

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المُعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المُعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

م. أسيل الحمصي**

د.م. محمد خالد شاهين*

المُلخَص

تُنشر عقد الحساسات في بيئات مختلفة لتلبية متطلبات تطبيقات محددة. ويتطلب العديد من هذه التطبيقات عمل عقد الحساسات لعدة أشهر أو حتى سنوات؛ لذا تعدّ مدة حياة الشبكة من أهم خصائص شبكات الحساسات اللاسلكية. وقد اقتُرحت في الأدبيات عدة تقنيات بهدف خفض استهلاك الطاقة، ومن ثمّ تحسين مدة حياة الشبكة.

تم في هذا البحث دراسة طريقتين أساسيتين من طرائق تحسين مردود الطاقة في هذه الشبكات: الأولى هي دورة العمل التي تعتمد على منهجية واعية لخمول الحساسات ونشاطها مقدّمة بالموضوع، أمّا الثانية فهي بروتوكولات التوجيه التراتبية. وقد اخترنا أربعة بروتوكولات توجيه تراتبية موفرة للطاقة شائعة الاستخدام هي: التوجيه التراتبي لعنقدة تكفيّة منخفضة الطاقة LEACH، والتوجيه التراتبي المعدل لعنقدة تكفيّة منخفضة الطاقة MOD-LEACH، وبروتوكول العنقدة الموزعة الفعال من حيث الطاقة DEEC، وبروتوكول الانتخاب المستقر SEP.

ثم أجرينا مقارنة لأداء الطريقتين من أجل عدة مقاييس لأداء الشبكة وهي مدة حياة الشبكة ومدة استقرارها والطاقة المتبقية في الشبكة وذلك من أجل عدة سيناريوهات عمل.

الكلمات مفتاحية: شبكات الحساسات اللاسلكية، الحساس، المحطة القاعدية، رأس عنقود، العنقدة، دورة العمل، بروتوكولات التوجيه التراتبية، مردود الطاقة.

* أستاذ مساعد- قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق- سورية.

** طالبة دراسات عليا (ماجستير) قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة

دمشق-سورية.

Comparing the Performance of Wireless Sensor Networks Based on Duty Cycle Method with those Based on Hierarchical Routing Protocols

Dr. Eng. Mohamed Khaled Chahine* Eng. Aseel Al Homsii**

Abstract

Sensor nodes are deployed under different environment to fulfill the requirements of specific applications. Many of these applications require sensor nodes to work for several months or even years; that is why network lifetime is considered as a key characteristic of wireless sensor networks (WSNs). Several techniques were proposed in the literature aiming to reduce energy consumption thus, improving wireless sensor network lifetime.

In this research, two basic methods for improving energy efficiency in these networks were studied: first one is the duty cycle based on sleep/awake aware location-driven methodology, the second one is hierarchical routing protocols. We have selected four common energy-efficient hierarchical routing protocols namely: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), Modified Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (MOD-LEACH), Distributed Energy Efficient Clustering (DEEC), and Stable Election Protocol (SEP).

Then we achieved a performance comparison between the two methods for several network performance metrics: network lifetime, stability period and network remaining energy for several scenarios.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Sensor, Base station, Cluster Head, Clustering, Duty Cycle, Hierarchical Routing Protocols, Energy Efficiency.

*Associate Professor – Department of Electronics and Communication Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University-Syria.

**Postgraduate Student – Department of Electronics and Communication Engineering – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University-Syria.

مقدمة:

نجم عن التقدم الكبير في مجال الاتصالات اللاسلكية تطوير منظومات مستقلة ذاتياً autonomous مؤلفة من المئات أو حتى الآلاف من وحدات صغيرة قادرة على التحسس والحوسبة computing والاتصال البيئي؛ وأطلق عليها مسمى عقد الحساسات sensors nodes. ويشكل الترابط بين هذه العقد شبكة تدعى بشبكة الحساسات اللاسلكية Wireless Sensor Network (WSN)، والتي تتمتع بسهولة نشرها وانخفاض تكلفتها وقدرتها على الاتصال بشكل آني من دون دعم بنية تحتية ثابتة؛ مما يجعلها خياراً جذاباً للعديد من التطبيقات مثل مراقبة البيئة وتطبيقات الأمن والتعقب بزمان حقيقي. وتعدّ شبكات الحساسات اللاسلكية مُكوّناً رئيسياً في إنترنت الأشياء Internet of Things (IoT) لاعتمادها على التحسس وجمع المعطيات.

ولهذا يزداد الطلب على شبكات الحساسات اللاسلكية بإطراد نظراً لتثعب تطبيقاتها في مجال الاتصالات اللاسلكية الحديثة. وقد أشارت الإحصائيات بأن حجم السوق العالمي لهذه الشبكات قد بلغ 39 مليار دولار في العام 2018، في حين يُتوقع أن يصل إلى 149 مليار دولار في العام 2026 [1]. وعلى الرغم من انتشار شبكات الحساسات اللاسلكية؛ إلا أنها تواجه تحديات عديدة مرتبطة بمشاكل في موارد الحساسات من حيث استهلاك الاستطاعة وسرعة المعالجة ومدى الاتصال وعرض المجال المتاح وغيرهم [2]. ومن ثمّ تشتمل خواص شبكة حساسات لاسلكية جيدة على مردود (كفاءة) استطاعة عالي، وقابلية توسع scalability جيدة، وسرعة استجابة responsiveness مقبولة، وموثوقية reliability عالية وحركية mobility ملائمة.

يعدّ تصميم بروتوكولات وخوارزميات تأخذ مسألة محدودية الطاقة بالحسبان أمراً ضرورياً لأن عملية تبديل بطاريات هذه العقد قد تكون مهمة شاقة أو غير ممكنة في بعض التطبيقات.

هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة فعالية كل من طريقة دورة العمل الواعية لخمول الحساسات ونشاطها ومقودة بالموضع وطريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية في تحسين كفاءة الطاقة في شبكات الحساسات اللاسلكية بناءً على مدد استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة والطاقة المتبقية في الشبكة وذلك من أجل عدة سيناريوهات تحوي على مناقشة تغيير البارامترات الآتية: تموضع المحطة القاعدية، وعدد الحساسات وحجم رزمة المعطيات.

الدراسات المرجعية:

- خاضت دراسة الصليفاني Al-Sulaifanie وزملاؤه [3] في دراسة تحسين مردود الطاقة في شبكات الحساسات اللاسلكية باستخدام خوارزمية قائمة على العقدة الثابتة ذات دورة تشغيل duty cycle متكيفة مع حمل الشبكة وآلية نفاذ هجينة إلى القناة من قبل رؤوس العناقيد CHs إلى مصب الشبكة، والتي تكون إما بالاتصال المباشر أو بوساطة خوارزمية النفاذ المتعدد بتحسس الحامل CSMA تبعاً لمتطلبات التطبيق.
- قدّم الباحث ناسو Nawusu وزملاؤه [4] بروتوكول توجيه معدل لشبكات الحساسات اللاسلكية غير المتجانسة. والبروتوكول الجديد هو امتداد لبروتوكول الانتخاب المستقر المناطقي Z-SEP في الشبكات غير المتجانسة، والذي يعدل استراتيجية نشر العقدة في البروتوكول Z-SEP، ويستخدم المسارات منخفضة التكلفة لنقل المعطيات إلى المحطة القاعدية. ويعتمد معيار الانتخاب في Z-SEP على الطاقة المتبقية للعقد المتقدمة فقط، وقد تم تعديله في هذا البحث ليجمع بين الطاقة المتبقية وكثافة العقد. وهذا يضمن أن العقد عالية الطاقة ذات مهام استقبال المعطيات والتجميع هي المفضلة للعمل كرؤوس العناقيد في كل جولة. وقادت هذه التعديلات إلى خفض معدل موت العقد بشكل كبير. بالإضافة إلى ذلك، زاد عدد

الرزم التي تم تسليمها إلى المحطة القاعدية بسبب تمديد العمر النشط للشبكة، مما يجعلها تعمل لفترة طويلة. بشكل عام، تظهر نتائج المحاكاة التي أجريت باستخدام برمجية ماتلاب MATLAB أن البروتوكول المقترح يقدم أداءً أفضل بكثير من البروتوكولات الأخرى مثل LEACH و SEP و Z-SEP وذلك بخفض استهلاك الطاقة، وخفض عدد العقد الميتة في كل جولة، وزيادة عدد الرزم المُستلمة، وإطالة عمر الشبكة. يعمل البروتوكول المقترح عندما تتوضع المحطة القاعدية في مركز مجال التحسس. إلا أنّ أداء هذا البروتوكول غير مضمون في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج مجال التحسس.

- اقترح الباحثان أحمد Ahmmad وزميله [5] بروتوكول توجيه يسمح بتحسين عمر شبكة الحساسات اللاسلكية، ويعتمد على تقسيم السلاسل الطويلة في الشبكة إلى سلاسل أصغر يمثل كل منها عنقود؛ وكل عنقود يملك رأسين heads لإرسال المعطيات إلى المحطة القاعدية؛ وتم اختيار العدد الأمثل لرؤوس العناقيد في الشبكة باستخدام طريقة كالينسكي- هاراباز Calinski-Harabasz، كما تتضمن الشبكة مصب sink نَقَال يقوم بالتنقل من عنقود إلى آخر لاستلام المعطيات من رؤوس العناقيد، وذلك في مسار محدد. أُجريت المحاكاة باستخدام برمجية MATLAB 2015b، وجرى مقارنة النتائج مع عدة بروتوكولات، وحقق البروتوكول المقترح أطول مدة لحياة الشبكة في عدد الجولات المُختار (5000 جولة) مقارنة مع البروتوكولات المدروسة.

مواد وطرق البحث:

قمنا في هذا البحث بمقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المُعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المُعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية من حيث مردود الطاقة، وقد اخترنا أربعة بروتوكولات توجيه تراتبية موفرة للطاقة شائعة الاستخدام هي: التوجيه

التراتبية لعنقدة تكيّفية منخفضة الطاقة LEACH، والتوجيه التراتبي المعدل لعنقدة تكيّفية منخفضة الطاقة MOD-LEACH، وبروتوكول العنقدة الموزعة الفعال من حيث الطاقة DEEC، وبروتوكول الانتخاب المستقر SEP. تبعاً لعدة مقاييس أداء هي: مدة استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة والطاقة المتبقية في الشبكة. وقد أجرينا المحاكاة باستخدام برمجية ماتلاب MATLAB الإصدار 2011a، أمّا مخططات النتائج فقمنا برسمها باستخدام برنامج Excel 2016 لضمان سهولة الإظهار ووضوح الأشكال. وقمنا باستخدام حاسوب شخصي له المواصفات الآتية:

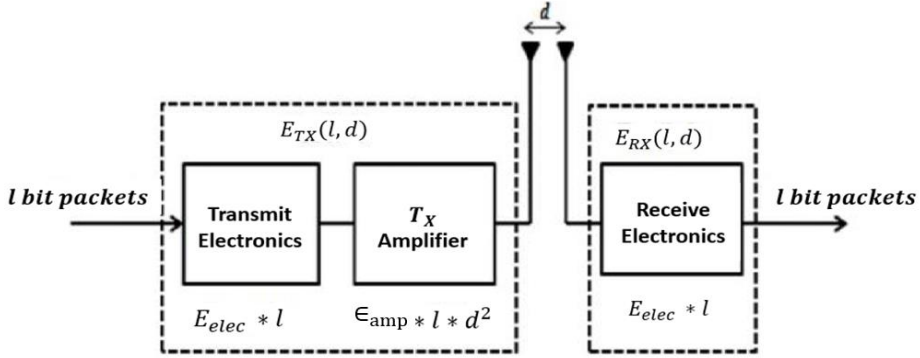
- معالج: Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ.

- ذاكرة نفاذ عشوائي RAM مثبتة: 12GB.

الأساسيات النظرية

1- نموذج الطاقة الراديوي

حيث أن معظم الطاقة المتاحة لدى العقد ضمن شبكة الحساسات اللاسلكية تُفقد أثناء الإرسال، لذا تُستخدم عادة طرائق استمثال للطاقة. ويجري في الأدبيات تقدير استهلاك الطاقة في شبكة الحساسات اللاسلكية اعتماداً على نموذج الطاقة الراديوي من المرتبة الأولى المبين في الشكل (1). وفيه يستهلك المرسل طاقة بفعل الإلكترونيات الراديوية والمضخم amplifier، في حين يستهلك المستقبل طاقة فقط في الإلكترونيات الراديوية [6].



