الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

تَقييم طَرَائق تَحْسِين كَفَاءة الطَّاقَة فِي شَبَكَات المُحسّات اللاسِلْكِيَّة

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الاتصالات المُتقدّمة

إعداد

م. أسيل الحمصي

المشرف العلمي

د.م. محمد خالد شاهين

العام الدراسي

2024-2023

الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات





بطاقة شكر لأعضاء لجنة الحكم

أتقدم بأسمى آيات الشكر والامتنان والمحبة لأعضاء لجنة الحكم الموقرة لقبولهم قراءة خلاصة بحثي والحكم على رسالة الماجستير التي أنجزتُها، وهم:

الدكتور محمد خالد شاهين	**عضواً ومشرفاً**
الدكتور محمد ميهوب	**عضواً**
الدكتور نضال زيدان	**عضواً**

المُشكَّلة بموجب قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم /4780/م.ب.د، المُتَّخذة بالجلسة رقم /23/ التي انعقدت بتاريخ 2024/07/29.

دمشق 2024/09/05

د. محمد خالد شاهين	**د. محمد ميهوب**	**د. نضال زيدان**

تصريح خطي

أنا الموقعة أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والرسالة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الرسالة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع إلكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2. أنه لايوجد أي جزء من هذه الرسالة جرى اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية .

الاسم والتوقيع

م. أسيل الحمصي

الإهداء

قال تعالى: (وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ)

اللهم بفضلك عملت ..أنت سهلت، أنت يسرت، أنت أعنت وفضلت..

فلك الحمد والشكر على ما أنعمت وأكرمت وبفضلك أتممت..

إلهي

إلى من بلّغ الرسالة وأدى الأمانة... إلى مبعوث إقرأ... نبي العلم والعمل... نبراس الأمّة..

إليك شفيعي صاحب الخُلق العظيم والقدر الفخيم..

سيدنا محمدﷺ

إلى من وهبوني الحياة والأمل والنشأة على شغف الإطلاع والمعرفة، ومن علموني أن ارتقي سلم الحياة بحكمة وصبر..

إلى من ساندوني وقَوّموا خطاي المُتعثرة ..

لا نجاح إلا بفضلكم ولا إنجاز إلا بدعمكم ..

برّاً وإحساناً ووفاءً لهما أهديهما ثمرة جهدي المتواضع..

والدي الحبيب.. والدتي الحبيبة..

إلى من وهبني الله وجودهم في حياتي ليكونوا أجمل أقداري..

إلى من تشاطرنا دروب السعي وتشاركنا فرحة المسعى..

إلى ملاذ دربي وشامة أيامي ..

إخوتي ملاذ وشيماء

إلى جبلي الشامخ وملجأي عند الشدائد ..

إلى من كان يفيض قلبه فرحاً بإنجازاتنا وكأنها جُلّ إنجازاته ..

جدي الحبيب أبو خالد

إلى من شاركتني فرحة بداية هذا الدرب وكانت توّاقة ليُكلل بطيب الختام ..

إلى من افتقد حرارة تصفيقها فرحاً بإنجازي في هذه اللحظة..

ولا أفتقد دعواتها التي أجني ثمارها في كل لحظة..

جدتي الحبيبة أم خالد

إلى من أشرف على رسالتي هذه.. فزادها تشريفاً وتكريماً..

إلى من أعطى وأجزل بعطائه وضحى بوقته وجهده دون كلل أو ملل..

إلى من شاركني كامل مسيرتي العلمية بكل تقلباتها فكان شعلة الأمل عند فتورها ومنبع التشجيع عند ازدهارها ..

إلى من تحلّى بمُكنة العلم ورقي الفكر ومرونة الشخصية فأبى إلا أن يكون خالداً بطيب أثره وببصمته الذهبية أينما عَبَر.

إلى من تعلمت منه ما لا يُحصى من العلم الوفير والخُلق الرفيع.. حتى أصبح قدوتي ومدعاة فخري..

ربما لا أستطيع أن أقول لك شكراً.. فهي لا تُقال إلا في نهاية الأحداث.. وأنا أرى نفسي دائما في البداية أنهل من علمك الذي لا ينضب..

د.م. محمد خالد شاهين

إلى من آمن بقدسية العلم وحمل على عاتقه نشره بأمانة وسخاء ..

إلى موجه الخطوات الأولى الضبابية ..

إلى ينبوع الخير الذي لا ينضب ..

م. داود دحدل

إلى عائلتي الكبيرة ..أصدقائي الأحبة.. الذين أغنوا حياتي بأُنسهم وإن افتقرت صفحاتي لأسمائهم..

إلى كل من لازمني بدعواته وطيب أمنياته..

إلى كل من سما بي بشتى علوم الكون..

أهديكم....

م. أسيل الحمصي

شكر وتقدير

ممتنة لله الذي لولاه ما سار بي ركب فله الحمد على عظيم فضله فيما وفقني فيه لإتمام هذا البحث، ومن ثم أتوجه بشكري الجزيل إلى كل من ذلل الصعوبات ومَهَد طريق العلم والمعرفة وساهم بإنجاز هذا البحث حتى يُتَوّج بأبهى النتائج...

أكرر شكري وامتناني لأُستاذي المُشرف الدكتور محمد خالد شاهين الذي كان المُرشد والدّاعم منذ بداية العمل وحتى خواتيمه..

كما أتوجه بالشكر إلى أساتذتنا الأفاضل أعضاء الهيئة التدريسية في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات على ملاحظاتهم البنّاءة أثناء السيمنارات الدورية.

وأخص بالشكر الجزيل السيد الدكتور نضال زيدان رئيس القسم والسادة أعضاء لجنة الحكم على جهودهم وملاحظاتهم التي أسهمت في إغناء هذا العمل.

وختاماً أتقدّم بخالص الامتنان للمهندسة رولا الكيّال على جميل تعاونها وطيب معشرها.

م. أسيل الحمصي

فهرس المحتويات Table of Contents

بطاقة شكر لأعضاء لجنة الحكم..... i

تصريح خطي.....Declaration ii

الإهداء.....Dedication iii

شكر وتقدير.....Acknowledgment v

فهرس المحتويات.....Table of Contents vi

فهرس الأشكال .....List of Figures x

فهرس الجداول .....List of Tables xiii

قائمة المصطلحات والاختصارات.....List of Terms and Abbreviations xiv

المستخلص باللغة العربية.....Arabic Abstract xx

المستخلص باللغة الإنكليزية .....English Abstract xxii

الفصل الأول: الإطار العام للبحثGeneral Framework of the Research..... 1

1-1 مقدمة..... 2

2-1 بعض الدراسات السابقة..... 3

3-1 مشكلة البحث..... 7

4-1 هدف البحث..... 7

5-1 أهمية البحث..... 8

6-1 مسوغات البحث..... 8

7-1 محددات البحث..... 8

8-1 حدود البحث..... 8

9-1 منهج البحث وأدواته..... 9

10-1 بنية الرسالة..... 9

الفصل الثاني: الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث Theoretical Basis Related to the Research 11

2-1 شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 12

2-1-1 تعريف شبكة مُحسّات لاسلكية..... 12

2-1-2 عناصر شبكة مُحسّات لاسلكيّة..... 13

2-1-2-1 عقدة المُحسّ..... 14

2-1-2-2 شبكة التحسس..... 14

2-1-2-3 بنيان الشبكة..... 15

2-1-3 تصنيف شبكات المُحسّات اللاسلكيّة..... 16
2-1-3-1 السكونية/الحركية..... 16
2-1-3-2 توزع حتمي/ توزع عشوائي..... 17
2-1-3-3 عدد المحطات القاعدية..... 17
2-1-3-4 أحادية القفزة/متعددة القفزات..... 17
2-1-3-5 متجانسة/غير متجانسة..... 17
2-1-4 تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 18
2-1-4-1 التطبيقات العسكرية..... 18
2-1-4-2 التطبيقات الطبية..... 19
2-1-4-3 التطبيقات البيئية..... 20
2-1-4-4 التطبيقات الإنشائية..... 20
2-1-4-5 المدن الذكيّة..... 20
2-1-5 خواص شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 21
2-1-6 تحديات تصميم شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 23
2-1-6-1 استهلاك الاستطاعة..... 23
2-1-6-2 وسائط الإرسال..... 24
2-1-6-3 محدودية الموارد العتادية 24
2-1-6-4 بيئة دينامية وغير موثوقة..... 24
2-1-6-5 انتشار هائل وعشوائي..... 24
2-1-6-6 تنوع التطبيقات..... 25
2-1-7 كدسة بروتوكولات شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 25
2-1-7-1 طبقة التطبيق..... 27
2-1-7-2 طبقة النقل..... 27
2-1-7-3 طبقة الشبكة..... 28
2-1-7-4 طبقة وصلة المعطيات..... 29
2-1-7-5 الطبقة الفيزيائية..... 31
2-2 الطبولوجيا وبروتوكولات التوجيه الرئيسية والنموذج الراديوي في شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 32
2-2-1 طبولوجيا شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 32
2-2-1-1 الطبولوجيا النجمية..... 32
2-2-1-2 الطبولوجيا العروية..... 33

2-2-1-3 الطبولوجيا النجمية العروية الهجينة..... 33
2-2-2 بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 34
2-2-2-1 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على تنظيم المسار..... 35
2-2-2-2 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على بنية الشبكة..... 36
2-2-2-3 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على تشغيل البروتوكول..... 37
2-2-3 نموذج الطاقة الراديوي..... 38
2-3 طرائق تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية..... 39
2-3-1 المناهج المقودة بالمعطيات..... 40
2-3-1-1 تخفيض المعطيات..... 41
2-3-1-2 تحصيل المعطيات..... 42
2-3-2 دورة العمل..... 43
2-3-2-1 بروتوكولات التحكم بالطبولوجيا..... 43
2-3-2-2 بروتوكولات النوم/الإيقاظ..... 44
2-3-2-3 بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط مع دورة عمل منخفضة 45
2-3-3 التوجيه الفعال من حيث الطاقة..... 49
2-3-3-1 التوجيه الموحد..... 49
2-3-3-2 التوجيه التراتبي..... 50
2-3-3-2-1 بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة 53
2-3-3-2-2 بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة المُعدّل..... 58
2-3-3-2-3 بروتوكول الجمع الفعال من حيث الاستطاعة في منظومات معلومات المُحسّات. 59
2-3-3-2-4 بروتوكول شبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبة..... 61
2-3-3-2-5 بروتوكول شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساسة للعتبة متكيّفة..... 62
2-3-3-2-6 بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة..... 64
2-3-3-2-7 بروتوكول الانتخاب المستقر..... 65
2-3-3-3 نهج التوجيه المُعتمد على الموضع..... 66
2-3-4 مخططات حفظ الطاقة المعتمدة على الحركية..... 67
الفصل الثالث: التنفيذ العملي والنتائج Implementation and Results..... 68
3-1 المقدمة..... 69
3-2 الأدوات المُستخدمة في البحث..... 69
3-3 طريقة دورة العمل باستخدام منهجية واعية للنوم والنشاط مقودة بالموضع..... 70

3-4 مقاييس الأداء المُختارة..... 71
3-5 المحاكاة المُنفذة 72
3-5-1 السيناريو الأول: دراسة تأثير تغيير تموضع المحطة القاعدية..... 73
3-5-1-1 تحليل استهلاك الطاقة..... 74
3-5-1-2 تحليل معدل التدفق في الشبكة..... 81
3-5-2 السيناريو الثاني: دراسة تأثير تغيير عدد المُحسّات المنشورة..... 87
3-5-2-1 تحليل استهلاك الطاقة..... 87
3-5-2-2 تحليل معدل التدفق في الشبكة..... 95
3-5-3 السيناريو الثالث: دراسة تأثير تغيير حجم رزمة المُعطيات..... 102
3-5-3-1 تحليل استهلاك الطاقة..... 102
3-5-3-2 تحليل معدل التدفق في الشبكة..... 106
3-6 مقارنة النتائج مع نتائج دراسات سابقة..... 111
3-6-1 مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات 112
3-6-2 مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة 114
3-6-3 مقارنة معدل التدفق في الشبكة 115
3-7 تحليل النتائج العملية والاستنتاجات..... 117
الآفاق المستقبلية..... 120
الأبحاث المنشورة..... 121
قائمة المراجع..... 122

فهرس الأشكال List of Figures

الشكل(2-1) البنية العامة لشبكة مُحسّات لاسلكية [14] 12

الشكل(2-2) تصنيف العناصر المكوّنة لشبكة مُحسّات لاسلكية[13] 13

الشكل(2-3) شبكة أحادية القفزة[13] 15

الشكل(2-4) شبكة متعددة القفزات[13] 16

الشكل (2-5) خوذة متقدمة لمراقبة الحالة الصحية للجنود [17] 19

الشكل (2-6) خواص شبكة المُحسّات اللاسلكية[19] 21

الشكل (2-7) كدسة بروتوكولات شبكات المُحسّات اللاسلكية[15] 26

الشكل (2-8) مثال على طبولوجيا نجمية[20] 32

الشكل (2-9) مثال على طبولوجيا عروية [20] 33

الشكل (2-10) مثال على طبولوجيا نجمية عروية هجينة[20] 34

الشكل (2-11) الاستراتيجيات الأساسية لتصنيف بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية[22] 35

الشكل (2-12) نموذج الطاقة الراديوي[23] 38

الشكل(2-13) مخططات الحفاظ على الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية[24]..... 40

الشكل (2-14) آلية النفاذ إلى القناة بتقنيةTDMA [24]..... 46

الشكل (2-15) تقنية أخذ العينات التمهيدي[25] 48

الشكل (2-16) بنيان الشبكة الموحدة [15] 49

الشكل(2-17) مبدأ العنقدة في شبكات المُحسّات اللاسلكية[3] 50

الشكل (2-18) آلية عمل إطار البروتوكول LEACH [26]..... 55

الشكل (2-19) خوارزمية تشكيل العناقيد في البروتوكول LEACH [27]..... 56

الشكل (2-20) المخطط التدفقي لطوري الإعداد والحالة المستقرة للبروتوكول LEACH [28] 57

