دو گره مربوط به این لینک به مجموعه پوشش رأسی VC اضافه می شوند و تمام لینک‌های متصل به گره‌های i و j به مجموعه LC اضافه می‌شوند. این مرحله تازمانی‌که مجموعه LC کل لینک‌های شبکه را شامل شود تکرار می شود (خط ۱۳-۷). درنهایت، تمام گره‌هایی که در مجموعه پوشش رأسی VC قرار نداشته‌باشند به‌همراه تمام لینک‌های متصل آن‌ها از گراف شبکه به شرط حفظ اتصال، حذف می‌شوند (خط ۱۶-۱۴). گراف باقی‌مانده $G_{res} = (V', E')$، خروجی این الگوریتم پس از حذف مؤلفه‌های انتخاب شده جهت خاموشی می‌باشد.

۳-۲- الگوریتم خاموش‌کردن لینک‌ها

در این مرحله، لینک‌های کم‌رخداد شبکه به‌ترتیب برای خاموشی انتخاب می‌شوند. باتوجه‌به‌این‌که خاموشی یک لینک کم‌رخداد ممکن است در کل شبکه موجب تراکم شود، در این الگوریتم لینک کم‌رخداد در صورتی خاموش می‌شود که تحت‌تأثیر خاموشی آن لینک میانگین رخداد لینک‌های شبکه از میزان مشخص‌شده بیش‌تر نشود. بنابراین معیار میانگین رخداد لینک‌ها در کل شبکه به‌صورت معادله (۵) تعریف می‌شود.

$$LO_{Avg}(G) = \frac{\sum_{e \in E} O_G(e)}{|E|} \quad (۵)$$

باتوجه‌به‌این‌که با افزایش تعداد لینک‌های خاموش در شبکه، انرژی ذخیره شده افزایش یافته اما در مقابل آن کارایی شبکه کاهش می‌یابد، مصالحه‌ای میان این دو معیار باید در نظر گرفته شود. بنابراین، در الگوریتم VCGA یک ضریب α برای افزایش مقدار $LO_{Avg}(G)$ تعریف می شود. هر چه مقدار α بیش‌تر با شد، ذخیره سازی انرژی بیش‌تر و به تبع‌آن کارایی شبکه ضعیف‌تر خواهدشد. بنابراین ضریب α باید به نحوی تنظیم شود که نیاز شبکه را از نظر هر دو معیار ذخیره‌سازی انرژی و کارایی شبکه ارضا نماید.

شکل ۲ فرایند خاموش‌کردن لینک‌ها را نشان می‌دهد. ورودی الگوریتم گراف اصلی شبکه $G(V,E)$، گراف باقی‌مانده $G_{res} = (V', E')$ پس از اجرای الگوریتم خاموش‌کردن گره‌ها و ضریب α می‌باشد که میزان افزایش میانگین رخداد لینک‌های شبکه را نسبت به شبکه اولیه پس از اجرای الگوریتم خاموش‌کردن لینک‌ها مشخص می‌کند. در الگوریتم خاموش‌کردن لینک، رخداد هر لینک براساس معادله (۴) در گراف شبکه اولیه محاسبه می‌شود (خط ۳). سپس میانگین رخداد لینک‌های گراف شبکه اولیه $LO_{Avg}(G)$ با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود (خط ۴). در مرحله بعد، لینک‌های گراف G_{res} براساس رخدادشان به‌صورت غیرکاهشی مرتب می‌شوند و در مجموعه SL قرار داده می‌شوند (خط ۵). سپس در هر تکرار، کم‌رخدادترین لینک از مجموعه SL برای خاموشی انتخاب می‌شود. درصورتی‌که پس از خاموشی لینک انتخابی، اتصال شبکه به هم نخورد و میانگین رخداد لینک‌های شبکه از α برابر مقدار آن در شبکه اولیه بیش‌تر نشود، لینک مربوطه خاموش می‌شود. درنهایت، به‌عنوان خروجی این الگوریتم $G_{fin} = (V'', E'')$ برگردانده می‌شود.

1: **procedure** LINK−SLEEPING
2: **Inputs:** the initial network topology $G(V,E)$, the residual network topology $G_{res} = (V', E')$ resulted from node switching off Algorithm and the α threshold that specifies the maximum increase in average link occurrence
3: Calculate the occurrence of each link $(O_G(e))$ in graph G
4: Calculate the average occurrence of network links $LO_{Avg}(G)$ in graph G
5: $SL \leftarrow$ Sort all network links that are included in graph G_{res} based on non-decreasing order of their occurrences in graph G
6: $G_{fin} = (V'', E'') \leftarrow G_{res} = (V', E')$
7: **for** each link $e \in SL$ **do**
8: $E'' \leftarrow E'' - \{e\}$
9: Calculate $LO_{Avg}(G_{fin})$ in graph G_{fin}
10: **if** $LO_{Avg}(G_{fin}) > \alpha \times LO_{Avg}(G)$ or G_{fin} is not connected **then**
11: $E'' \leftarrow E'' + \{e\}$
12: **end if**
13: **end for**
14: **Output:** the final network topology $G_{fin} = (V'', E'')$
15: **end procedure**

شکل۲: الگوریتم خاموش کردن لینک‌ها.

۴- شبیه‌سازی و ارزیابی

به‌منظور ارزیابی عمل‌کرد روش پیشنهادی نسبت به سایر کارهای موجود،روش VCGA تو سط شبیه ساز شبکه ns-3 [۳۵]، پیاده سازی شده‌است و نسبت به دو روش مشابه مبتنی‌بر رخداد ESOL و DGAS مورد مقایسه قرارگرفته‌است. در این شبیه‌سازی، روش VCGA در میانه زمان شبیه سازی اجرا می شود، به‌عبارتی، در ابتدای زمان شبیه سازی تمام مؤلفه‌های شبکه درحالت روشن قرار دارند و در ادامه تعدادی از گره‌ها و لینک‌ها توسط روش سبز انتخاب شده و در حالت خاموش قرار می‌گیرند. ضریب درنظرگرفته‌شده برای حداکثر میزان افزایش قابل‌قبول میانگین رخداد لینک‌های شبکه پس از خاموشی در این شبیه‌سازی با مقادیر مختلفی از $\alpha = \{۱/۳، ۱/۵، ۱/۷\}$ موردآزمایش قرار گرفته‌است. بدیهی است که هرچه مقدار α بیش‌تر با شد، درصد لینک‌های خاموش

و درنتیجه میزان صرفه‌جویی انرژی بیش‌تر و در مقابل کارایی شبکه کم‌تر خواهدشد. به‌همین‌دلیل، حداکثر مقدار α را ۱/۷ درنظر گرفته شده‌است تا کارایی شبکه دست‌خوش کاهش قابل‌توجهی نشود.

