زمان‌بندی پاینده مبتنی بر درخت در شبکه‌های مش بی‌سیم خورشیدی

هادی برقی و سیدوحید ازهری

چکیده: در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های مش بی‌سیم به دلیل عدم دسترسی به منبع انرژی دایم و استفاده از باتری و تجهیزات برداشت‌کننده انرژی طراحی بر مبنای پایندگی انرژی بسیار حایز اهمیت است. تنظیم چرخه کاری و به خواب بردن گره‌های شبکه در بخشی از دوره کاری، روشی برای حفظ انرژی و تضمین پایندگی است. در این حالت برای تبادل داده بین گره‌های همسایه به پروتکل‌هایی برای هماهنگی خواب نیاز است. در برخی کاربردهای این شبکه‌ها مانند کاربرد نظارت تصویری نیاز است که داده از بخش‌های مختلف شبکه جمع‌آوری شود. توپولوژی درخت در این کاربردها گزینه مناسبی است. یک روش ساده برای هماهنگی خواب در توپولوژی درخت الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمان (TIME-SPLIT) است که در آن زمان هر گره به طور مساوی بین فرزندان تقسیم می‌شود.

الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمان پیشنهادشده مسئله پایندگی انرژی و محدودیت انرژی گره‌ها را در نظر نمی‌گیرد. ما در این مقاله به منظور ایجاد پایندگی انرژی در شبکه‌های مش بی‌سیم مبتنی بر توپولوژی درخت در الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمان محدودیت چرخه کاری گره‌ها را اضافه کرده‌ایم. در شرایطی که وضعیت انرژی فرزندان متفاوت باشد تقسیم مساوی زمان به عدم کارایی شبکه می‌انجامد. به منظور بهبود کارایی و گذردهی شبکه دو الگوریتم زمان‌بندی بر مبنای الگوریتم تقسیم زمان که شرایط انرژی و ترافیک فرزندان را در نظر می‌گیرند ارائه کرده‌ایم. در الگوریتم پیشنهادی اول تقسیم زمان به نسبت چرخه کاری فرزندان هر گره انجام می‌گیرد. در الگوریتم دوم تقسیم زمان به صورت پویا و به نسبت ترافیک فرزندان است و همچنین پذیرش تماس بر مبنای انرژی مصرفی اتصالات و بر اساس طول اتصالات به طور دقیق‌تری انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی که به وسیله شبیه‌ساز شبکه NS۳ انجام شده نشان می‌دهد که در شرایط عدم توازن در انرژی و ساختار درخت، یعنی حالتی که فرزندان یک گره دارای انرژی یکسان یا زیردرخت تقریباً مشابه نیستند، روش‌های پیشنهادی به میزان قابل توجهی (بیش از حدود ۶۰٪) ترافیک عبوری را افزایش می‌دهند.

کلیدواژه: **پایندگی انرژی، چرخه کاری، زمان‌بندی، شبکه مش بی‌سیم.**

۱- مقدمه

شبکه‌های مش بی‌سیم دارای قابلیت‌های خودپیکربندی[1] و خودسازماندهی[2] هستند و به دلیل سهولت و هزینه کم در برپایی و نگهداری و ارائه سرویس‌های باند وسیع بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. در این شبکه‌ها یک یا چند گره که دروازه مش[3] (MGW) نام دارند ارتباط شبکه را با خارج از شبکه (اینترنت) و سایر گره‌ها که نقطه دسترسی مش[4] (MAP) نام دارند ارتباط کاربران متحرک را با یکدیگر و با اینترنت به صورت چندگامی[5] برقرار می‌کنند [۲]. در برخی از کاربردها مانند نظارت تصویری که جمع‌آوری داده[6] انجام می‌شود ایجاد درخت برای تشکیل مسیر از همه گره‌های شبکه به سمت دروازه مش می‌تواند مشکلات مسیریابی در هنگام برقراری اتصال را کاهش دهد.

در بسیاری از پیاده‌سازی‌های شبکه‌های مش بی‌سیم دسترسی به منبع انرژی مقدور نیست و گره‌ها انرژی لازم را از باتری تأمین می‌کنند. برای شارژ مجدد باتری غالباً از تجهیزات برداشت‌کننده انرژی[7] مانند انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. در بسیاری از کاربردها خدمات شبکه در هیچ زمانی نباید قطع شود و به عبارتی شبکه باید دارای پایندگی باشد. برای این منظور به دلیل محدودیت انرژی، روش‌ها و پروتکل‌های مناسبی باید به کار گرفته شوند که به وسیله آنها میزان مصرف انرژی طوری کنترل گردد که شبکه قطعی خدمات را تجربه نکند.

به منظور پایندگی انرژی[8] شبکه مش بی‌سیم، در [۳] روشی ساده برای تنظیم چرخه کاری[9] پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی [۳]، ES-MESH، در دوره‌هایی کار می‌کند که انرژی برداشتی[10] تقریباً ثابت باشد. در این دوره‌های پایندگی[11]، چرخه کاری طوری تنظیم می‌شود که انرژی گره در انتهای دوره از یک مقدار مشخصی کمتر نشود. در [۳] فرض شده که شبکه یک حداقل ترافیک مشخص را باید عبور دهد و در صورت وجود انرژی مازاد، از این انرژی برای عبور حداکثر ترافیک ممکن در شبکه باید استفاده شود. با این فرض مقدار انرژی مورد نیاز در انتهای هر بازه با استفاده از پیش‌بینی انرژی برداشتی و مصرفی طوری تعیین می‌شود که شبکه دارای پایندگی انرژی باشد. ما در این مقاله برای تنظیم چرخه کاری گره‌ها از روش پیشنهادی در [۳] استفاده کرده‌ایم. زمانی که گره‌های شبکه در بخش‌هایی از زمان به حالت خواب می‌روند باید روشی برای هماهنگی خواب استفاده شود تا بازه‌های بیدار همپوشان بین گره‌های مجاور وجود داشته باشد. در [۴] یک الگوریتم حریصانه و یک الگوریتم تقسیم زمانی، TIME-SPLIT، برای زمان‌بندی خواب در شبکه مش بی‌سیم با توپولوژی درخت ارائه شده است. در الگوریتم تقسیم زمانی، زمان فعالیت هر گره به طور مساوی بین فرزندان آن تقسیم می‌شود و هر فرزند و زیردرخت آن فقط در بازه بیداری نسبت داده شده توسط گره پدر فعالیت می‌کنند و در سایر زمان‌های دوره کاری در حالت خواب قرار می‌گیرند.

به دلیل این که ممکن است گره‌های شبکه وضعیت انرژی متفاوتی

این مقاله در تاریخ ۲۲ بهمن ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۰ مرداد ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

هادی برقی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: hbarghi@yahoo.com).

سیدوحید ازهری (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: azharivs@iust.ac.ir).

1. Self-Configuration
2. Self-Organization
3. Mesh Gateway
4. Mesh Access Point
5. Multi-Hop
6. Data Gathering
7. Energy Harvesting Facilities
8. Energy Sustainability
9. Duty Cycle
10. Harvesting Energy
11. Sustainability Epoch

داشته باشند تقسیم مساوی زمان بین گره‌ها باعث عدم کارایی شبکه می‌شود. برای حل این مشکل بر اساس روش زمان‌بندی تقسیم زمانی مطرح‌شده در [۴] و روش کنترل چرخه کاری ارائه‌شده در [۳]، سه الگوریتم برای زمان‌بندی خواب ارائه کرده‌ایم. در الگوریتم پیشنهادی اول زمان یک گره به نسبت چرخه کاری فرزندان تقسیم می‌شود. با این کار، زمان به گره‌های با وضعیت انرژی بهتر تخصیص می‌یابد که نتیجه آن گذردهی بهتر شبکه خواهد شد. در صورتی که زیردرخت یک گره وضعیت انرژی مناسبی نداشته باشد و خود گره انرژی زیادی داشته باشد تخصیص زمان بر اساس وضعیت انرژی آن گره نیز پهنای باند شبکه را تا حدی هدر می‌دهد. برای حل این مشکل، بهبودی در الگوریتم اول داده و الگوریتم بهبودیافته را پیشنهاد کرده‌ایم. در الگوریتم بهبودیافته تقسیم زمانی به نسبت چرخه کاری زیردرخت فرزندان گره انجام می‌گیرد.

در صورتی که مدت زمان اتصالات مشخص باشد، تعیین میزان باتری باقیمانده در انتهای دوره پایندگی بسیار دقیق‌تر انجام می‌شود. بدین ترتیب پذیرش تماس‌ها نیز با دقت بیشتری انجام می‌گردد و این به افزایش گذردهی شبکه کمک می‌کند. علاوه بر این، تقسیم پویای زمان بین فرزندان بر اساس میزان ترافیک عبوری هر فرزند نیز به افزایش گذردهی شبکه کمک می‌کند. در الگوریتم دوم که یک الگوریتم پویا است، روش دیگری برای بررسی وضعیت انرژی گره‌ها با توجه به طول اتصالات ارائه شده است. در این الگوریتم هنگام برقراری یک اتصال جدید در صورتی که اتصال با زمان‌بندی فعلی قابل برقرارشدن باشد زمان‌بندی تغییر نخواهد کرد، در غیر این صورت زمان‌بندی بر اساس وضعیت ترافیکی فعلی تغییر خواهد کرد. در هنگام زمان‌بندی مجدد با تقسیم متناسب زمان‌های بیکاری گره بین فرزندان سعی شده که تغییرات زمان‌بندی هنگام برقراری اتصالات جدید کمترین میزان ممکن باشد.

یکی از مزایای روش‌های پیشنهادی ایجاد بازه‌های خواب پیوسته و طولانی‌مدت است. در گره‌های شبکه مش بی‌سیم، توان مصرفی برد اصلی قابل توجه است و در بسیاری موارد عمده توان مصرفی گره مربوط به برد اصلی است. کارت رادیویی را می‌توان در بازه‌های خواب کوتاه به حالت خواب برد اما خواب عمیق، به معنی به حالت خواب‌بردن برد اصلی، در فواصل زمانی خیلی کوتاه قابل دستیابی نیست.

به طور خلاصه نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- اعمال روش کنترل چرخه کاری روی روش زمان‌بندی تقسیم زمانی به منظور ایجاد پایندگی انرژی در شبکه مش بی‌سیم دارای توپولوژی درخت.
- ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی خواب ایستا مبتنی بر الگوریتم تقسیم زمانی به منظور بهبود گذردهی شبکه هنگامی که شبکه از نظر انرژی دارای توازن نیست.
- ارائه یک الگوریتم زمان‌بندی خواب پویا مبتنی بر الگوریتم تقسیم زمانی به منظور بهبود گذردهی شبکه هنگامی که شبکه از نظر انرژی و بار کاری دارای توازن نیست.
- کنترل پذیرش تماس مبتنی بر میزان مصرف دقیق انرژی توسط اتصالات شبکه به منظور پذیرش دقیق‌تر تماس‌ها و افزایش گذردهی شبکه.