الشكل (1) نموذج الطاقة الراديوي [6]

وبناءً على هذا النموذج تُعطى كمية الطاقة اللازمة لإرسال l بت على مسافة d بالعلاقة (1) [6].

$$\left. \begin{aligned} E_{TX} &= E_{TX-elec}(l) + E_{TX-amp}(l, d) \\ &= l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} d^2 \quad , d < d_0 \\ &= l * E_{elec} + l * \epsilon_{mp} d^4 \quad , d > d_0 \end{aligned} \right\} (1)$$

وفيها يمثل E_{TX} طاقة الإرسال، ويمثل E_{elec} الطاقة المحررة بالبت الواحد لتنفيذ دورة المرسل أو المستقبل. وتمثل ϵ_{fs} و ϵ_{mp} سمّيّ features مضخم المرسل. وعلى وجه التحديد، تُستخدم ϵ_{fs} من أجل حالة الفضاء الحر، وتُستخدم ϵ_{mp} من أجل حالة تعدد المسارات. وعندما تكون المسافة بين المرسل والمستقبل أقل من قيمة عتبة d_0 يُستخدم نموذج الفضاء الحر وفيه تكون المسافة من المرتبة الثانية (d^2)، وبخلاف ذلك يُستخدم نموذج القناة متعدد المسارات وفيه تكون المسافة من المرتبة الرابعة (d^4). وتدل E_{RX} والمُعطاة بالعلاقة (2) على كمية الطاقة المستهلكة لاستقبال l بت من المعطيات

[6]، علماً أنّ قيمة العتبة d_0 تُعطى بالعلاقة (3) وهي النسبة ϵ_{fs} إلى ϵ_{mp} .

$$E_{RX} = l * E_{elec} \quad (2)$$

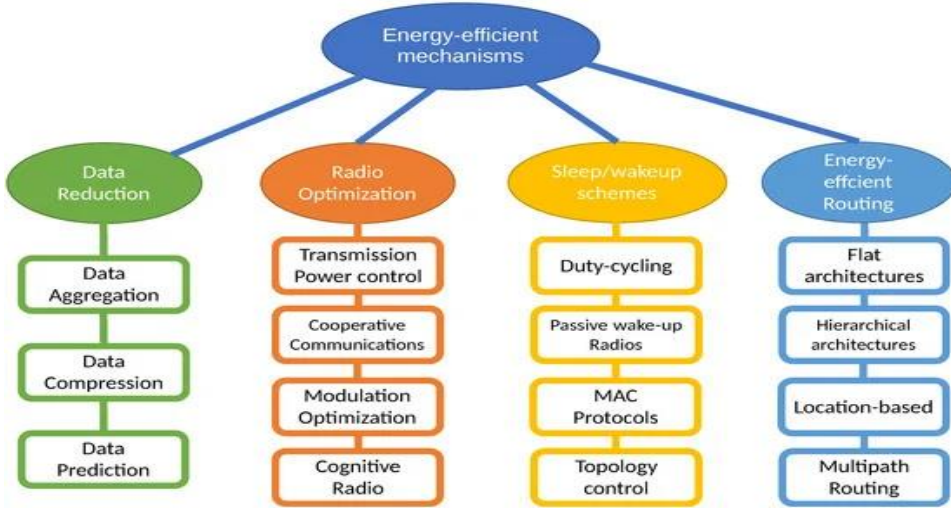
$$d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{mp}} \quad (3)$$

2- طرائق تحسين مردود الطاقة في شبكات الحساسات اللاسلكية

يمكن تصنيف آليات الحفاظ على الطاقة في أربع فئات كما هو موضح في الشكل (2) [21]: تقليل المعطيات data reduction، والاستمثال الراديوي radio optimization، ومنهجيات النوم/الإيقاظ sleep/wake up schemes، والتوجيه الفعّال للطاقة energy efficient routing.

2-1 تقليل المعطيات

إنّ المعطيات المأخوذة من البيئة المحيطة لها ترابط correlation مكاني، على وجه التحديد إذا كانت الحساسات قريبة من بعضها، فإن إرسال معطيات مكررة إلى المصب سيتسبب بضياع كبير في عرض المجال bandwidth وإلى استهلاك كبير لطاقة العقد. فيمكن تقليل حجم المعطيات المرسلة إلى المصب اعتماداً على عدة مناهج وهي تجميع المعطيات أو ضغطها أو التنبؤ بها [21].



الشكل (2) تصنيف آليات مردود الطاقة في شبكات الحساسات اللاسلكية [21]

2-2 التحسين الراديوي

بما أن الجزء الراديوي هو المسؤول الرئيسي عن استهلاك بطارية العقد، لذلك تناول العديد من الباحثين عدة آليات للتحسين في هذا الخصوص، مثل تحسين التعديل أو التشفير، والاتصالات التعاونية، أو التحكم في استطاعة الإرسال، أو استخدام الهوائيات الاتجاهية أو الراديو المعرفي [21].

2-3 مناهج النوم / الإيقاظ

تشمل هذه المناهج طريقة دورة العمل وراديو الإيقاظ غير الفعال وبروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط، والتحكم في الطبولوجيا [21]، تُعرّف بروتوكولات النوم/الإيقاظ sleep/wake up بواسطة المنظومة الفرعية الراديوية radio subsystem للعقدة المُحسّ، مما يخفض زمن بقاء العقدة في حالة الراحة idle state [7].

2-4 التوجيه الفعال من حيث الطاقة

التوجيه هو خدمة رئيسية في شبكات الحساسات اللاسلكية WSNs وهي مسؤولة عن توجيه المعطيات المرسله من عقدة المصدر إلى الوجهة عبر الشبكة. ويجري الإرسال إما بفقرة واحدة أو عبر عقدة وسيطة في اتصال متعدد الفترات [7]. ويمكن تصنيف بروتوكولات التوجيه في شبكات الحساسات اللاسلكية في أربع فئات هي: التوجيه الموحد (المسطح) flat routing ، والتوجيه التراتبي hierarchical routing (العنقدة)، والتوجيه المعتمد على الموضع location-based routing (الجغرافي)، والتوجيه متعدد المسارات multipath routing [21].

3- بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيفية منخفضة الطاقة

يندرج بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيفية منخفضة الطاقة Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) تحت تصنيف التوجيه التراتبي والذي تم عرضه في الفقرة (2-3)، وفيه تُقسم الشبكة إلى عدد من العناقيد، ويتكون كل عنقود من رأس عنقود Cluster Head (CH) ومجموعة من أعضاء العنقود Cluster Members (CMs) التي تتحسس المعطيات من البيئة المحيطة وتجمعها، ثم ترسلها إلى المحطة القاعدية Base Station (BS) عبر رأس العنقود CH. في هذا البروتوكول تُنشئ آلية اختيار رأس العنقود CH بطريقة عشوائية، بحيث تتيح لجميع عقد المجموعة إمكانية تأدية دور رأس عنقود CH في إحدى الجولات rounds؛ مما يفيد في موازنة تبديد الطاقة للعقد؛ حيث أنه من المفترض أن يكون رأس العنقود هو العقدة ذات الطاقة الأعلى في المجموعة لكونها ستستهلك طاقة أكبر أثناء تأدية مهامها. وإذ يعمل رأس العنقود CH كمركز معطيات محلي لجميع العناقيد، ويستخدم جدول scheduling النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن Time Division Multiple Access (TDMA) لإرسال المعطيات المجمعّة إلى المحطة القاعدية BS من دون تصادمات

داخل العقنود، وفيما بين العناقيد. في العقنودة السكونية static، ترسل رؤوس العناقيد CHs المعطيات بشكل مستمر، وتستهلك المزيد من الطاقة، وتموت بسرعة. في حين يعمل بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكييفية منخفضة الطاقة LEACH اعتماداً على جولات rounds؛ وتتكون كل جولة من طورين، هما طور الإعداد phase setup وطور الحالة المستقرة steady state phase.

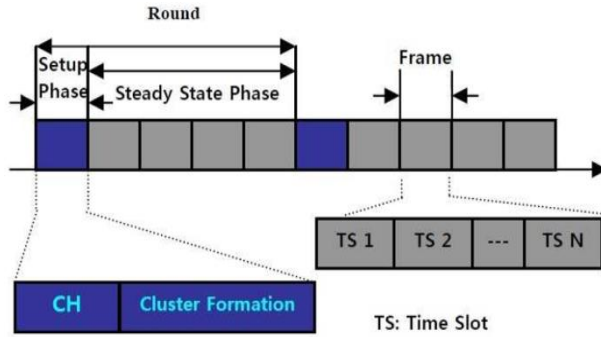
- طور الإعداد

في طور الإعداد تقرر كل عقدة فيما إذا كانت ستشارك في عملية انتقاء رأس العقنود في الجولة الحالية أم لا. وذلك باختيار رقم عشوائي ما بين 0 و 1. وتجري مقارنة هذا الرقم مع قيمة عتبة يرمز إليها بالرمز $T(N_i)$ ، وتعطى هذه العتبة بالعلاقة (4)[9].

$$T(N_i) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{if } N_i \in G \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

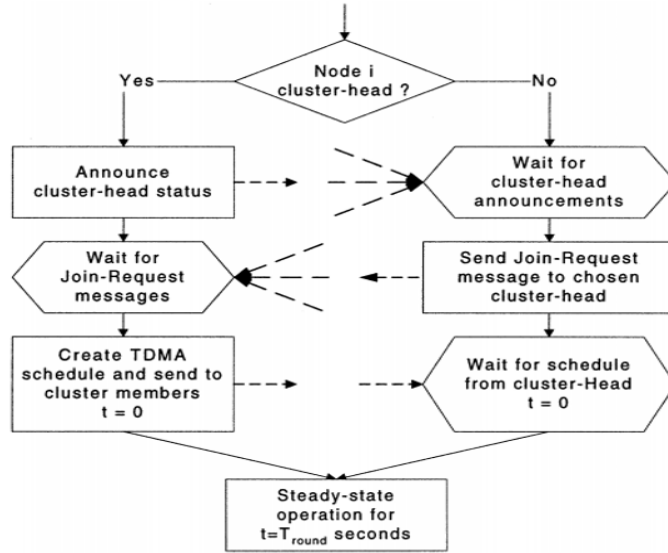
وفيها تمثل p احتمال أن تصبح العقدة رأس عقنود في الجولة الحالية r ، و G مجموعة العقد التي لم تختار كرؤوس عناقيد CHs في الجولات $\frac{1}{p}$ السابقة، وتصبح العقدة رأس عقنود CH للجولة الحالية إذا كان الرقم العشوائي أقل من العتبة $T(N_i)$. تبث رؤوس العناقيد CHs رسالة إعلان Advertisement (ADV). ولدى استقبال هذه الرسالة تقرر جميع العقد التي ليست رؤوس عناقيد إلى أي رأس عقنود ستنضم بناءً على شدة إشارة الرسالة المستقبلية Received Signal Strength (RSS). يُنشئ كل رأس عقنود CH جدول نفاذ متعدد بتقسيم الزمن TDMA ويرسله إلى العقد الأعضاء (CMs)

Cluster Members لتحاكي التصادمات أثناء إرسال المعطيات إلى رأس العنقود CH. ويستقبل كل عضو في العنقود CM جدول النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن TDMA، ثم ينتقل بناءً عليه إلى حالة الخمول حتى الوصول إلى الحيز الزمني المجدول المخصص له [9]. في تلك اللحظة فقط، يمكن لعضو العنقود إرسال المعطيات. يوضح الشكل (3) عملية إنشاء جدول النفاذ المتعدد بتقسيم الزمن TDMA، وفيه يشير إلى TS_i إلى الحيز الزمني رقم i .



الشكل (3) بنية إطار البروتوكول LEACH [9]

يتبين من الشكل (3) أن طور الإعداد يتلخص باختيار رأس العنقود CH، ثم تشكيل العنقود وذلك بانضمام كل مجموعة عقد إلى عنقود محدد وفقاً لشدة الإشارة المستقبلية من قبل كل عقدة على حدة. ويبين الشكل (4) المخطط التدفقي لهذه الآلية.



الشكل (4) خوارزمية تشكيل العناقيد في البروتوكول LEACH [10]

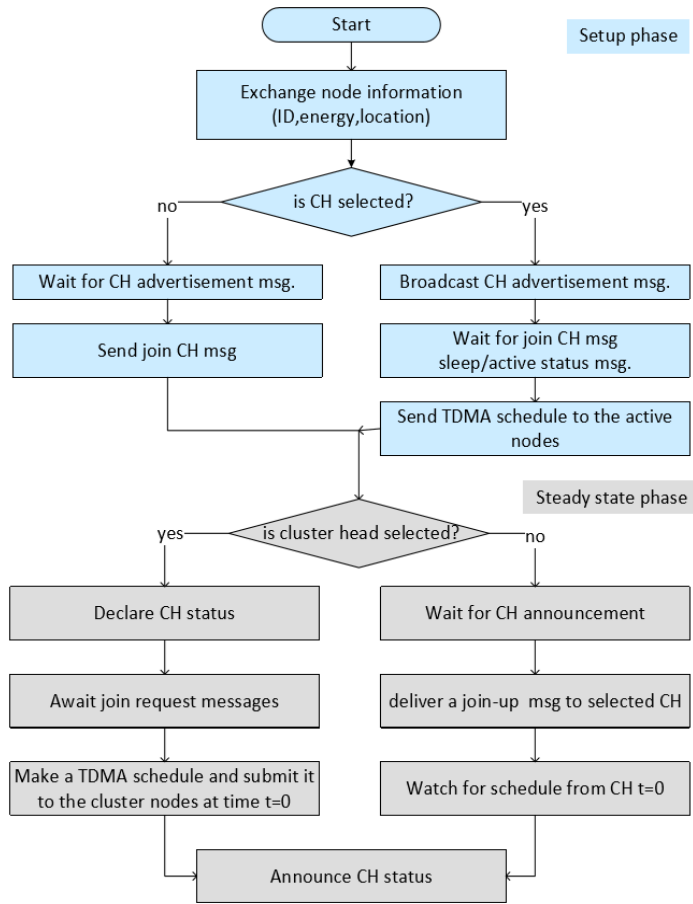
- طور الحالة المستقرة

في نهاية طور الإعداد، يمكن لكل عضو عنقود CM البدء بإرسال المعطيات باتجاه رأس عنقوده CH أثناء الحيز الزمني المخصص له، ويجب على رأس العنقود CH المحافظة على تشغيل مستقبله الراديوي radio receiver لاستقبال جميع المعطيات من أعضاء عنقوده. إذ يفترض البروتوكول أن لدى كل عضو عنقود معطيات للإرسال. بالإضافة إلى ذلك، عندما ينتهي الحيز الزمني أو زمن الجولة round، يقوم رأس العنقود CH بتنفيذ عملية ضغط المعطيات المستقبلية من أعضاء العنقود CMs، ويُرسل المعطيات الناتجة إلى المحطة القاعدية BS. ونظراً لأن المسافة بين المحطة القاعدية BS ورأس العنقود CH أكبر بكثير من المسافة التي تفصل رأس العنقود CH عن أعضاء عنقوده CMs، فإن هذا الإرسال يتطلب استهلاكاً عالياً للطاقة مقارنة بعمليات نقل المعطيات الأخرى.