به‌عنوان توپولوژی شبکه، می‌توان از گراف شبکه‌های تصادفی یا گراف‌های برگرفته از شبکه‌های واقعی استفاده کرد. تاکنون روش‌های سبز روی گراف‌های متفاوتی برگرفته از پایگاه‌هایی ازقبیل BRITE [۳۶]،SNDlib [۳۷] و Rocketfuel [۳۸] ارزیابی شده‌اند. باتوجه به این‌که گراف‌های موجود در پایگاه Rocketfuel برگرفته‌از شبکه‌های واقعی بوده و بسیاری از روش‌های سبز از سناریوهای موجود در این پایگاه استفاده کرده‌اند، در این مقاله به‌طور نمونه از گراف آزمایشی EBONE برگرفته‌از پایگاه Rocketfuel برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی استفاده شده‌است. این گراف آزمایشی از ۱۵۹ گره و ۶۱۴ لینک تشکیل شده و دارای ۸۷ گره هسته می‌باشد.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، ظرفیت تمام لینک‌ها یکسان در نظر گرفته شده‌است. همچنین، به احتمال ٪۳۵ میان هر جفت گره‌ی لبه ترافیک یکنواختی در کل زمان شبیه‌سازی با نرخ ۰/۱ نسبت به ظرفیت لینک‌ها ارسال می‌گردد. این ترافیک معادل ترافیک متوسط تولیدشده در شبکه‌های خودمختار می‌باشد [۳۹]. ازاین‌رو، در سایر کارهای مشابه ترافیکی با ویژگی‌های مشابه نسبت به ظرفیت شبکه مورداستفاده قرار گرفته‌است [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۹].

۴-۱- معیارهای ارزیابی

همان‌طورکه ذکر شد، روش VCGA برخی از لینک‌ها و گره‌های هسته شبکه را به‌منظور کاهش مصرف انرژی درحالت خاموش قرار می‌دهد. دراین‌صورت جریان ترافیکی مربوط به مؤلفه‌های خاموش در شبکه باقی‌مانده توزیع می‌شود. بنابراین، روش سبز باید به‌گونه‌ای عمل کند که یک تعادل بین کاهش مصرف انرژی و کارایی شبکه برقرار باشد. دراین‌راستا، دو گروه معیارهای ذخیره‌سازی انرژی وکارایی شبکه برای ارزیابی عمل‌کرد روش VCGA استفاده شده‌است. معیارهای ذخیره‌سازی انرژی میزان انرژی ذخیره‌شده توسط روش پیشنهادی را ارزیابی می‌کنند. معیارهای اصلی ذخیره‌سازی انرژی در ادامه شرح داده شده‌است:

۱. **میزان انرژی ذخیره‌شده:** این معیار میزان انرژی مصرفی مؤلفه‌های شبکه را ارزیابی می‌کند. بنابراین، می‌توان این معیار را برای شبکه موردآزمایش قبل از خاموشی و بعد از خاموشی مؤلفه‌ها محاسبه نموده و برآوردی از میزان انرژی ذخیره‌شده را به دست آورد. به‌منظور محاسبه معیار میزان انرژی مصرفی از مدل انرژی تعریف‌شده در [۴۰] استفاده شده‌است. براساس این مدل، انرژی مصرفی هر گره لبه و هسته شبکه در شبکه‌های واقعی بدون لحاظ انرژی مصرفی رابطه‌های آن به‌ترتیب معادل $2kW$ و $10kW$ می‌باشد. انرژی مصرفی هر رابط گره، P_{ni}، به‌ازای هر واحد از ظرفیت لینک ($c = 10\text{Gbps}$)، 50 W خواهدبود. ازطرف‌دیگر، انرژی مصرفی برای بازسازی مجدد، P_r، به‌ازای هر واحد از طول لینک ($l = 70km$)، 1kW می‌باشد. بنابراین، انرژی مصرفی هر لینک (i,j) با ظرفیت c_{ij} و طول l_{ij} با استفاده از معادله (۶) قابل محاسبه خواهدبود.

$$P_{ij} = \left\lceil \frac{c_{ij}}{c} \right\rceil \left(\left\lfloor \frac{l_{ij}}{l} \right\rfloor P_r + 2P_{ni} \right) \qquad (۶)$$

میزان انرژی مصرفی کل شبکه براساس مجموع میزان انرژی مصرفی گره‌ها و لینک‌های شبکه با استفاده از معادله (۷) قابل محاسبه خواهدبود.

$$P_{total} = \sum_{(i,j)\in E} P_{ij} + \sum_{n\in n_c} P_{cn} + \sum_{n\in n_a} P_{an} \qquad (۷)$$

که دراینجا P_{cn} و P_{an} به‌ترتیب انرژی مصرفی مربوط به گره‌های هسته و گره‌های لبه شبکه را مشخص می‌کنند. درنهایت، میزان انرژی ذخیره‌شده، ES، با استفاده از معادله (۸) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ES = \frac{P_{total}^{original} - P_{total}^{green}}{P_{original}} \times 100 \qquad (۸)$$

که در آن $P_{total}^{original}$ و P_{total}^{green}، به‌ترتیب میزان انرژی مصرف‌شده در شبکه اولیه و شبکه باقی‌مانده پس از اجرای روش سبز می‌باشد.

۲. **درصد گره‌های خاموش‌شده:** این معیار درصد گره‌هایی که توسط روش سبز خاموش شده‌اند را به‌صورت $\gamma_n = \frac{SN}{N}$ محاسبه می‌کند که در آن SN تعداد گره‌های خاموش‌شده توسط روش سبز و N تعداد کل گره‌های شبکه را نشان می‌دهد.