در ادامه در بخش ۲ تحقیقات صورت‌گرفته پیشین در حوزه پایندگی انرژی و زمان‌بندی خواب در شبکه‌های مش بی‌سیم مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۳ مدل سامانه مورد استفاده و مفروضات ارائه شده و در بخش ۴ الگوریتم‌ها و روش‌های پیشنهادی آمده است. در بخش ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً در بخش ۶ نتیجه‌گیری فعالیت‌های انجام‌شده ارائه شده است.

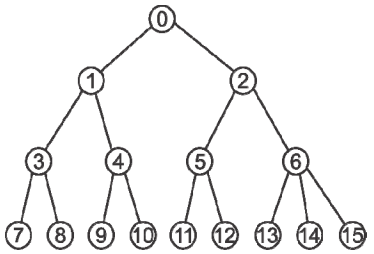
۲- تحقیقات مرتبط پیشین

تحقیقات زیادی در زمینه زمان‌بندی در شبکه‌های چندگامی بی‌سیم صورت گرفته است. همچنین در زمینه پایندگی انرژی در شبکه‌های چندگامی بی‌سیم برداشت‌کننده انرژی نیز پیشنهادهای زیادی وجود دارد. در این بخش ما برخی از پیشنهادهای مطرح‌شده در تحقیقات پیشین در این زمینه‌ها را که در شبکه‌های مش بی‌سیم کاربرد دارند بررسی می‌کنیم.

تحقیقات موجود در زمینه زمان‌بندی در شبکه‌های چندگامی بی‌سیم از پروتکل دسترسی CSMA[1] یا TDMA[2] استفاده می‌کنند. الگوی ترافیکی مفروض آنها به صورت همتا به همتا یا جمع‌آوری داده می‌باشد. در [۵] به وسیله اعلان‌های محلی بین گره‌های پدر و فرزند یک زمان‌بند مبتنی بر درخت با پروتکل دسترسی CSMA ارائه شده است. زمان‌های ارتباط پدر و فرزند به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و بنابراین تداخل بین پیوندهای مجاور باید با اتخاذ شیوه مناسبی حذف شود. در [۶] و [۷] یک الگوریتم زمان‌بندی دوره‌ای برای حالت خاص درخت دودویی ارائه شده است. پروتکل دسترسی TDMA است و روش مرکزی برای محاسبه زمان‌بندی پیشنهاد شده است. در [۸] یک روش زمان‌بندی انرژی کارا برای جمع‌آوری داده در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از دسته‌بندی گره‌ها برای مدیریت تداخل و انجام زمان‌بندی در هر دسته استفاده می‌کند. زمان‌بندی داخل دسته در اسلات‌های زمانی پشت سر هم انجام می‌شود تا زمان‌های خواب پیوسته ایجاد شود و انرژی مصرفی کاهش یابد. در این روش از پروتکل دسترسی TDMA استفاده می‌شود و برای شبکه‌های با بار ترافیکی کم کاربرد دارد. در [۹] یک الگوریتم زمان‌بندی مرکزی برای شبکه‌های مبتنی بر دسترسی تقسیم زمانی با توپولوژی درخت پیشنهاد شده است. در [۱۰] یک الگوریتم زمان‌بندی مرکزی برای ترافیک زمان واقعی نرخ ثابت (CBR)[3] برای شبکه‌های مبتنی بر دسترسی تقسیم زمانی با توپولوژی درخت پیشنهاد شده است. در [۱۱] یک الگوریتم زمان‌بندی توزیع‌شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر دسترسی تقسیم زمانی عمومی پیشنهاد شده است. این الگوریتم یک زمان همگرایی بزرگ دارد و بنابراین برای شبکه‌های مش بی‌سیم مناسب نیست. در [۱۲] یک الگوریتم زمان‌بندی سلسله‌مراتبی مبتنی بر درخت پیشنهاد شده است. این الگوریتم تأخیر جمع‌آوری داده را با زمان‌بندی پیوندهای به سمت بالای هر گره پس از همه پیوندهای به سمت پایین آن حداقل می کند. اکثر زمان‌بندی‌های ارائه‌شده در تحقیقات پیشین دارای پیچیدگی زیادی هستند و وابسته به کنترل‌کننده مرکزی هستند، اما روش ارائه‌شده در [۴] بسیار ساده و به صورت توزیع‌شده قابل پیاده‌سازی است.

پایندگی انرژی در شبکه‌هایی که از تجهیزات برداشت‌کننده انرژی استفاده می‌کنند یک مسئله مهم است و تحقیقات زیادی پیرامون آن انجام شده است. حالت خواب و تنظیم چرخه کاری، توزیع ترافیک، کنترل پذیرش تماس، کنترل نرخ اتصالات، کنترل مصرف توان، خوشه‌بندی و شارژ باتری به وسیله شارژرهای متحرک از جمله روش‌های پیشنهادی در

1. Carrier Sense Multiple Access
2. Time Division Multiple Access
3. Constant Bit-Rate



شکل ۱: درخت شبکه مفروض.

تحقیقات پیشین می‌باشند. بسیاری از این تحقیقات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده‌اند. به دلیل ساختار و مشخصات متفاوت گره‌های حسگر با گره‌های مش برخی از این روش‌ها در شبکه مش بی‌سیم قابل استفاده نیستند. مثلاً خوشه‌بندی در شبکه‌های با تراکم گره زیاد کاربرد دارد. به عنوان مثالی دیگر شارژرهای متحرک غالباً برای شارژ باتری‌های کوچک استفاده می‌شوند.

در [۱۳] عملیات خنثی انرژی (ENO)[1] برای شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده که به این معنی است که انرژی مصرفی گره نباید بیشتر از انرژی دریافتی آن باشد. یک روش بهینه‌سازی انرژی و یک روش ساده کنترل چرخه کاری برای تنظیم کارایی و میزان مصرف انرژی گره پیشنهاد شده است. برای بهینه‌سازی انرژی نیاز به یک تخمین تقریباً دقیق از انرژی ورودی و مصرفی در ۲۴ ساعت آینده است. در [۱۴] از روش‌های تئوری کنترل وفقی برای کنترل چرخه کاری استفاده شده است. مدل خاصی برای انرژی ورودی در نظر گرفته نشده و با استفاده از روش‌های تئوری کنترل وفقی چرخه کاری تنظیم می‌شود. یکی از اهداف اصلی، پایداری چرخه کاری تنظیمی یا به عبارتی عدم تغییرات زیاد آن است. شرط دیگری علاوه بر ENO برای رسیدن به حداکثر کارایی به نام ENO-Max گذاشته شده که در آن انرژی باقیمانده گره همواره باید برابر انرژی اولیه باشد. در [۱۵] برای پایندگی انرژی یک پروتکل لایه MAC دارای چرخه کاری ارائه شده که در آن پیشنهادهایی برای هماهنگی گره‌های همسایه مطرح شده است. این پروتکل برای شرایط ترافیک کم (که در حسگر وجود دارد) طراحی شده و یک پروتکل زمان‌بندی شروع با گیرنده است که گیرنده به طور متناوب بسته بیکن و فرستنده با دریافت آن داده می‌فرستد. در [۱۶] یک سری الگوریتم برای کنترل چرخه کاری با هدف پایندگی انرژی و حداقل‌کردن تأخیر ترافیک عبوری در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است. در [۱۷] مفهوم عملیات خنثی انرژی طولانی‌مدت در بازه‌های زمانی بسیار طولانی در حد چندین سال برای فعالیت دایم و بدون وقفه شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی شده است.

در [۱۸] یک معیار مسیریابی جهت توزیع ترافیک و یک استراتژی کنترل پذیرش تماس برای تضمین پایندگی انرژی ارائه شده است. با توجه به تصادفی‌بودن فرایند برداشت انرژی، محل ذخیره انرژی نامحدود و محدود با صف‌های $G/G/1/\infty$ و $G/G/1/N$ مدل‌سازی شده‌اند. روش پیشنهادی، حداقل‌کردن احتمال تخلیه انرژی شبکه با توزیع جریان‌ها در مسیر مناسب است. در [۱۹] یک الگوریتم مسیریابی پویا در شبکه‌های حسگر بی‌سیم برداشت‌کننده انرژی ارائه شده که مسیر بهینه‌ای را از هر گره مبدأ در شبکه به گره چاهک[2] پیدا می‌کند که از نظر انرژی پاینده باشد. در [۲۰] یک پروتکل مسیریابی برای شبکه‌های چندگامی بی‌سیم انرژی کارا ارائه شده است. در پروتکل پیشنهادی هدف این است تا مسیرهایی که انرژی کافی برای اتصال جدید در اختیار دارند انتخاب شوند، به علاوه مسیر انتخابی از نظر پارامترهای کیفیت خدمات مثل لرزش[3] بهترین مسیر ممکن باشد.

در [۲۱] الگوریتم‌هایی برای سناریوهای مختلف کاری در گره‌های شبکه حسگر ارائه شده که هدفشان بهینه‌سازی کارایی با توجه به قید پایندگی انرژی است. یک کنترل‌کننده نرخ برنامه کاربردی پیشنهاد شده که با کنترل نرخ فعالیت کارها در برنامه کاربردی میانگین انرژی مصرفی را کنترل می‌کند. در [۲۲] یک سیستم کنترل جریان انرژی به نام EFCon[4] برای حفظ توازن بین انرژی موجود و انرژی مصرفی برای رسیدن به هدف پایندگی انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده است. سه حجم مختلف بار کاری تعریف شده که عبارتند از بار کاری پایه، بار کاری پیشنهادی و بار کاری حداکثر و بر اساس وضعیت انرژی گره یکی از آنها انتخاب می‌شود و بار کاری مورد قبول با توجه به آن تعیین می‌شود. در [۲۳] از کنترل جریان برای تضمین پایندگی انرژی استفاده شده است. چنین راهکاری در جریان‌های بهترین تلاش[5] که اتصال، نرخ‌های متفاوت را تحمل می‌کند مثل انتقال فایل یا دسترسی به اینترنت راهکار مناسبی است. بسیاری از روش‌های پیشنهادی برای پایندگی انرژی نیاز به تخمین انرژی برداشتی و مصرفی آینده دارند. برخی از روش‌ها نیز برای شرایط ترافیک کم یا باتری کوچک طراحی شده‌اند. روش پیشنهادی در [۳] با یک محاسبه ساده با استفاده از وضعیت انرژی برداشتی و مصرفی فعلی چرخه کاری گره را تعیین می‌کند و سعی در حفظ انرژی گره تا ابتدای دوره پرانرژی بعدی دارد.