الشكل (2-21) آلية عمل البروتوكول MODLEACH [29] 59

الشكل(2-22) تشكيل السلسلة ومعالجة المعطيات[22] 61

الشكل(2-23) التسلسل الزمني لتشغيل بروتوكول شبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبةTEEN [22] 62

الشكل(2-24) عمل بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة الموزعة DEEC [32]..... 65

الشكل(2-25) عمل بروتوكول الانتخاب المستقر SEP [34] 66

الشكل (3-1) نموذج ارتباط الشبكة[35] 70

الشكل(3–2) تموضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة[الباحثة]..... 74
الشكل(3–3) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لتموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة]..... 75
الشكل (3–4) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لتموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة [الباحثة]..... 76
الشكل (3–5) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لتموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة[الباحثة] 77
الشكل (3–6) مدد استقرار ومدد حياة الشبكة من أجل تغيير موضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة[الباحثة]..... 78
الشكل(3–7) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة]..... 79
الشكل(3–8) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة[الباحثة]..... 79
الشكل (3–9) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة[الباحثة]..... 80
الشكل(3–10) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة] 81
الشكل(3–11) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة[الباحثة] 82
الشكل(3–12) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة[الباحثة]..... 83
الشكل(3–13) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها في منتصف البيئة المدروسة [لباحثة]..... 84
الشكل(3–14) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها على حافة البيئة المدروسة[الباحثة]..... 84
الشكل(3–15) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها خارج البيئة المدروسة[الباحثة]..... 85
الشكل(3–16) معدل تدفق الشبكة من أجل تغيير تموضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى: المحطة في منتصف البيئة المدروسة، (b)الحالة الثانية: المحطة على حافة البيئة المدروسة، (c) الحالة الثالثة: المحطة خارج البيئة المدروسة[الباحثة] 86
الشكل(3–17)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لشبكة ذات 50 مُحسّ[الباحثة]..... 88
الشكل(3–18)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لشبكة ذات 100 مُحسّ[الباحثة]..... 89
الشكل(3–19)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لشبكة ذات 200 مُحسّ[الباحثة]..... 90
الشكل(3–20)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الرابعة لشبكة ذات 500 مُحسّ[الباحثة]..... 91
الشكل (3–21) مدد استقرار الشبكة من أجل عدة قيم لعدد المُحسّات[الباحثة]..... 92
الشكل (3–22) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]..... 93
الشكل (3–23) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]..... 94
الشكل (3–24) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]..... 94
الشكل (3–25) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]..... 95
الشكل(3–26) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]..... 96

الشكل(3–27) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]..... 96
الشكل(3–28) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]..... 97
الشكل(3–29) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]..... 97
الشكل(3–30) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]..... 98
الشكل(3–31) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]..... 99
الشكل(3–32) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]..... 99
الشكل(3–33) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]..... 100
الشكل(3–34) معدل تدفق الشبكة من أجل أربع حالات لعدد المُحسّات في الشبكة (a) الحالة الأولى 50 محسّ،(b) الحالة الثانية 100 محسّ،(c) الحالة الثالثة 200 محسّ، (b)الحالة الرابعة 500 محسّ [الباحثة] 101
الشكل(3–35)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]..... 103
الشكل(3–36)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]..... 104
الشكل(3–37) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]..... 105
الشكل(3–38) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]..... 105
الشكل(3–39) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]..... 107
الشكل(3–40) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]..... 108
الشكل(3–41) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]..... 109
الشكل(3–42) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]..... 110
الشكل (3–43) معدل تدفق الشبكة من أجل تغيير حجم رزم المعطيات(a) الحالة الأولى حجم رزم معطيات 2000 بت ،(b) الحالة الثانية حجم رزم معطيات 4000 بت [الباحثة] 111
الشكل(3–44) مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36] 113
الشكل(3–45) مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36] 114
الشكل(3–46) مقارنة معدل تدفق الشبكة (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36] 116
الشكل(3–47) مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [35] 117

فهرس الجداول List of Tables

الجدول (3–1) موسطات المحاكاة [الباحثة]..... 73
الجدول(3–2) موسطات المحاكاة لدراسة المقارنة مع الدراسة المرجعية لجفري [36] 112

قائمة المصطلحات والاختصارات List of Terms and Abbreviations

المصطلح المُعرّب	الاختصار	المصطلح الإنكليزي
ضبط	-	Accuracy
مدة نشاط	-	Active period
نشط/نوم	-	Active/sleep
أخذ العينات التكيّفيّ	-	Adaptive sampling
شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساسة للعتبة متكيّفة	APTEEN	AdaPtive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network
إعلان	ADV	Advertisement
المناهج الخوارزمياتية	-	Algorithmic approaches
مبدل تماثلي رقمي	ADC	Analog to Digital Converter
مخطط غير متزامن	-	Asynchronous scheme
توهين	-	Attenuation
خاصيّة	-	Attribute
طلب التكرار الآلي	ARQ	Automatic Repeat reQuest
محطة قاعدية	BS	Base Station
منارة	-	Beacon
التحكم في النفاذ إلى الوسائط–بيركلي	B-MAC	Berkeley-Media Access Control
معدل خطأ البت	BER	Bit Error Rate
النفاذ المتعدد بتحسس الحامل	CSMA	Carrier Sense Multiple Access
النفاذ المتعدد بتحسس الحامل مع تحاشي التصادم	CSMA / CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
بنيان مركزي	-	Centralized architecture
سلسلة	-	Chain
رأس العنقود	CH	Cluster Head

Cluster Members	CMs	أعضاء العنقود
Cluster	-	عنقود
Compression	-	الضغط
Computed model	-	نموذج مُحسّوب
Connection management plane	-	مستوي إدارة الروابط
Connectivity driven protocols	-	بروتوكولات مقودة بالتوصيلية
Contention-based protocols	-	البروتوكولات المُعتمدة على التنازع
Count Time	CT	مدة التعداد
Data driven approach	-	النهج المقود بالمعطيات
Data redundancy	-	حشو المعطيات
Data stream multiplexing	-	تجميع دفقات المعطيات
Delay	-	التأخير
Delivery	-	توصيل
Dense networks	-	الشبكات الكثيفة
Deterministic	-	حتمي
Distributed Energy Efficient Clustering	DEEC	عنقدة موزعة فعالة من حيث الطاقة
Downlink slots	-	حيزات الوصلة الهابطة
Downstream	-	الهابط
Duty cycle	-	دورة العمل
Dynamic	-	دينامي
Energy efficiency	-	مردود الطاقة
Entity	-	كيان
Error Correction Forward	FEC	تصحيح أمامي للخطأ
Fading	-	خفوت
Flat routing approach	-	نهج التوجيه الموحد
Flow	-	جريان

Free space	-	الفضاء الحر
Gateway	-	عبّارة
Greedy algorithm	-	خوارزمية جشعة
Hard Threshold	HT	العتبة القاسية
Heterogeneous	-	غير متجانسة
Hierarchical routing approach	-	نهج التوجيه التراتبي
Homogeneous	-	متجانس
Single Hop	-	أحادي القفزة
Hybrid Routing Protocols	-	بروتوكولات التوجيه الهجين
Idle state	-	حالة راحة
Latency	-	التلبُّث
Leader node	-	عقدة رائدة
Load balancing	-	موازنة الحمل
Localization protocols	-	بروتوكولات المَوضعة
Location based routing approach	-	نهج التوجيه المُعتمد على الموضع
Location driven protocols	-	بروتوكولات مقودة بالموضع
Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy	LEACH	تراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة
Management frame	-	إطار إدارة
Many-to-one traffic pattern	-	مخطط حركة جمع لفرد
Media Access Control	MAC	التحكم في النفاذ إلى الوسائط
Mesh	-	عروي
Mobile	-	نقّال
Mobilizer	-	نقّالة
Model-based active sampling	-	أخذ العينات الفعّال القائم على النموذج
Multi hop	-	متعدد القفزات
Multi-path routing protocols	-	بروتوكولات التوجيه متعدد المسارات

Network processing schemes	-	مخططات معالجة الشبكة
Network structure	-	بنية الشبكة
Mobile node	-	عقدة نقّالة
On demand protocols	-	بروتوكولات بحسب الطلب
Path organization	-	تنظيم المسار
Periodic messages	-	الرسائل الدورية
periodical sampling	-	أخذ العينات الدوري
Power management plane	-	مستوي إدارة الاستطاعة
Power-efficient gathering in sensor information systems	PEGASIS	جمع فعّال من حيث الاستطاعة في منظومات معلومات المُحسّات
Preamble sampling	-	أخذ عينات تمهيدي
Prediction	-	التنبؤ
Proactive routing approach	-	نهج التوجيه الاستباقي
Proactive routing protocols	-	بروتوكولات التوجيه الاستباقية
Protocol stack	-	كدسة بروتوكولات
Quality of Service	QoS	جودة الخدمة
Query-based routing approach	-	نهج التوجيه القائم على الاستفسار
Random	-	عشوائي
Reactive routing approach	-	نهج التوجيه التفاعلي
Reactive routing protocols	-	بروتوكولات التوجيه التفاعلية
Received Signal Strength	RSS	شدة الإشارة المستقبلة
Reliability	-	موثوقية
Route request packets	-	رزم طلب التوجيه
Resource constraints	-	القيود على الموارد
Rounds	-	جولات
Routers	-	موجهات
Routing operation	-	عملية التوجيه
Scalability		قابلية التصعّد

Scheduled rendezvous	-	المواعيد المجدولة
Self configurable	-	ذاتي التشكيل
Sensed attribute	-	الخاصية المُحسّوسة
Sensed Value	SV	القيمة المُحسّوسة
Sensor Management Protocol	SMP	بروتوكول إدارة المُحسّات
Sensor Node	SN	عقدة المُحسّ
Sensor Query and Data Dissemination Protocol	SQDDP	بروتوكول نشر المعطيات والاستفسار عن المُحسّات
Sensor- Media Access Control	S-MAC	التحكم في النفاذ إلى الوسائط –المُحسّ
Setup phase	-	طور الإعداد
Single Point Of Failure	SPOF	نقطة عطل أُحادية
Sink	-	مصب
Sleep intervall	-	مدة النوم
Sochastic approach	-	نهج عشوائي
Soft Threshold	ST	عتبة لينة
Stability period		مدة الاستقرار
Stable Election Protocol	SEP	بروتوكول الانتخاب المستقر
Star-mesh hybrid topology	-	الطبولوجيا النجمية العُرويَّة الهجينة
Static	-	ساكن
Static clustering	-	العنقدة الساكنة
Steady state phase	-	طور الحالة المستقرة
Stream	-	دفقة
Task management plane	-	مستوي إدارة المهام
Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network	TEEN	شبكة مُحسّات فعّالة من حيث الطاقة حسّاسة للعتبة
Threshold	-	عتبة
Throughput	-	معدل التدفق
Time Division Multiple Access	TDMA	النفاذ المتعدد باقتسام الزمن

Time frame	-	إطار زمني
Timeline	-	تسلسل زمني
Time Slot	TS	حيز زمني
Time series forecasting	-	التنبؤ بالسلاسل الزمنية
Timeout- Media Access Control	T-MAC	التحكم في النفاذ إلى الوسائط–وقت مستقطع
Token message	-	رسالة علّام
Topology control protocols		بروتوكولات التحكم بالطبولوجيا
Transceiver	-	مرسل مستقبل
Transducer	-	محول طاقة
Transmission Control Protocol	TCP	بروتوكول التحكم في الإرسال
Unreliable	-	غير موثوقة
Uplink slot	-	حيز الوصلة الصاعدة
Upstream	-	الصاعد
Wake-up schedule	-	جدول الإيقاظ
Wireless Local Area Networks	WLANs	الشبكات المحلية اللاسلكية

المستخلص Arabic Abstract

خلفية البحث

يتناول البحث مسألة تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية Wireless Sensor Networks(WSNs) والتي تعدّ مُكوّناً رئيسياً في إنترنت الأشياء Internet of Things (IoT). في هذه الشبكات تقوم المُحسّات بجمع المعطيات من حقل العمل، ثم تقوم بإرسالها إلى المحطة القاعدية من أجل معالجتها. تعتمد المُحسّات على بطاريات غير قابلة للشحن أو للتبديل، ولهذا يتوجب على خوارزميات التوجيهrouting في شبكة المُحسّات اللاسلكية أن تكون فعّالة من حيث الطاقة.

جرى في هذا البحث دراسة طريقتين أساسيتين من طرائق تحسين مردود الطاقة في هذه الشبكات: الأولى هي دورة العمل التي تعتمد على منهجية واعية لنوم المُحسّات ونشاطها مقودة بالموضع، أمّا الثانية فهي بروتوكولات التوجيه التراتبية. وقد اخترنا أربعة بروتوكولات توجيه تراتبية موفرة للطاقة شائعة الاستخدام هي: التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)، والتوجيه التراتبي المُعدل لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة modified LEACH (MODLEACH)، وبروتوكول العنقدة الموزعة الفعال من حيث الطاقة Distributed Energy Efficient Clustering (DEEC)، وبروتوكول الانتخاب المستقر . Stable Election Protocol (SEP)

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

هدف البحث

تَقييم طَرَائق تَحْسِين كَفَاءة الطَّاقَة فِي شَبَكَات المُحسّات اللاسِلْكِيَّة.

المواد والطرائق

جرى اتباع المنهج البحثي في دارستنا لطرائق تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية، كما جرى اتباع المنهج التحليلي في تقييم أداء طريقتين رئيسيتين منها من أجل عدة مقاييس أداء شائعة الاستخدام وذلك باستخدام برمجية ماتلاب MATLAB الإصدار R2021a مُنصّب على حاسوب من نوع دل DELL، له المواصفات الآتية: معالج Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ، وذاكرة نفاذ عشوائي RAM مثبتة 12GB ونظام تشغيل ويندوز 10.