۳. **در صد لینک‌های خاموش شده:** این معیاردرصد لینک‌های به خواب‌رفته نسبت به کل لینک‌هایی که می‌توانند در بیش‌ترین حالت ذخیره‌سازی انرژی به خواب روند را ارزیابی می‌کند. بیش‌ترین حالت ذخیره‌سازی انرژی براساس حداقل تعداد لینک‌های لازم برای حفظ هم‌بندی گراف شبکه محاسبه می‌شود، که این حداقل $N-1$ می‌باشد. بنابراین تعداد کل لینک‌هایی که در بیش‌ترین حالت ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند خاموش شوند برابر است با $E-(N-1)$، به‌طوری‌که E تعداد کل لینک‌ها در شبکه می‌باشد. درنهایت، معیار توصیف‌شده به‌صورت $\gamma_l = \frac{SL}{E-(N-1)}$ محاسبه می شود، که در آن SL تعداد لینک‌های خاموش‌شده توسط روش سبز را نشان می‌دهد.

معیارهای کارایی میزان تأثیر روش سبز را روی کارایی شبکه موردبررسی قرار می‌دهند. برخی از این معیارها مناسب‌بودن کارایی شبکه و به‌عبارتی قابلیت شبکه در پاسخ‌گویی به کیفیت سرویس کاربردها را تحت‌تأثیر اجرای روش سبز بررسی می‌کنند و برخی دیگر تغییرات کارایی شبکه را با مقایسه تغییرات مسیریابی اولیه نسبت به مسیریابی اصلی محاسبه می‌کنند. معیارهای اصلی کارایی در ادامه شرح داده شده‌است:

۱. **بهره‌وری لینک‌ها:** این معیار تعداد لینک‌ها را در بازه‌های مختلف از بهره‌وری نشان می‌دهد (به‌طورمثال ٪۰-٪۱۰، ٪۱۰-٪۲۰ تا ٪۹۰-٪۱۰۰). بهره‌وری هر لینک e می‌تواند توسط فرمول $\frac{F(e)}{C(e)}$ محاسبه شود،که در آن $F(e)$ میزان جریان ترافیک روی لینک e و $C(e)$ ظرفیت لینک را نشان می‌دهد. براساس تحقیقات انجام‌شده [۳۲]، هدف یک روش سبز حفظ بهره‌وری لینک‌ها در بازه کم‌تر از δ درصد (عموماً ٪۵۰) می‌باشد به‌طوری‌که زمان انتظار بسته‌ها و احتمال حذف آن‌ها در اثر ازدحام در صف انتظار گره‌ها دست‌خوش افزایش قابل‌توجهی نگردد.

۲. **نرخ تحویل بسته(PDR[۱۸]):** این معیار بیانگر درصد بسته‌هایی است که نسبت به کل بسته‌های ارسالی به‌طور موفقیت‌آمیز در مقصد دریافت شده‌اند.

۳. **تأخیر انتهابه‌انتها(E2ED[۱۹]):** این معیار میانگین کل زمانی که بسته‌ها از مبدأ به مقصد رسیده‌اند را محاسبه می‌نماید. این زمان به‌طور غیرمستقیم زمان انتشار و زمان ارسال لینک و زمان انتظار بسته‌ها در صف را لحاظ می‌کند.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده براساس معیارهای ذخیره‌سازی انرژی و کارایی شبکه به‌طور مجزا شرح داده شده‌است.

۴-۲-۱- ارزیابی تأثیر روش پیشنهادی بر ذخیره‌سازی انرژی

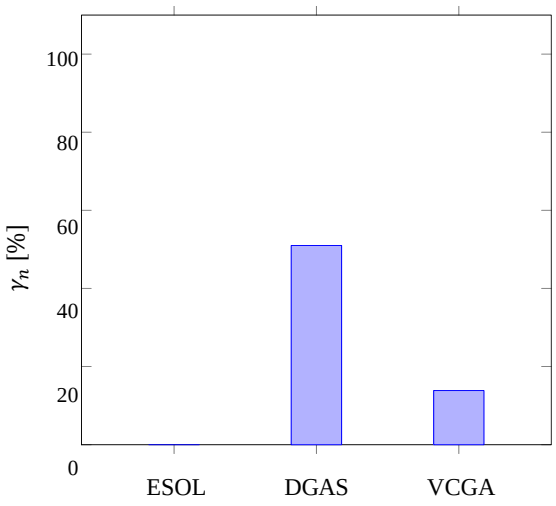
در این بخش، تأثیر اجرای روش پیشنهادی بر میزان انرژی ذخیره شده بررسی می شود. بدیهی است با توجه به هدف یک روش سبز مبتنی‌بر ذخیره‌سازی حداکثری انرژی با حفظ یا تأثیر حداقلی بر معیارهای کارایی شبکه، مصالحه‌ای میان این دو دسته معیار باید در نظر گرفته شود به‌طوری‌که معیارهای کارایی قربانی ذخیره‌سازی انرژی نگردد.

جدول ۱، انرژی مصرفی شبکه را با توجه به خصوصیات درنظرگرفته‌شده برای شبکه EBONE و معادله‌های (۶)، (۷) و (۸) قبل و بعد از اجرای روش VCGA به‌ازای مقادیر مختلف α نشان می‌دهد. در این جدول، نتایج مربوط به شبکه اولیه با $P_{total}^{original}$ و نتایج مربوط به بیش‌ترین میزان ممکن صرفه‌جویی انرژی در شبکه با عنوان MAX_{ES} و برمبنای توپولوژی باقی‌مانده براساس بیش‌تری تعداد لینکی که با حفظ اتصال شبکه می‌تواند خاموش شود یعنی $E-(N-1)$ نمایش داده شده‌است. در این جدول، ستون دوم تا پنجم به‌ترتیب، میزان انرژی مصرف‌شده در گره‌های هسته، گره‌های لبه، لینک‌ها و کل شبکه را براساس واحد کیلووات نشان می‌دهند. همچنین، ستون آخر درصد انرژی ذخیره‌شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱: میزان انرژی مصرف‌شده و ذخیره‌شده توسط روش VCGA در مقایسه با شبکه اولیه و شبکه با حداکثر میزان خاموشی.