تمثل هذه الإجرائية الكاملة لعملية طور الحالة المستقرة لبروتوكول تراتبية عنقدة تكييفية منخفضة الطاقة LEACH، ومن ثم سنشارك عقد الحساسات التي لم تُنتخب بعد كرأس عنقود CH في الجولات السابقة، لتصبح رأس عنقود CH في الجولات اللاحقة [9]. يوضح الشكل (5) طوري الإعداد والحالة المستقرة لبروتوكول LEACH.

4- بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكييفية منخفضة الطاقة المعدل

يضيف بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكييفية منخفضة الطاقة المعدل modified LEACH (MODLEACH) على البروتوكول التقليدي LEACH ميزتين هما مخطط استبدال رأس العنقود فعال، ومستويات استطاعة إرسال مزدوجة dual، بهدف زيادة مدة حياة الشبكة ومعدل التدفق. إذ يعتمد البروتوكول LEACH على تغيير رؤوس العناقيد في بداية كل جولة، ويجري إعادة تشكيل العناقيد بأكملها؛ في حين يعتمد البروتوكول المعدل على مخطط جديد لاستبدال رأس العنقود، والذي يتمثل باعتماد عتبة تُستخدم في تشكيل رأس العنقود في الجولة اللاحقة، حيث تجري مقارنة طاقة رأس العنقود الحالي بعتبة محددة مسبقاً، فإن لم ينفق الكثير من الطاقة أثناء مدة ولايته وما زال لديه طاقة أكبر من العتبة المطلوبة، فيبقى رأساً للعنقود في الجولة اللاحقة. وبهذه الطريقة يمكن حفظ الطاقة المُهدورة في رزم التوجيه لتشكيل العنقود الجديد ورأسه. أما إذا كان لرأس العنقود طاقة أقل من العتبة المطلوبة، فيجري استبداله وفقاً للآلية المتبعة في الخوارزمية LEACH.

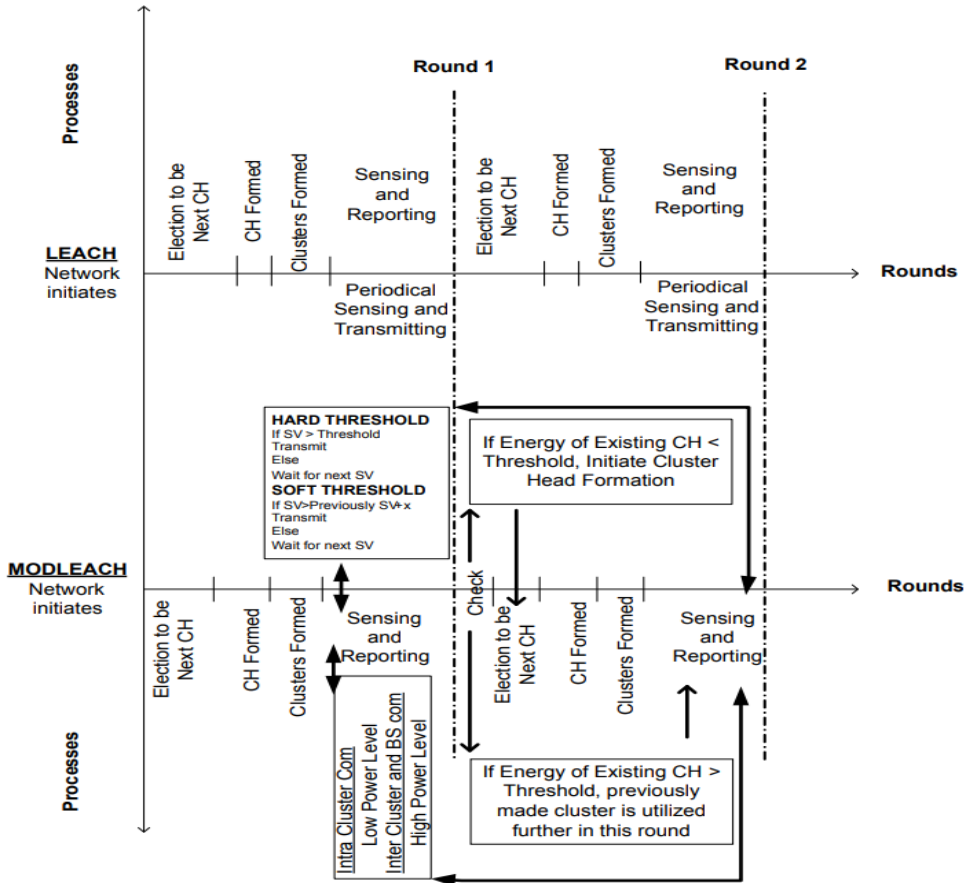


الشكل (5) تطوري الإعداد والحالة المستقرة لبروتوكول LEACH [11]

إلى جانب الحد من استخدام الطاقة في تشكيل العنقود، فإنّ البروتوكول المُعدّل يقدم أيضاً مستويين مختلفين من الاستطاعة لتضخيم الإشارات؛ وذلك حسب طبيعة الإرسال. حيث أنّ الإرسال داخل العنقود (بين أعضاء العنقود الواحد ورأس العنقود) لا يحتاج لاستطاعة تضخيم مماثلة للاستطاعة المستهلكة عند الإرسال بين العناقيد أو بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية؛ فهذا البروتوكول يستخدم مستوى طاقة منخفض من أجل الإرسال داخل العنقود، مع مراعاة وجود مستوى طاقة أعلى للإرسال بين العناقيد أو بين

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية. وينجم عن ذلك توفير قدر كبير من الطاقة؛ في حين يجري تحديد استطاعة التضخيم في البروتوكول LEACH، بصورة موحدة لجميع أنواع الإرسال. كما ينفذ البروتوكول المعدل العتبة القاسية hard والعتبة اللينة soft أثناء تحسس الظواهر، مما يعطي نتائج أفضل. ويبين الشكل (6) آلية عمل البروتوكول MODLEACH [12].



الشكل (6) آلية عمل البروتوكول MODLEACH [12]

5- بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة

بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة (DEEC) Distributed Energy Efficient Clustering هو بروتوكول تراتبي، يأخذ بالحسبان كل من الطاقة الابتدائية والطاقة المتبقية في العقد عند اختيار رؤوس العناقيد CH، مما يضمن حصول العقد التي لديها طاقة متبقية أكبر على احتمال أعلى لتصبح رأس عنقود CH من العقد التي تملك طاقة متبقية أقل، ويعطى هذا الاحتمال بالعلاقة (5).

$$p_j = p_o \left[1 - \frac{\bar{E}(r) - E_j(r)}{\bar{E}(r)} \right] = p_{opt} \frac{E_j(r)}{\bar{E}(r)} \quad (5)$$

حيث $E_j(r)$ هي الطاقة المتبقية في العقدة j في الجولة r ، و $\bar{E}(r)$ هي متوسط الطاقة المتاحة في الشبكة في الجولة r ، وتعطى بالعلاقة (6).

$$\bar{E}(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \quad (6)$$

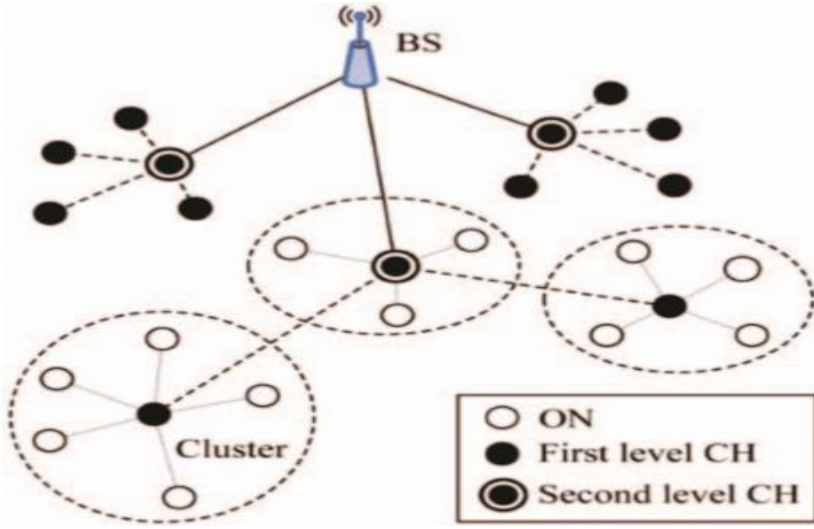
حيث E_{total} الطاقة الكلية للشبكة و N هي العدد الكلي للعقد في الشبكة، و R هي عدد الجولات الكلي ويُعطى بالعلاقة (7).

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \quad (7)$$

وبين الشكل (7) آلية عمل بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة DEEC، والذي يعتمد على نمط القفزات المتعددة ضمن الاتصالات بين العناقيد [13].

عند اختيار عقدة حساس ما لتكون رأس عنقود CH، فإنها تبث رسالة بأنها رأس عنقود مؤقت أو رأس عنقود نهائي، تتلقى العقد القوائم المبنوثة من رؤوس العناقيد CHs وتختار رأس عنقود CH من بين مجموعة رؤوس العناقيد CHs الذي يشكّل أقل تكلفة. بعد ذلك، تزيد كل عقدة من قيمتها الاحتمالية لتصبح CH في الجولة اللاحقة.

إذا أكملت عقدة الحساس دورة تنفيذ بروتوكول موزع فعال من حيث الطاقة هجين Hybrid Energy Efficient Distributed (HEED) دون أن تصبح رأس عنقود CH أو أن تتصل بعنقود، فسوف تعلن عن نفسها على أنها رأس عنقود CH نهائي [14].

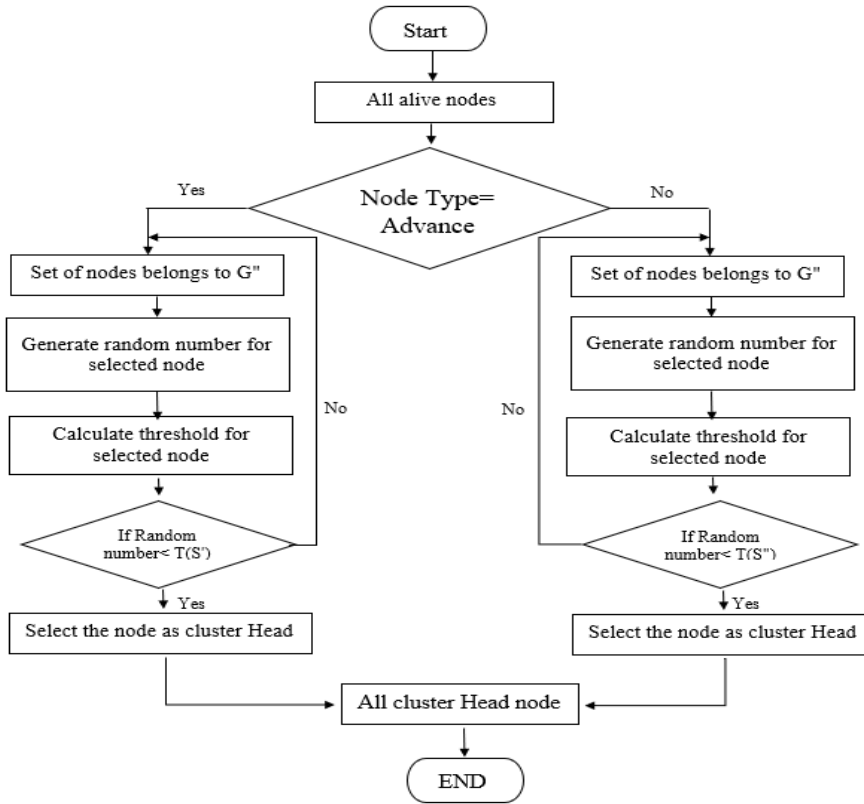


الشكل (7) عمل بروتوكول عنقودة موزعة فعال من حيث الطاقة DEEC [13]

6- بروتوكول الانتخاب المستقر

بروتوكول الانتخاب المستقر (SEP) Stable Election Protocol هو بروتوكول غير متجانس من مستويين يقدم نوعين من العقد هما العقد العادية normal والعقد المتقدمة Advance. ويكون للعقد المتقدمة طاقة أكبر من العقد العادية. في هذا البروتوكول يكون لكلا النوعين من العقد (العادية والمتقدمة) فرصة لأن تصبح رأس عنقود؛ ولكن للعقد المتقدمة فرص أكبر لتصبح رأس عنقود مقارنةً بالعقد العادية [15].

يُبين الشكل (8) عمل بروتوكول الانتخاب المستقر، تمثل العقد التي لم تصبح رؤوس عناقيد، و $T(S')$ عتبة العقد النظامية (العادية)، و G'' العقد التي لم تصبح رؤوس عناقيد، و $T(S'')$ عتبة العقد المتقدمة [16].