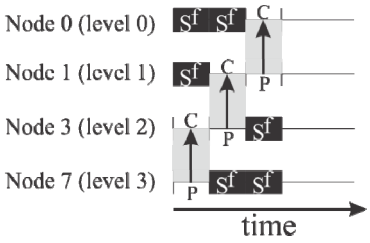
۳- مدل سامانه و مفروضات

سامانه مورد نظر یک شبکه مش بی‌سیم است که از پروتکل مسیریابی ترکیبی مش (HWMP)[6] در حالت کنشی[7] استفاده می‌کند. در این حالت کاری یک درخت ایجاد می‌شود که ریشه آن گره دروازه است و به طور متناوب به روز می‌شود. فرض بر این است که بسته‌های بیکن و مدیریتی همه گره‌های شبکه در یک بازه زمانی کوتاه ارسال می‌شوند و مابقی زمان دوره بیکن برای زمان‌بندی پیوندهای شبکه در اختیار است.

زمان‌های مختلف هر گره مشابه روش پیشنهادی [۴] برای ارتباط با پدر، فرزند و خواب در نظر گرفته می‌شوند. مدل تداخل مورد استفاده مدل تداخل سه‌گامی است که در آن زمانی که یک پیوند فعال است همه گره‌های واقع در همسایگی دوگامی دو گره فعال نباید فعالیتی داشته باشند. بنابراین زمانی که یک گره با فرزند خود ارتباط دارد (زمان C) پدر و پدرِ پدر آن گره در حالت خواب اجباری (زمان S^f) هستند. به طور مشابه زمانی که یک گره با پدر خود ارتباط دارد (زمان P) فرزندان و فرزندانِ فرزندان آن گره در حالت خواب اجباری می‌باشند. به عنوان مثال اگر درخت شبکه مورد نظر مطابق شکل ۱ باشد زمان‌بندی پیوندهای روی مسیری از گره ۷ مطابق شکل ۲ خواهد بود.

در مورد پایندگی انرژی، مدل پیشنهادی [۳] را در نظر گرفته‌ایم. در این مدل دوره‌هایی به نام دوره پایندگی در نظر گرفته شده که در پایان هر دوره هر گره باید یک مقدار حداقلی انرژی در باتری داشته باشد تا

1. Energy Neutral Operation
2. Sink
3. Jitter
4. Energy Flow Control
5. Best Effort
6. Hybrid Wireless Mesh Protocol
7. Proactive



شکل ۲: زمان‌بندی اتصال از گره ۷ در درخت شکل ۱.

```
1   for each node starting from root:
2     T ← T_node
3     Child ← Child_node
4     While Child ≠ Ø
5       t ← T/ Child.Count
6       Ch ← child with smallest DC time τ
7       if τ < t
8         assign τ to Ch
9         subtract τ from T
10        remove Ch from Child
11      else
12        assign t to all member of Child
13        Child ← Ø
```

الگوریتم ۱: تقسیم زمان ایستا متناسب با چرخه کاری.

پایندگی شبکه تا ابتدای بازه پرانرژی بعدی تضمین شود. برای رسیدن به این میزان انرژی میزان فعالیت گره باید به درستی و بر اساس میزان انرژی موجود کنترل شود. گره‌ها مجهز به باتری با میزان انرژی $B(t)$ و ظرفیت $B_{\max}$ بوده و برای شارژ مجدد باتری دارای صفحه خورشیدی با انرژی ورودی $\Gamma(t)$ هستند. جدول ۱ علایم مورد استفاده در متن و روابط را نشان می‌دهد.

مسئله مورد نظر ما در این مقاله تعیین زمان‌بندی خواب گره‌ها بر اساس مدل تقسیم زمانی و با در نظر گرفتن چرخه کاری و انرژی است به طوری که گذردهی شبکه حداکثر ممکن باشد و شبکه از نظر انرژی پایندگی داشته باشد. الگوریتم‌هایی برای تقسیم زمان هر گره بین فرزندان بر مبنای انرژی فرزندان و ترافیک زیردرخت‌ها به منظور حفظ پایندگی انرژی و حداکثرکردن گذردهی شبکه ارائه شده است.

٤- پایندگی انرژی در شبکه مش بی‌سیم درختی

در این بخش برای ایجاد هماهنگی زمان‌های بیداری بین گره‌های شبکه و در عین حال دستیابی به پایندگی انرژی دو الگوریتم زمان‌بندی پیوند که چرخه کاری گره‌ها را نیز در نظر می‌گیرند ارائه شده است. در الگوریتم اول همانند روش [۳] دوره‌های پایندگی که در آن انرژی برداشتی تقریباً ثابت است در نظر گرفته شده و رابطه چرخه کاری ارائه‌شده در [۳] به صورت (۱) است

$$\alpha = \frac{B - B^{req}}{T_{sus}} \frac{1}{P_{active} - P_{sleep}} + \frac{\Gamma - P_{sleep}}{P_{active} - P_{sleep}} \qquad (۱)$$

که در آن B انرژی موجود در باتری، B^{req} انرژی مورد نیاز در انتهای دوره پایندگی، P_{sleep} توان مصرفی در حالت خواب، P_{active} توان مصرفی در حالت فعال، T_{sus} زمان باقیمانده تا انتهای دوره پایندگی و Γ توان برداشتی گره است. در این رابطه P_{active}، P_{sleep} و B^{req} نیز در طول هر دوره پایندگی ثابت است. در صورتی که گره مطابق چرخه کاری فعالیت کند انرژی باقیمانده باتری با تغییرات یکنواخت به سمت B^{req} حرکت می‌کند و در نتیجه نسبت $(B - B^{req})/T_{sus}$ نیز ثابت خواهد بود. در نتیجه اگر Γ نیز ثابت باشد چرخه کاری در کل طول دوره انرژی ثابت خواهد ماند. در صورتی که گره کمتر از چرخه کاری فعالیت کند انرژی گره افزایش خواهد یافت و به دلیل عدم تغییر چرخه کاری در انتهای دوره پایندگی انرژی گره از حداقل انرژی مورد نیاز بیشتر خواهد شد. این مقدار انرژی مازاد در دوره‌های بعدی باعث افزایش چرخه کاری و گذردهی بیشتر گره می‌شود.

جدول ۱: شرح علایم مورد استفاده.

C	زمان ارتباط با فرزند
P	زمان ارتباط با پدر
S^f	زمان خواب اجباری
$B(t)$	انرژی موجود در باتری در زمان t
$B_{\max}$	ظرفیت باتری
$\Gamma(t)$	انرژی برداشتی در زمان t
B^{req}	انرژی مورد نیاز در انتهای دوره پایندگی
P_{sleep}	توان مصرفی در حالت خواب
P_{active}	توان مصرفی در حالت فعال
T_{sus}	زمان باقیمانده تا انتهای دوره پایندگی
t^i_{dc}	زمان فعالیت محاسبه‌شده بر اساس چرخه کاری گره i
$t^i_{dc,up}$	زمان مورد نیاز گره i برای ارتباط با پدر بر اساس چرخه کاری
$t^i_{dc,subtree}$	زمان محاسبه‌شده بر اساس چرخه کاری گره i و زیردرخت
K	تعداد اتصالات
T^k_{life}	زمان باقیمانده تا انتهای اتصال k
t^k	زمان اختصاص‌یافته به اتصال k در هر ثانیه
t_{BM}	زمان لازم برای ارسال بیکن‌ها و بسته‌های مدیریتی در هر ثانیه
t_{sleep}	مجموع زمان‌های بیکاری گره در هر ثانیه
t^i_{cnns}	زمان لازم برای اتصالات موجود و جدید گره i
t_{total}	کل زمان قابل تقسیم گره
$t^i_{assigned}$	زمان نسبت داده شده به گره i
t^k_{pkts}	زمان لازم برای ارسال بسته‌های اتصال k در یک دوره بیکن
l	سطح گره در درخت

اگر دوره پایندگی بر اساس پیش‌بینی انرژی برداشتی و بر اساس داده‌های تابش به اندازه کافی کوچک تعیین شود که در آن انرژی برداشتی تقریباً ثابت باشد می‌توان چرخه کاری را فقط در ابتدای هر دوره و بر اساس انرژی برداشتی، انرژی موجود در باتری و انرژی مورد نیاز برای پایندگی انرژی در انتهای دوره پایندگی تعیین کرد. سپس بر اساس چرخه کاری تعیین‌شده زمان‌بندی پیوندها تعیین می‌شود و تا انتهای دوره پایندگی ثابت می‌ماند. در صورتی که نتوان چنین دوره‌ای تعیین کرد می‌توان از میانگین انرژی برداشتی در طول دوره برای تعیین چرخه کاری استفاده کرد. در الگوریتم پیشنهادی دوم چرخه کاری در زمان ایجاد یا خاتمه هر اتصال و بر اساس انرژی ورودی، سطح باتری و انرژی مورد نیاز در انتهای اتصال تعیین می‌شود. بر اساس ترافیک موجود از مسیرهای مختلف زمان‌بندی پیوندها طوری تعیین می‌شود که حداکثر اتصالات ممکن در شبکه برقرار شوند.

٤-١ الگوریتم اول: تقسیم زمان به صورت ایستا متناسب با چرخه کاری

الگوریتم پیشنهادی اول مبتنی بر الگوریتم تقسیم زمانی ثابت ارائه‌شده در [۴] می‌باشد. چرخه کاری مطابق روش [۳] بر اساس میزان باتری و انرژی ورودی هر گره تعیین می‌شود. در ابتدای هر دوره پایندگی با شروع

1 *if* $t_{cnns}^{i}+lt_{pkts}^{k}>Beacon\ Interval$
2 *reject connection*
3 *for each node i on the path:*
4 *if energy is unadequate*
5 *reject connection*
6 *for each node i on the path:*
7 *if* $t_{cnns}^{i}+lt_{pkts}^{k}> t_{assigned}^{i}$
8 *goto line 11*
9 *schedule the connection*
10 *finish*
11 *for each node i on the path:* $t_{cnns}^{i} \leftarrow t_{cnns}^{i}+lt_{pkts}^{k}$
12 *for each node starting from root:*
13 *for each child i of n children:*
14 $t_{assigned}^{i}=t_{cnns}^{i}+\frac{t_{total}-\sum_{j=1}^{n} t_{cnns}^{j}}{n}$
15 *reschedule all connections*

الگوریتم ۲: تقسیم زمانی پویا.

از گره ریشه هر گره زمان خود را به تعداد فرزندانش تقسیم می‌کند. در صورتی که زمان اختصاص‌یافته به یک فرزند از زمان چرخه کاری آن بیشتر باشد مازاد آن به طور مساوی بین سایر فرزندان تقسیم می‌گردد. با این کار فرزندی که چرخه کاری کمی دارد می‌تواند به اندازه کل چرخه کاری خود زمان داشته باشد و گرهی که چرخه کاری بزرگ‌تری دارد مازاد زمان‌های موجود را برای برقراری اتصالات بیشتر استفاده می‌کند. به علاوه گرهی که انرژی و چرخه کاری کمی دارد زمان‌های خواب پیوسته بیشتری برای حفظ بیشتر انرژی خواهد داشت.