انرژی مصرفی	گره هسته	گره لبه	لینک	کل	$ES(\%)$
$P_{total}^{original}$	۸۷۰	۱۴۴	۷۳۶/۸	۱۷۵۰/۸	٪۰
$P_{total}^{VCGA_{(\alpha=1.3)}}$	۶۵۰	۱۴۴	۴۵۸/۴	۱۲۵۴/۴	٪۲۸/۳۴
$P_{total}^{VCGA_{(\alpha=1.5)}}$	۶۵۰	۱۴۴	۴۱۵/۲	۱۲۰۹/۲	٪۳۰/۹۱
$P_{total}^{VCGA_{(\alpha=1.7)}}$	۶۵۰	۱۴۴	۳۷۴/۴	۱۱۶۸/۴	٪۳۳/۲۶
MAX_{ES}	۶۵۰	۱۴۴	۱۸۹/۶	۹۸۳/۶	٪۴۳/۸۲

مطابق جدول ۱، روش VCGA تا حدود ٪۳۴ ذخیره‌سازی انرژی را حاصل می‌کند که این مقدار بسیار نزدیک به بیش‌ترین نرخ ممکن ذخیره‌سازی انرژی براساس توپولوژی باقی‌مانده MAX_{ES}، که حدود ٪۴۴ است، می‌باشد. این درحالی‌است‌که شبکه حاصل از توپولوژی MAX_{ES} که گراف آن به‌صورت درخت و تنها متشکل از $N-1$ لینک روشن باشد نه‌تنها دورازواقعیت بوده بلکه درصورت وجود از کارایی بسیارپایینی برخوردار خواهدبود.

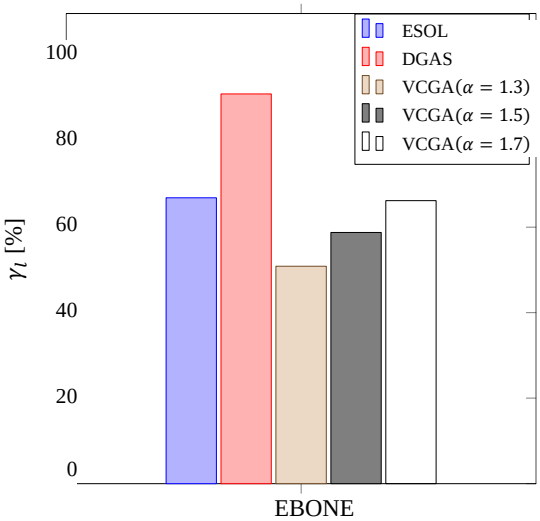


شکل۳: مقایسه الگوریتم‌های ESOL، DGAS و VCGA براساس درصد گره‌های خاموش‌شده γ_n در شبکه آزمایشی EBONE.

در شکل۳، در صد گره‌های خاموش شده توسط روش‌های مختلف نمایش داده شده‌است. باتوجه‌به‌این‌که روش ESOL زمان‌بندی خواب را تنها برای لینک‌های شبکه انجام می‌دهد، تعداد گره‌های خاموش‌شده آن صفر می‌باشد. همان‌طورکه نتایج موجود در شکل نشان می‌دهد روش پیشنهادی حدود ٪۱۴ از گره‌های شبکه را خاموش می‌کند که خود موجب ذخیره‌سازی انرژی قابل‌توجهی خواهدشد. مطابق نتایج، روش پیشنهادی به نفع معیاری‌های کارآیی شبکه، درصد گره‌های کم‌تری را نسبت به روش DGAS خاموش می‌کند که این مسئله با توجه به برتری قابل‌ملاحظه روش پیشنهادی نسبت به روش DGAS از نظر معیارهای کیفیت سرویس، برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج معیارهای کارآیی به‌طور مشروح در بخش ۴-۲-۲ بیان شده‌است.

در شکل ۴، درصد لینک‌های خاموش‌شده توسط سه روشESOL، DGAS و VCGA در شبکه آزمایشی EBONE براساس معیار γ_l و به ازای مقادیر مختلف ضریب α نشان داده شده‌است.. مطابق نتایج، روش

پیشنهادی با توجه به مقدار تنظیم‌شده α تا حدود ٪۶۷ از لینک‌ها را خاموش می‌کند که نشان‌دهنده موفقیت روش پیشنهادی در صرفه‌جویی قابل‌توجه در انرژی شبکه می‌باشد. درصد لینک‌های خاموش‌شده برای روش ESOL مشابه روش پیشنهادی و برای روش DGAS حدود ٪۹۱ است که این امر با توجه به برتری قابل‌توجه معیارهای کارآیی شبکه در روش VCGA نسبت به دو روش دیگر، بیانگر عملکرد مناسب‌تر روش پیشنهادی می‌باشد.

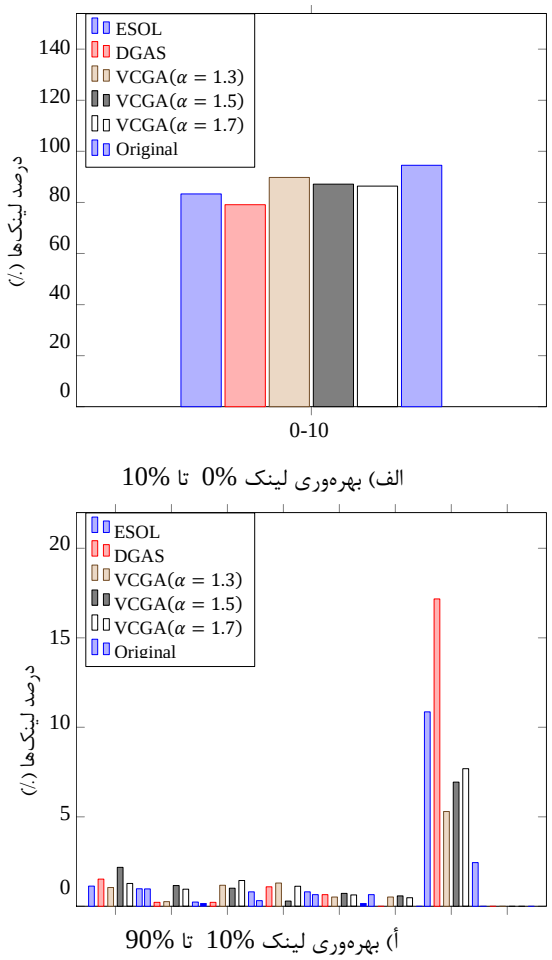


شکل ۴: مقایسه الگوریتم‌های ESOL، DGAS و VCGA براساس درصد لینک‌های خاموش‌شده γ_l در شبکه آزمایشی EBONE.