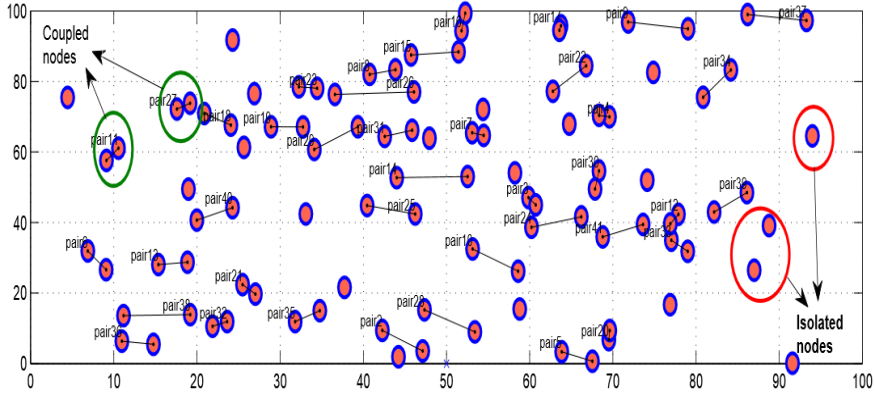


الشكل (8) عمل بروتوكول الانتخاب المستقر SEP [16]

7- دورة تشغيل باستخدام منهجية واعية للنوم والنشاط مقودة بالموضع

تتدرج هذه المنهجية تحت طريقة دورة العمل التي تم عرضها في الفقرة (2-3). وتكمن آلية عملها بأنه بعد نشر الحساسات بشكل عشوائي في الشبكة، يجري تقسيمهم إلى أزواج pairs حيث تقوم الحساسات بمشاركة موقعها مع المحطة القاعدية اعتماداً على المنظومة الشاملة لتحديد المواقع (GPS) Global Positioning System، تقوم المحطة القاعدية بعد ذلك بتطبيق خوارزمية ارتباط محددة تتعلق بدراسة أقرب مسافة بين الحساسات، ويجري بناءً عليها اختيار لكل حساس في الشبكة زوج خاص به، كما هو مبين في الشكل (9).

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية



الشكل (9) نموذج ارتباط الشبكة [17]

في بداية كل جولة round يتناوب كل زوجين من الحساسات بين نمطي العمل: النشاط والنوم مما يقود إلى توفير استهلاك طاقة كبير على مستوى مجموع الحساسات؛ وذلك لأن الحساسات التي في نمط النوم sleep تغلق المرسل-المستقبل transceiver الخاص بها، ومن ثمّ تقلل من الاستماع الحامل idle listening وتتجنب الاستماع الزائد overhearing الذي ينتج عن التحسس لمعلومات مكررة من قبلها ومن قبل الحساس المجاور لها نتيجة تموضعهما في منطقة قريبة للغاية والتي تُقدّر بأقل من 10m. بالمقابل قد تحتوي الشبكة على حساسات معزولة أي لا يتوافر بالقرب منها (على مدى 10m) أي حساس؛ ومن ثمّ لن ترتبط مع حساس آخر، وهذا يفرض عليها البقاء في نمط عمل نشط active بشكل دائم في كل الجولات إلى أن تفتى طاقتها [17]. ومن هنا يمكن الاستدلال بأن مردود طريقة دورة العمل يزداد بازدياد كثافة الشبكة (عدد الحساسات)، وهذا سيتم تبيانها في فقرة النتائج.

أيضاً من الحالات التي تجعل بعض الحساسات تبقى في حالة عمل نشط بشكل دائم هي عندما تنفذ طاقة الحساس القرين (الذي يصبح عقدة ميتة) وهذا ما يجعل بعض عقد الشبكة تستهلك طاقتها وتموت بشكل أسرع من غيرها، يُنسب ذلك إلى التوزع العشوائي للعقد وحسب موقع كل عقدة وبُعدها عن بقية عقد الشبكة. بعد ذلك يبدأ طور إعداد

الشبكة، والذي يتضمن اختيار رؤوس العناقيد وتشكيل العناقيد، ومن ثم يجري إرسال المعطيات من البيئة المحيطة من الحساسات وصولاً إلى المحطة القاعدية وذلك ضمن طور إرسال المعطيات.

النتائج ومناقشتها:

استخدمنا برمجية ماتلاب MATLAB 2021a لمقارنة أداء الطريقتين المدروستين، وسنقوم بمحاكاة عدة سيناريوهات للشبكة؛ تشمل هذه السيناريوهات على تغيير موقع المحطة القاعدية، وتغيير كثافة الحساسات في الشبكة، وأخيراً تغيير حجم رزم المعطيات المتبادلة في الشبكة. ويبين الجدول (1) بارامترات parameters المحاكاة.

الجدول (1) بارامترات المحاكاة

ملاحظات	القيم والوحدات	البارامترات
Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[18]	100 x 100 (m ²)	امتداد الشبكة (Ym, Xm)
Krishnan, K., et al. (2021),[20]	(25,200) < (100,100) < (50,50)	موقع المحطة القاعدية BS
	5000	عدد الجولات (r)
Yousif, Z., et al. (2021),[9]	50, 100, 200, 500	عدد الحساسات (N)
	4000 · 2000 bit	طول رزمة المعطيات
Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[18]	0.5 J	الطاقة الابتدائية لكل حساس (E ₀)
Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[18]	50 nJ / bit	الطاقة المحررة في البت بدارة المرسل (E _{Tx-elec})
Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[18]	50 nJ / bit	الطاقة المحررة في البت بدارة المستقبل (E _{Rx-elec})
	5 nJ / bit	الطاقة المبدة بالبت من أجل التجميع (E _{da})
بحالة (d ≥ do)	0.0013 pJ/ bit / m ²	سمة مضخم المرسل بحالة تعدد المسارات (E _{mp})
بحالة (d < do)	10 pJ/ bit / m ²	سمة مضخم المرسل بحالة الفضاء الحر (E _{fs})
من أجل MODLEACH [12]	E _{mp} /10	سمة مضخم المرسل بحالة تعدد المسارات (داخل العنقود) عندما d ≥ d1
من أجل MODLEACH [12]	E _{fs} /10	سمة مضخم المرسل بحالة الفضاء الحر (داخل العنقود) عندما d < d1
من أجل ال duty cycling [17]	10 m	المدى الأعظم بين الأزواج

اخترنا ثلاثة مقاييس أداء لمقارنة طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات الحساسات اللاسلكية المدروسة وهي:

- مدة الاستقرار stability period: وهو الزمن الفاصل من بدء عمليات الشبكة حتى موت أول عقدة حساس [18].
- مدة حياة الشبكة network lifetime: وهي المدة من بداية عمل الشبكة حتى موت آخر عقدة حساس فيها [18].
- الطاقة المتبقية remaining energy: وهي إجمالي الطاقة المتبقية في بطارية الحساسات في كل جولة. وينجم استهلاك الطاقة في الحساس عن عمليات التحسس للبيئة المحيطة ومعالجة المعطيات وإرسالها كما تم تبيانها في فقرة نموذج الطاقة الراديوي. وتُعطى كمية الطاقة المستهلكة في كل عقدة (حساس) في الشبكة بواسطة المعادلة (8) [19].

$$E_{consumed} = E_{initial} - E_{residual} \quad (8)$$

يعبر الرمز $E_{consumed}$ عن الطاقة الكلية المستهلكة من قبل العقدة، و $E_{initial}$ الطاقة الابتدائية لكل عقدة والتي تساوي في دراستنا 0.5 جول، أما الرمز $E_{residual}$ فيدل على الطاقة المتبقية في العقدة. وفي نهاية كل جولة يجري حساب الطاقة المتبقية [19].

وتُعطى كمية الطاقة الكلية المستهلكة في الشبكة بواسطة المعادلة (9) [19].

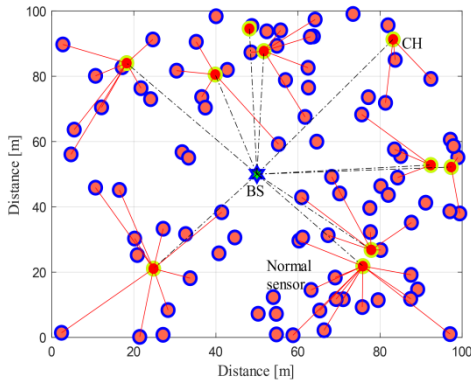
$$\sum_{c=1}^N E_{consumed} = \sum_{i=1}^N E_{initial} - \sum_{r=1}^N E_{residual} \quad (9)$$

وبالتالي تُعطى قيمة الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة بالعلاقة (10)

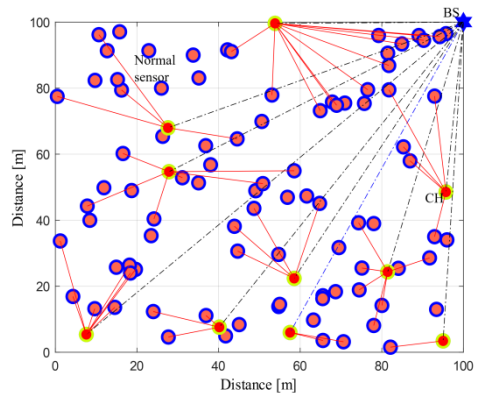
$$\sum_{r=1}^N E_{residual} = \sum_{i=1}^N E_{initial} - \sum_{c=1}^N E_{consumed} \quad (10)$$

السيناريو الأول: دراسة تأثير تغيير تموضع المحطة القاعدية

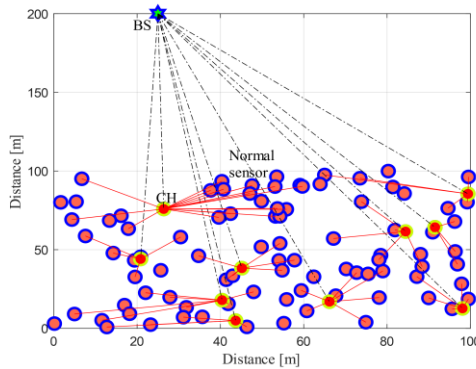
إنّ لموضع المحطة القاعدية تأثير كبير على استهلاك الطاقة في الشبكة. ومن أجل تحليل التأثير الناتج سنأخذ بالحسبان ثلاث حالات لتموضع المحطة القاعدية، وهي: الحالة الأولى يكون فيها تموضع المحطة القاعدية في منتصف الشبكة، وفي الحالة الثانية يكون تموضع المحطة القاعدية على حافة الشبكة، أمّا في الحالة الثالثة يكون تموضع المحطة القاعدية خارج الشبكة [20]. والحالات الثلاث موضحة في الشكل (10) على الترتيب (a) و (b) و (c).



(a)



(b)

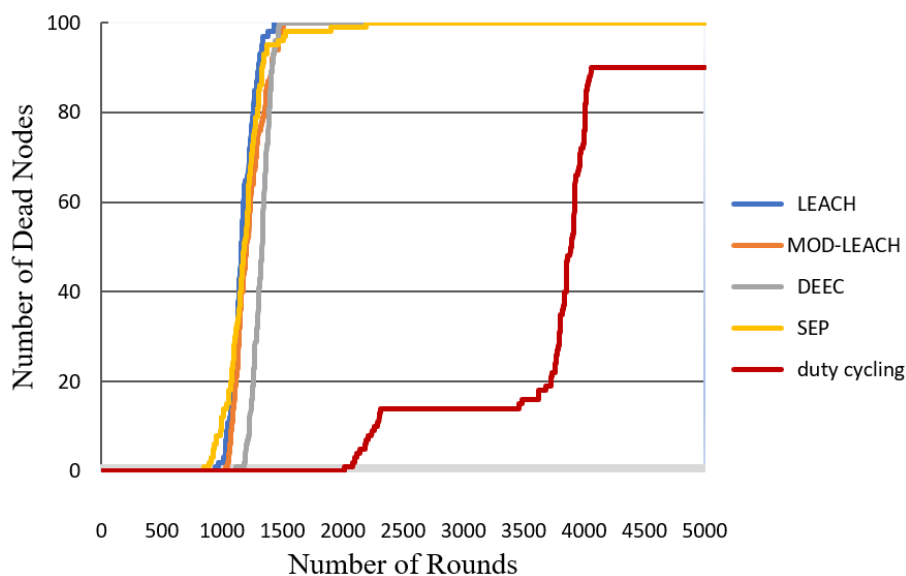


(c)

الشكل (10) تموضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة [الباحث]

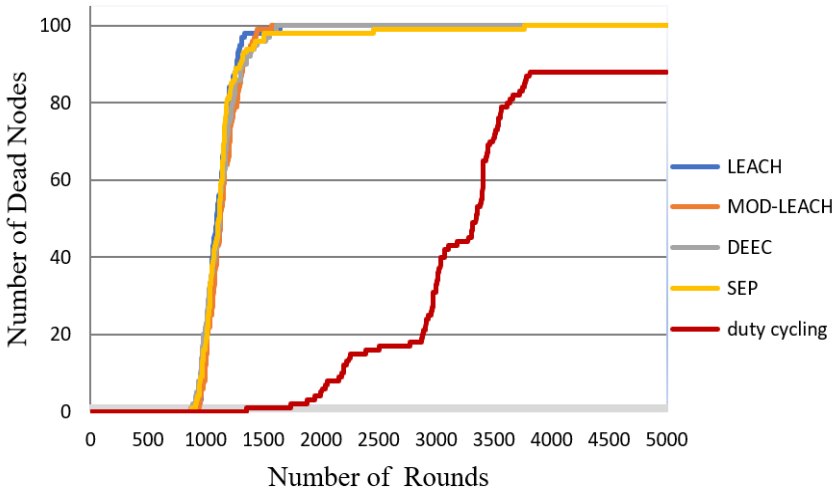
سنقوم باستخراج مقاييس الأداء المعتمدة من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية مع تثبيت عدد الحساسات المنشورة عند 100 حساس، ومن أجل حجم رزم المعطيات 4000 بت.