النتائج العملية

بيّنت نتائج البحث أنّ طريقة دورة العمل قادرة على الحفاظ على مدة حياة شبكة أطول من طريقة التوجيه التراتبية ببروتوكولاتها الأربعة المدروسة؛ وهذا بدوره انعكس إيجاباً على معدل التدفق throughput، ولكن على حساب زيادة التعقيد الحسابي.

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث

يتعلق مقدار تحسين مدة حياة الشبكة ومعدل التدفق في الشبكة المُحقق بعدة عوامل؛ منها موقع المحطة القاعدية من حيث مدى قربه وبعده عن البيئة المدروسة، وحجم رزم المعطيات التي يجري تبادلها ضمن الشبكة، وطبيعة الظواهر المُحسّوسة، وكثافة المُحسّات في الشبكة.

الكلمات المفتاحية

شبكات المُحسّات اللاسلكيّة، المُحسّ، المحطة القاعدية، رأس عنقود، العنقدة، دورة العمل، بروتوكولات التوجيه التراتبية، مردود الطاقة، مدة حياة الشبكة، مدة استقرار الشبكة، معدل التدفق.

English Abstract المستخلص باللغة الإنكليزية

Research Background

This research handles the problem of enhancing the energy efficiency in Wireless Sensor Networks, which are a key component of the Internet of Things (IoT). In these networks, sensors collect data from the field of work and then send it to the base station for processing. Sensors depend on non-rechargeable or interchangeable batteries, so the routing algorithms of the sensor network must be energy efficient.

In this research, two basic methods for improving energy efficiency in these networks were studied: first one is the duty cycle based on a 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).

We conducted a performance comparison between the two methods for several network performance metrics: network lifetime, network stability, network remaining energy and network throughput for several scenarios.

Research Objective

Evaluation of energy efficiency enhancement methods for wireless sensors networks

Resources and Methods

We followed a research approach in our study of improving energy efficiency methods in wireless sensors networks; as well as an analytical approach in evaluating the performance of two main methods for several common performance metrics; using MATLAB R2021a, on DELL laptop with Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ core and 12GB RAM, and using Windows10 as operating system.

Practical Results

The research results showed that the duty cycle method is able to maintain network life time longer than the hierarchical routing method for the four hierarchical routing protocols considered, which in turn reflected positively on the throughput, but at the expense of computational complexity.

Conclusions from the researcher's point of view

The amount of network life time improvement and throughput achieved depend on several factors, including the location of the base station, its proximity and distance from the studied environment, the data packet size exchanged in the network and the nature of the perceived phenomena, and the density of network sensors.

Keywords

Wireless Sensor Networks, Sensor, Base station, Cluster Head, Clustering, Duty Cycle, Hierarchical Routing Protocols, Energy Efficiency, Network Lifetime, Stability Period, Throughput.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

General Framework of the Research

1-1 مقدمة

قاد التطور الكبير في مجال الاتصالات اللاسلكية إلى تطوير منظومة مستقلة ذاتياً autonomuos system مؤلفة من المئات أو حتى الآلاف من وحدات صغيرة قادرة على التَحَسُّس والحوسبة computing والاتصال البيني؛ وأُطلق على هذه العقد اسم المُحسّات sensors. ويشكل الترابط بين هذه العقد شبكة تدعى بشبكة المُحسّات اللاسلكية Wireless Sensor Network (WSN).

تتمتع هذه الشبكة بانخفاض تكلفتها وسهولة نشرها وقدرتها على الاتصال بشكل آني من دون دعم بنية تحتية ثابتة، مما يجعلها خياراً جذاباً للعديد من التطبيقات مثل مراقبة البيئة وتطبيقات الأمن والتعقب بزمن حقيقي وغيرها الكثير. وتعدّ شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs مُكوّناً رئيساً في إنترنت الأشياء Internet of Things (IoT) لاعتمادها على التحسّس وجمع المعطيات.

تواجه شبكات المُحسّات اللاسلكية تحديات عديدة مرتبطة بمحدودية موارد المُحسّات من حيث استهلاك الاستطاعة وسرعة المعالجة ومدى الاتصال وعرض المجال المتاح وغيرها [1].

ومن ثمّ تشتمل خواص شبكة مُحسّات لاسلكية على مردود الاستطاعة وقابلية التصعّد(التوسع) scalability وسرعة الاستجابة responsiveness والموثوقية reliability والحركية (التحركية) mobility.

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

تتطلب هذه التحديات والقيود حلولاً جديدة ومُحسّنة؛ لذا سنقوم في هذا البحث بتقييم أداء عدد من طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية، وبخاصة خوارزميات وبروتوكولات التوجيه routing protocols، والتي تعدّ من التقنيات الرئيسية المستخدمة لإطالة مدة حياة شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs وضمان استقرارها. وسنركز على بروتوكولات التوجيه التراتبية (الهرمية) hierarchical، والتي تعتمد على تقسيم

الشبكة إلى عناقيد clusters، ولكل عنقود رأس يقوم بتجميع المعطيات من العقد ويرسلها إلى المحطة القاعدية Base Station (BS)، ولهذه الآلية مساهمة كبيرة في تحسين أداء شبكات المُحسّات اللاسلكية.

1-2 بعض الدارسات السابقة

- أظهر غولاتي Gulati وآخرون [2] (2022) دور إنترنت الأشياء في شبكات المُحسّات اللاسلكية، وعرضوا أهم تقنيات تجميع المعطيات التي تركز على الحفاظ على الطاقة وتحسين مدة حياة الشبكة وجودة الخدمة والأمن في شبكات المُحسّات اللاسلكية المعتمدة على إنترنت الأشياء.
- قدّم فارزا Varsa وآخرون [3] (2021) بياناً بأهمية العنقدة clustering في شبكات المُحسّات اللاسلكية، وناقشوا الأهداف المختلفة المُتعلقة بعملية العنقدة، بالإضافة إلى الخصائص والموسطات التي تؤخذ بالحسبان أثناء تصميم خوارزميات العنقدة، بما في ذلك تحديات التصميم ومزاياه؛ وقدّموا دراسة مقارنة لأحدث خوارزميات العنقدة في شبكات المُحسّات اللاسلكية.
- اقترح سوناواني Sonawane وزميله [4] (2024) نهج عنقدة clustering جديد يهدف إلى تخفيض استهلاك الطاقة وإطالة مدة الحياة الكلية للشبكة. ويتضمن النهج المقترح عدم التجانس لتحسين الاستقرار ومردود الطاقة لعقد المحسّات sensor nodes عشوائية النشر. وأثبتت نتائج المحاكاة فعالية النهج المقترح من حيث مدة الاستقرار، والطاقة المتبقية في الشبكة، وعدد رؤوس العناقيد المولّدة ضمن الشبكة. كما أظهرت تحسيناً في الأداء من حيث عدد العقد الميتة ومدة الحياة الكلية للشبكة.
- حلل كيم Kim وزملاؤه [5] (2021) الشروط اللازمة لزيادة مردود (كفاءة) الطاقة للعقد التي تشكل شبكة المُحسّات اللاسلكية؛ وذلك باستخدام تقنية توجيه معتمدة على العنقدة وتقنية توجيه معتمدة على معلومات الموضع. وجرى نقل المعطيات المجمّعة من رؤوس العناقيد إلى المحطة القاعدية بوساطة آلية متعددة القفزات. وأظهر البروتوكول المقترح أداءاً أفضل من أداء البروتوكول LEACH من حيث عدد العقد الحية alive،

والطاقة المتوسطة المستهلكة من قبل كل عقدة بدلالة عدد الجولات rounds؛ وذلك من أجل تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة، وبنشر العقد بشكل عشوائي على مساحة ($200\times200(m^2)$ وبطاقة ابتدائية مقدارها 20 جول لكل عقدة.

- اقترح دشباند Deshpande وزميله [6] (2024) نهجيّ عنقدة موزعة وتوجيه جديدين للتغلب على محدودية الآليات الراهنة، بحيث يجري تحسين مدة حياة الشبكة والأداء في شبكات المحسّات اللاسلكية المعتمدة على إنترنت الأشياء. وتضمن النموذج المقترح مقاييس عقد مكانية spatial (موضع العقد، والطاقة المتبقية، ونموذج الطاقة) من أجل تشكيل عناقيد أمثلية، تسمح بإنشاء مسالك متعددة المسارات. وتقوم خوارزمية مستمثل اليراعة المعلمة المتعلمة Teacher Learner Firefly Optimizer (TLFFO) المطوّرة وفق الطلب، بدمج مبادئ الاستمثال المعتمد على التعلّم والتعليم مع خوارزمية اليراعة المستلهمة من علم الأحياء، بما يضمن انتقاء مسلك أمثلي مع التركيز على مردود الطاقة وسرعة الاتصال. وأثبتت التقييمات الاختبارية تفوق النموذج المقترح على طرائق التوجيه والعنقدة الراهنة.

- اقترح الباحثان السيد El-Sayed والبياتي Al Bayatti [7] (2021) بروتوكول توجيه فعال من حيث الطاقة معتمد على عبَّارة متعددة القفزات M-GEAR؛ حيث اعتمدا على توزيع عقد التحسّس على أربع مناطق في حقل التحسّس. ففي المنطقة الأولى ترسل العقد المعطيات المُحسّوسة إلى المحطة القاعدية بشكل مباشر بسبب قصر المسافة، بينما ترسل العقد في المنطقة الثانية المعطيات بشكل مباشر إلى العقدة العبَارة gateway، والتي بدورها تعيد إرسالها إلى المحطة القاعدية. أمّا في المنطقتين الثالثة والرابعة فيجري تشكيل عناقيد واختيار رؤوس عناقيد التي تستقبل المعطيات من أعضاء العنقود وفقاً لتقنية النفاذ المتعدد باقتسام الزمن Time Division Multiple Access (TDMA)، وترسل المعطيات المستقبلة إلى العقدة العبّارة التي تحولهم بدورها إلى المحطة القاعدية. أُجريت المحاكاة العملية باستخدام برمجية ماتلاب، حيث جرى نشر العقد بشكل عشوائي في بيئة مدروسة أبعادها ($100\times100(m^2)$ وبطاقة ابتدائية مقدارها 0.5 جول، وذلك من أجل حالتين لكثافة الشبكة؛

في الحالة الأولى كان عدد المُحسّات المنشورة 300 مُحسّ، وفي هذه الحالة تفوق البروتوكول المقترح على البروتوكول LEACH من حيث عدد العقد الحية، بينما في الحالة الثانية التي جرى فيها نشر 100 مُحسّ، كان أداء البروتوكول LEACH أفضل.

- قام الصليفاني Al-Sulaifanie وآخرون [8] (2021) بدراسة تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية باستخدام خوارزمية قائمة على العنقدة الثابتة ذات دورة عملduty cycle متكيّفة مع حمل الشبكة، وآلية نفاذ هجينة لرؤوس العناقيد(Cluster Heads (CHs إلى القناة وصولاً إلى مصب sink الشبكة؛ والتي تكون إمّا بالاتصال المباشر أو بوساطة خوارزمية النفاذ المتعدد بتحسس الحامل Carrier Sense Multiple Access (CSMA). ويُقصد بدورة العمل المتكيّفة adaptive duty cycle مع حمل الشبكة بأنّ محور الزمن مُقسّم إلى مجموعة أطر زمنية time frames ويجري شطر كل إطار زمني أيضاً إلى عدد ثابت من الأحياز الزمنية time slots، ويحصص(يخصص) allocate كل رأس عنقود بحيز زمني يكون أثناءه نشطاً لاستقبال المعطيات؛ ولكن في حال كان معدل المعطيات قليل في الشبكة، يُعدّ بقاء رأس العنقود نشطاً ضمن الحيز المخصص له هدراً للطاقة؛ ولتفادي ذلك يجري تعديل مدة نشاط رأس العنقود وفقاً لمعدل المعطيات في الشبكة؛ ومن هنا أطلق عليها بأنها متكيّفة مع الحمل. وقد أُجريت المحاكاة العملية باستخدام محاكي الشبكات NS-2، حيث جرى نشر العقد بشكل عشوائي، منها 95 عقدة عادية وخمس رؤوس عناقيد مزودين بالطاقة بشكل دائم، في بيئة عمل أبعادها ($100\times100(m^2)$ وبطاقة ابتدائية مقدارها 0.5 جول للعقد العادية مع عدّ تموضع مصب الشبكة في زاوية البيئة المدروسة وأثناء زمن عمل 10800 ثانية، وبلغ طول الإطار الزمني ثانية واحدة وهو مُقسّم إلى 16 حيز زمني. حققت الخوارزمية المدروسة زمن استقرار شبكة يساوي 6965 ثانية (لحظة موت أول عقدة في الشبكة)؛ بينما حقق البروتوكول LEACH زمن استقرار يساوي 287 ثانية؛ ويعود ذلك إلى أنّ المُحسّات في البروتوكول LEACH تشْغل جميع الأدوار إضافةً إلى الطاقة التي تُهدر في إعادة تشكيل العناقيد وانتخاب رؤوسها.

- بيّن خان Khan وآخرون [9] (2022) إمكانية تمديد مدة حياة شبكة مُحسّات لاسلكية WSN باستخدام كيانات نقالة mobile entities تقوم بإعادة شحن عقدة مُحسّ عند نفاذ استطاعة بطاريتها، بالإضافة إلى عقد قافزة jumping nodes تقوم بنقل المعطيات من عقد المُحسّات عند الحاجة.