۴-۲-۲- ارزیابی تأثیر روش پیشنهادی بر کارایی شبکه

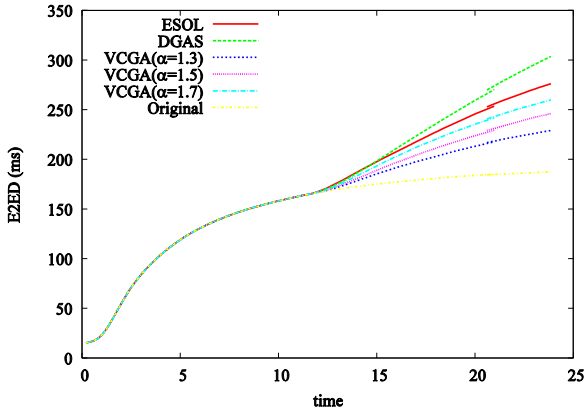
در این بخش، تأثیر روش پیشنهادی بر معیارهای کارایی شبکه در مقایسه با سایر روش‌ها موردبررسی قرارمی‌گیرد. باتوجه‌به تفاوت قابل‌توجه درصد لینک‌های دارای بهره‌وری کم‌تر و بیش‌تر از ٪۱۰ و به‌منظور وضوح نمایش نتایج، شکل۵-الف و ۵-ب به‌طور مجزا درصد لینک‌های فعال در بازه‌های مختلف بهره‌وری کم‌تر و بیش‌تر از ٪۱۰ را برای هر سه روش در مقایسه با گراف شبکه اولیه نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۵-الف، درصد لینک‌های فعال با کم‌ترین میزان بهره‌وری لینک (٪۱۰-٪۰) در روش VCGA بیش‌تر از دو روش ESOL و DGAS و نزدیک به میزان آن در شبکه اولیه می‌باشد. این نتایج نمایان‌گر تحمیل حداقل بار اضافی بر اغلب لینک‌ها در روش پیشنهادی می‌باشد به‌طوری‌که ٪۹۰ لینک‌ها بهره‌وری کم‌تر از ٪۱۰ داشته و به عبارتی ٪۹۵ لینک‌ها نسبت به شبکه اولیه بهره‌وری خود را در بازه ٪۱۰-٪۰ حفظ می‌کنند. شکل ۵-ب نتایج مربوط به درصد لینک‌های دارای بهره‌وری لینک بیش‌تر از ٪۱۰ را نشان می‌دهد. مطابق نتایج این شکل، درصد لینک‌های دارای بیش‌ترین میزان بهره‌وری لینک (٪۸۰-٪۷۰) در روش پیشنهادی کم‌تر از دو روش ESOL و DGAS و نزدیک به میزان آن در شبکه اولیه می‌باشد. این نتایج موفقیت قابل‌توجه روش پیشنهادی در ایجاد کم‌ترین تأثیر در افزایش بهره‌وری لینک‌ها بیش‌تر از حد آستانه ٪۵۰ را نسبت به دو روش دیگر به‌خوبی نشان می‌دهد.



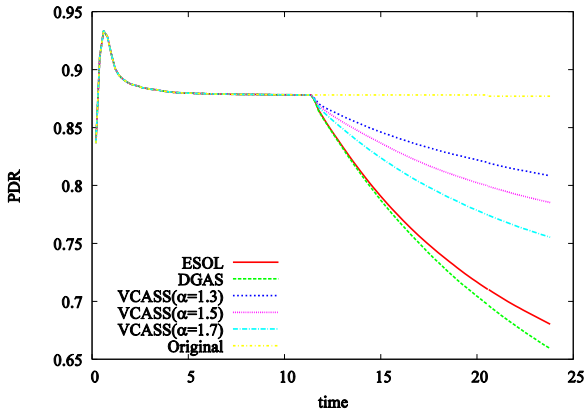
شکل ۵: تغییرات بهره‌وری لینک در الگوریتم‌های ESOL، DGAS و VCGA در مقایسه با شبکه اولیه در شبکه آزمایشی EBONE.

در شکل ۶، تأخیر انتهابه‌انتهای بسته‌ها پس از خاموشی مؤلفه‌ها توسط هر سه روش در مقایسه با شبکه اولیه نمایش داده شده‌است. مطابق این شکل، تأخیر انتهابه‌انتها پس از اعمال روش سبز از ثانیه ۱۲ به بعد نسبت به حالت بدون اعمال خاموشی مولفه‌ها افزایش می‌یابد که این امر ناشی از تمرکز ترافیک شبکه بر یک زیرمجموعه از گره‌ها و لینک‌های شبکه اولیه پس از اجرای روش سبز می‌باشد. مطابق این شکل، تاخیر به‌دست‌آمده توسط روش VCGA نسبت به روش‌های ESOL و DGAS پس از اعمال خاموشی مولفه‌ها بهتر می‌باشد. علت این امر درنظرگرفتن معیار رخداد به صورت محلی و نسبت به میانگین رخداد لینک‌ها در کل شبکه در روش پیشنهادی است که از خاموشی مولفه‌های پررخدادتر شبکه و درنتیجه انتقال ترافیک آن‌ها به شبکه باقی‌مانده اجتناب می‌کند. به‌عبارتی، با درنظرگرفتن معیار رخداد، کارایی شبکه به‌طور غیرمستقیم در انتخاب مولفه‌ها جهت خاموشی لحاظ می‌گردد.



شکل ۶: مقایسه الگوریتم‌های ESOL، DGAS و VCGA براساس تأخیر انتهابه‌انتها در مقایسه با شبکه اولیه در شبکه آزمایشی EBONE.

در شکل ۷، نرخ تحویل بسته در هر سه روش نمایش داده شده‌است. مطابق این شکل، نرخ تحویل بسته‌ها در روش VCGA نسبت به روش‌های ESOL و DGAS به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر و نزدیک به نتایج مربوط به توپولوژی اولیه می‌باشد. علت این امر لحاظ کارایی شبکه ازطریق معیار رخداد توسط روش پیشنهادی در انتخاب مؤلفه‌های موردنظر جهت خاموشی می‌باشد، به‌طوری‌که عدم‌اتصال یا تراکم لحظه‌ای در شبکه رخ نمی‌دهد. بنابراین درصد بسته‌های ازدست رفته کاهش و در مقابل نرخ دریافت بسته افزایش می‌یابد.