فرزندان هر گره به استثنای گره ریشه حداقل در نیمی از زمان اختصاصی خود منتظر جلورانی داده‌های خود توسط گره پدر به سمت ریشه هستند. بنابراین گره فرزند می‌تواند در این زمان‌ها به حالت خواب برود و در نتیجه برای تقسیم زمان به جای چرخه کاری از مقدار دو برابر آن استفاده می‌کنیم. الگوریتم ۱ روش تقسیم زمان مبتنی بر چرخه کاری فرزندان را نشان می‌دهد. در این الگوریتم ابتدا زمان گره پدر به تعداد فرزندان تقسیم می‌شود که t حاصل این تقسیم است (خط ۵). در هر مرتبه اجرا فرزندی که کوچک‌ترین زمان چرخه کاری را دارد انتخاب می‌شود (خط ۶). اگر زمان چرخ کاری آن فرزند از t بزرگ‌تر باشد زمان چرخه کاری مابقی فرزندان نیز از t بزرگ‌تر است. در این حالت t به همه فرزندان باقیمانده اختصاص می‌یابد و اجرای الگوریتم پایان می‌یابد (خطوط ۱۲ و ۱۳). در غیر این صورت زمان چرخه کاری به فرزند انتخاب‌شده اختصاص می‌یابد، این زمان از زمان کل کسر شده و آن گره از لیست فرزندان خارج می‌شود (خطوط ۸ تا ۱۰) و الگوریتم با فرزندان باقیمانده تکرار می‌گردد.

این الگوریتم به صورت توزیع‌شده و محلی اجرا می‌شود و هر گره برای اجرای آن تنها نیاز به اطلاعات انرژی فرزندان خود دارد. به علاوه در ابتدای هر دوره پایندگی که چرخه کاری گره‌ها به‌روز می‌شوند، به طور برخط اجرا می‌شود. با توجه به حلقه تکرار خط ۴، پیچیدگی الگوریتم $O(n)$ است که n تعداد فرزندان گره می‌باشد. با توجه به تعداد کم فرزندان هر گره در یک شبکه مش بی‌سیم، پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی بسیار کم و به همین دلیل اجرای برخط آن کاملاً عملی و ممکن است.

به دلیل عدم استفاده از اطلاعات زیردرخت در صورتی که زیردرخت یک گره انرژی کافی برای پرکردن زمان گره نداشته باشند زمان اختصاص‌یافته به گره هدر می‌رود. برای رفع این مشکل بهبودی در این الگوریتم ایجاد کرده‌ایم. در الگوریتم بهبودیافته اطلاعات زیردرخت‌ها نیز برای زمان‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر گره باید زمان مورد نیاز برای برقراری ارتباط با هر فرزند خود را از فرزندان دریافت کند. اگر زمان فعالیت محاسبه‌شده بر اساس چرخه کاری هر گره را با t_{dc}^{i} و زمان مورد نیاز برای ارتباط با پدر بر اساس چرخه کاری را با $t_{dc,up}^{i}$ نشان دهیم زمان محاسبه‌شده بر اساس چرخه کاری گره و زیردرخت آن، $t_{dc,subtree}^{i}$، از (۲) محاسبه می‌گردد

$$t_{dc,subtree}^{i}=\min(t_{dc}^{i},\text{۲}\sum_{j\in childs\ of\ i} t_{dc,up}^{j}) \qquad (\text{۲})$$

زمان لازم برای ارتباط با پدر در گره‌های برگ t_{dc}^{i} و در سایر گره‌ها $t_{dc,subtree}^{i}/\text{۲}$ می‌باشد.

در هنگام زمان‌بندی که به وسیله الگوریتم ۱ انجام می‌شود به جای استفاده از زمان خود گره به تنهایی، این زمان اعلامی که برایند زمان‌های مورد نیاز کل زیردرخت است ملاک تصمیم‌گیری در مورد تقسیم زمان‌ها خواهد بود. با این کار در صورتی که زیردرخت یک گره انرژی کافی برای ایجاد ترافیک نداشته باشد زمان برای استفاده سایر بخش‌های شبکه به آن قسمت اختصاص می‌یابد و مشکل عدم کارایی الگوریتم قبلی تخفیف پیدا می‌کند.

۴-۲ الگوریتم دوم: تقسیم زمان به صورت پویا بر اساس اطلاعات انرژی و ترافیک زیردرخت

در این الگوریتم فرض بر این است که طول اتصالات از ابتدا مشخص است. در این صورت میزان مصرف توان هر اتصال مشخص بوده و انرژی گره‌ها می‌تواند به صورت مفیدتری در جهت افزایش گذردهی شبکه استفاده شود. برای این کار هنگام برقراری هر اتصال کل انرژی مصرفی اتصالات موجود تا انتهای اتصال، انرژی مصرفی بازه بیکن‌ها تا انتهای دوره پایندگی و انرژی مورد نیاز در زمان‌های خواب محاسبه می‌شود. در صورتی که قبولی اتصال جدید باعث افت انرژی باقیمانده گره در انتهای دوره پایندگی به مقادیر پایین‌تر از انرژی مورد نیاز شود، اتصال قبول نخواهد شد. فرض کنید K اتصال داریم و زمان باقیمانده تا انتهای هر اتصال K را با T_{life}^{k} نشان می‌دهیم. همچنین فرض کنید زمان اختصاص‌یافته به اتصال K در هر ثانیه را با t^{k}، زمان لازم برای ارسال بیکن‌ها و بسته‌های مدیریتی در هر ثانیه را با t_{BM}، زمان باقیمانده تا انتهای دوره پایندگی را با T_{sus} و مجموع زمان‌های بیکاری گره در هر ثانیه (بعد از پذیرش اتصال جدید k') را با t_{sleep} نشان می‌دهیم. اتصال k' از نظر انرژی در صورتی پذیرفته می‌شود که (۳) برقرار باشد

$$\begin{aligned} &B-\sum_{k=\text{۱}}^{K} P_{active}t^{k}T_{life}^{k}-\sum_{k=\text{۱}}^{K} P_{sleep}t^{k}(T_{sus}-T_{life}^{k})^{+}- \\ &P_{active}t^{k'}T_{life}^{k'}-P_{sleep}t^{k'}(T_{sus}-T_{life}^{k'})^{+}- \\ &P_{active}t_{BM}T_{sus}-P_{sleep}t_{sleep}T_{sus}+\Gamma T_{sus}\geq B^{req} \end{aligned} \qquad (\text{۳})$$

در این الگوریتم تقسیم زمان بین فرزندان بر اساس میزان ترافیک آنهاست که این کار مشکل کمبود زمان گره‌های عمیق‌تر درخت را در الگوریتم‌های قبلی حل می‌کند و باعث می‌شود اتصالات از آن گره‌ها نیز بتوانند برقرار شوند. ایراد این روش تقسیم مجدد زمان هنگام برقراری هر اتصال جدید است. برای بهبود این مشکل هنگام تقسیم زمان، به هر فرزند به میزان مورد نیاز اتصالاتش زمان داده می‌شود و زمان‌های بیکاری باقیمانده به طور مساوی تقسیم می‌گردد. در ابتدای هر دوره پایندگی نیز تقسیم زمانی بر اساس وضعیت انرژی زیردرخت‌ها (مطابق روش بهبودیافته الگوریتم ۱) انجام می‌گیرد.

جدول ۲: پارامترهای توان مصرفی کارت رادیویی در حالت‌های مختلف.

حالت	توان مصرفی (میلی‌وات)
ارسال	۱۲۸۰
دریافت	۹۴۰
بی‌کار	۸۲۰
خواب	۱۰۰

جدول ۳: پارامترهای شبیه‌سازی.

شبیه‌ساز مورد استفاده و نسخه آن	NS۳-۱۹
ماژول‌های مربوط	mesh, wifi, energy
زمان شبیه‌سازی	۳۰۰ ثانیه
نرخ تولید بسته‌ها در اتصالات	۵۰ بسته در ثانیه
اندازه بسته‌ها	۱۲۸۰ بیت
فاصله زمانی بین ورود دو اتصال متوالی	پواسن با میانگین ۳ ثانیه
الگوی ترافیک اتصالات	نرخ بیت ثابت
دوره بیکن	۵۰۰ میلی‌ثانیه
توان مصرفی گره‌ها در حالت فعال	۵ ژول
توان مصرفی گره‌ها در حالت خواب	۰٫۵ ژول

برای توضیح بهتر روش تقسیم، فرض کنید زمان لازم برای اتصالات موجود و جدید هر فرزند i را با t^i_{cnns} و کل زمان قابل تقسیم گره پدر را با t_{total} نشان دهیم و گره پدر دارای n فرزند است. در این صورت زمان هر فرزند طبق (۴) به دست می‌آید

$$t^i_{assigned} = t^i_{cnns} + \frac{t_{total} - \sum_{j=1}^{n} t^j_{cnns}}{n} \qquad (۴)$$

در صورتی که زمان‌های بیکاری موجود برای برقراری یک اتصال جدید کافی نباشد زمان‌بندی مجدد به روش مذکور انجام می‌شود.

علاوه بر کمبود انرژی، کمبود ظرفیت نیز می‌تواند مانع پذیرش یک اتصال جدید شود. فرض کنید زمان لازم برای ارسال بسته‌های اتصال k در یک دوره بیکن t^k_{pkts} بوده و گره مبدأ در سطح l واقع باشد. با توجه به شکل ۲ زمان مورد نیاز در همه گره‌ها از مبدأ تا ریشه برابر است با lt^k_{pkts}. در صورتی که عمق گره از ۴ بیشتر شود به دلیل استفاده مجدد از زمان، زمان لازم به $4t^k_{pkts}$ محدود می‌شود. اگر زمان بیکاری گره ریشه کمتر از lt^k_{pkts} باشد اتصال به دلیل کمبود ظرفیت پذیرفته نخواهد شد. در غیر این صورت با شروع زمان‌بندی از گره ریشه با استفاده از (۴) زمان‌ها به نسبت ترافیک فرزندان بین آنها تقسیم خواهد شد.