- اقترح ناوسو Nawusu وزملاؤه [10] (2023) بروتوكول توجيه معدل لشبكات المُحسّات اللاسلكية غير المتجانسة. والبروتوكول الجديد هو امتداد لبروتوكول الانتخاب المستقر المناطقي Zonal Stable Election Protocol (Z-SEP) في الشبكات غير المتجانسة، والذي يعدل استراتيجية نشر العقد في البروتوكول Z-SEP، ويستخدم المسارات منخفضة التكلفة لنقل المعطيات إلى المحطة القاعدية. ويعتمد معيار الانتخاب في Z-SEP على الطاقة المتبقية للعقد المتقدمة advance nodes فقط، وقد جرى تعديله في هذا البحث ليجمع بين الطاقة المتبقية وكثافة العقد. وهذا يضمن أن العقد عالية الطاقة ذات مهام استقبال المعطيات وتجميعها هي المفضلة للعمل كرؤوس العناقيد في كل جولة. وقادت هذه التعديلات إلى خفض معدل موت العقد بشكل كبير. بالإضافة إلى ذلك، ازداد عدد الرزم التي جرى تسليمها إلى المحطة القاعدية بسبب تمديد العمر النشط للشبكة، مما جعلها تعمل لمدة طويلة. وأظهرت 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 مدة حياة الشبكة. ويعمل البروتوكول المقترح عندما تتوضع المحطة القاعدية في مركز مجال التحسس؛ إلّا أنّ أداء هذا البروتوكول غير مضمون في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج مجال التحسس.

- اقترح الباحثان أحمد Ahmmad والبادي Albady [11] (2022) بروتوكول توجيه يسمح بتحسين مدة حياة شبكة المُحسّات اللاسلكية؛ ويعتمد هذا البروتوكول على تقسيم السلاسل الطويلة lengthy chains في الشبكة إلى سلاسل أصغر يمثل كل منها عنقود؛ وكل عنقود يملك رأسين heads لإرسال المعطيات إلى المحطة القاعدية؛ وجرى اختيار العدد الأمثل لرؤوس العناقيد في الشبكة باستخدام طريقة كالينسكي– هاراباز Calinski-

Harabasz، كما تتضمن الشبكة مصب sink نقّال يقوم بالتنقل من عنقود إلى آخر لاستلام المعطيات من رؤوس العناقيد، وذلك في مسار محدد. أُجريت المحاكاة باستخدام برمجية MATLAB 2015b، وجرت مقارنة النتائج مع أداء البروتوكولات LEACH, PEGASIS, IEEPB, MIEEPB، وقد جرى نشر 100 مُحسّ على مساحة ($100\times100(m^2)$، وبطاقة ابتدائية 0.5 جول لكل مُحسّ وبحجم رزمة معطيات 2000 بت وقد حقق البروتوكول المقترح أطول مدة حياة للشبكة في عدد الجولات المُختار(5000 جولة) قياساً بالبروتوكولات المدروسة.

- قدّمت الباحثة محمد Mohammed [12] (2023) تصنيفات ومقارنات تحليلية لعدّة بروتوكولات توجيه خاصة بشبكات المُحسّات اللاسلكية وهي LEACH و LEACH-C وPEGASIS وLEACH-B و E-LEACH وLEACH-Cell وMHT-LEACH وBRE-LEACH وEADCR وجرى تقييم البروتوكولات بناءً على مردود الطاقة ومدة حياة الشبكة وتسليم المعطيات وقابلية التصعد والأمان. حيث تفرد كلاً منها بأساليب مختلفة من أجل معالجة التحديات الحرجة لهذا النوع من الشبكات. وتساعد النتائج على اختيار بروتوكولات التوجيه المناسبة لتطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs المحددة الخاصة بهم، وتُمهد الطريق لتصميم شبكات أكثر مردوداً في مجالات تطبيق مختلفة.

1-3 مشكلة البحث

عادة ما تُنشر deployment شبكات المُحسّات اللاسلكية في بيئات ذات ظروف قاسية، حيث يكون من الصعب أو غير الممكن تبديل البطاريات أو إعادة شحنها، ومن هنا دعت الحاجة إلى وجود سياسة لإدارة استخدام الموارد المتاحة تؤمن التوازن بين الاستطاعة المستهلكة والعمل المنجز من قبل كل مُحسّ.

1-4 هدف البحث

تَقييم طَرَائق تَحْسِين كَفَاءة الطَّاقَة فِي شَبَكَات المُحسّات اللاسِلْكِيَّة.

1-5 أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في إجراء دراسة مقارنة بين أهم طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية، وتحديد الموسطات المهمّة ومقاييس الأداء شائعة الاستخدام في دراسة شبكات المُحسّات اللاسلكية.

كما تتمثل أهمية البحث في تسهيل نشر شبكات المُحسّات اللاسلكية وتشغيلها في سورية، ودعم التوجه التقاني الرقمي للحكومة.

1-6 مسوغات البحث

تشتمل مسوغات البحث على المبررات الآتية:

- الحاجة إلى تلبية الطلب المتزايد على جودة شبكات المُحسّات اللاسلكية وموثوقيتها.
- دعم التوجه الحكومي نحو تحسين البنى التحتية الشبكية والاتصالاتية.
- المساهمة في تحسين الخدمات المقدمة بما ينعكس إيجاباً على الاقتصاد الوطني.

1-7 محددات البحث

يتناول البحث شبكات المُحسّات اللاسلكية، ويتضمن دراسة نظرية عامة لعناصرها وتصنيفاتها وخواصها وتطبيقاتها، كما يتناول طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في هذه الشبكات، مع التركيز على بروتوكولات التوجيه الشائعة الاستخدام وتقييم أدائها.

1-8 حدود البحث

- الحد المكاني: جرى تنفيذ هذا البحث في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.
- الحد التقاني: أُجريت محاكاة لشبكة مُحسّات لاسلكية مرجعية، ومقارنة أداء عدد من طرائق تحسين مردود الطاقة اعتماداً على عدة مقاييس أداء شائعة، باستخدام برمجية ماتلاب MATLAB الإصدار R2021a

مُنصّب على حاسوب من نوع دل DELL، له المواصفات الآتية: معالج Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ، وذاكرة نفاذ عشوائي RAM مثبتة 12GB ونظام تشغيل ويندوز 10.

- الحد الزمني: استغرق تنفيذ البحث عامين اعتباراً من تاريخ صدور قرار التسجيل.
- الحد العلمي: جرى اتباع النهج التحليلي في دراسة طرائق تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية، ثم اتباع النهج التجريبي في اختبار أداء الطرائق المختارة ومقارنة أدائها.

1-9 منهج البحث وأدواته

اعتُمدَ في هذا البحث على المنهج البحثي أولاً لدراسة بعض طرئق تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية، إضافةً إلى المنهج الاستقرائي التجريبي لمقارنة أداء هذه الطرائق من حيث مردود (كفاءة) الطاقة ومعايير أداء أخرى. وذلك باستخدام الإصدار R2021a من برمجية ماتلاب Matlab مُنصّب على حاسوب من نوع دل DELL، له المواصفات الآتية:

- معالج: Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ.
- ذاكرة نفاذ عشوائي RAM مثبتة: 12GB.

1- 10 بنية الرسالة

تتضمن الرسالة ثلاثة فصول وفق الآتي:

- يشتمل الفصل الأول على الإطار العام للبحث؛ والذي يتضمن مقدمة عامة، وبعض الدراسات السابقة، ومشكلة البحث، وهدفه، وأهميته، ومسوغاته، ومحدداته، وحدوده، ومنهجه وأدواته.
- يتناول الفصل الثاني الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث؛ ويتضمن دراسة نظرية لشبكات المُحسّات اللاسلكية، وطرائق تحسين مردود الطاقة في هذه الشبكات.

- يعرض الفصل الثالث بالتفصيل عملية محاكاة شبكة مُحسّات لاسلكية مُختارة، وتطبيق طريقتين من طرائق تحسين مردود الطاقة المعتمدة ومقارنة أدائها من أجل عدة سيناريوهات، وتفسير النتائج، وجملة من الاستنتاجات.

الفصل الثاني

الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث

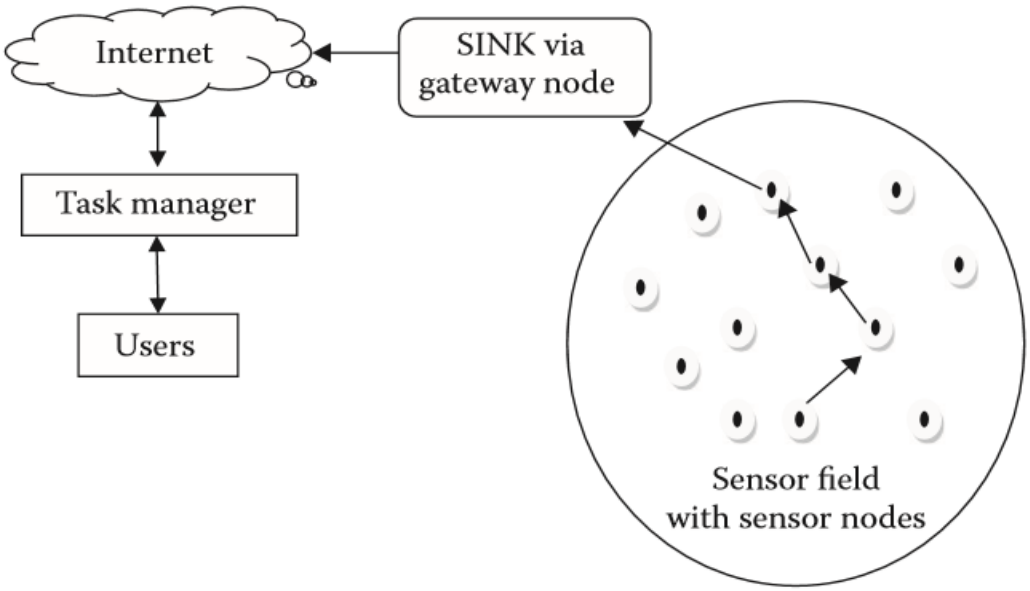
Theoretical Basis Related To The Research

2-1 شبكات المُحسّات اللاسلكيّة

2-1-1 تعريف شبكة مُحسّات لاسلكية

يقصد بشبكة مُحسّات لاسلكية Wireless Sensor Network (WSN) مجموعة من الأجهزة الصغيرة التي تسمى عقد التحسس (الاستشعار) sensing nodes؛ وتتمثل وظيفتها في رصد الظروف الفيزيائية للبيئة المحيطة ومراقبتها وتسجيلها. ومن هذه الظروف الفيزيائية شدة الرياح والرطوبة ودرجة الحرارة ومستويات تلوث الهواء وغيرها[13].

تُنشر عقد التحسس بكثافة معينة ووفق توزع عشوائي عادة في منطقة جغرافية محددة. تقوم العقدة بجمع المعطيات ونقلها إلى المصب sink بوساطة اتصال متعدد القفزات multihop؛ وقد تُنقل المعطيات من المصب إلى عبّارة gateway موصولة بمدير المهام بوساطة الإنترنت لاتخاذ القرار المناسب[14]. ويبيّن الشكل (2-1) البنية العامة لشبكة مُحسّات لاسلكية.



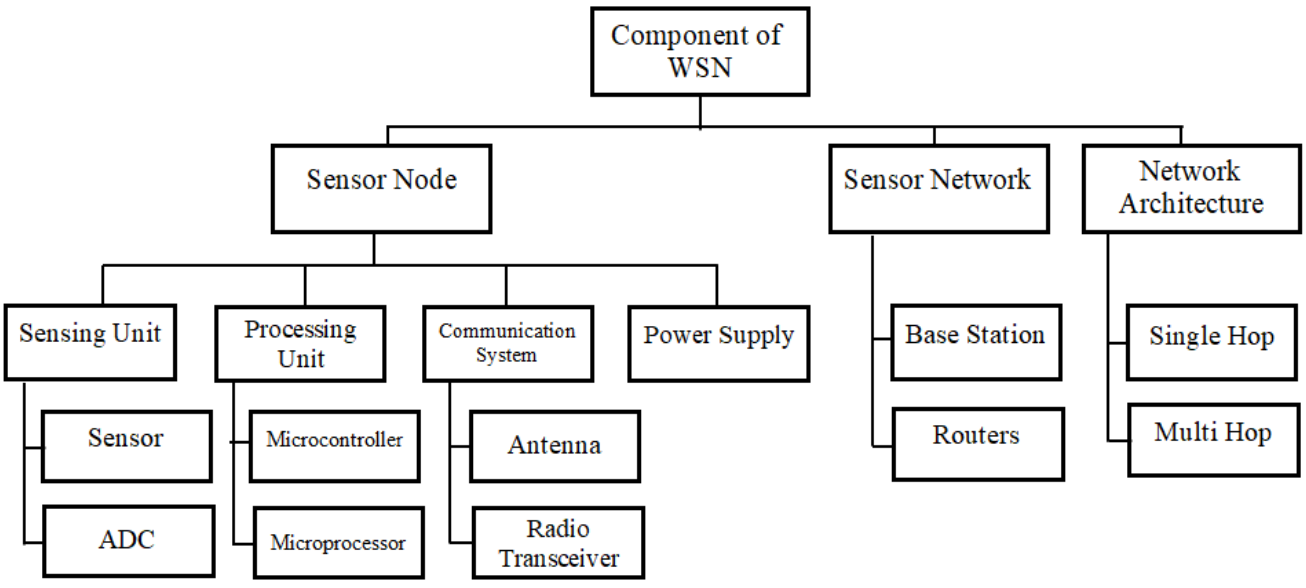
الشكل(2-1) البنية العامة لشبكة مُحسّات لاسلكية[14]

2-1-2 عناصر شبكة المُحسّات اللاسلكيّة

العنصر الرئيسي في شبكة المُحسّات اللاسلكية هو عقدة المُحسّ sensor node؛ وتحتوي كل عقدة على عدة أجزاء تتضمن هوائي إرسال واستقبال، ومتحكم صِغْري، ومرسل ومستقبل راديوي للتواصل مع المُحسّات، ومصدر للطاقة.