شکل۷: مقایسه الگوریتم‌های ESOL، DGAS و VCGA براساس نرخ دریافت بسته در مقایسه با شبکه اولیه در شبکه آزمایشی EBONE.

۵- بحث و بررسی

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، در این بخش نتیجه شبیه‌سازی و تحلیل پیچیدگی محاسباتی الگوریتم VCGA در مقایسه با الگوریتم‌های ESOL و DGAS موردبررسی قرار گرفته‌است. به‌منظور محاسبه پیچیدگی زمانی الگوریتم VCGA، پیچیدگی زمانی مربوط به الگوریتم خاموش‌کردن گره‌ها و لینک‌ها به‌صورت مجزا محاسبه و سپس پیچیدگی کل از برآیند دو مرحله به‌دست می‌آید.

در الگوریتم خاموش‌کردن گره‌ها، ابتدا رخداد تمامی لینک‌ها در حین محاسبه کوتاه‌ترین مسیرها محاسبه می‌شود که با پیچیدگی زمانی $O(|V||E| + |V|^2 \log|V|)$ انجام می‌پذیرد، به‌طوری‌که $|V|$ و $|E|$ به‌ترتیب تعداد گره‌ها و لینک‌های موجود در گراف شبکه اصلی را نشان می‌دهند. سپس، تمام لینک‌ها با پیچیدگی $O(|E| \log|V|)$ مرتب می‌شوند. در مرحله بعد، به‌ترتیب لینک‌های پررخداد انتخاب شده و دو رأس مربوط به آن‌ها به مجموعه پوشش رأسی اضافه می‌شوند که این مرحله با پیچیدگی $O(|E|)$ انجام می‌گیرد. سپس، تمامی گره‌های و لینک‌های متصل به آن‌ها در صورت عدم‌ایجاد اتصال به لیست مولفه‌های خاموش اضافه خواهندشد. دراین‌راستا، بررسی عدم اتصال در گراف شبکه می‌تواند با الگوریتم DFS[۲۰] به پیچیدگی $O(|V|)$ انجام پذیرد [۳۴]. بنابراین، براساس تعداد گره‌های خاموش‌شده، آخرین مرحله حداکثر با پیچیدگی $O(|V|^2)$ انجام می‌گردد. درنتیجه، پیچیدگی الگوریتم خاموش‌کردن گره ها $O(|V||E| + |V|^2 \log|V|)$ خواهدبود.

در الگوریتم خاموش‌کردن لینک‌ها، ابتدا رخداد تمامی لینک‌ها با پیچیدگی زمانی $O(|V||E| + |V|^2 \log|V|)$ محاسبه می شود. سپس، تمام لینک‌ها با پیچیدگی $O(|E| \log|V|)$ مرتب می‌شوند. پس از آن، لینک‌های کم‌رخداد در شبکه باقی‌مانده حاصل از الگوریتم خاموش کردن گره‌ها ($G_{res} = (V', E')$)، به‌شرط حفظ کارایی از گراف شبکه حذف می‌شوند. باتوجه‌به‌این‌که در الگوریتم VCGA چک‌کردن کارایی براساس میانگین رخداد در شبکه باقی‌مانده فعلی محاسبه می‌شود، به‌ازای هر لینک موجود در شبکه باقی‌مانده کلیه کوتاه‌ترین مسیرها با پیچیدگی زمانی $O(|V'||E'| + |V'|^2 \log|V'|)$ محاسبه می‌گردند. بنابراین با توجه به تعداد تکرارهای آخرین مرحله، پیچیدگی زمانی الگوریتم خاموش‌کردن لینک‌ها، $O(N_{iter}(|V'||E'| + |V'|^2 \log|V'|) + (|V||E| + |V|^2 \log|V|))$ خواهدشد که در اینجا N_{iter} برابر تعداد تکرارهای آخرین مرحله می‌باشد.

درنتیجه، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم VCGA پس از اجرای دو مرحله‌ی خاموش‌کردن گره و لینک برابر $O(N_{iter}(|V'||E'| + |V'|^2 \log|V'|) + (|V||E| + |V|^2 \log|V|))$ می‌باشد. باتوجه‌به‌این‌که پیچیدگی الگوریتم VCGA برگرفته از محاسبه کوتاه‌ترین مسیرها می‌باشد، این پیچیدگی در پروتکل OSPF با توجه به فرآیند به‌روزرسانی جداول مسیریابی در کلیه گره‌های شبکه حتی بدون توجه به مسئله زمان‌بندی خواب وجود دارد. بنابراین، الگوریتم VCGA از نظر پیچیدگی زمانی بار بیش‌تری به گره‌های شبکه اضافه نمی‌کند. علاوه‌براین، در مقایسه با الگوریتم ESOL با پیچیدگی زمانی $O(N_{iter}(|V||E| + |V|^2 \log|V|))$ و الگوریتم DGAS با پیچیدگی زمانی $O((N_{Niter} + N_{Liter})(|V||E| + |V|^2 \log|V|))$، الگوریتم VCGA، دارای پیچیدگی مناسب‌تری خواهدبود.

همان‌طورکه نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهد، الگوریتم VCGA با وجود پیچیدگی زمانی کم‌تر، به صرفه‌جویی انرژی بهتری