الگوریتم ۲ جزئیات اجرای روش تقسیم زمانی پویا را نشان می‌دهد. به دلیل این که همه اتصالات به گره ریشه ختم می‌شوند اگر در گره ریشه زمان کافی وجود داشته باشد اتصال جدید از نظر ظرفیت قابل پذیرش است. این مورد در خط ۱ بررسی می‌شود. در خطوط ۳ تا ۵ وضعیت انرژی گره‌های روی مسیر بررسی می‌شود. در خطوط ۶ تا ۸ بررسی می‌شود که آیا در گره‌های روی مسیر ظرفیت کافی برای پذیرش اتصال وجود دارد یا خیر. اگر ظرفیت کافی موجود باشد بدون تغییر زمان‌بندی خواب اتصال جدید برقرار می‌شود. در غیر این صورت در خط ۱۱ زمان اتصالات روی مسیر به‌روز شده و در خطوط ۱۲ تا ۱۴ زمان‌بندی مجدد در همه گره‌های شبکه اتفاق می‌افتد تا زمان کافی برای برقراری اتصال جدید در مسیر ایجاد شود. در خط ۱۵ همه اتصالات موجود و اتصال جدید مجدداً زمان‌بندی می‌شوند زیرا زمان‌بندی خواب درخت تغییر کرده است.

این الگوریتم با ارسال پیام بین گره‌های شبکه می‌تواند به صورت توزیع‌شده و برخط اجرا شود. در اجرای توزیع‌شده و برخط، با حرکت بسته درخواست مسیر از مبدأ تا ریشه، خطوط ۱ تا ۹ و ۱۱ در هر گره روی مسیر اجرا می‌شوند. در صورتی که یکی از گره‌های مسیر زمان کافی برای زمان‌بندی اتصال جدید نداشته باشد (خط ۷) پیامی به گره ریشه ارسال می‌کند که در پی آن، همه گره‌های شبکه خطوط ۱۳ و ۱۴ را برای زمان‌بندی مجدد اجرا خواهند کرد. پیچیدگی خطوط ۱ تا ۹ و ۱۱ برای هر گره روی مسیر $O(1)$ و برای خطوط ۱۳ و ۱۴ $O(n)$ است که n تعداد فرزندان گره می‌باشد. الگوریتم ۲ نیز مانند الگوریتم ۱ دارای پیچیدگی زمانی بسیار کم و اجرای آن به صورت برخط کاملاً عملی و ممکن است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی از شبیه‌ساز شبکه NS۳ استفاده کرده‌ایم. توپولوژی انتخابی برای شبیه‌سازی‌ها یک درخت تقریباً متوازن با ۱۶ گره مطابق شکل ۱ می‌باشد. برای همه نتایج، آزمون‌ها چندین بار تکرار شده‌اند و بازه اطمینان[1] ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها برای یک دوره پایندگی با مدت زمان ۳۰۰ ثانیه انجام شده است. توان مصرفی برد اصلی نقطه دسترسی مش در حالت فعال حدود ۴ وات و در حالت خواب حدود ۰٫۴ وات در نظر گرفته شده است. برای کارت رادیویی از پارامترهای توان کارت اینتل ۵۳۰۰ که در جدول ۲ [۲۴] آمده است استفاده کرده‌ایم. جدول ۳ پارامترهای اصلی شبیه‌سازی را در آزمون‌های انجام‌شده نشان می‌دهد.

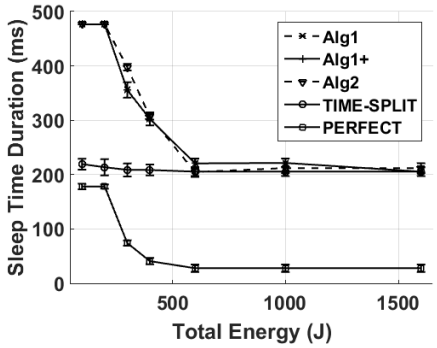
برای درک بهتر کارایی روش‌های پیشنهادی، این روش‌ها با استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۱s MESH، روش تقسیم زمانی ارائه‌شده در [۴]، TIME-SPLIT و یک روش زمان‌بندی کامل به عنوان روش بهینه از نظر انرژی به نام PERFECT که در آن فرض شده که گره در تمام زمان‌های بیکاری در حالت خواب قرار دارد مقایسه شده‌اند.

۵-۱ ارزیابی بازه‌های خواب

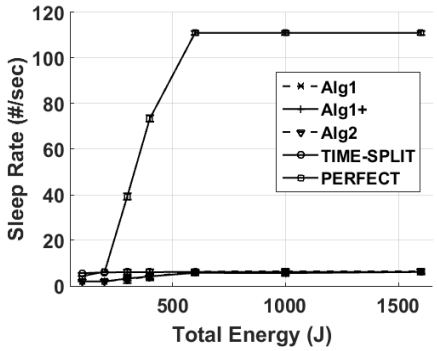
یکی از مزایای روش تقسیم زمانی ایجاد بازه‌های خواب پیوسته و طولانی‌مدت (در حد چند ده یا چند صد میلی‌ثانیه) است که اجازه می‌دهد برد اصلی نقطه دسترسی مش نیز همزمان با کارت رادیویی به حالت خواب برود. به علاوه از تغییرات زیاد وضعیت خواب که سربار انرژی به همراه دارد جلوگیری می‌کند. در این بخش طول و نرخ بازه‌های خواب ایجادشده توسط الگوریتم پیشنهادی اول، Alg۱، روش بهبودیافته الگوریتم اول، Alg۱+ و الگوریتم پیشنهادی دوم، Alg۲، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

شکل ۳ میانگین زمان خواب را در انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. در انرژی‌های کمتر از ۳۰۰ ژول Alg۱، Alg۱+، Alg۲ و PERFECT هیچ اتصال برقرارشده‌ای در مدت شبیه‌سازی ندارند، لذا بازه‌های خواب بسیار طولانی دارند. برای انرژی‌های بیشتر از ۳۰۰ و کمتر از ۶۰۰ ژول شبکه تعدادی اتصال قبول می‌کند و این باعث کم‌شدن طول بازه خواب می‌شود. در انرژی‌های بیش از ۶۰۰ ژول شبکه به اندازه ظرفیت خود اتصال قبول می‌کند و بنابراین بازه‌های خواب در کوتاه‌ترین حالت خود می‌باشند. اما TIME-SPLIT همیشه به اندازه ظرفیت خود اتصال قبول می‌کند و همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود میانگین طول بازه خواب آن برای همه مقادیر انرژی تقریباً یکسان است. میانگین طول

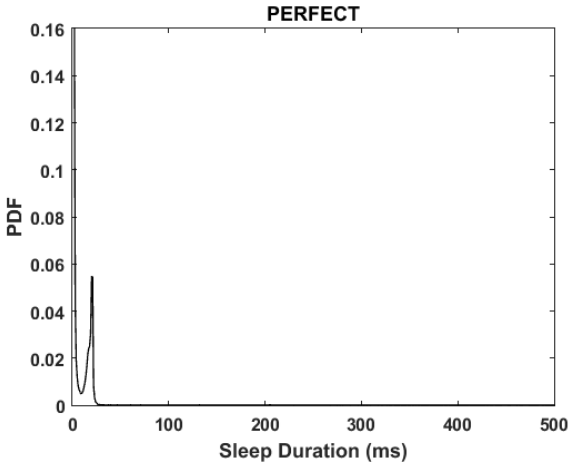
1. Confidence Interval



شکل ۳: طول بازه‌های خواب برای روش‌های پیشنهادی با انرژی‌های مختلف.



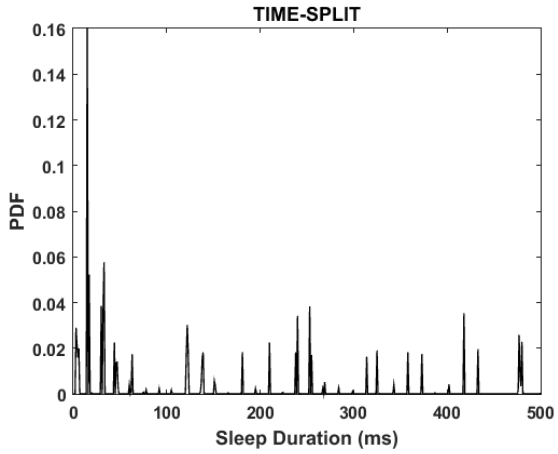
شکل ۴: نرخ خواب برای روش‌های پیشنهادی با انرژی‌های مختلف.



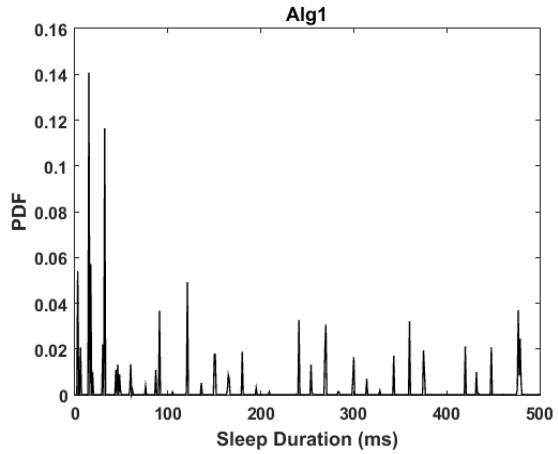
شکل ۵: تابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب برای PERFECT.

بازه‌های خواب روش‌های تقسیم زمانی در حدود ۱۰ برابر PERFECT است که این برای حفظ انرژی گره‌ها هنگام کمبود انرژی می‌تواند بسیار مفید باشد. شکل ۴ تعداد دفعات به حالت خواب‌رفتن در هر ثانیه را نشان می‌دهد. هرچه تعداد دفعات خواب کمتر باشد سربار ناشی از به حالت خواب‌رفتن و بازگشتن از حالت خواب کمتر خواهد بود.

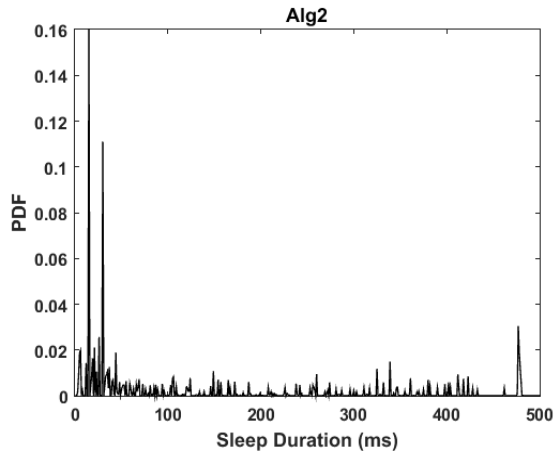
شکل‌های ۵ تا ۸ توابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب را برای روش‌های PERFECT، TIME-SPLIT، Alg۱ و Alg۲ نشان می‌دهند. تقریباً همه بازه‌های خواب PERFECT بسیار کوتاه هستند و برای به خواب‌بردن برد اصلی مناسب نیستند. به دلیل ایستابودن تقسیم زمان در دو روش TIME-SPLIT و Alg۱، توزیع طول بازه‌های خواب بسیار شبیه یکدیگر است. اما به دلیل پویایی تقسیم زمان‌ها در Alg۲، طول بازه‌های خواب توزیع یکنواخت‌تری نسبت به روش‌های ایستا دارد. شکل ۵ نشان می‌دهد که هرچند PERFECT زمان خواب بیشتری نسبت به روش‌های تقسیم زمانی دارد اما همه اینها زمان‌های کوتاه و منقطع هستند که در بسیاری از مدل‌های نقاط دسترسی مش برای بردن برد



شکل ۶: تابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب برای TIME-SPLIT.