يختلف حجم عقدة المُحسّ وتكلفتها تبعاً لدرجة تعقيدها وخصائصها المختلفة، مثل استهلاكها للطاقة والذاكرة وسرعة الحوسبة وعرض المجال الترددي المتاح؛ ومن ثمّ فإن قيود الحجم والتكلفة على عقد المُحسّات تفرض قيوداً على الموارد، وتتحقق الموازنة بينهما على أساس طبيعة التطبيق والجودة المطلوبة.

تُعدّ المحطات القاعدية Base Stations (BSs) عنصراً مهمًا آخر في شبكات المُحسّات اللاسلكية، إذ تؤدي دور العبّارة بين عقد المُحسّ والمستخدم النهائي. يضاف إلى ذلك الموجهات routers المصممة خصيصاً لحساب جداول التوجيه وتحديثها وتوزيعها [13]. ويوضح الشكل (2-2) العناصر المختلفة في شبكة مُحسّات لاسلكية.



الشكل (2-2) تصنيف العناصر المكوّنة لشبكة مُحسّات لاسلكية[13]

2-1-2-1 عقدة المُحسّ

عقدة المُحسّ عبارة عن مجموعة من الوحدات الفرعية المختلفة التي تساعد على أداء الوظائف المطلوبة. وهذه الوحدات تتمثل بوحدة التحسس ووحدة المعالجة ووحدة الاتصال ووحدة الاستطاعة [13].

تتكون وحدة التحسس من مُحسّ ومبدل تماثلي رقمي(Analog to Digital Converter (ADC. يجمع المُحسّ المعطيات التماثلية من البيئة المحيطة، ويقوم بتحويل تلك المعطيات التماثلية إلى صيغة رقمية. أما الوحدة الثانية فهي وحدة المعالجة، والتي عادة ما تكون معالجاً صِغْرياً و/أو متحكماً صِغْرياً، والذي يتولى مهمة معالجة المعطيات. والوحدة الثالثة هي وحدة الاتصالات التي تتكون من مرسل مستقبلtransceiver وهوائي لإرسال المعطيات واستقبالها لاسلكياً.

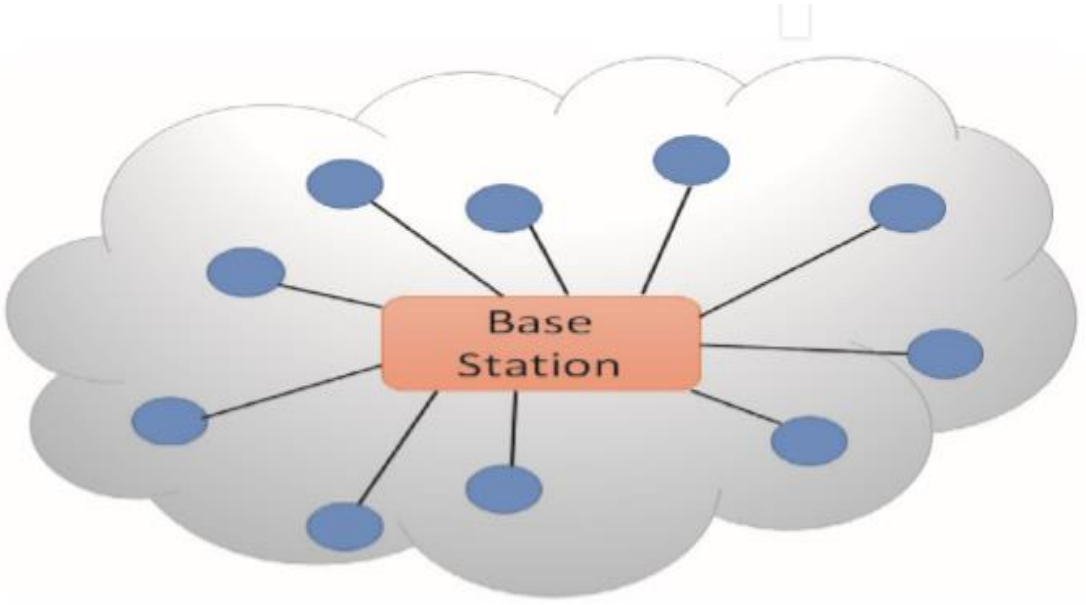
2-1-2-2 شبكة التحسس

تتكون شبكة التحسُّس من عنصرين رئيسين هما المحطة القاعدية والموجه router. وغالباً ما يُنظر إلى المحطات القاعدية على أنها مجرد مكوّن مركزي يُستخدم لجمع المعطيات من العقد الموزعة؛ لكن هنا تعمل المحطة القاعدية كبوابة للربط مع الشبكات الأخرى. فبمجرد أن تتلقى المحطة القاعدية المعطيات من عقد المُحسّات، تقوم المحطة القاعدية بعمليات معالجة على المعطيات المجمعة، وترسل المعلومات المعالجة إلى المستخدم بوساطة الإنترنت. أمّا المكوّن الثاني وهو الموجه، فيعمل على إيجاد مسار التوجيه الأمثل من العقدة المصدر إلى المحطة القاعدية. ثمة العديد من بروتوكولات التوجيه الشائعة؛ ويجب أن يأخذ تصميم بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية بالحسبان قيود الاستطاعة والموارد لعقد الشبكة، وجودة القناة اللاسلكية المتغيرة مع الزمن، واحتمال فقد الرزم والتأخير[13].

2-1-2-3 بنيان الشبكة

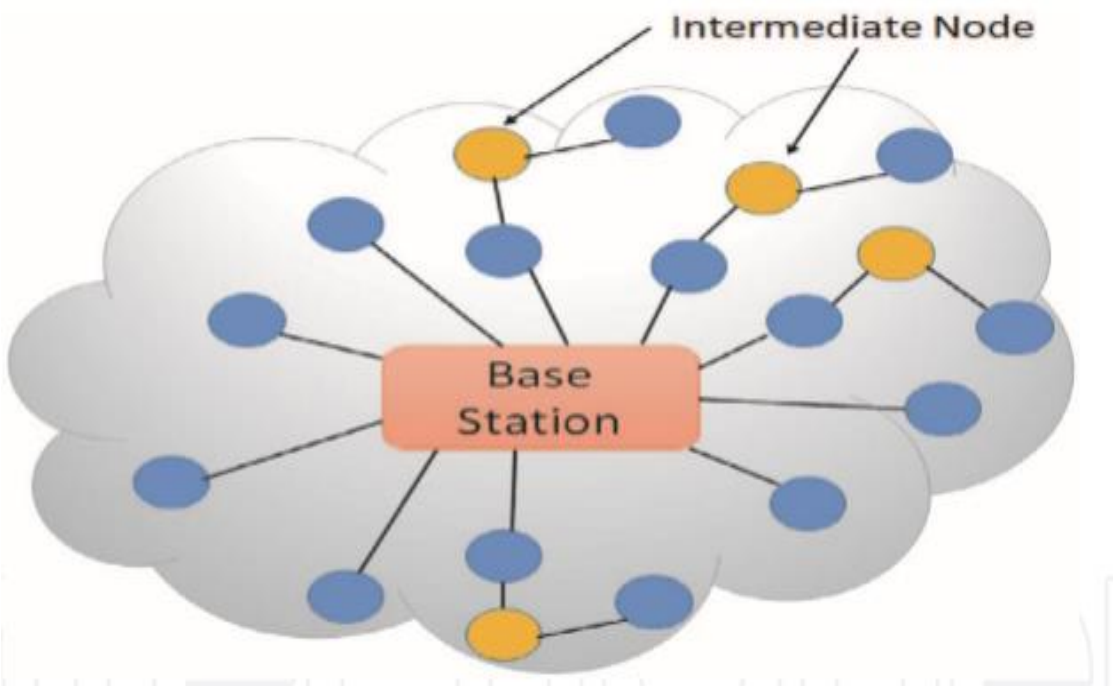
يجري توزيع عدد كبير من عقد المُحسّات في المنطقة المدروسة لمراقبة البيئة المحيطة بشكل تعاوني عادة، وهذا هو سبب أهمية الربط الشبكي لعُقد المُحسّات، إذ لا يقتصر الاتصال على الربط بين عقد المُحسّات الوسيطة أو بين عقد المُحسّات والمحطة القاعدية؛ بل يمكن أن تتواصل المحطة القاعدية أيضاً مع عقد المُحسّات. ترسل المحطة القاعدية التعليمات directions إلى عقد المُحسّات، وتؤدي عقدة المُحسّ المهمة المطلوبة بالتعاون مع عقد المُحسّات الأخرى في الشبكة.

يمكن أن يكون بنيان الشبكة أحادي القفزة single-hop، أو متعدد القفزات multi-hop. ويوضح الشكل(2-3) بنيان شبكة أحادية القفزة، ويجري فيه وصل كل عقدة مُحسّ بالمحطة القاعدية مباشرةً، كما يسمح بالنقل لمسافات طويلة؛ ومن ثمّ يكون استهلاك الاستطاعة لغايات الاتصال عالياً[13]. ويجري تجاوز هذه السيئة باستخدام بنيان شبكة متعددة القفزات كما هو مبيّن في الشكل(2-4).



الشكل(2-3) شبكة أحادية القفزة[13]

ونظراً لاستخدام عقد وسيطة في بنيان شبكة متعددة القفزات، يقل حمل الربط المباشر بين عقد التحسس والمحطة القاعدية؛ إذ تُنْقل المعطيات عبر واحدة أو أكثر من العقد الوسيطة. ومن ثمّ فهذا البنيان أكثر كفاءة من بنيان شبكة أحادي القفزة من حيث استهلاك الاستطاعة.



الشكل(2-4) شبكة متعددة القفزات[13]

2-1-3 تصنيف شبكات المُحسّات اللاسلكيّة

تُصنف شبكات المُحسّات اللاسلكية حسب عدة معايير، نذكر منها[15]:

2-1-3-1 السكونية/الحركية

تكون الشبكة ساكنة static عنما تكون عقد المُحسّات فيها ثابتة؛ إلّا أنّه في بعض التطبيقات ثمة حاجة لأن تكون عقد المُحسّات نقالة، وعندها تسمى هذه الشبكات بالشبكات النقالة mobile.

2-1-3 -2 توزع حتمي/ توزع عشوائي

في الشبكات ذات التوزع الحتمي (المحدد) deterministic، يجري حساب موضع عقدة المُحسّ وتثبيته. في حين يجري في بعض التطبيقات توزيع المُحسّات بشكل عشوائي (غير محدد) random، بسبب عدة عوامل منها طبيعة البيئات القاسية أو ظروف التشغيل الصعبة.

2-1-3-3 عدد المحطات القاعدية

يمكن أن يكون للشبكة محطة قاعدية واحدة أو عدة محطات قاعدية، كما أنه يمكن أن تكون المحطة ثابتة أو متحركة؛ فعندما تكون ثابتة فإنها تتموضع في موقع قريب من جميع مُحسّات الشبكة، بينما عندما تكون متحركة فهي تدور حول منطقة التحسس لتؤمن موازنة أحمال load balancing جميع المُحسّات.

2-1-3-4 أحادية القفزة/متعددة القفزات

يُقصد بشبكة المُحسّات اللاسلكية أحادية القفزة single hop أن جميع المُحسّات تتصل بشكل مباشر مع المحطة القاعدية. أما في حالة شبكة مُحسّات لاسلكية متعددة القفزات multi hop، فتُستخدم عقد وسيطة أو رؤوس عناقيد cluster heads لنقل المعطيات من مُحسّ ما إلى المحطة القاعدية وذلك لتقليل استهلاك الطاقة.

2-1-3-5 متجانسة/غير متجانسة

في حالة شبكات المُحسّات اللاسلكية المتجانسة homogeneous، تعامل كافة العقد على أنّ لها نفس الطاقة، ويكون لهذه العقد نفس الإمكانيات من حيث مدى الاتصال والبطاريات المستخدمة والذاكرة وغيرها. وفي حالة شبكات مُحسّات لاسلكية غير متجانسة heterogeneous أو ما تسمى أيضاً بالهجينة hybrid، تتمتع بعض عقد المُحسّات بطاقة وإمكانيات أعلى من غيرها، ويجري تقسيم مهام المعالجة والاتصال وفقاً لذلك [15].