ضمن لحاظ معیارهای کارآیی دست می‌یابد. مطابق نتایج، الگوریتم پیشنهادی نزدیک به ۸۰ درصد از بیشینه میزان انرژی قابل ذخیره‌سازی را ذخیره می‌کند. باتوجه‌به‌این‌که در محاسبه بیش‌ترین میزان انرژی قابل ذخیره‌سازی، کارایی شبکه در نظر گرفته نشده و الگوریتم VCGA با حفظ کارایی شبکه ۸۰ درصد انرژی بیشینه را ذخیره می‌کند، این میزان بسیار قابل‌ملاحظه خواهدبود. علاوه‌براین، روش پیشنهادی تعداد گره و لینک بیش‌تری نسبت به الگوریتم ESOL خاموش می‌کند. البته الگوریتم VCGA به نفع معیارهای کارآیی شبکه، درصد گره‌های کم‌تری را نسبت به روش DGAS خاموش می‌کندکه این مسئله با توجه به برتری قابل‌ملاحظه روش پیشنهادی نسبت به روش DGAS از نظر معیارهای کیفیت سرویس، برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در مقایسه‌ی دیگری از نظر بهره‌وری لینک‌ها،درصد لینک‌های فعال با کم‌ترین میزان بهره‌وری لینک (٪۱۰-٪۰) در روش VCGA بیش‌تر از دو روش ESOL و DGAS و نزدیک به میزان آن در شبکه اولیه می‌باشد. این نتایج نمایان‌گر تحمیل حداقل بار اضافی بر اغلب لینک‌ها در روش پیشنهادی می‌باشد، به‌طوری‌که ٪۹۰ لینک ها بهره‌وری کم‌تر از ٪۱۰ داشته و به‌عبارتی ٪۹۵ لینک‌ها نسبت به شبکه اولیه بهره‌وری خود را در بازه ٪۱۰-٪۰ حفظ می‌کنند. علاوه‌براین، درصد لینک‌های دارای بیش‌ترین میزان بهره‌وری لینک (٪۸۰-٪۷۰) در روش پیشنهادی کم‌تر از دو روش ESOL و DGAS و نزدیک به میزان آن در شبکه اولیه می‌باشد. این نتایج موفقیت قابل‌توجه روش پیشنهادی درایجاد کم‌ترین تأثیر در افزایش بهره‌وری لینک‌ها بیش‌تر از حد آستانه ٪۵۰ را نسبت به دو روش دیگر به‌خوبی نشان می‌دهد.

از نظر معیار تأخیر و نرخ تحویل بسته‌ها در شبکه، نتایج به دست‌آمده توسط روش VCGA نسبت به روش‌های ESOL و DGAS پس از اعمال خاموشی مولفه‌ها بهتر می‌باشد. علت این امر در نظر گرفتن معیار رخداد به‌صورت محلی و نسبت به میانگین رخداد لینک‌ها در کل شبکه در روش پیشنهادی است که از خاموشی مولفه‌های پررخدادتر شبکه و درنتیجه انتقال ترافیک آن‌ها به شبکه باقی‌مانده اجتناب می‌کند. به‌عبارتی، با درنظرگرفتن معیار رخداد، کارایی شبکه به‌طور غیرمستقیم در انتخاب مولفه‌ها جهت خاموشی لحاظ می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش توزیعی برای زمان‌بندی خواب مؤلفه‌های شبکه پیشنهاد شده‌است که به‌منظور کاهش مصرف انرژی، برخی از لینک‌ها و گره‌های شبکه را در ساعات کم‌ترافیک به‌حالت خاموش انتقال می‌دهد. روش پیشنهادی به صورت کاملاً توزیع شده عمل می‌کند و با توجه به استفاده از اطلاعات تبادل شده توسط پروتکل‌های مسیریابی وضعیت-لینک، هیچ بار اضافی به شبکه تحمیل نمی‌کند. بنابراین، از نظر دسترس‌پذیری سرویس و عدم‌وجود تنها نقطه شکست دارای مزیت است.همچنین، پیچیدگی زمانی الگوریتم پیشنهادی مبتنی‌بر الگوریتم کوتاه‌ترین مسیرها می‌باشد که با توجه به وجود این پیچیدگی در شبکه‌های مبتنی‌بر پروتکل OSPF در هر گره، الگوریتم VCGA از نظر پیچیدگی زمانی هیچ بار اضافه‌ای به شبکه تحمیل نمی‌کند. علاوه‌برآن، روش پیشنهادی هر دو مولفه گره و لینک را برای خاموشی در نظر می‌گیرد و تعداد لینک‌های بیش‌تری نسبت به سایر روش‌های موجود که فقط براساس خاموشی لینک عمل می‌کنند، خاموش می‌کند. همچنین،روش پیشنهادی با وجود موفقیت در ذخیره‌سازی قابل‌توجهی در انرژی، معیارهای کارایی شبکه را تاحدممکن تضمین می‌کند. به‌علاوه، در این روش می‌توان با تغییر پارامتر ضریب افزایش میانگین رخداد، به مصالحه‌ای میان میزان ذخیره سازی انرژی و کارایی شبکه دست یافت.

به‌عنوان کارهای آتی و به‌منظور حفظ دقیق‌تر کارایی شبکه، می‌توان ترافیک جاری شبکه را به‌صورت محلی در انتخاب مولفه‌ها جهت خاموشی لحاظ کرد تا به تضمین بهتری از معیارهای کیفیت سرویس بدون سربار ترافیکی و با حداقل سربار محاسباتی دست یافت. به‌علاوه، می‌توان یک نسخه پویا از روش پیشنهادی ارائه کرد، به‌طوری‌که در تمامی ساعات اجرای شبکه با توجه به وضعیت ترافیک جاری، تعدادی از مؤلفه‌ها را به حالت خاموش یا روشن انتقال دهد.

مراجع

[1] A. Beloglazov, R. Buyya, Y.C. Lee, A. Zomaya, "A taxonomy and survey of energy-efficient data centers and cloud computing systems", Advances in computers, vol. 82, no. 2, pp. 47-111, 2011.

[2] M. Webb, "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age", The Climate Group, London, 2008.

[3] S. Lambert, W. Van Heddeghem, W. Vereecken, B. Lannoo, D. Colle and M. Pickavet,"Worldwide electricity consumption of communication networks". Optics express, vol. 20, no. 26, pp. B513-B524,2012.

[4] S. Nedevschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, D. Wetherall, "Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-Adaptation", In NsDI, vol. 8, pp. 323-336, 2008.

[5] C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, "Managing energy consumption costs in desktop PCs and LAN switches with proxying, split TCP connections, and scaling of link speed", International Journal of Network Management, vol. 15, no. 5, pp. 297-310, 2005.

[6] A. Adelin, P. Owezarski, P. Gayraud, "On the impact of monitoring router energy consumption for greening the internet", In 11th IEEE/ACM International Conference on Grid Computing (GRID), IEEE, pp. 298-304, Oct, 2010.

[7] M. Gupta, S. Singh, "Greening of the Internet", In Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, ACM, pp. 19-26, 2003.

[8] A.P. Bianzino, C. Chaudet, D. Rossi, J. L. Rougier, "A survey of green networking research", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 1, pp. 3-20, 2012.

[9] Q. Li, M. Xu, Y. Yang, L. Gao, Y. Cui, J. Wu, "Safe and practical energy-efficient detour routing in IP networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 22, no. 6, pp. 1925-1937, 2014.