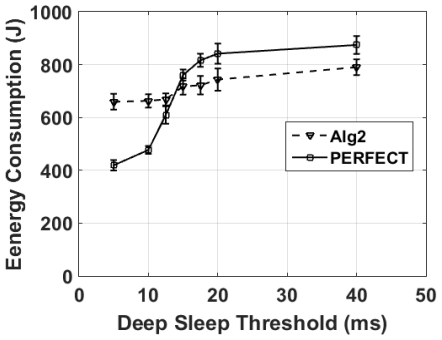
شکل ۷: تابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب برای Alg۱.



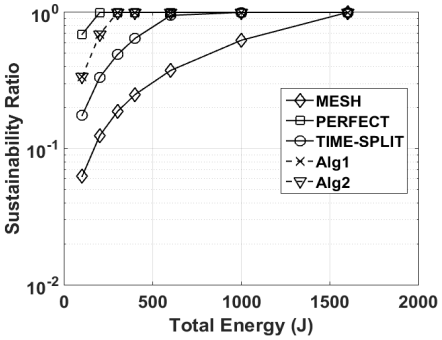
شکل ۸: تابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب برای Alg۲.

اصلی به حالت خواب مناسب نیستند.

به منظور بررسی اثر انرژی خواب پیوسته، میزان انرژی مصرفی Alg۲ و PERFECT برای مقادیر مختلف آستانه خواب عمیق با هم مقایسه شده است. آستانه خواب عمیق عددی است که به ازای بازه‌های کوتاه‌تر از آن برد اصلی را نمی‌توان به حالت خواب برد. شکل ۹ نشان می‌دهد که برای مقادیر آستانه کوچک‌تر از حدود ۱۵ میلی‌ثانیه میزان انرژی مصرفی PERFECT از Alg۲ کمتر است اما به ازای مقادیر بیشتر از آن انرژی مصرفی Alg۲ کمتر می‌باشد. با توجه به توابع چگالی احتمال طول بازه‌های خواب (شکل‌های ۵ تا ۸)، Alg۱ و TIME-SPLIT نیز همین شرایط را دارا می‌باشند. به عبارت دیگر برای بردهایی که به ازای بازه‌های



شکل ۹: میزان انرژی مصرفی به ازای مقادیر مختلف آستانه خواب عمیق.



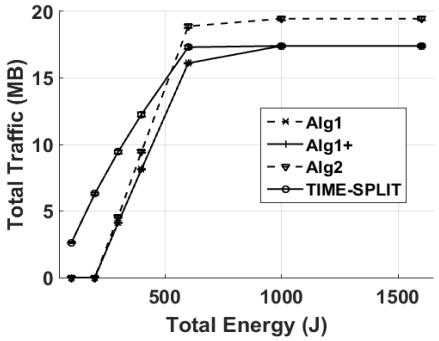
شکل ۱۰: نسبت پایندگی انرژی برای مقادیر مختلف انرژی موجود.

زمانی کمتر از ۱۵ میلی‌ثانیه به خواب‌بردن برد اصلی امکان پذیر نباشد یا مزیت حفظ انرژی نداشته باشد، روش‌های پیشنهادی از نظر مصرف انرژی از PERFECT هم عملکرد بهتری دارند. ذکر این نکته حایز اهمیت است که روش PERFECT به عنوان روش ایده‌آل و برای مقایسه انتخاب شده ولی در عمل قابل پیاده‌سازی نیست.

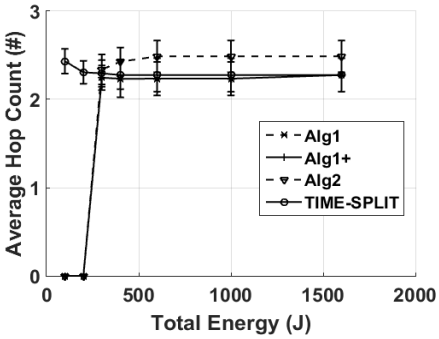
۵-۲ ارزیابی پایندگی انرژی شبکه

در این قسمت پایندگی انرژی روش تنظیم چرخه کاری اعمال‌شده روی روش‌های پیشنهادی ارزیابی شده است. پایندگی انرژی در این مقاله به معنی رسیدن به یک مقدار حداقلی انرژی در انتهای دوره پایندگی است. در شبیه‌سازی‌ها حداقل انرژی مورد نیاز صفر در نظر گرفته شده و بنابراین زنده‌ماندن تا انتهای دوره پایندگی به معنی داشتن پایندگی انرژی است. برای ارزیابی پایندگی، نسبت پایندگی و نسبت طول عمر شبکه به طول یک دوره پایندگی در شرایط مختلف انرژی بررسی شده است. شکل ۱۰ نسبت پایندگی را برای روش‌های مذکور برای انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به میزان انرژی مصرفی گره‌ها در حالت فعال و خواب و بازه بیکن حدود ۲۵ میلی‌ثانیه‌ای، حداقل انرژی لازم برای گره برای فعالیت بدون برقراری هیچ اتصالی در حدود ۲۲۰ ژول است. همان طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است برای مقادیر کمتر از ۳۰۰ ژول روش‌های Alg۱ و Alg۲ نیز پایندگی کامل ندارند. روش TIME-SPLIT به دلیل ایجاد بازه‌های خواب حداقل به اندازه نصف دوره بیکن، نسبت به MESH که هیچ زمان خوابی ندارد وضعیت بهتری دارد. در شبیه‌سازی‌های این بخش آستانه خواب عمیق صفر در نظر گرفته شده تا روش‌های پیشنهادی با روش ایده‌آل مقایسه شده باشد. وضعیت پایندگی انرژی PERFECT از روش‌های پیشنهادی بهتر است زیرا در PERFECT هیچ زمان بیکاری که در آن گره بیدار باشد وجود ندارد، حتی زمان‌های انتظار بین قاب (IFS)[1] و زمان‌های backoff که در

1. Inter Frame Space



شکل ۱۱: ترافیک عبوری از شبکه با انرژی‌های یکسان.

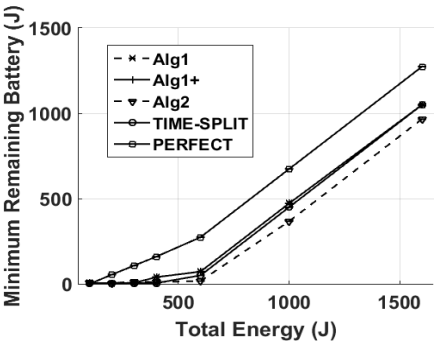


شکل ۱۲: میانگین تعداد گام اتصالات برقرارشده.

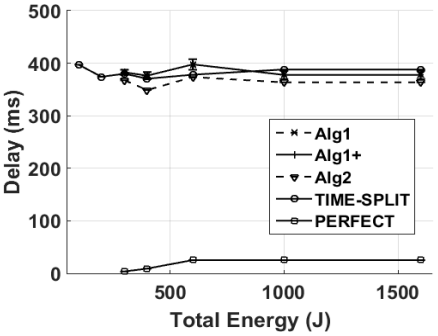
دسترسی به کانال وجود دارد و این باعث حفظ بیشتر انرژی در آن روش می‌شود.

در ادامه میزان ترافیک عبوری روش‌های پیشنهادی در مقایسه با روش TIME-SPLIT برای حالتی که انرژی همه گره‌ها یکسان است بررسی شده است. یکسان‌بودن انرژی‌ها بدین معنی است که زمان گره بین فرزندان باید به طور مساوی تقسیم شود. در واقع در این شرایط که درخت تقریباً متعادل است و انرژی گره‌ها هم برابر است، روش Alg۱ و Alg۱+ کمترین میزان بهبود را در ترافیک عبوری دارند. در بخش‌های بعدی شرایط نامتعادل از نظر انرژی و توپولوژی نیز بررسی شده‌اند. شکل ۱۱ میزان ترافیک عبوری را نشان می‌دهد. در انرژی‌های ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ که شبکه محدود به ظرفیت است سه روش TIME-SPLIT، Alg۱ و Alg۱+ مقدار ترافیک یکسانی عبور داده‌اند. اما در انرژی‌های کمتر TIME-SPLIT به دلیل این که انرژی را برای پایندگی حفظ نمی‌کند کمی بیشتر ترافیک عبور داده است. در عوض Alg۱ و Alg۱+ برای انرژی‌های بیش از ۳۰۰ ژول پایندگی کامل دارند. به دلیل این که PERFECT روشی برای کنترل پذیرش اتصالات ندارد برای مقایسه عادلانه اتصالات قبول‌شده در روش Alg۲ به آن داده شده و بالطبع میزان ترافیک عبوری آن مانند Alg۲ است و در شکل ۱۱ رسم نشده است.

در روش‌های زمان‌بندی تقسیم زمان، در صورتی که اتصالات از همه گره‌های شبکه بتوانند شروع شوند به دلیل محدودیت زمان گره‌های با عمق بیشتر، اکثر اتصالات از گره‌های نزدیک به ریشه برقرار می‌شوند. این مورد در تناقض با عدالت در برقراری ارتباط است. برای بررسی این مورد شبیه‌سازی‌هایی انجام شده که در آن اتصالات از همه گره‌های شبکه شامل گره‌های میانی و برگ‌ها برقرار می‌شوند. میانگین تعداد گام می‌تواند برای ارزیابی عدالت ذکرشده مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۱۲ میانگین تعداد گام در اتصالات برقرارشده را نشان می‌دهد. مطابق انتظار عملکرد TIME-SPLIT، Alg۱ و Alg۱+ مشابه است و Alg۲ در این مورد بهتر عمل می‌کند و میانگین تعداد گام بیشتری دارد. این نشان



شکل ۱۳: انرژی باقیمانده در باتری گره گلوگاه انرژی در انتهای دوره پایندگی.



شکل ۱۴: تأخیر انتها به انتها.

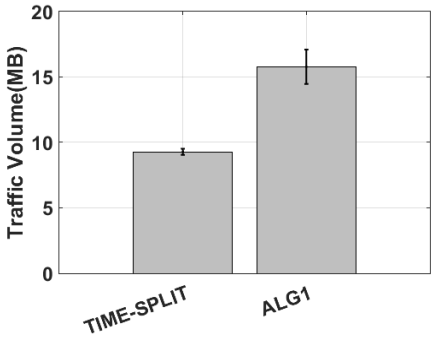
می‌دهد که Alg۲ میزان ترافیک عبوری خود را از مسیرهای دورتری هدایت کرده است.