2-1-4 تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية

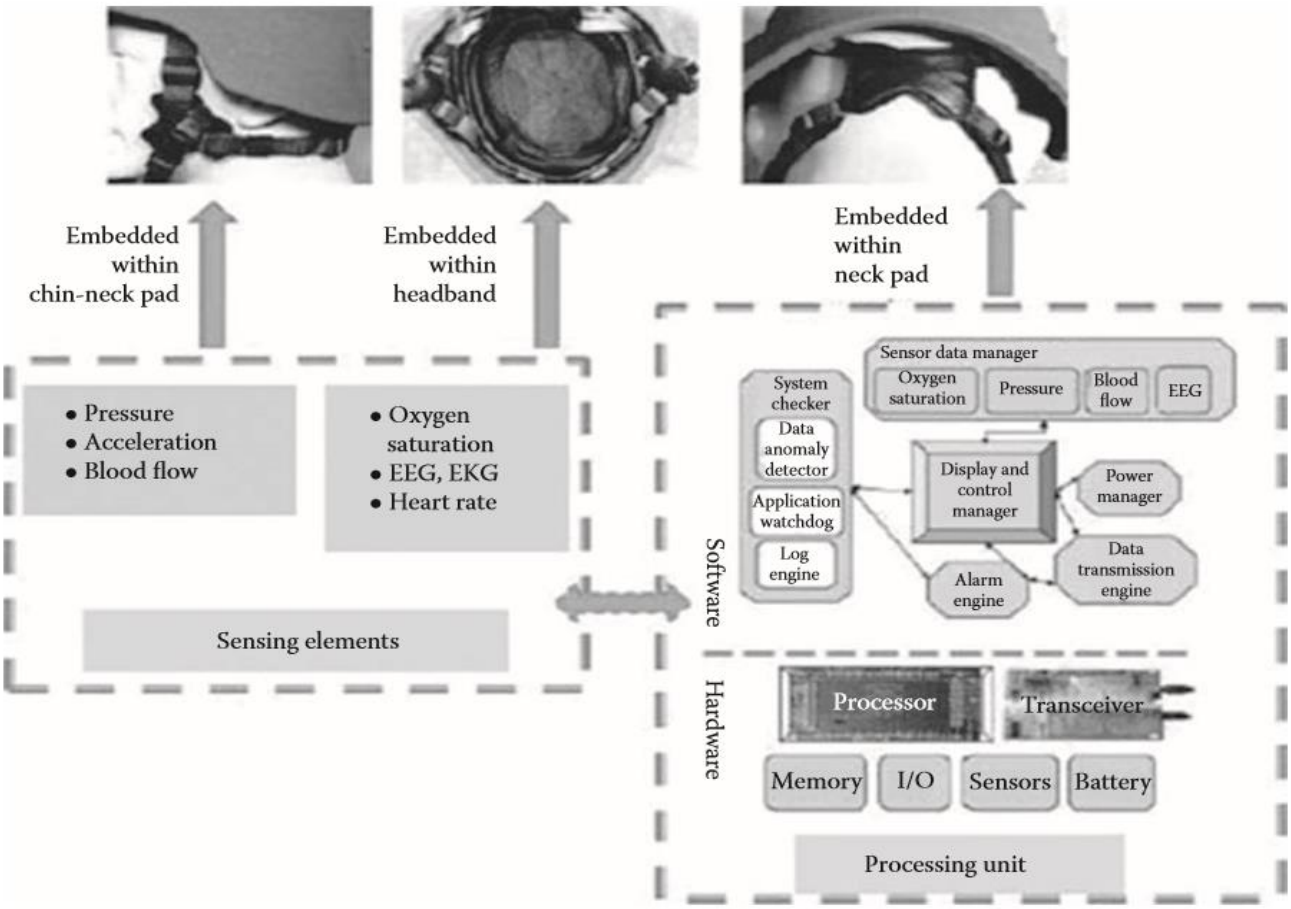
توفر شبكات المُحسّات اللاسلكية مجموعة واسعة من التطبيقات نظراً لسهولة نشرها. ويؤثر اختلاف التطبيقات على اختيار شبكة المُحسّات اللاسلكية التي سيجري استخدامها، إذ تبعاً لمتطلبات التطبيق، ينبغي على مصممي شبكة المُحسّات اللاسلكية تحديد موارد الشبكة التي تسمح بتلبية هذه المتطلبات[16].

ونذكر من التطبيقات المهمّة لشبكات المُحسّات اللاسلكية [16]:

2-1-4-1 التطبيقات العسكرية

من هذه التطبيقات مراقبة الأهداف وتتبعها والكشف عن الهجمات النووية أو الكيميائية وتحديد مواقع الجنود وحركتهم. ويجري تصميم المُحسّات بحيث تكون صغيرة جداً تشبه الرمال، وتنشر كميات كبيرة منها على شريط حدودي مثلاً أو منطقة معينة مثلاً لإيصال المعطيات لاسلكياً إلى أقرب مركز حدودي؛ مما يسمح للقادة العسكرين باتخاذ قرارات وفقاً للمعطيات الواردة لتقليل الخسائر المادية والبشرية.

كما يمكن استخدام شبكة المُحسّات اللاسلكية لمراقبة الحالة الصحية للجنود في المعركة بشكل مستمر؛ ويوضح الشكل (2-5) كيفية دمج المُحسّات، مثل مقياس درجة الحرارة وتخطيط الدماغ، داخل خوذة قتالية متقدمة يرتديها الجندي. وفي حالة حدوث أي تشوهات، يجري اكتشافها بوساطة منظومة المراقبة الأساسية، ثمّ تنبيه الجندي المعني. إنّ من أكثر سمات شبكات المُحسّات اللاسلكية أهمية، والتي تجعلها ملائمة جداً للتطبيقات العسكرية هي قدرتها على تشكيل الشبكات تلقائياً وعلى تحمل الأعطال؛ فإذا تعطلت عقدة واحدة، يمكن للشبكة إعادة تشكيل نفسها بنفسها وتوجيه المعلومات عبر عقد مجاورة، ومن ثمّ الحفاظ على سلامة الشبكة[17].



الشكل (2–5) خوذة متقدمة لمراقبة الحالة الصحية للجنود [17]

2-1-4-2 التطبيقات الطبية

ثمة العديد من تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية في منظومات المراقبة الصحية؛ حيث يجري قياس المؤشرات الحيوية مثل ضغط الدم ومعدل النبض ومعلومات الموقع والحركة للمريض وما إلى ذلك، وفي حال الحاجة إلى أي مساعدة طبية طارئة يجري توفيرها لهم.

أما في منظومات مراقبة المشافي، فتجري مراقبة المرضى ذوي الحالات الحرجة باستمرار في وحدات العناية المركزة، ويجري إبلاغ الأطباء بأي تغيير في المؤشرات الحيوية، ويجري عادة اعتماد عتبة لكل واحد من المؤشرات الحيوية؛ وفي حالة تجاوز هذه العتبة، يجري إطلاق إنذار لضمان وصول الرعاية الطبية في الوقت المناسب. كما تُستخدم المُحسّات اللاسلكية على نطاق واسع في العمليات الجراحية للمرضى والرعاية ما بعد الجراحة[14].

2-1-4-3 التطبيقات البيئية

تُعدّ مراقبة البيئة مجالاً بالغ الأهمية، لذا تتوافر منظومات مراقبة للبيئة في الزمن الحقيقي والتحكم في الاتصال بالعالم الفيزيائي. تستطيع عقد المُحسّات جمع المعطيات البيئية المختلفة لتأمين مراقبة عامة للبيئة مثل مراقبة جودة الهواء وإدارتها، ومراقبة ظروف حركة المرور وإدارتها، ومراقبة حالة الطقس وإدارتها[13]. كما تشمل هذه التطبيقات تحسس حالة المحيطات والبحار والأنهار الجليدية والغلاف الجوي والبراكين واكتشاف حرائق الغابات، وغيرها[16].

2-1-4-4 التطبيقات الإنشائية

يمكن استخدام شبكات المُحسّات اللاسلكية لمراقبة حركة المشاريع الإنشائية، المتنوعة مثل المباني ومشاريع البُنى التحتية الأخرى مثل الجسور والطرق والأنفاق؛ ويسمح ذلك بمراقبة المنشآت عن بُعد، مما يسمح بخفض نفقات الزيارات الميدانية للمواقع [16].

2-1-4-5 المدن الذكيّة

في المدن الكبيرة، يُعدّ رصد سوية الخدمات من نقل مشترك وحركة المركبات على الطرق وتوزيع للكهرباء والمياه وغيرها، أمراً بالغ الأهمية لضمان ظروف معيشة مُرضية للمواطنين. ولشبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs كم هائل من التطبيقات التي تسمح بتوفير المعطيات للهيئات المعنية من أجل الحفاظ على جودة الخدمات. وعلى وجه التحديد، فإن زيادة حركة المركبات تخلق ازدحامات مرورية وهدراً للوقت، ويمكن استخدام شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs للمراقبة واتخاذ الإجراءات اللازمة لتنظيم حركة المركبات.

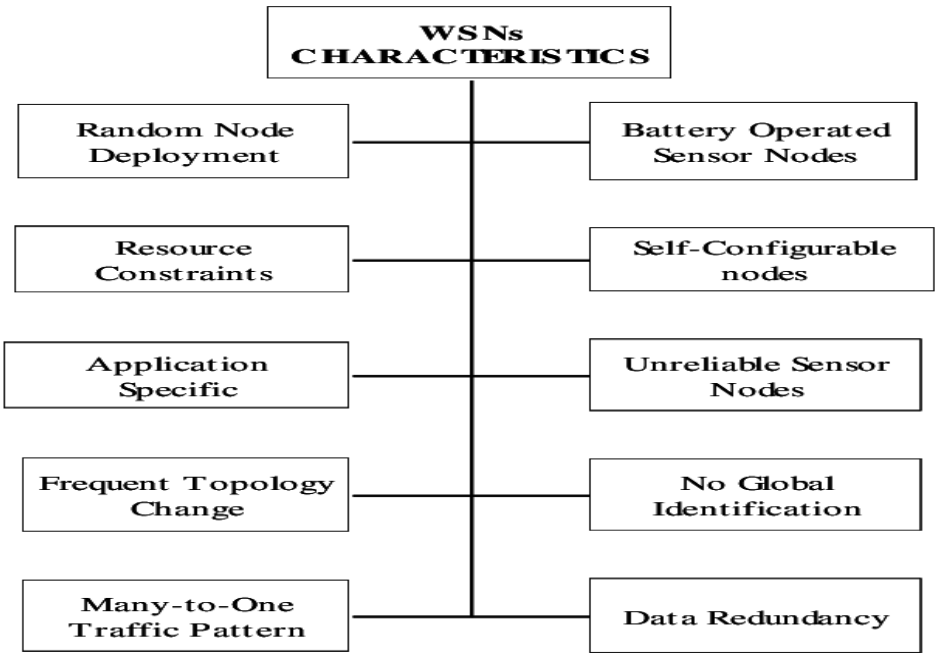
كما يمكن إنشاء منظومة ذكية smart لركن السيارات قائمة على شبكة مُحسّات لاسلكية WSN. إذ يجري داخل منطقة وقوف السيارات تجهيز كل موقف للسيارات بعقدة تحسس واحدة منخفضة التكلفة، والتي تسمح بتحديد

مواقف السيارات الشاغرة. وتجمع المحطة القاعدية المعطيات المتعلقة بحالة جميع مواقف السيارات، وترسل تقارير دورية إلى قاعدة المعطيات. ويمكن النفاذ إلى قاعدة المعطيات هذه بوساطة منظومة إدارة الطبقة العليا من أجل تنفيذ العديد من المهام، مثل اكتشاف مواقف السيارات الشاغرة، والإشراف الأمني، ورسوم المرور الآلية، وإنشاء تقارير إحصائية.

كما يمكن توفير منظومة قائمة على شبكات مُحسّات لاسلكية WSN لمراقبة إنارة الشوارع والتحكم فيها؛ حيث تتيح هذه المنظومة التحكم عن بعد في مصابيح إنارة الشوارع، باستخدام مُحسّات مخصصة لاكتشاف حركة المركبات؛ حيث تزداد شدة الإنارة إلى مستوى محدد مسبقاً في حال اقتراب المركبات وتنخفض شدة الإنارة عند ابتعادها[18].

2-1-5 خواص شبكات المُحسّات اللاسلكية

يبيّن الشكل(2-6) أهم خواص شبكات المُحسّات اللاسلكية.



الشكل (2-6) خواص شبكة المُحسّات اللاسلكية[19]

ومن الخواص المهمّة لهذه الشبكات نذكر[19]:

- **النشر العشوائي للعقد random node deployment:** عادة ما تُنشر المُحسّات اللاسلكية بشكل عشوائي في المنطقة المعنية من دون تخطيط مسبق.
- **عُقد المُحسّ التي يجري تشغيلها بالبطارية battery operated:** تعتمد عُقد المُحسّات في عملها عادة على البطاريات، ويصعب غالباً تغيير أو إعادة شحن البطاريات نظراً لنشر المُحسّات اللاسلكية في بيئات قاسية في أغلب الحالات.
- **القيود على الموارد resource constraints:** المُحسّ محدود الموارد من حيث الطاقة وقدرة الحوسبة والتخزين، وهذا ما يجعل من الصعب تنفيذ خوارزميات متقدمة.
- **العقد ذاتية التشكيل self configurable:** عادة ما تُنشر المُحسّات اللاسلكية بشكل عشوائي في البيئة المراد مراقبتها من دون تخطيط دقيق مسبق؛ وبمجرد النشر تقوم الشبكة بتشكيل نفسها ذاتياً، وتستطيع جميع المُحسّات اللاسلكية التواصل مع بعضها.
- **مخصصة التطبيق application specific:** عادة ما تُصمم شبكة المُحسّات اللاسلكية من أجل تطبيق محدد وعمل محدد، لأنّ متطلبات تصميم الشبكة تختلف من تطبيق إلى آخر.
- **عقد مُحسّات غير موثوقة unreliable:** بسبب محدودية الطاقة وصغر حجم عقد المُحسّات، ثمة احتمال أن تفشل العقدة في عملها أو تتسبب بضرر، لذا فإنّ شبكة المُحسّات اللاسلكية قد لا تكون موثوقة.
- **تغير الطبولوجيا المتكررfrequent topology change:** يجري تحديث طبولوجيا الشبكة بشكل دوري لتلافي تأثير الأضرار التي يمكن أن تحدث في الشبكة؛ كموت عقدة معينة عند استنفاذ طاقتها.
- **عدم توافر تعريف شامل no global identification:** نظراً للعدد الكبير من أجهزة التحسس، فمن المستحيل بناء منظومة عنونة عالمية للشبكة بالكامل، لأنها ستؤدي إلى زيادة هائلة في النفقات لتحديد كل جهاز مُحسّ.

- **نموذج حركة جمع لفرد many-to-one traffic pattern:** في معظم تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية، فإن المعطيات التي يحصلها كل مُحسّ، تتّدَفق من المُحسّ إلى المحطة القاعدية، لذلك يكون مخطط الحركة من نوع جمع إلى فرد نتيجة لتدفق المعطيات من جميع المُحسّات باتجاه المحطة القاعدية.
- **حشو المعطيات data redundancy:** في معظم تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية، تُنشر المُحسّات اللاسلكية بكثافة في منطقة المراقبة، ويجري التعاون بين المُحسّات لإنجاز مهمة تحسس مشتركة، ومن ثمّ فإن المعطيات التي يجري تحسسها بوساطة مُحسّات متعددة يكون فيها عادةً مستوى معين من الحشو[19].