تبيّن الأشكال (11) و(12) و(13) تغير عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة المعتمدة LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP التي تندرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، بالإضافة إلى طريقة دورة العمل وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة على الترتيب لتموضع المحطة القاعدية على الترتيب.



الشكل (11) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لتموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة [الباحث]

من المنحني المُعبّر عن العلاقة بين عدد العقد الميتة وعدد جولات العمل يمكن استخراج مقياسين أداء هما: مدة استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة، فمن الشكل (11) تم استخراج المقياسين من أجل حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة، فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة والتي تساوي الجولة المقابلة لموت أول حساس في الشبكة، جرت الملاحظة بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد استقرار متقاربة وهي 848 و 943 و 1031 و 1113 جولة للبروتوكولات SEP و LEACH و MOD-LEACH و DEEC على الترتيب بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة مساوي للـ 100% أي خلال مدة عمل 5000 جولة لم تنفذ طاقة جميع الحساسات، ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية حقق بروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 2196 جولة أما بقية البروتوكولات حققوا مدد حياة متقاربة تتراوح بين 1400 و 1500 جولة.



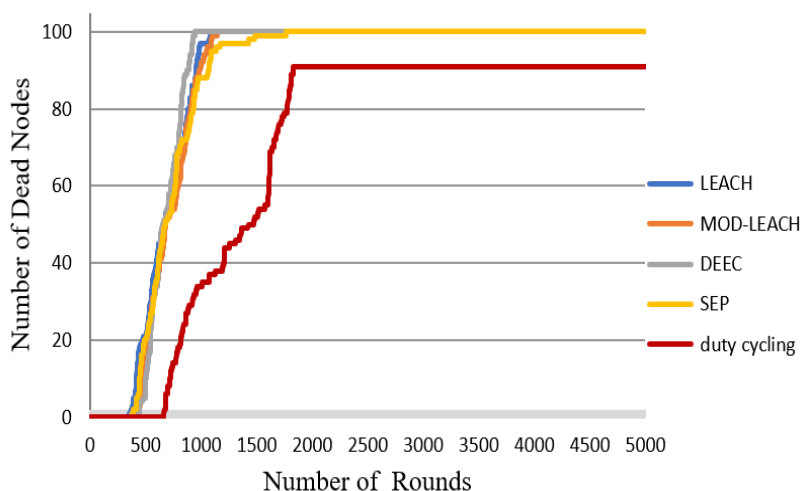
الشكل (12) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لتموضع المحطة

القاعدية على حافة البيئة المدروسة [الباحث]

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

لوحظ من الشكل (12) بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد استقرار متقاربة تتراوح بين 870 و 935 جولة، أما من أجل مدة حياة الشبكة فحقق بروتوكول SEP أعلى مدة حياة مساوية لـ 3767 جولة بالمقارنة مع بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية والذين حققوا مدد حياة شبكة متقاربة تتراوح بين 1570 و 1650 جولة.

بينما حققت طريقة دورة العمل مدة استقرار مساوية لـ 1353 جولة ومدة حياة شبكة بنسبة 100%.

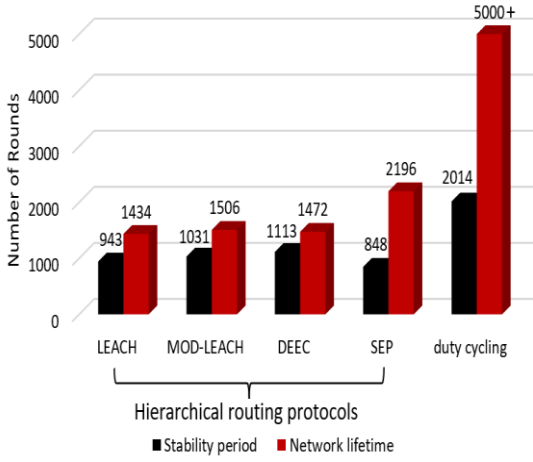


الشكل (13) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لتموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة [الباحث]

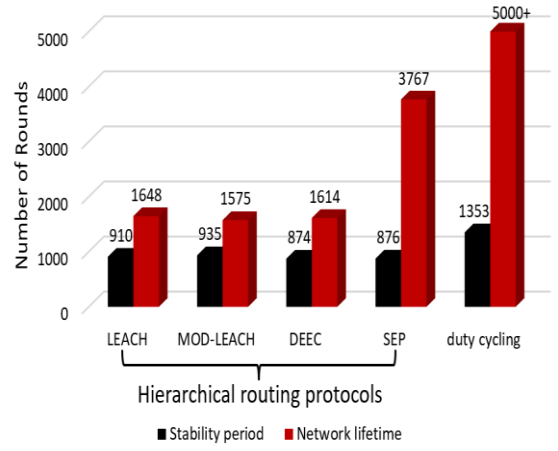
لوحظ من الشكل (13) تحقيق بروتوكولات التوجيه التراتبية لمدد استقرار متقاربة جدا تتراوح بين 350 و 390 جولة بينما حققت طريقة دورة العمل مدة استقرار بمقدار الضعف والتي تساوي 664 جولة، وحققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد حياة شبكة متراوحة بين 950 و 1766 بالمقابل حققت طريقة دورة العمل مدة حياة شبكة بنسبة 100%.

يبين الشكل (14) (a) و (b) و (c) تفصيلاً عن مدد استقرار ومدد حياة الشبكة لكلاً من الطريقتين المدروستين من أجل ثلاث حالات لتموضع المحطة القاعدية على الترتيب.

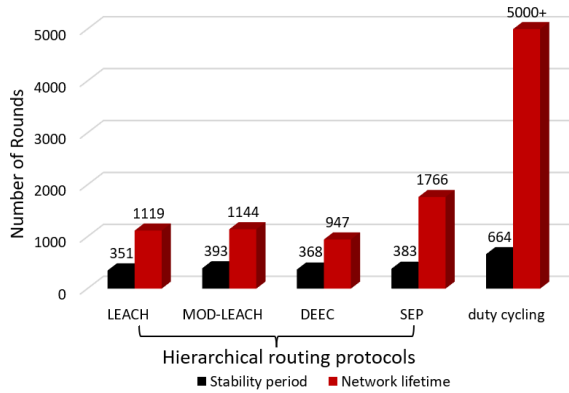
يُلاحظ من الشكل (14) انخفاض مدد استقرار ومدد حياة الشبكة مع ازدياد بُعد المحطة القاعدية عن البيئة المدروسة، وهي نتيجة منطقية لأن الطاقة المصروفة للإرسال والاستقبال تتعلق بالمسافة بين المرسل والمستقبل. فعندما زادت المسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية أدى ذلك لصرف طاقة أكبر في دراتي الإرسال والاستقبال.



(a)



(b)



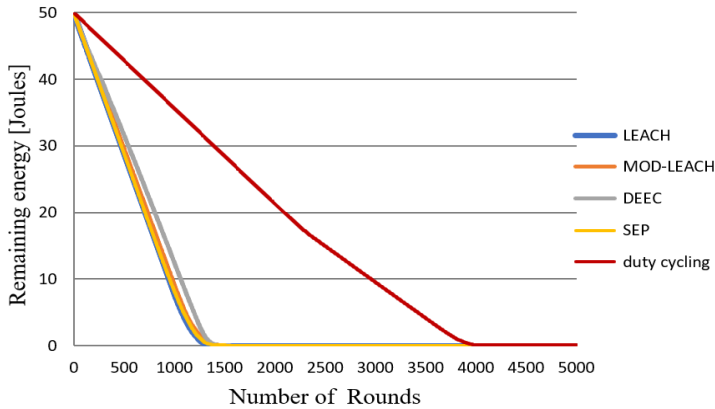
(c)

الشكل (14) مدد استقرار ومدد حياة الشبكة من أجل تغيير موضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة [الباحث]

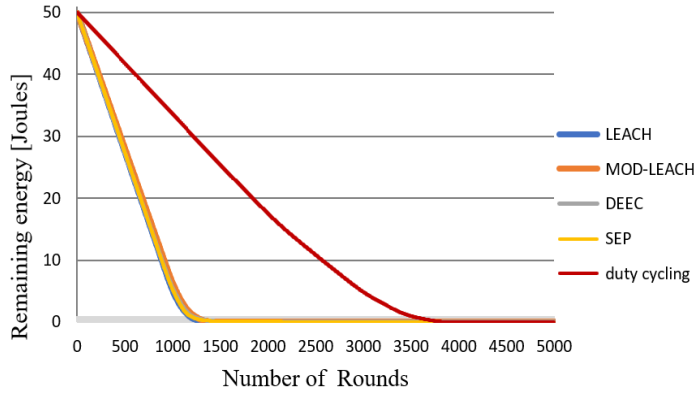
مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

كما نلاحظ من الشكل (14) تفوق طريقة دورة العمل على جميع بروتوكولات التوجيه التراتبية المدروسة، حيث أنها حققت مدة حياة شبكة بنسبة 100% أثناء عدد جولات عمل تساوي 5000 جولة، وذلك من أجل الحالات الثلاث المختلفة لتموضع المحطة القاعدية. وفيما يخص المقارنة بين بروتوكولات التوجيه التراتبية الأربعة فقد أظهرت النتائج تحقيق البروتوكول SEP لأعلى مدة حياة للشبكة والتي حققت 2196 و 3767 و 1766 جولة من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية على الترتيب.

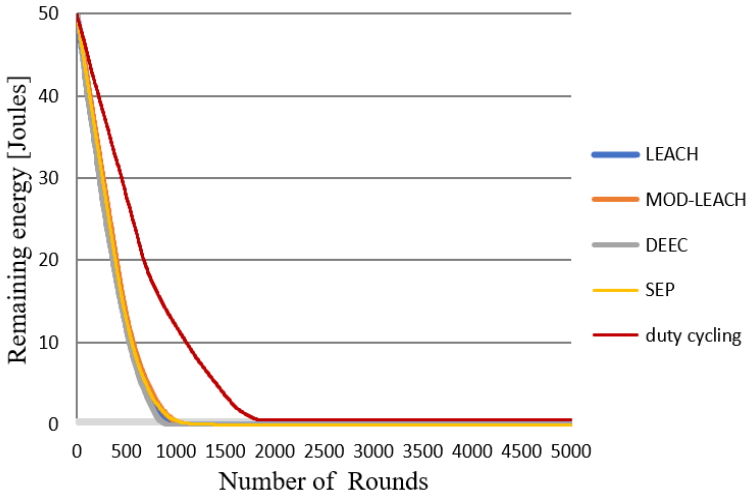
تبيّن الأشكال (15) و(16) و(17) الطاقة المتبقية في الشبكة وسلوكها على مدى جولات العمل وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة على الترتيب لتموضع المحطة القاعدية.



الشكل (15) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة [الباحث]



الشكل (16) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة [الباحث]



الشكل (17) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة [الباحث]

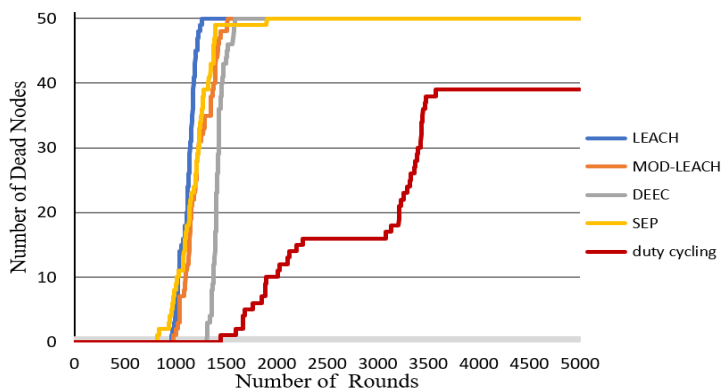
نلاحظ من الأشكال (15) و(16) و(17) المُعبّرة عن منحنيات الطاقة المتبقية الكلية في الشبكة بأن ميل المنحنيات يزداد حدة عند ازدياد بُعد المحطة القاعدية عن البيئة المدروسة، وهذا يدل على سرعة استهلاك الطاقة وعلاقتها بالبُعد، كما لوحظ بأن بروتوكولات التوجيه التراتبية تستهلك طاقة كلية أكبر من أجل ذات عدد الجولات بالمقارنة مع طريقة دورة العمل وذلك من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة

القاعدية، فعلى سبيل المثال يمكن الملاحظة من الشكل (16) عندما تقع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة وعند الجولة 1000 بأن الطاقة المتبقية في طريقة دورة العمل مساوية لـ 33 جول أما الطاقة المتبقية لبروتوكولات التوجيه التراتبية تتراوح بين 5.5 و 6.5 جول. وقُدرت قيمة الطاقة المتبقية في الشبكة في طريقة دورة العمل عند الجولة 5000 بالقيمة 0.05 جول.