روش کنترل پذیرش تماس مبتنی بر انرژی که در الگوریتم اول بر مبنای چرخه کاری محاسبه شده و در الگوریتم دوم مبتنی بر میزان مصرف انرژی اتصالات می‌باشد توانسته است شبکه را به پایندگی برساند. اما برای این که ببینیم آیا این روش‌ها بیش از حد محافظه‌کارانه عمل می‌کنند یا خیر انرژی باقیمانده در گره گلوگاه انرژی را در انتهای دوره پایندگی در شکل ۱۳ نشان داده‌ایم. در انرژی‌های کمتر از ۶۰۰ ژول که شبکه محدود به انرژی است روش‌های TIME-SPLIT، Alg۱ و Alg۲ تقریباً همه انرژی گره‌ها را مصرف می‌کنند. Alg۲ به دلیل پویایی و انعطاف‌پذیری در تعیین زمان‌های تقسیم‌شونده از دو روش دیگر بهتر عمل می‌کند. PERFECT به دلیل زمان‌های خواب بیشتر برای همان میزان ترافیک عبوری انرژی کمتری مصرف می‌کند و در انتهای دوره پایندگی مقدار بیشتری انرژی در گره‌ها باقی می‌ماند.

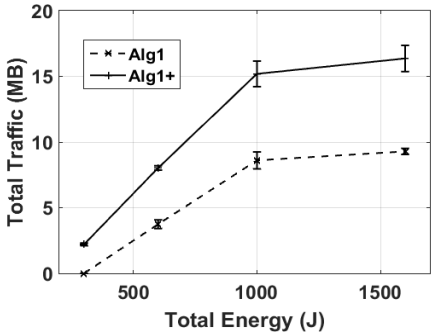
به منظور ارزیابی عملکرد گذرای شبکه در این قسمت تأخیر روش‌های پیشنهادی را با روش PERFECT مقایسه کرده‌ایم. تأخیر انتها به انتهای بسته‌ها در روش‌های پیشنهادی به دلیل زمان‌بندی دوره‌ای، حداکثر به اندازه یک دوره سرویس می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود زمان تأخیر برای همه روش‌های پیشنهادی کمتر از یک دوره سرویس می‌باشد که برابر است با یک دوره بیکن که در شبیه‌سازی‌ها ۵۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب شده است. در صورتی که تأخیر کمتر مورد نیاز باشد دوره سرویس می‌تواند کوتاه‌تر از دوره بیکن باشد.

۵-۳ مقایسه گذردهی روش‌های پیشنهادی

هدف از ارائه الگوریتم اول افزایش گذردهی شبکه در شرایطی است که گره‌ها میزان انرژی متفاوتی دارند. به منظور بررسی این که آیا این هدف برآورده شده است یا خیر شبکه مورد آزمایش را با مقادیر انرژی متفاوت برای گره‌ها بررسی کرده‌ایم. در این آزمایش انرژی گره‌ها حدوداً ۱۰۰۰ ژول و گره ۱ نسبت به گره ۲ دارای انرژی بیشتری است. شکل ۱۵



شکل ۱۵: میزان ترافیک عبوری برای الگوریتم اول و TIME-SPLIT.



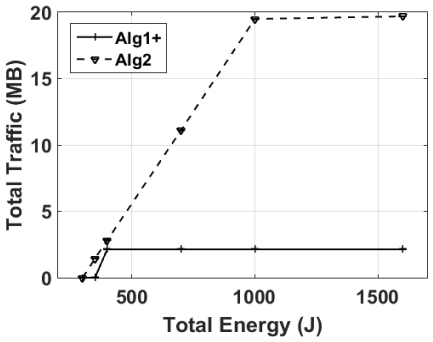
شکل ۱۶: مقایسه ترافیک عبوری در الگوریتم اول و حالت بهبودیافته آن.

میزان ترافیک عبوری از شبکه را برای الگوریتم اول و TIME-SPLIT نشان می‌دهد.

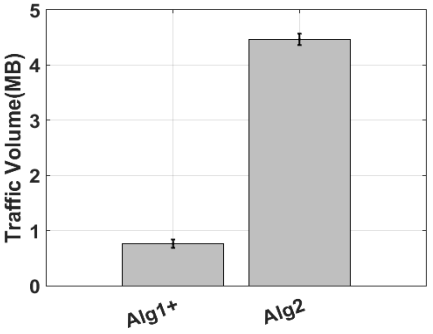
میزان ترافیک عبوری در الگوریتم اول نسبت به TIME-SPLIT حدود ۶۰٪ افزایش یافته و دلیل این امر تخصیص زمان بیشتر به فرزندی است که انرژی بیشتری دارد. این کار باعث می‌شود اتصالات بیشتری در شبکه و از طریق گره با وضعیت انرژی بهتر برقرار شود.

برای بررسی کارایی بهبود انجام‌شده در الگوریتم پیشنهادی اول، Alg۱+، شرایط انرژی شبکه را طوری قرار داده‌ایم که زیردرخت یک گره انرژی بسیار کمتری از خود گره داشته باشد. شکل ۱۶ میزان ترافیک عبوری این شبکه را برای الگوریتم‌های اول و دوم نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها گره‌های ۱ و ۲ و زیردرخت گره ۲ دارای انرژی‌های مساوی هستند و گره‌های ۳ و ۴ همواره ۳۰۰ ژول انرژی دارند. الگوریتم ۱ زمان گره ریشه را به طور مساوی بین گره ۱ و ۲ تقسیم می‌کند اما الگوریتم بهبودیافته بیشتر زمان را به گره ۲ اختصاص می‌دهد زیرا زیردرخت گره ۱ زمان چرخه کاری بسیار کمی دارد. در نتیجه در الگوریتم بهبودیافته اتصالات بسیار بیشتری برقرار می‌شوند و نتیجتاً ترافیک عبوری افزایشی در حدود ۶۰٪ دارد.

الگوریتم دوم پیشنهادی دو بهبود هم‌زمان نسبت به الگوریتم‌های قبلی دارد. یکی زمان‌بندی پویا که بر اساس میزان ترافیک هر فرزند تقسیم زمانی را انجام می‌دهد و دیگری کنترل پذیرش تماس مبتنی بر طول اتصالات. برای بررسی بهبود اول همه اتصالات شبکه از یکی از گره‌های برگ برقرار شده‌اند. شکل ۱۷ میزان ترافیک عبوری Alg۱+ و Alg۲ را برای این شرایط نشان می‌دهد. به دلیل ثابت‌بودن تقسیم زمان در Alg۱+ تعداد کمی از اتصالات برقرار می‌شوند و محدودیت ظرفیت اجازه برقراری اتصالات بیشتر را نمی‌دهد. با افزایش انرژی نیز میزان ترافیک عبوری به خاطر محدودیت ظرفیت افزایش نمی‌یابد. اما در Alg۲ پس از کامل‌شدن ظرفیت اختصاصی اولیه هنگام برقراری اتصال بعدی تقسیم مجدد صورت گرفته و زمان گره‌های روی مسیر افزایش می‌یابد و اتصالات بیشتری برقرار خواهد شد. در انرژی حدود ۱۰۰۰ ژول شبکه محدود به ظرفیت



شکل ۱۷: مقایسه +Alg۱ و Alg۲ برای بررسی پویایی الگوریتم ۲.



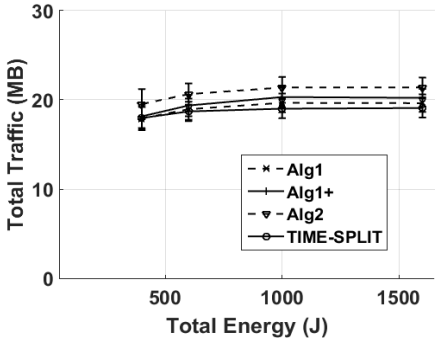
شکل ۱۸: مقایسه +Alg۱ و Alg۲ برای بررسی روش کنترل پذیرش تماس الگوریتم ۲.

شده و با افزایش انرژی ترافیک افزایش نخواهد یافت.

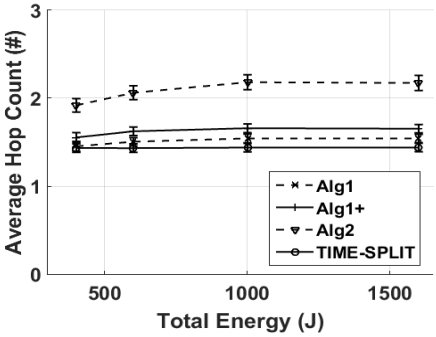
آزمون دیگری برای ارزیابی بهبود دوم الگوریتم ۲ انجام شده است. بهبود پذیرش تماس الگوریتم ۲ در حالتی است که شبکه محدود به انرژی است و گره‌ها انرژی کافی برای قبولی اتصالات به اندازه ظرفیتشان ندارند. به همین دلیل این آزمون برای انرژی ۴۰۰ ژول انجام شده که شبکه محدود به انرژی است. برای نمایش بهتر اختلاف دو روش ابتدا اتصالات کوتاه‌تر برقرار می‌شوند و سپس اتصالات طولانی‌تر. ضمناً زمان شروع همه اتصالات قبل از خاتمه اولین اتصال می‌باشد. در +Alg۱ در صورت پذیرش اتصالات کوتاه به دلیل محدودیت چرخه کاری اتصالات بیشتری پذیرفته نمی‌شوند. اما در الگوریتم ۲ در صورت پذیرش اتصالات کوتاه انرژی مصرفی آنها به طور دقیق محاسبه می‌شود و به همین دلیل اتصالات بیشتری می‌توانند پذیرفته شوند و این باعث افزایش ترافیک عبوری در الگوریتم ۲ می‌شود. شکل ۱۸ میزان ترافیک عبوری +Alg۱ و Alg۲ را نشان می‌دهد.

٥-٤ درخت‌های تصادفی

به منظور بررسی تعمیم‌پذیری روش‌های پیشنهادی در این قسمت نتایج شبیه‌سازی را روی حدود ۴۰ درخت تصادفی با ۲۰ گره ارائه می‌نماییم. در هر آزمایش میانگین انرژی گره‌ها برابر مقدار مشخص‌شده می‌باشد و به گونه‌ای تخصیص یافته‌اند که عدم توازن انرژی وجود داشته باشد. پارامترهای شبیه‌سازی در آزمایشات این بخش نیز مشابه آزمایشات قبلی و منطبق بر جدول ۳ است. شکل ۱۹ میانگین ترافیک عبوری از شبکه‌های تصادفی را نشان می‌دهد. عدم توازن در تشکیل درخت و تفاوت در میزان انرژی گره‌ها باعث شده که Alg۱ نسبت به TIME-SPLIT حدود ۳٪ و +Alg۱ حدود ۶٪ بهبود در ترافیک عبوری ایجاد کند. Alg۲ نیز نسبت به TIME-SPLIT حدود ۱۲٪ بهبود ایجاد کرده است. با مقایسه این شکل با شکل ۱۱ درمی‌یابیم که در درخت‌های تصادفی میزان ترافیک عبوری برای انرژی ۴۰۰ ژول نیز در حدود ترافیک عبوری برای انرژی ۶۰۰ ژول است اما در درخت متوازن این گونه نیست.