2-1-6 تحديات تصميم شبكات المُحسّات اللاسلكية

ثمة العديد من التحديات التي تواجه تصميم شبكات المُحسّات اللاسلكية، نذكر منها:

2-1-6-1 استهلاك الاستطاعة

تركزت معظم تحديات شبكات المُحسّات اللاسلكية WSN على موارد الاستطاعة power غير الكافية. إذ يحد حجم المُحسّ من حجم مصدر الاستطاعة (البطارية)؛ ومن ثمّ عند تصميم البرمجيات والعتاديات ثمة حاجة إلى الأخذ بالحسبان مسألة ترشيد استخدام الطاقة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يؤدي ضغط المعطيات إلى خفض كمية الطاقة المستخدمة في الإرسال اللاسلكي، ولكنه يستخدم طاقة إضافية في عملية المعالجة. كما أنّ إجرائية الطاقة تعتمد على نوع التطبيق؛ إذ قد يكون من المناسب في بعض التطبيقات إيقاف تشغيل قسم من المُحسّات وذلك للحفاظ على الطاقة، بينما تحتاج التطبيقات الأخرى إلى عمل جميع المُحسّات معاً[16].

من أجل ذلك، ولإطالة مدة حياة (العمر التشغيلي) شبكة مُحسّات لاسلكية، يجب مراعاة مردود (كفاءة) efficiency الطاقة في كل جانب من جوانب تصميم الشبكة، ليس فقط على مستوى البرمجيات والعتاديات، ولكن أيضاً على مستوى بنيان الشبكة والبروتوكولات المستخدمة فيها.

2-1-6-2 وسائط الإرسال

عادة ما يُنفذ الاتصال والتفاعل بين المُحسّات اعتماداً على الاتصالات الراديوية، ومع ذلك فإن بعض شبكات المُحسّات اللاسلكية تستخدم الاتصال المرئي أو الاتصال بالأشعة تحت الحمراء، كونها قوية وخالية من التداخل بشكل فعال[16].

2-1-6-3 محدودية الموارد العتادية

تتمتع عقد المُحسّات بقدرات معالجة وتخزين محدودة، ومن ثمّ يمكنها أداء وظائف حوسبة محدودة فقط. وتطرح هذه القيود على التجهيزات العديد من التحديات في تطوير البرمجيات وتصميم بروتوكولات شبكات المُحسّات اللاسلكية، والتي يجب أن تراعي القيود على الطاقة في عقد المُحسّات من جهة، وقدرات المعالجة والتخزين لعقد المُحسّ من جهة أُخرى[15].

2-1-6-4 بيئة دينامية وغير موثوقة

تعمل شبكة المُحسّات اللاسلكية عادةً في بيئة دينامية dynamic وغير موثوقة. ومن ناحية أخرى قد تتغير طبولوجيا شبكة المُحسّات اللاسلكية بشكل متكرر بسبب فشل عقدة أو حدوث أضرار أو إضافات أو استنفاد الطاقة. وترتبط عُقد المُحسّات اللاسلكية فيما بينها ومع المحطة القاعدية بوساطة وسط لاسلكي، وهو عرضة للضجيج والتشويش، وله طبيعة دينامية بدلالة الزمن. وقد يتدهور الأداء بشكل متكرر بسبب حدوث خفوت fading للقناة أو توهين attenuation للإشارة[15].

2-1-6-5 انتشار هائل وعشوائي

تتكون معظم شبكات المُحسّات اللاسلكية من عدد كبير من عقد التحسس؛ إذ قد يبلغ المئات أو الآلاف أو أكثر. وعادةً ما يعتمد نشر العقد على التطبيق، إذ يمكن أن يكون النشر يدوياً أو عشوائياً. وفي معظم التطبيقات،

يمكن أن تنتشر عُقد المُحسّات بشكل عشوائي في منطقة معينة أو فوق منطقة معادية أو منطقة يتعذر الوصول إليها. ويجب أن تنظم عقد التحسس نفسها بشكل مستقل في شبكة اتصالات قبل أن تبدأ في أداء مهمة التحسس[15].

2-1-6-6 تنوع التطبيقات

لشبكات المُحسّات اللاسلكية مجموعة واسعة من التطبيقات المتنوعة. وقد تتفاوت متطلبات التطبيقات بشكل كبير، ومن ثمَّ ليس ثمة بروتوكول شبكة واحد يمكنه تلبية متطلبات جميع التطبيقات؛ أي أنّ تصميم شبكات المُحسّات اللاسلكية يكون مبنياً من أجل تطبيق مُعين[15].

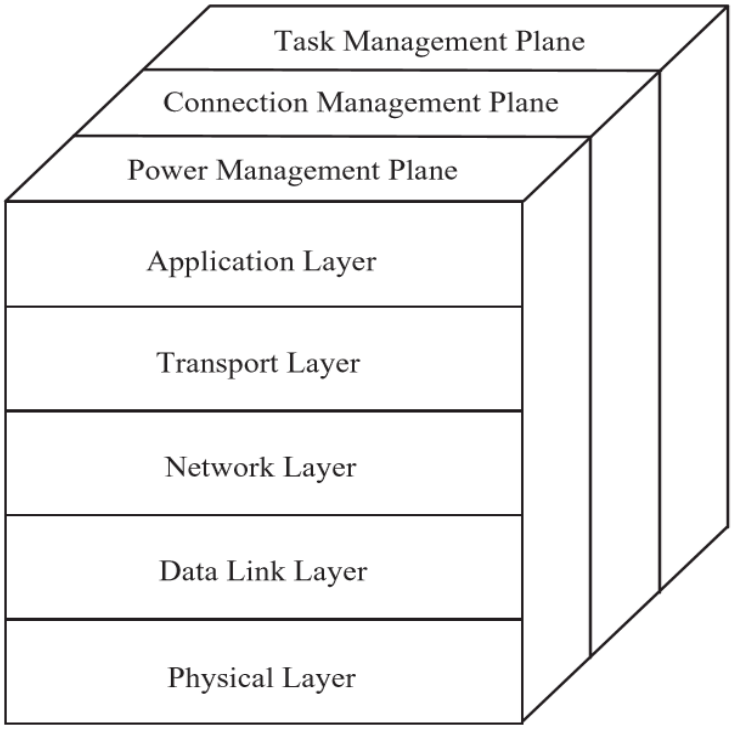
2-1-7 كدسة بروتوكولات شبكات المُحسّات اللاسلكية

تتكون كدسة بروتوكولات protocol stack شبكات المُحسّات اللاسلكية من خمس طبقات هي: الطبقة الفيزيائية physical، وطبقة وصلة المعطيات data link، وطبقة الشبكة network، وطبقة النقل transport وطبقة التطبيق application. ويُبيّن الشكل (2-7) تلك الطبقات، بالإضافة إلى ثلاثة مستويات إدارة عبر كل طبقة وهي: مستويات إدارة الاستطاعة وإدارة الروابط وإدارة المهام[15].

يكون مستوي إدارة الاستطاعة power management plane مسؤولاً عن إدارة مستوى استطاعة عقدة المُحسّ والمعالجة والإرسال والاستقبال، والتي يمكن تنفيذها باستخدام آليات إدارة استطاعة فعالة في طبقات بروتوكول مختلفة. فعلى سبيل المثال، في الطبقة الفرعية التحكم في النفاذ إلى الوسائط Media Access Control (MAC) ، يمكن لعقدة المُحسّ إيقاف تشغيل جهاز الإرسال والاستقبال الخاص بها في حالة عدم وجود معطيات للإرسال والاستقبال. وفي طبقة الشبكة، قد تحدد عقدة المُحسّ عقدة مجاورة ذات قدر معين من الاستطاعة المتبقية كخطوتها إلى المصب sink.

يكون مستوي إدارة الروابط connection management plane مسؤولاً عن تشكيل عقد المُحسّات وإعادة تشكيلها لتأسيس اتصال الشبكة وصيانته في حالة نشر المُحسّات وتغير الطبولوجيا بسبب إضافة عقدة، أو فشل عقدة، أو حركة العقدة على سبيل المثال.

في حين يكون مستوي إدارة المهام task management plane مسؤولاً عن توزيع المهام بين عقد المُحسّات في منطقة التحسس من أجل تحسين مردود الطاقة وإطالة مدة حياة الشبكة. ونظراً لأن عقد المُحسّات عادة ما تُنشر بكثافة في منطقة التحسس فقد تكون زائدة عن الحاجة لأداء المهمة المطلوبة، لذا لا ضرورة لأن تقوم جميع عقد المُحسّات في منطقة التحسس بأداء نفس المهمة؛ ومن ثمّ يمكن استخدام آلية إدارة مهام لتوزيع المهام بين المُحسّات المتعددة[15].



الشكل (2-7) كدسة بروتوكولات شبكات المُحسّات اللاسلكية[15]

2-1-7-1 طبقة التطبيق

تشتمل طبقة التطبيق على مجموعة متنوعة من بروتوكولات التطبيقات التي تقوم بتنفيذ العديد من تطبيقات شبكة المُحسّات اللاسلكية، مثل نشر الاستفسار query dissemination، وموقع العقدة، والمزامنة، وأمن الشبكة.

على سبيل المثال، يوفر بروتوكول إدارة المُحسّ Sensor Management Protocol (SMP) عمليات برمجية لأداء مجموعة متنوعة من المهام، مثل تبادل معطيات الموقع، ومزامنة عقد المُحسّات وحركيتها وجدولتها scheduling، والاستفسار عن حالة عقد المُحسّات.

في حين يوفر بروتوكول نشر المعطيات والاستفسار عن المُحسّات Sensor Query and Data Dissemination Protocol (SQDDP) واجهات لإصدار الاستفسارات والرد على الاستفسارات وجمع الردود.

على الرغم من أنه جرى اقتراح العديد من تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية، إلا أن بروتوكولات التطبيقات الموافقة ما تزال بحاجة إلى تطوير.

2-1-7-2 طبقة النقل

بشكل عام، تكون طبقة النقل مسؤولة عن إيصال المعطيات النهائية بصورة موثوقة بين المُحسّات والمصب sink. ونظراً للقيود على الطاقة والحوسبة والتخزين الخاصة بالمُحسّات، لا يمكن تطبيق بروتوكولات النقل التقليدية مباشرة على شبكات المُحسّات اللاسلكية دون تعديل. فعلى سبيل المثال، لا يمكن استخدام التحكم التقليدي في الخطأ القائم على إعادة الإرسال من طرف إلى طرف، وآليات التحكم في الازدحام الموجودة في بروتوكول التحكم في الإرسال Transmission Control Protocol (TCP) لشبكات المُحسّات اللاسلكية مباشرة لضعف مردودها من حيث استخدام الموارد. بالإضافة إلى ذلك، يجري إيصال المعطيات في شبكات المُحسّات اللاسلكية في اتجاهين: الصاعد upstream والهابط downstream؛ ففي الاتجاه الصاعد تنقل عُقد المُحسّات معطياتها إلى المصبsink، في حين يرسل المصب المعطيات الناشئة كالاستفسار query والأوامر إلى عقد المُحسّات بالاتجاه الهابط. قد يكون

لجريان المعطيات data flows في الاتجاهين متطلبات موثوقية مختلفة. فعلى سبيل المثال، تتسامح دفقة المعطيات data stream في الاتجاه الصاعد مع الفقد loss، لأن المعطيات المُحسّوسة عادة ما تكون مترابطة أو زائدة عن الحاجة إلى حد معين، وأمّا في الاتجاه الهابط فتكون دفقات المعطيات في المصب عبارة عن استفسارات وأوامر تُرسل إلى عقد المُحسّات، مما يتطلب عادةً تسليماً موثوقاً بنسبة 100% [15]. لذا تطرح الخصائص الفريدة لشبكات المُحسّات والمتطلبات المحددة للتطبيقات المختلفة العديد من التحديات الجديدة في تصميم بروتوكولات طبقة النقل لشبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs.

2-1-7-3 طبقة الشبكة

طبقة الشبكة مسؤولة عن توجيه المعطيات المُحسّوسة بوساطة المُحسّات إلى المصب. ففي شبكة المُحسّات اللاسلكية، تُنشر عقد المُحسّات في منطقة التحسس لمراقبة ظاهرة معينة؛ ويجب إرسال المعطيات المرصودة إلى المصب. إذ يمكن لعقدة المصدر source node نقل المعطيات المُحسّوسة إلى المصب؛ إمّا مباشرة عبر اتصال لاسلكي طويل المدى، أو عبر اتصال لاسلكي قصير المدى متعدد القفزات. مع العلم أن الاتصالات اللاسلكية طويلة المدى مكلفة من حيث استهلاك طاقة عقد المُحسّات وتعقيد التنفيذ. وعلى النقيض من ذلك، فإن الاتصال قصير المدى متعدد القفزات لا يخفض بشكل كبير من استهلاك الطاقة لعُقد المُحسّات فحسب، بل يخفض أيضاً من مشاكل انتشار الإشارة وتأثيرات خفوت القناة الكامنة في الاتصال اللاسلكي طويل المدى. وبما أن عقد المُحسّات تكون عادة منتشرة بكثافة وأن العقد متجاورة وقريبة من بعضها البعض، فمن الممكن استخدام اتصالات قصيرة المدى متعددة القفزات في شبكات المُحسّات اللاسلكية. وفي هذه الحالة، من أجل إرسال المعطيات المُحسّوسة إلى المصب، يتوجب على العقدة المصدر استخدام بروتوكول توجيه لتحديد مسار متعدد القفزات موفر للطاقة. ومع ذلك، فإن بروتوكولات التوجيه للشبكات اللاسلكية التقليدية ليست مناسبة لشبكات المُحسّات لأنها لا تولي مردود الطاقة energy efficiency الأهمية القصوى.