السيناريو الثاني: دراسة تأثير تغيير عدد الحساسات المنشورة

في هذا السيناريو سنقوم بدراسة تأثير تغير كثافة الشبكة على مقاييس الأداء المدروسة، حيث سنقوم بتقييم مقاييس الأداء من أجل 50 و 100 و 200 و 500 حساس في الشبكة [9]، ضمن امتداد شبكة (100 x 100 m²) وذلك مع تثبيت تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة، ومن أجل حجم رزم معطيات 4000 بت.

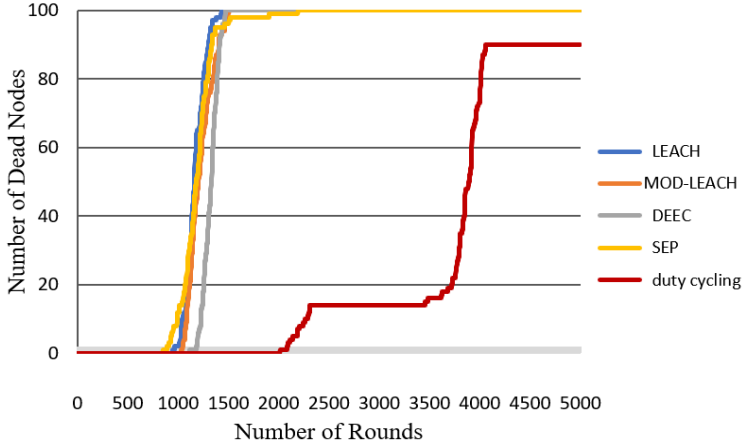
تبيّن الأشكال (18) و (19) و (20) و (21) تغير عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP التي تندرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، إلى جانب طريقة دورة العمل وذلك من أجل الحالات الأربع لكثافة الشبكة.



الشكل (18) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لكثافة الشبكة ذات

50 حساس [الباحث]

من المنحني المُعبّر عن العلاقة بين عدد العقد الميتة وعدد جولات العمل يمكن استخراج مقياسين أداء هما: مدة استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة، فمن الشكل (18) تم استخراج المقياسين من أجل حالة شبكة مكونة من 50 حساس، فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة والتي تساوي رقم الجولة الموافقة لموت أول حساس في الشبكة، جرت الملاحظة بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد استقرار مساوية لـ 824 و 964 و 982 و 1311 جولة للبروتوكولات SEP و LEACH و MOD-LEACH و DEEC على الترتيب بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 1446 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة مساوي للـ 100% أي خلال مدة عمل 5000 جولة لم تنفذ طاقة جميع الحساسات، ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 1902 جولة.

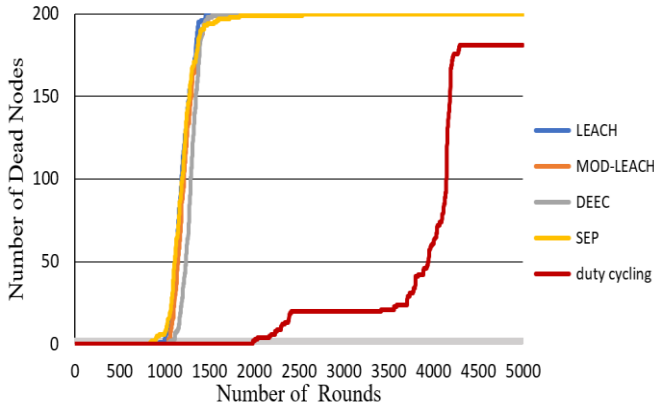


الشكل (19) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لكثافة الشبكة ذات

100 حساس [الباحث]

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

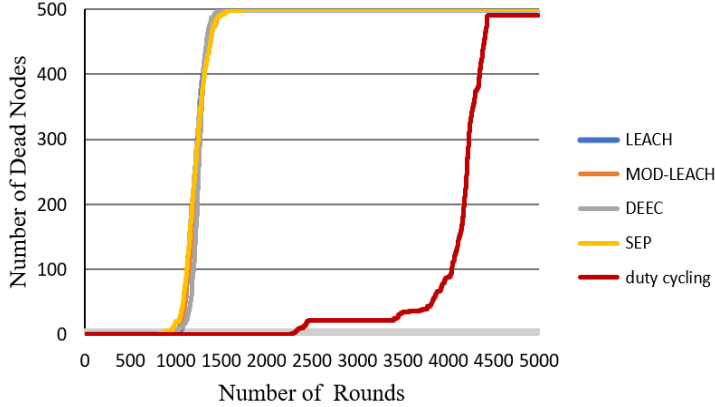
جرت الملاحظة من الشكل (19) بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد استقرار متقاربة وهي 848 و 943 و 1031 و 1113 جولة للبروتوكولات LEACH و SEP و MOD-LEACH و DEEC على الترتيب بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة مساوي للـ 100% أي خلال مدة عمل 5000 جولة لم تنفذ طاقة جميع الحساسات، ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية حقق بروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 2196 جولة أما بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة تتراوح بين 1400 و 1500 جولة.



الشكل (20) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لكثافة الشبكة ذات 200 حساس [الباحث]

لوحظ من الشكل (20) بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة وهي 942 و 1041 و 1045 و 840 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب. بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 1983 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة مساوي للـ 100% أما بروتوكولات التوجيه التراتبية فحققت مدد

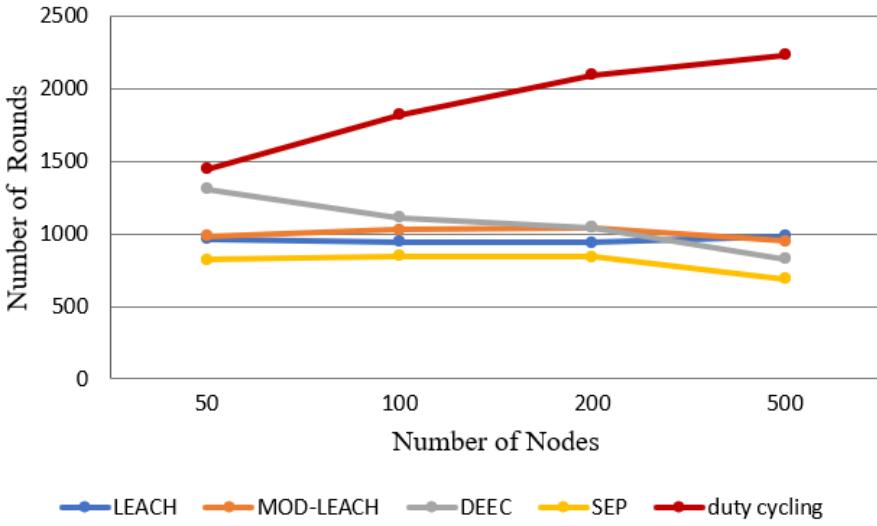
حياة شبكة 1463 و 1544 و 1581 و 2536 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب.



الشكل (21) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الرابعة لكثافة الشبكة ذات 500 حساس [الباحث]

تبيّن من الشكل (21) بأن بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة والتي تساوي 983 و 949 و 825 و 690 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب، بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2232 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة إذ تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 100%، إذ أنه عند الجولة 5000 كان ثمة 9 حساسات لم تنفذ طاقتها بعد، أمّا بروتوكولات التوجيه التراتبية فقد حققت مدد حياة شبكة 1500 و 1599 و 1617 و 3406 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب.

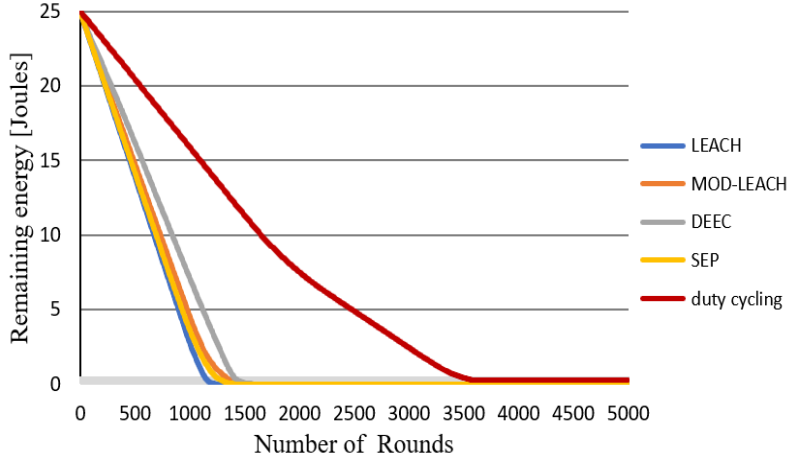
يبين الشكل (22) تغير مدد استقرار الشبكة لكلتا الطريقتين المدروستين، من أجل عدة قيم لعدد الحساسات المنشورة في الشبكة.



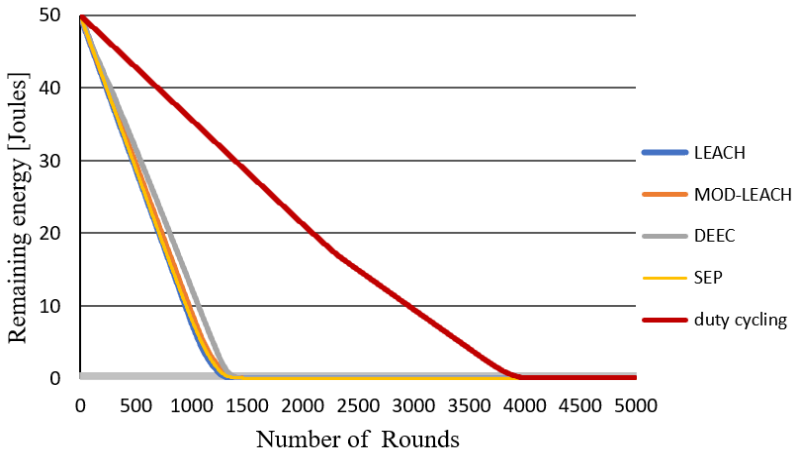
الشكل (22) مدد استقرار الشبكة من أجل عدة قيم لعدد الحساسات [الباحث]

يُلاحظ من الشكل (22) عموماً في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أنه مع ازدياد عدد حساسات الشبكة تزداد سرعة موت الحساسات باستثناء حالة البروتوكول LEACH الذي لم يتأثر بشكل كبير بتغيير عدد حساسات الشبكة، أما بالنسبة لطريقة دورة العمل فكان سلوكها معاكس لسلوك بروتوكولات التوجيه التراتبية، حيث ازدادت مدد الاستقرار مع ازدياد عدد حساسات الشبكة والتي حققت القيم 1446 و 1822 و 2097 و 2232 جولة المقابلة لكثافة شبكة 50 و 100 و 200 و 500 حساس على الترتيب، ويعود ذلك إلى أنه في طريقة دورة العمل، المدى الأعظمي المحدد بين الحساسات هو 10m لتصبح أزواج وتتأوب بعملها بين جولة وأخرى، فمع انخفاض عدد الحساسات قد يصعب تحقيق شرط تشكيل الأزواج مما سيؤدي إلى عمل بعض الحساسات بشكل دائم وهذا ما يقود إلى تخفيض فعالية طريقة دورة العمل عند عدد حساسات قليل.

تبيّن الأشكال (23) و(24) و(25) و(26) الطاقة المتبقية في الشبكة وسلوكها على مدى جولات العمل وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة والرابعة لعدد حساسات الشبكة، حيث أن المحور الشاقولي المعبر عن الطاقة المتبقية في الشبكة ناتج عن جداء عدد الحساسات المنشورة في الشبكة بالطاقة الابتدائية لكل حساس والتي تساوي 0.5 جول.

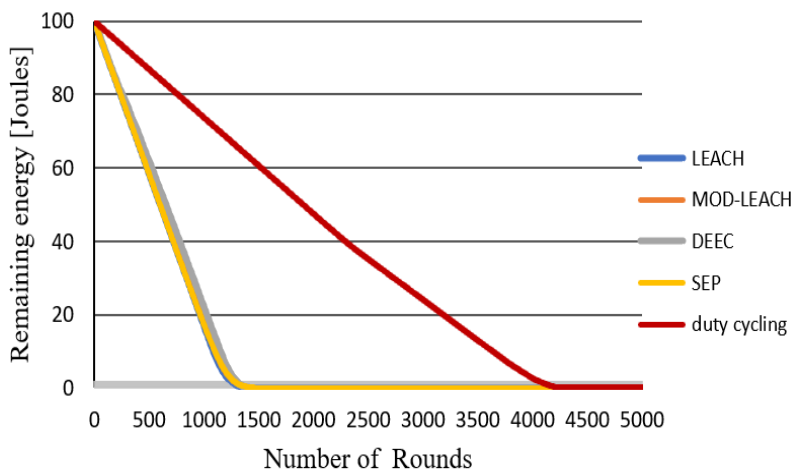


الشكل (23) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكونة من 50 حساس [الباحث]

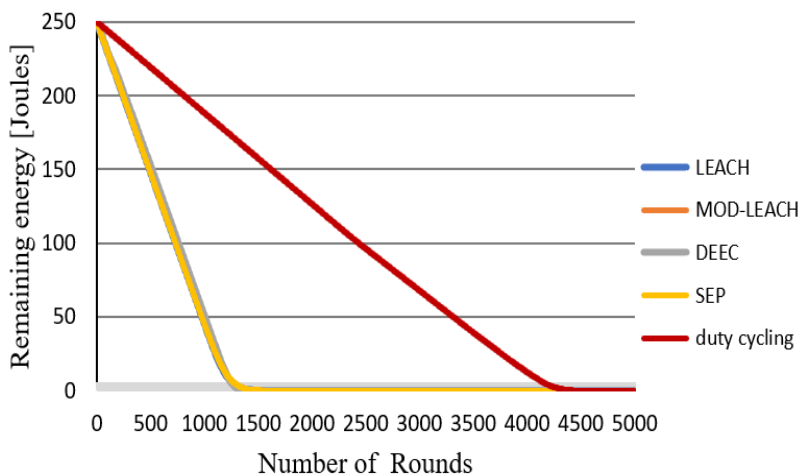


الشكل (24) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكونة من 100 حساس [الباحث]

مقارنة أداء شبكات الحساسات اللاسلكية المعتمدة على طريقة دورة العمل مع تلك المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية



الشكل (25) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكونة من 200 حساس [الباحث]



الشكل (26) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكونة من 500 حساس [الباحث]

لوحظ من الأشكال (23) و(24) و(25) و(26) بأن المنحنيات المعبرة عن سلوك الطاقة المتبقية في الشبكة في بروتوكولات التوجيه التراتبية تأثرت بشكل طفيف بتغيير كثافة الحساسات في الشبكة؛ حيث أنّ ميل انحدار المنحني يزداد بزيادة عدد الحساسات

بمقدار بسيط جداً، أما بالنسبة لمنحني طريقة دورة العمل فنلاحظ أنه الطاقة المتبقية تتناقص تدريجياً مع زيادة عدد الحساسات وهذا دليل على بطء استهلاك الطاقة وهو مؤشر على مردود هذه الطريقة في ترشيد الطاقة وخاصة في الشبكات ذات الكثافة الكبيرة.