شکل ۱۹: میانگین ترافیک عبوری از درخت‌های تصادفی.



شکل ۲۰: میانگین تعداد گام اتصالات پذیرفته‌شده.

دلیل این امر تصادفی‌بودن انرژی گره‌ها است. با این که میانگین انرژی‌ها ۴۰۰ ژول است اما گره‌هایی با انرژی بیشتر از ۴۰۰ ژول در شبکه وجود دارد و این گره‌ها باعث افزایش ترافیک عبوری می‌شوند.

شکل ۲۰ میانگین تعداد گام اتصالات پذیرفته‌شده را نشان می‌دهد. به دلیل تقسیم ایستا میانگین تعداد گام در TIME-SPLIT، Alg۱ و +Alg۱ تقریباً مساوی است اما در Alg۲ اتصالات از گره‌های به مراتب دورتری تشکیل می‌شوند. با توجه به این که میزان ترافیک عبوری Alg۲ از سایر روش‌ها بیشتر است (شکل ۱۹) می‌توان نتیجه گرفت که Alg۲ از پهنای باند و انرژی شبکه به بهترین شکل استفاده می‌کند.

این نتایج نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی در شرایط عمومی نیز در میزان ترافیک عبوری و عدالت در برقراری اتصال بهبودهایی نسبت به روش‌های قبلی ایجاد می‌کنند.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای پایندگی انرژی شبکه مش بی‌سیمی که برای جمع‌آوری داده به کار می‌رود و دارای توپولوژی درخت است و از الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمانی بهره می‌برد دو الگوریتم زمان‌بندی ارائه کرده‌ایم. در الگوریتم اول برای ایجاد پایندگی انرژی برای گره‌ها چرخه کاری تنظیم کرده‌ایم و برای بهبود گذردهی شبکه بر اساس وضعیت انرژی تقسیم زمان را بر اساس چرخه کاری گره‌ها انجام داده‌ایم. در برخی حالت‌ها این روش زمان‌بندی با اشکالاتی مواجه می‌شود از جمله این که در صورتی که چرخه کاری زیردرخت یک گره از خود گره خیلی کمتر باشد روش مذکور کارایی خوبی ندارد. برای حل این مشکل بهبودی روی این روش داده و از چرخه کاری زیردرخت‌ها برای زمان‌بندی استفاده کرده‌ایم. همچنین الگوریتمی پویا برای زمان‌بندی ارائه کرده‌ایم که در آن بر اساس میزان انرژی مصرفی اتصالات موجود و جدید یک روش کنترل پذیرش تماس نسبتاً دقیق پیشنهاد داده‌ایم. این الگوریتم، تقسیم زمان را در صورت لزوم هنگام برقراری اتصالات طوری انجام می‌دهد که میزان

نیاز به زمان‌بندی مجدد در آینده کاهش یابد.

یکی از مزایای الگوریتم‌های پیشنهادی ایجاد بازه‌های خواب پیوسته و طولانی است که اجازه می‌دهد هم کارت رادیویی و هم بورد اصلی گره برای حفظ بیشتر انرژی به حالت خواب برده شوند. همچنین با استفاده از این الگوریتم‌ها شبکه به پایندگی انرژی دست می‌یابد. به عبارتی با هر میزان انرژی که دستیابی به انرژی مورد نیاز در انتهای دوره پایندگی قابل حصول باشد با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی شبکه به انرژی مورد نیاز خواهد رسید. از نتایج شبیه‌سازی‌های زیادی که انجام گرفت دریافتیم در شرایطی که انرژی گره‌های شبکه تقریباً برابر است و مبدأ ترافیک به طور نسبتاً یکنواخت در شبکه توزیع شده است کارایی روش‌های ارائه‌شده و الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمان تقریباً یکسان است. اما در شرایطی که این تعادل در انرژی، منابع ترافیک یا توپولوژی شبکه به هم می‌خورد کارایی روش‌های ارائه‌شده بسیار بهتر از الگوریتم زمان‌بندی تقسیم زمان می‌باشد. برای ادامه این کار می‌توان زمان‌بندی و تعیین چرخ کاری را به صورت توأم و هم‌زمان انجام داد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای بهره‌برداری از همه پیوندهای شبکه در جهت افزایش گذردهی به جای یک درخت از چند درخت استفاده شود.

مراجع

[1] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 47, no. 4, pp. 445-487, Mar. 2005.

[2] IEEE Standards Association, *802.11-2012-IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)*, Sept. 2012.

[3] H. Barghi and S. V. Azhari, "A practical sleep coordination and management scheme with duty cycle control for energy sustainable IEEE 802.11s wireless mesh networks," *Wirel. Networks*, vol. 21, no. 2, pp. 1-26, Feb. 2018.

[4] M. Malekpour Shahraki, H. Barghi, S. V. Azhari, and S. Asaiyan, "Distributed and energy efficient scheduling for IEEE802.11s wireless EDCA networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 90, no. 1, pp. 301-323, 2016.

[5] B. Hohlt, L. Doherty, and E. Brewer, "Flexible power scheduling for sensor networks," in *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Information Processing in Sensor Networks, IPSN'04*, p. 205-214, 2004.

[6] E. S. Kim and C. A. Glass, "Perfect periodic scheduling for three basic cycles," *J. of Scheduling*, vol. 17, no. 1, pp. 47-65, Feb. 2014.

[7] E. S. Kim and C. A. Glass, "Perfect periodic scheduling for binary tree routing in wireless networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 247, no. 2, pp. 389-400, 1 Dec. 2015.

[8] P. Shrivastava and S. B. Pokle, "Energy efficient scheduling strategy for data collection in wireless sensor networks," in *Proc. Int. Conf. on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies*, pp. 170-173, Nagpur, India, 9-11 Jan. 2014.

[9] D. Ghosh, A. Gupta, and P. Mohapatra, "Admission control and interference-aware scheduling in multi-hop WiMAX networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS'07*, 9 pp., Pisa, Italy, 8-11 Oct. 2007.

[10] J. Zou and D. Zhao, "Real-time CBR traffic scheduling in IEEE 802.16-based wireless mesh networks," *Wirel. Networks*, vol. 15, no. 1, pp. 65-72, Jan. 2009.

[11] I. Rhee, A. Warrier, J. Min, and L. Xu, "DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 8, no. 10, pp. 190-201, Oct. 2009.

[12] Z. Wang, J. Li, L. Kang, C. Wang, and Y. Zhang, "Low-latency TDMA sleep scheduling in wireless sensor networks," in *Proc. 2015 IEEE/CIC Int. Conf. on Communications in China, ICCC'15*, 6 pp., Shenzhen, China, 2-4 Nov. 2016.

[13] A. Kansal, J. Hsu, and S. Zahedi, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 1-35, Sept. 2007.

[14] C. M. Vigorito, D. Ganesan, and A. G. Barto, "Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Sensing, Communication, and Networking, IEEE SECON'07*, pp. 21-30, San Diego, CA, USA, 18-21 Jun. 2007.

[15] X. Fafoutis and N. Dragoni, "ODMAC: an on-demand MAC protocol for energy harvesting-wireless sensor networks," in *Proc. of the 8th ACM Symp. on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*, *PE-WASUN'11,* pp. 49-56, Miami Beach, FL, USA, 31 Oct.- 4 Nov. 2011.

[16] S. Tang, J. Wu, G. Chen, C. Wang, X. Liu, T. Li, and X. Y. Li, "On minimum delay duty-cycling protocol in sustainable sensor network," in *Proc. Int. Conf. on Network Protocols, ICNP'12*, 9 pp., Oct. 2012.

[17] B. Buchli, F. Sutton, J. Beutel, and L. Thiele, "Dynamic power management for long-term energy neutral operation of solar energy harvesting systems," in *Proc. 12th ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems, SenSys'14*, pp. 31-45, Memphis, TN, USA, 3-6 Nov. 2014.

[18] L. X. Cai, T. H. Luan, J. W. Mark, and H. V. Poor, "Sustainability analysis and resource management for wireless mesh networks with renewable energy supplies," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 2, pp. 345-355, Feb. 2014.

[19] M. K. Jakobsen, J. Madsen, and M. R. Hansen, "DEHAR: a distributed energy harvesting aware routing algorithm for ad-hoc multi-hop wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Symp. on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM'10,* 9 pp., Montrreal, QC, Canada, 14-17 Jun. 2010.

[20] P. K. Srinivas, "SLR: sustainable longevity routing protocol for ad hoc networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on*, *Signal Processing, Communication and Computing, ICSPCC'13,* 6 pp., KunMing, China, 5-8 Aug. 2013.

[21] C. Moser, J. Chen, and L. Thiele, "An energy management framework for energy harvesting embedded systems," *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 6, no. 2, Article No. 7, 21 pp., Jun. 2010.

[22] X. Shen, *et al*., "EFCon: energy flow control for sustainable wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 1421-1431, Jun. 2011.

[23] G. H. Badawy, A. A. Sayegh, and T. D. Todd, "Fair flow control in solar powered WLAN mesh networks," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., WCNC*'09, 6 pp., Budapest, Hungary, 5-8 Apr. 2009.

[24] D. P. Consumption, D. Halperin, B. Greenstein, A. Sheth, and D. Wetherall, "Demystifying 802.11n power consumption," in *Proc. of the Workshop on Power Aware Computing and Systems HotPower'10*, Article No. 1, pp. 2-6, Vancouver, BC, Canada, 2010.

هادی برقی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی سخت افزار و کارشناسی ارشد معماری کامپیوتر به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۰ در دانشگاه اصفهان و دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری معماری سیستم‌های کامپیوتری در دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های بی‌سیم، پروتکل‌های شبکه و معماری کامپیوتر.

سیدوحید ازهری در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۸۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق و کامپیوتر از دانشگاه مک مستر کانادا گردید. دکتر ازهری از سال ۱۳۸۷ در دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. از جمله فعالیت‌های تحقیقاتی ایشان می‌توان به توسعه روش‌های کارای انرژی در شبکه‌های بی‌سیم و شبکه‌های مبتنی بر پروتکل SIP و سیستم‌های چندرسانه‌ای مبتنی بر پروتکل IP اشاره کرد.