[10] K. Bilal, S.U. Khan, S.A. Madani, K. Hayat, M.I. Khan, N. Min-Allah, J. Kolodziej, L. Wang, S. Zeadally, D. Chen, "A survey on green communications using adaptive link rate", Cluster Computing, vol. 6, no. 3, pp. 574-589, 2013.

[11] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, F. Cucchietti, "Energy efficiency in the future internet: A survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, no. 2, pp. 223-244, 2011.

[12] K. Cengiz, T. Dag, "A review on the recent energy-efficient approaches for the Internet protocol stack.", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2015, no. 1, pp. 1-22, 2015.

[13] F. Dabaghi, Z. Movahedi, R. Langar, "A survey on green routing protocols using sleep-scheduling in wired networks", Journal of Network and Computer Applications, vol. 77, no. 1, pp. 106-122, 2017.

[14] M. N. Dharmaweera, R. Parthiban, Y. A. Sekercioglu, "Toward a Power-Efficient Backbone Network: The State of Research", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 198-277, 2015.

[15] C. Eyupoglu, M.A. Aydin, "Energy efficiency in backbone networks", Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 195, pp. 1966-1970, 2015.

[16] A. C. Orgerie, M. D. Assuncao, L. Lefevre, "A survey on techniques for improving the energy efficiency of large-scale distributed systems", ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 46, no. 4, pp. 47:1-47-31, 2014.

[17] L. Ceuppens, A. Sardella, D. Kharitonov. "Power saving strategies and technologies in network equipment opportunities and challenges, risk and rewards." In International Symposium on Applications and the Internet (SAINT), IEEE, pp. 381-384, 2008.

[18] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, "Wright, Power awareness in network design and routing", In INFOCOM, The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, pp. 457-465, 2008.

[19] M. Jimeno, K. Christensen, "A prototype power management proxy for gnutella peer-to-peer file sharing. In 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks", IEEE, pp. 210-212. 2007.

[20] K. Sabhanatarajan, A. Gordon-Ross, "A resource efficient content inspection system for next generation Smart NICs", In IEEE International Conference on Computer Design, IEEE, pp. 156-163, 2008.

[21] Y. Agarwal, S. Hodges, R. Chandra, J. Scott, P. Bahl, R. Gupta, "Somniloquy: Augmenting Network Interfaces to Reduce PC Energy Usage", In NSDI, vol. 9, pp. 365-380, 2009.

[22] D. Meisner, B. T. Gold, T. F. Wenisch, "March. PowerNap: eliminating server idle power. In ACM Sigplan Notices, vol. 44, no. 3, pp. 205-216, 2009.

[23] A. Wierman, L. L. Andrew, A. Tang, "Power-aware speed scaling in processor sharing systems". In INFOCOM, IEEE, pp. 2007-2015, 2009.

[24] F. Dabaghi-Zarandi, Z. Movahedi, "An energy-efficient algorithm based on sleep-scheduling in IP backbone networks", International Journal of Communication Systems, vol. 30, no. 13, 2017.

[25] A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Marazza, E. Vittorini, "An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol", InINFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops, IEEE, pp. 1-5, 2010.

[26] A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Polverini, "An OSPF enhancement for energy saving in IP networks", In IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), IEEE, pp. 325-330, 2011.

[27] A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Polverini, A.V. Vasilakos, "An OSPF-integrated routing strategy for QoS-aware energy saving in IP backbone networks", IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 9, no. 3, pp. 254-267, 2012.

[28] L. Chiaraviglio, A. Cianfrani, M. Listanti, L. Mignano, M. Polverini, "Implementing energy-aware algorithms in backbone networks: a transient analysis", In IEEE International Conference on Communications (ICC), IEEE, pp. 142-148, 2015.

[29] F. Cuomo, A. Abbagnale, S. Papagna, "ESOL: Energy saving in the internet based on occurrence of links in routing paths", In WOWMOM, IEEE, pp. 1–6, 2011.

[30] H. Matsuura, "Energy-saving routing algorithm using Steiner tree". In IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), IEEE, pp. 378-386, 2013.

[31] P. Sarigiannidis, V. Kakali, M. Fragakis, "An adaptive energy-efficient framework for time-constrained optical backbone networks", International Journal of Communication Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1-26, 2017.

[32] O. Okonor, N. Wang, S. Georgoulas, Z. Sun, "Dynamic link sleeping reconfigurations for green traffic engineering", International Journal of Communication Systems, vol. 30, no. 9, 2017.

[33] J. Moy, "RFC 2328: OSPF Version 2", RFC, IETF, 1998.

[34] T. H. Cormen, C. Stein, R. L. Rivest, C. E. Leiserson, "Introduction to Algorithms", 2nd Edition, McGraw-Hill Higher Education, 2001.

[35] G.F. Riley, T. R. Henderson, "The ns-3 network simulator", URL http://www.nsnam.org/, Accessed 10 August 2016.

[36] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta, J. Byers, "BRITE: An approach to universal topology generation", In Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, IEEE, pp. 346-353, 2001.

[37] J. HANCOCK, "SNDlib-library of test instances for survivable xed telecommunication network design", 2006.

[38] T. Anderson, R. Mahajan, N. Spring, D. Wetherall, "Rocketfuel project", URL http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/, Accessed 2 October 2016.

[39] A. Nucci, A. Sridharan, N. Taft, "The problem of synthetically generating IP traffic matrices: initial recommendations", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 35, no. 3, pp. 19-32, 2005.

[40] L. Chiaraviglio, M. Mellia, F. Neri, "Minimizing ISP network energy cost: Formulation and solutions", IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 20, no. 2, pp. 463-476, 2012.

زیرنویس‌ها

[1] Information and Communication Technology

[2] Green Communication

[3]Over-Provisioning
[4]Sleep-Scheduling
[5]Single Point of Failure
[6]Link-State Advertisement
[7]Open Shortest Path First
[8]Power Proportion
[9]Distributed Green Algorithm based on Sleep-scheduling
[10]distributed-Energy Aware Routing
[11]Exportation
[12]Energy Saving IP Routing
[13]Green Partial Exportation
[14]Energy Saving based on Occurrence of Links
[15]Steiner Tree Based
[16]Autonomous System
[17]Vertex Cover based Green Algorithm
[18]Packet Delivery Ratio
[19]End-to-End Delay
[20]Depth First Search