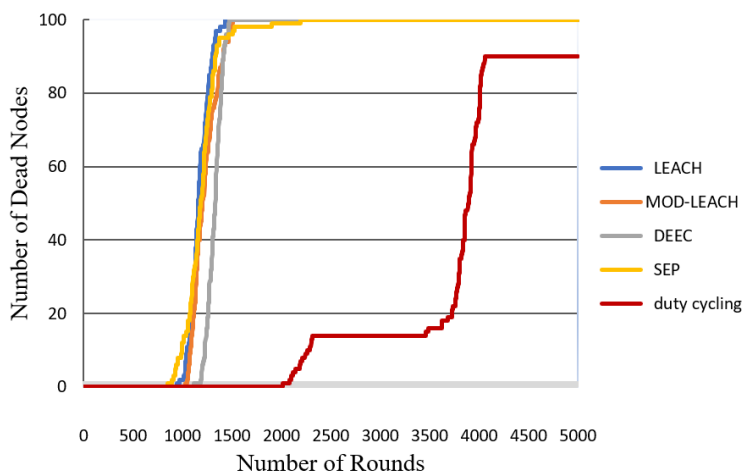
إن قيمة الطاقة المتبقية في الشبكة في طريقة دورة العمل عند الجولة 5000 لكثافة شبكة 50 و 100 و 200 و 500 حساس هي 0.24 و 0.09 و 0.22 و 0.08 جول على الترتيب.

السيناريو الثالث: دراسة تأثير تغيير حجم رزمة المعطيات

تُلبى شبكات الحساسات اللاسلكية عدداً هائلاً من التطبيقات، والتي تختلف فيما بينها بطبيعة الظواهر الحساسوسة؛ وينعكس هذا الاختلاف على حجم رزم المعطيات المنقولة أثناء كل جولة. ومن هذا المنطلق دعت الحاجة لدراسة تأثير تغيير حجم رزمة المعطيات على كفاءة الطاقة وعُمر الشبكة.

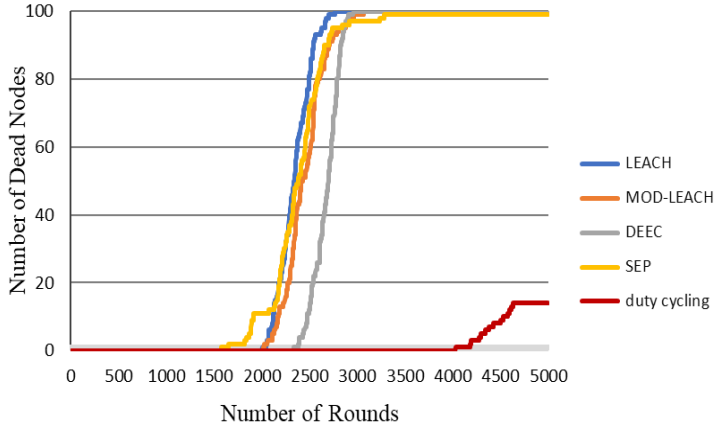
لذا قمنا بمحاكاة شبكة حساسات لاسلكية في حالتين، الحالة الأولى تم تنفيذها مع اعتماد حجم رزمة المعطيات يساوي 4000 بت، بينما في الحالة الثانية تم تنفيذ المحاكاة باعتماد حجم رزمة المعطيات يساوي 2000 بت وذلك من أجل شبكة مكونة من 100 حساس ومحطتها القاعدية تتموضع في منتصف البيئة المدروسة.

تبيّن الأشكال (27) و(28) تغيير عدد العقد الميثة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP والتي تدرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، بالإضافة إلى طريقة دورة العمل وذلك من أجل حالتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة.



الشكل (27) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت [الباحث]

من الشكل (27) تم استخراج مدة استقرار ومدة حياة الشبكة من أجل شبكة حجم رزم معطياتها المتبادلة 4000 بت، فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة والتي تساوي الجولة المقابلة لموت أول حساس في الشبكة، جرت الملاحظة بأنه حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد استقرار متقاربة وهي 848 و 943 و 1031 و 1113 جولة للبروتوكولات SEP و LEACH و MOD-LEACH و DEEC على الترتيب بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة، كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 100% أي خلال مدة عمل 5000 جولة لم تنفذ طاقة جميع الحساسات، ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية فقد حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 2196 جولة، أما بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة تتراوح من 1400 إلى 1500 جولة.

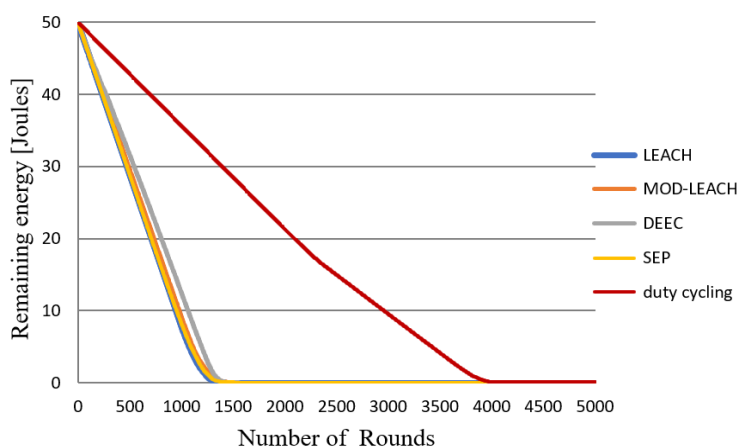


الشكل (28) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت [الباحث]

نلاحظ من الشكل (28) بأن بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد الاستقرار الآتية: 2002 و 2015 و 2337 و 1579 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP و LEACH على الترتيب، ومدد حياة شبكة مساوية 2767 و 3064 و 2958 جولة للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC على الترتيب، بينما حقق بروتوكول SEP مدة حياة شبكة كاملة على مدى 5000 جولة عمل. أما بالنسبة لطريقة دورة العمل فقد حققت مدة استقرار شبكة تساوي 4027 جولة، ومدة حياة شبكة كاملة فلم تستنفذ الشبكة طاقة جميع حساساتها في أي جولة من الجولات المدروسة؛ تجدر الملاحظة بأن كلاً من طريقة دورة العمل وبروتوكول SEP حققا مدة حياة شبكة كاملة، لكن يجب التنويه بأن عند الجولة رقم 5000 كان عدد العقد الميتة في طريقة دورة العمل 14 عقدة، بينما في حالة البروتوكول SEP كان عدد العقد الميتة يساوي 99 عقدة.

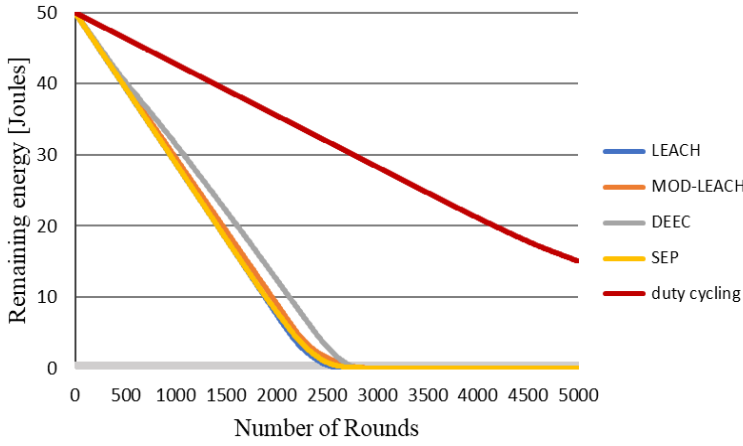
إن جميع القيم المُستنتجة من الشكل (28) والتي تعبر عن مدد استقرار ومدد حياة الشبكة لكلتا الطريقتين المدروستين في حالة حجم رزمة معطيات 2000 بت تساوي تقريباً ضعف القيم المحققة في حالة حجم رزمة معطيات 4000 بت والتي تم استخراجها من الشكل (27).

تبيّن الأشكال (29) و(30) منحنيات الطاقة المتبقية في الشبكة وتغير سلوكها على مدى جولات العمل، وذلك من أجل حالتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة. بلغت قيمة الطاقة المتبقية في الشبكة في طريقة دورة العمل عند الجولة 5000، 0.09 جول و15 جول وذلك من أجل حجم رزمة المعطيات 4000 و2000 بت على الترتيب.



الشكل (29) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي

4000 بت [الباحث]



الشكل (30) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت [الباحث]

لأنه بانخفاض حجم الرزمة تنخفض الطاقة المستهلكة بفعل عمليات المعالجة، بالإضافة إلى انخفاض الطاقة اللازمة لإرسال واستقبال رزمة واحدة من المعطيات، ففيما يخص طريقة دورة العمل عند الجولة رقم 3000 نلاحظ بأن الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة عند حجم رزمة يساوي 4000 بت تساوي 9.5 جول؛ بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها يساوي 2000 بت فإن الطاقة الكلية المتبقية هي 28.3 جول، أي زيادة في الطاقة بما يقارب الثلاثة أضعاف ($28.3/9.5$)، بينما على سبيل المثال عند الجولة رقم 1000 نلاحظ بأن الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة عند حجم رزمة مساوي لـ 4000 بت تساوي 35.6 جول بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها يساوي 2000 بت يكون 42.7 جول تقريبا، أي أن الزيادة في الطاقة هي بنسبة 1.2 تقريبا ($42.7/35.6$). كذلك الأمر فيما يخص طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، حيث نلاحظ بأن الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة على سبيل المثال عند الجولة 1000 وعند شبكة ذات حجم رزم معطيات يساوي 4000 بت تساوي 7.8 و 9.1 و 12.4 و 8.2 جول تقريبا للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب. بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها مساوي لـ 2000 بت تكون

قيم الطاقة 28.8 و 29.5 و 31.4 و 28.8 جول للبروتوكولات LEACH و MOD-LEACH و DEEC و SEP على الترتيب، أي أن الزيادة بنسبة 3.7 و 3.2 و 2.5 و 3.5 تقريباً للبروتوكولات السابقة على الترتيب.

مقارنة النتائج مع نتائج دراسات سابقة

بالمقارنة مع الدراسة [18] والتي تشمل على تقييم مردود (كفاءة) بروتوكول قياس كفاءة المنطقة المدركة للطاقة المعتمدة على العتبة Threshold-based Energy-aware Zonal Efficiency Measuring (TEZEM)؛ والتي اعتمدت على البارامترات المبينة في الجدول (2) والتي قمنا أيضا باعتمادها في المنحنيات أدناه لضمان صحة المقارنة.

الجدول (2) بارامترات محاكاة الدراسة [18]

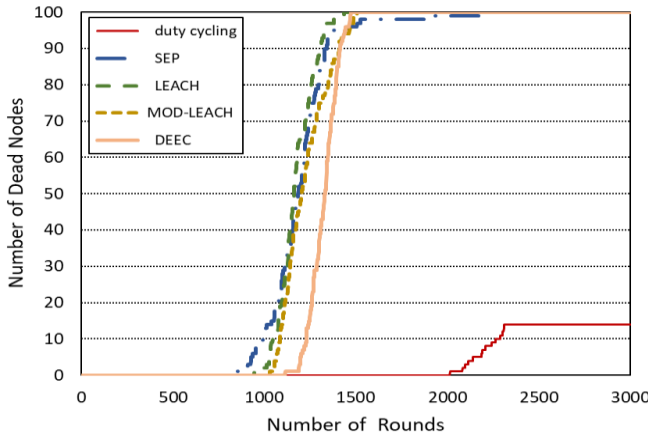
القيمة	البارامتر
100x100(m ²)	المساحة المدروسة
ثابت (50,50)	موقع المحطة القاعدية
3000	عدد الجولات
100	عدد العقد (الحساسات)
عشوائي	توزيع العقد
0.5J	الطاقة الابتدائية لكل عقدة
50 nJ / bit	الطاقة المحررة في البت بدارة المرسل (ETx-elec)
50 nJ / bit	الطاقة المحررة في البت بدارة المستقبل (ERx-elec)
4000 bit	حجم رزمة معطيات
Matlab	المحاكي

- مقارنة عدد العقد الميئة بدلالة عدد الجولات

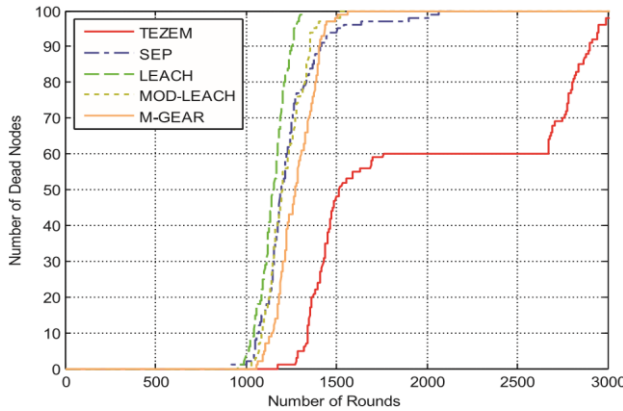
تتقاطع دراستنا مع الدراسة المرجعية لجعفري Jaffri وآخرون [18] في ثلاثة بروتوكولات مشتركة تنتمي إلى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية وهي LEACH و MOD-LEACH، ولاحظنا من خلال مقارنة النتائج بأن سلوك

المنحني المعبر عن عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات متقارب جداً كما هو مبين في الشكل (31).

كما تبين من المقارنة تفوق طريقة دورة العمل على البروتوكول المقترح في الدراسة المرجعية لجعفري Jaffri وآخرون [18]؛ حيث على سبيل المثال عند الجولة 2500 كان عدد العقد الميتة في طريقة دورة العمل يساوي 15 عقدة، بينما في البروتوكول TEZEM كان مساوياً للقيمة 60 عقدة عند ذات الجولة.



(a) [الباحث]



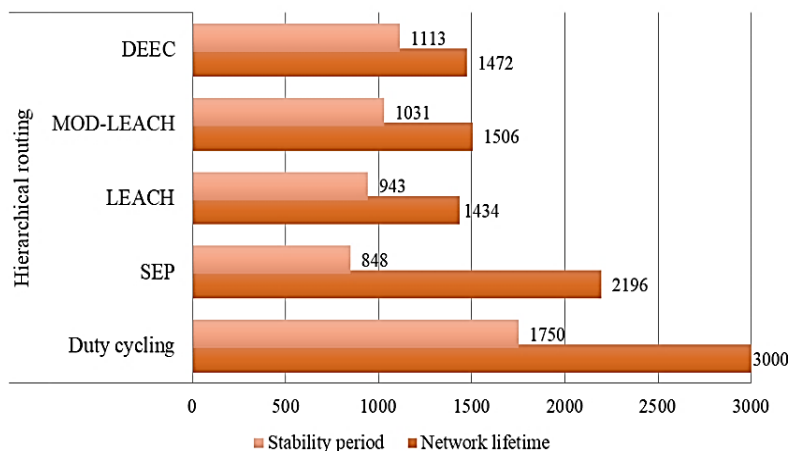
(b) [الدراسة المرجعية] [18]

الشكل (31) مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات (a) الباحث (b) الدراسة

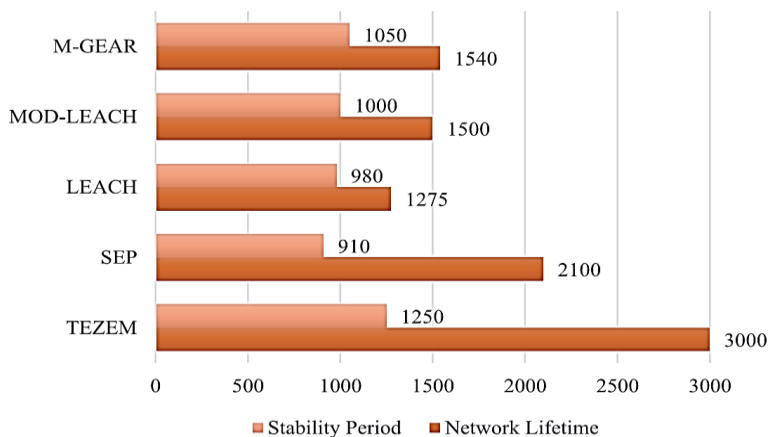
المرجعية [18]

- مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة

قمنا أيضاً بمقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة المدروسة التي حصلنا عليها مع نتائج الدراسة المرجعية لجعفري [18].



(a) [الباحث]



(b) [الدراسة المرجعية] [18]

الشكل (32) مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة (a) الباحث (b) الدراسة

المرجعية [18]

يلاحظ من الشكل (32) وبالمقارنة بين دراستنا والدراسة المرجعية [18] بأن البروتوكولات المشتركة بين الدراستين وهي SEP و LEACH و MOD-LEACH قد حققت قيم

مقارنة للغاية لمدد استقرار وحياء الشبكة مع الحفاظ على سلوك متطابق؛ كما حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة للشبكة من بين هذه البروتوكولات، وأيضاً أقل مدة لاستقرار الشبكة، وتشابه السلوك يؤكد صحة دراستنا.

كما يمكن الاستنتاج من المقارنة تفوق طريقة دورة العمل على البروتوكول المقترح TEZEM في الدراسة المرجعية لجعفري [18] لكونها إضافةً إلى تحقيقها لمدة حياة شبكة كاملة، قد حققت مدة استقرار أكبر تساوي 1750 جولة.

الاستنتاجات والتوصيات

أولاً: الاستنتاجات:

- تفوقت طريقة دورة العمل المعتمدة على منهجية واعية لخمول ولنشاط الحساسات والمقودة بالموضع على طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، وذلك في جميع السيناريوهات المدروسة ومن أجل معظم مقاييس الأداء المعتمدة.
- حافظت كلتا الطريقتين المدروستين على مدة حياة شبكة أطول في حالة تموضع المحطة القاعدية داخل البيئة المدروسة وذلك حسب الإحصائيات الواردة في الشكل (14)، وذلك لأن الطاقة المصروفة للإرسال والاستقبال تتعلق بالمسافة بين المرسل والمستقبل، فعندما زادت المسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية أدى ذلك لصرف طاقة أكبر بموجب دراتيّ الإرسال والاستقبال وهذا موضح رياضياً في نموذج الطاقة الراديوي وعلى وجه التحديد بالعلاقة (1).

- أدى زيادة عدد حساسات الشبكة إلى زيادة مدة استقرار الشبكة لطريقة دورة العمل وذلك حسب النتائج المبينة في الشكل (22) ويعود ذلك إلى أنه في طريقة دورة العمل، المدى الأعظمي المحدد بين الحساسات هو 10m لتصبح أزواج وتتناوب بعملها بين جولة وأخرى، أما عند انخفاض عدد الحساسات فقد يصعب تحقيق شرط تشكيل الأزواج

مما سيؤدي إلى عمل بعض الحساسات بشكل دائم وهذا ما يقود إلى تخفيض فعالية طريقة دورة العمل عند عدد حساسات قليل، بينما لم تتأثر بروتوكولات التوجيه التراتبية بشكل كبير عند زيادة كثافة الشبكة لكون كل حساس مجهز بطاقته الابتدائية بشكل مستقل، وحتى أن عمله مستقل عن العقد المجاورة.

- تزداد مدة حياة الشبكة عندما يكون حجم رزم المعطيات صغيراً، وتعدّ النتيجة منطقية لأنه بانخفاض حجم الرزمة تنخفض الطاقة المستهلكة بفعل عمليات المعالجة، بالإضافة إلى انخفاض الطاقة اللازمة لإرسال واستقبال رزمة واحدة من المعطيات، وذلك على مستوى جميع أدوار عقد الشبكة (حساسات عادية، ورؤوس عناقيد، ومحطة قاعدية)؛ وهذا بدوره سيحسن من مدة حياة الشبكة ويساهم بإطالته، وتم تبيان النتائج عددياً في الشكلين (27) و (28).

ثانياً: التوصيات:

- بناء بروتوكول قابل للتكيف مع بعد المحطة القاعدية عن حقل العمل، آخذاً بعين الاعتبار وجود حساسات نقالة في الشبكة مزودة بطاقة أكبر من الحساسات العادية أو يمكن تزويدها بمصدر طاقة ثابت، يجري تفعيلها لنقل المعطيات من رؤوس العناقيد إلى المحطة القاعدية عندما تكون المحطة القاعدية خارج حقل العمل بمسافة معتمدة، وهذا بدوره يقود إلى الاستهلاك الرشيد لمخزون طاقة الحساسات العادية وعدم تأثرهم ببعد المحطة القاعدية.
- بناء بروتوكول هجين يجمع بين بساطة التنفيذ البرمجي لبروتوكولات التوجيه التراتبية وفعالية طريقة دورة العمل في حفاظها على الطاقة، بما أن أداء الطريقتين يكون شبه متماثل في بداية عمر الشبكة فيمكن اعتماد منهج بروتوكولات التوجيه التراتبية، وبعد عدد مدروس من الجولات يجري اعتماد آلية عمل طريقة دورة العمل فقط.

- [1]<https://www.fortunebusinessinsights.com/wireless-sensor-network-market-102625> .
- [2] Muhammad, S.A., et al, 2023– **Information and communication technology issues and challenges for wireless sensor networks**, Savannah Journal of Science and Engineering Technology, Vol 1.3, 31–36.
- [3] Al-Sulaifanie, A. I., & Al-Sulaifanie, B. K., 2021. **Hybrid access and adaptive duty cycle clustering protocol for ultra-low power wireless sensor networks**. IET Communications, Vol 15.9, 1158–1173.
- [4] Nawusu, Y. A. W., et al., 2023. **A Modified ZONAL STABLE ELECTION PROTOCOL FOR ENERGY EFFICIENCY IN HETEROGENEOUS WIRELESS SENSOR NETWORKS**. Journal of Applied Intelligent Systems & Information Sciences, Vol 4.1, 17–31.
- [5] Ahmmad, B.A., and ALABADY, S.A., 2022. **Energy-Efficient Routing Protocol Developed for Internet of Things Networks**. IET Quantum Communication, Vol 4.1, 25–38.
- [6] Ghorbanviridi, M., & Mazinani, S. M, 2022– **Energy Efficient Multi-Clustering Using Grey Wolf Optimizer in Wireless**

Sensor Network. International Journal of Information and Communication Technology Research, Vol 14.1, 1-12.

[7] Khriji, S., et al, 2018- **Energy-Efficient Techniques in Wireless Sensor Networks**. In *Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks: Technologies, Components and System Design*. Berlin, Germany: De Gruyter Oldenbourg.

[8] Chéour, R., et al, 2019- **Recent trends of FPGA used for low-power wireless sensor network**. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol 34.10, 28-38.

[9] Yousif, Z., et al, 2021- **A Novel Energy-Efficient Clustering Algorithm for More Sustainable Wireless Sensor Networks Enabled Smart Cities Applications**. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol 10.3, 1-21.

[10] Hamamreh, R. A., et al, 2018- **An Energy-Efficient Clustering Routing Protocol for WSN Based on MRHC**. International Journal of Digital Information and Wireless Communications, Vol 8.3, 214-222.

[11] Salih, M. A., & Sulaiman, D. R, 2023- **Throughput and Energy Efficiency Evaluation of WSN Using Efficient Routing Protocols**. *University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences*, Vol 13.1, 25-33.

- [12] Mahmood, D., et al, 2013– **MODLEACH: a Variant of LEACH for WSNs.** In 2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications,158–163.
- [13] Banit, B., 2021. **Comparative Analysis of Mobility Based DEEC Protocol to Optimize the Efficiency in Wireless Sensor Networks.** IEEE 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering, 630–635.
- [14] Parvathi, C., & Talanki, S., 2021. **Energy Saving Hierarchical Routing Protocol in WSN. In Wireless Sensor Networks–Design, Deployment and Applications.** IntechOpen.
- [15] Faisal, S.,et al., 2013. **Z–SEP: Zonal–Stable Election Protocol for Wireless Sensor Networks.** Journal of Basic and Applied Scientific Research (JBASR), Vol 3.5, 132–135.
- [16] Martey, A.S. & Esenogho, E., 2022. **Improved Cluster to Normal Ratio Protocol for Increasing the Lifetime of Wireless Sensor Networks.** Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol 26.2, 1135–1147.
- [17] Shah, T., et al., 2012. **Energy efficient sleep awake aware (EESAA) intelligent sensor network routing protocol.** In 2012 15th international multitopic conference (INMIC),317–322. IEEE.

- [18] Jaffri, Z. U. A., et al., 2022. **TEZEM: A New Energy-Efficient Routing Protocol for Next-Generation Wireless Sensor Networks**. International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol 18.6, 1–18.
- [19] Vijayan, S., & Munusamy, N., 2022. **Deterministic Centroid Localization for Improving Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks**. Cybernetics and Information Technologies, Vol 22.1, 24–39.
- [20] Krishnan, K., et al., 2021. **energy-efficient cluster-based routing protocol for wsn based on hybrid bso-tlbo optimization model**. The Computer Journal, Vol 64.10.
- [21] Lopez-Ardao, J. C., et al., 2021. **Current trends on green wireless sensor networks**. Sensors, Vol 21.13.