كما تُظهر المعطيات من منطقة التحسس باتجاه المصب نمط مرور متعدد إلى واحد many-to-one في شبكات المُحسّات اللاسلكية. وينجم عن الجمع بين نقاط متعددة زيادة ملحوظة في كثافة الحركة، ومن ثمّ ازدحام الرزم وزيادة الاصطدامات والفقد والتأخير واستهلاك الطاقة، ومع اقتراب المعطيات من المصب ستفقد عُقد المُحسّات الأقرب إلى المصب عدداً أكبر من الرزم وتستهلك طاقة أكثر بكثير من العقد البعيدة عن المصب، مما ينقص إلى حد كبير العمر التشغيلي للشبكة بأكملها. لذا من الضروري مراعاة قيود الطاقة لعُقد المُحسّات إضافةً إلى نمط الحركة في تصميم طبقة الشبكة وبروتوكولات التوجيه[15].

2-1-7-4 طبقة وصلة المعطيات

طبقة وصلة المعطيات هي المسؤولة عن تجميع دفقات المعطيات data stream multiplexing، وإنشاء إطار المعطيات واكتشافه، والتحكم في الأخطاء من أجل توفير عمليات إرسال موثوقة من نقطة إلى نقطة ومن نقطة إلى عدة نقاط. ويعدّ التحكم في النفاذ إلى الوسائط Media Access Control (MAC) أحد أهم وظائف طبقة وصلة المعطيات. يتمثل الهدف الأساسي للتحكم في النفاذ إلى الوسائط في المشاركة العادلة والفعالة لموارد الاتصال المشتركة أو موارد الوسيط بين عقد المُحسّات المتعددة من أجل تحقيق أداء شبكة جيد من حيث استهلاك الطاقة ومعدل تدفق الشبكة وتلبث التوصيلdelivery latency. ومع ذلك، لا يمكن تطبيق بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC الخاصة بشبكات اللاسلكية التقليدية على شبكات المُحسّات اللاسلكية من دون تعديل؛ لأنها لا تأخذ بالحسبان الخصائص الفريدة لشبكات المُحسّات اللاسلكية، ولا سيما القيود على الطاقة. فعلى سبيل المثال، إنّ التحدي الأساسي في منظومة الاتصالات الخلوية هو توفير جودة الخدمة Service (QoS) Quality of للمستخدمين؛ ويعدّ مردود الطاقة ذا أهمية ثانوية فقط، لأنه لا يوجد قيد مهمّ على الاستطاعة في المحطات القاعدية، كما يمكن للمستخدمين النقالين mobile users تجديد البطاريات في هواتفهم، مما يجعل بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC التقليدية غير مناسبة لشبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs. لذا

أُجريت أبحاث كثيرة حول بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC، وجرى اقتراح مجموعة متنوعة من بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC لمعالجة سيناريوهات التطبيق المختلفة.

ثمة وظيفة أخرى مهمّة لطبقة وصلة المعطيات هي التحكم في الأخطاء في نقل المعطيات. ففي العديد من التطبيقات، تُنشر شبكة المُحسّات اللاسلكية WSN في بيئة قاسية حيث يكون الاتصال اللاسلكي عرضة للخطأ. وفي هذه الحالة، يصبح التحكم في الأخطاء أمراً لا غنى عنه لنقل المعطيات بشكل موثوق. وبشكل عام، ثمة آليتان رئيسيتان للتحكم في الأخطاء: التصحيح الأمامي للخطأ Forward Error Correction (FEC) وطلب التكرار الآلي Automatic Repeat reQuest (ARQ). يحقق طلب التكرار الآلي ARQ نقلاً موثوقاً للمعطيات وذلك بإعادة إرسال رزم المعطيات أو الإطارات المفقودة؛ لكن ذلك يتسبب بتكاليف إعادة إرسال كبيرة واستهلاك إضافي للطاقة، ومن ثمّ فهو غير مناسب لشبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs. في حين يحقق التصحيح الأمامي للخطأ FEC موثوقية الوصلة باستخدام رِمازات codes التحكم في الأخطاء في نقل المعطيات، والتي تتسبب بتعقيدات ترميز وفك ترميز إضافية تتطلب موارد معالجة إضافية في عقد المُحسّات. ومع ذلك، يمكن أن يقلل التصحيح الأمامي للخطأ FEC بشكل كبير من معدل خطأ البت Bit Error Rate (BER) من أجل استطاعة إرسال معينة. ونظراً للقيود على الطاقة لعقد المُحسّات، لا يزال التصحيح الأمامي للخطأ FEC هو الحل الأكثر فعالية للتحكم في الأخطاء في شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs. ولتصميم آلية التصحيح الأمامي للخطأ FEC، يعدّ اختيار رمز التحكم في الخطأ أمراً مهماً للغاية؛ لأن رمز التحكم في الخطأ المختار جيداً يمكن أن يحقق ربح ترميز جيد. وفي الوقت نفسه يجب مراعاة استطاعة المعالجة الإضافية المستهلكة في الترميز وفك الترميز. لذا يجب تحسين المفاضلة بين استطاعة المعالجة الإضافية ومكاسب الترميز المقابلة من أجل الحصول على آلية تصحيح أمامي للخطأ FEC قوية وفعالة من حيث الطاقة والتعقيد[15].

2-1-7-5 الطبقة الفيزيائية

تكون الطبقة الفيزيائية مسؤولة عن تحويل دفقات البتات الورادة من طبقة وصلة المعطيات إلى إشارات مناسبة للإرسال عبر وسط الإرسال. لذا، يجب التعامل مع العديد من القضايا ذات الصلة كاختيار وسط الإرسال وترددات العمل، وتوليد تردد الموجة الحاملة، وتعديل الإشارة وكشف التعديل، وتشفير المعطيات. بالإضافة إلى ذلك، يعدّ اختيار الوسط medium وتردد الإرسال مسألة مهمّة للاتصال بين عقد المُحسّات. إنّ أحد الخيارات المتاحة هو استخدام المجالات الترددية المخصصة مجاناً للأغراض الصناعية والعلمية والطبية Scientific and Medical Industrial (ISM)، في معظم البلدان. تشمل المزايا الرئيسية لاستخدام هذه المجالات الترددية ISM الاستخدام المجاني والطيف الواسع والتوافر العالمي. ومع ذلك، فقد جرى بالفعل استخدام المجالات الترددية المرخصة (المباعة) من قبل الهيئات الناظمة للاتصالات من أجل منظومات الاتصالات المختلفة، مثل منظومات الهاتف اللاسلكي والشبكات المحلية اللاسلكية Wireless Local Area Networks (WLANs) . من ناحية أخرى، تتطلب شبكات المُحسّات اللاسلكية جهاز إرسال واستقبال صغير ومنخفض التكلفة ومنخفض استطاعة الإرسال جداً. لهذه الأسباب، يوصى باستخدام المجال حول 433 MHz والمجال حول 917 MHz من المجالات الترددية ISM في أوروبا وأمريكا الشمالية على الترتيب. وقد استخدمت العديد من المشاريع دارات راديوية Radio Frequency (RF) circuitsفي تصميم العتاديات لعقد المُحسّات الاسلكية.

ويمكن أن تكون حلول الاتصالات البصرية أو الاتصالات بالأشعة تحت الحمراء خياراً ممكناً لتأمين الاتصال في شبكات المُحسّات اللاسلكية، وكلاهما يتطلب أن يكون المرسل والمستقبل على مسافة قريبة للتواصل مع بعضهما البعض، مما يحد من استخدامهما إلى حد معين[15].

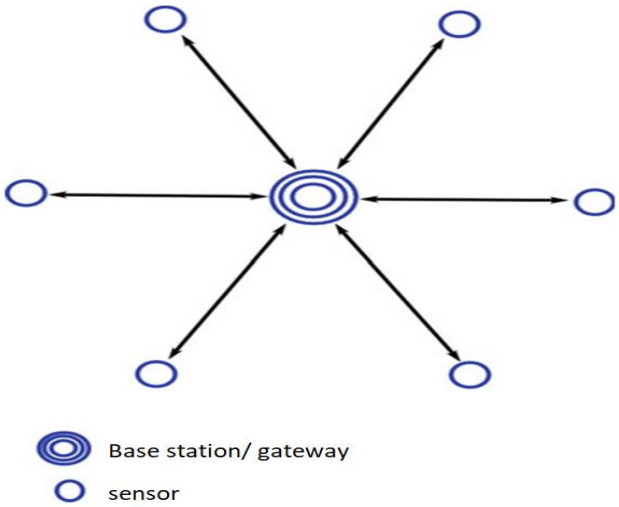
2-2 الطبولوجيا وبروتوكولات التوجيه الرئيسية والنموذج الراديوي في شبكات المُحسّات اللاسلكية

2-2-1 طبولوجيا شبكات المُحسّات اللاسلكية

يُقصد بطبولوجيا شبكات المُحسّات اللاسلكية كيفية ترتيب عقد المُحسّات داخل الشبكة، ومن أشهرها[20]:

2-2-1-1 الطبولوجيا النجمية

تُوزع عقد المُحسّات حول المحطة القاعدية Base Station (BS) بحيث يكون لها شكل نجمي؛ كما هو مبيّن في الشكل(2-8). تبث عقد المُحسّات المعطيات إلى المحطة القاعدية BS، ولا يمكنها تبادل الرسائل مباشرةً بين بعضها البعض. توفر هذه الطبولوجيا استخداماً منخفضاً للطاقة مقارنةً بالطبولوجيات الأخرى لشبكات المُحسّات اللاسلكية. وتتمثل سلبيتها في اعتمادها على عقدة واحدة لإدارة الشبكة أي نقطة عطل أحادية single-point-of-failure، مما يؤثر سلباً على الموثوقية reliability الكلية للشبكة، حيث أن حدوث عطل في المحطة القاعدية سيقود إلى فشل الشبكة كاملةً.

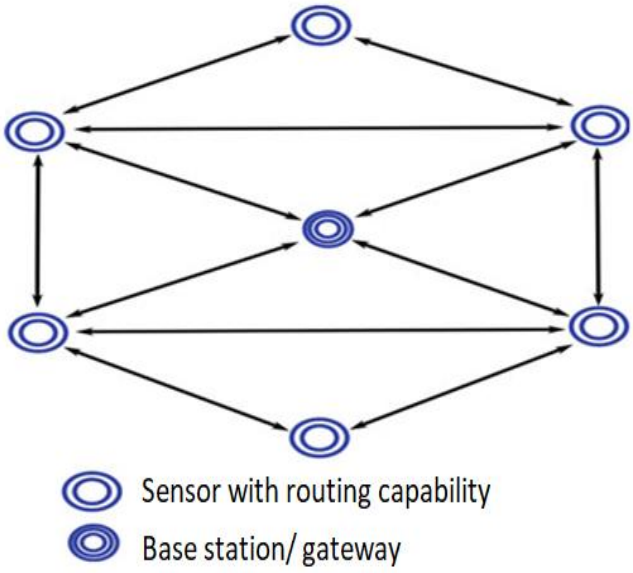


الشكل (2-8) مثال على طبولوجيا نجمية[20]

2-2-1-2 الطبولوجيا العروية

يتيح هذا النوع من الطبولوجيا نقل المعطيات بين عقد المُحسّات فيما بينها من دون المرور الإجباري بالمحطة القاعدية، كما هو مبيّن في الشكل (2-9).

ومن مزايا هذه الطبولوجيا أنه في حالة حدوث عطل في أحد المُحسّات، يجري إتمام الاتصال عبر بقية المُحسّات؛ وبالمقابل تتمثل سيئة هذه الطبولوجيا باستخدامها الزائد للاستطاعة بسبب طبيعة سلوكها في نقل المعطيات.

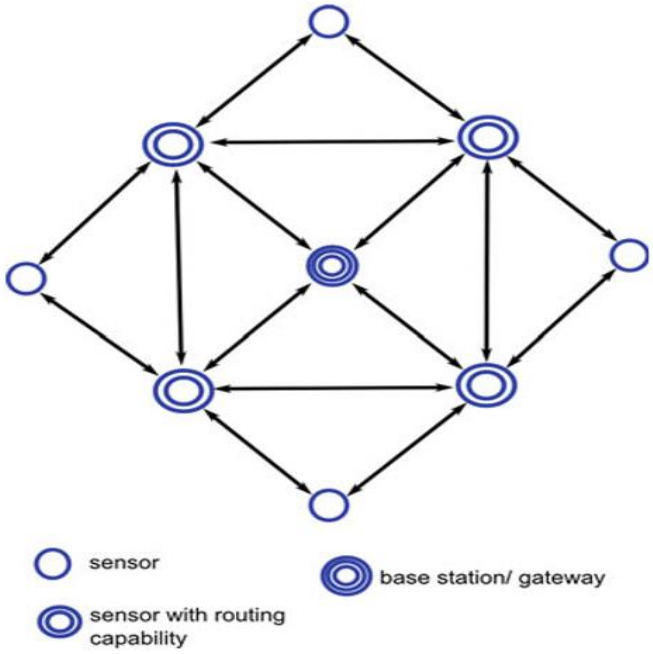


الشكل (2-9) مثال على طبولوجيا عروية [20]

2-2-1-3 الطبولوجيا النجمية العروية الهجينة

تجمع شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs المُعتمدة على الطبولوجيا النجمية العروية الهجينة hybride mesh star بين سمات كل من البنيان النجمي والعروي، حيث أنها تستفيد من الاستهلاك المنخفض للاستطاعة الذي يميز الطبولوجيا النجمية من جهة، ومن حشو المعطيات الذي يميز الطبولوجيا العروية لضمان وصول المعطيات إلى وجهتها من جهة أُخرى.

عند تنفيذ هذه الطبولوجيا، تكون العقد الموجودة على حافة edge الشبكة عادةً عبارة عن عقد منخفضة الطاقة، بينما تتمتع العقد الموجودة في قلب core الشبكة بطاقة أعلى. ونظراً لأن العقدة في قلب الشبكة تحول الرسائل بين عدد كبير من عقد المُحسّات؛ فهي تعمل كعقدة عبّارة gateway node. ويبيّن الشكل (2-10) مثالاً على طبولوجيا نجمية عروية هجينة لشبكة مُحسّات لاسلكية.



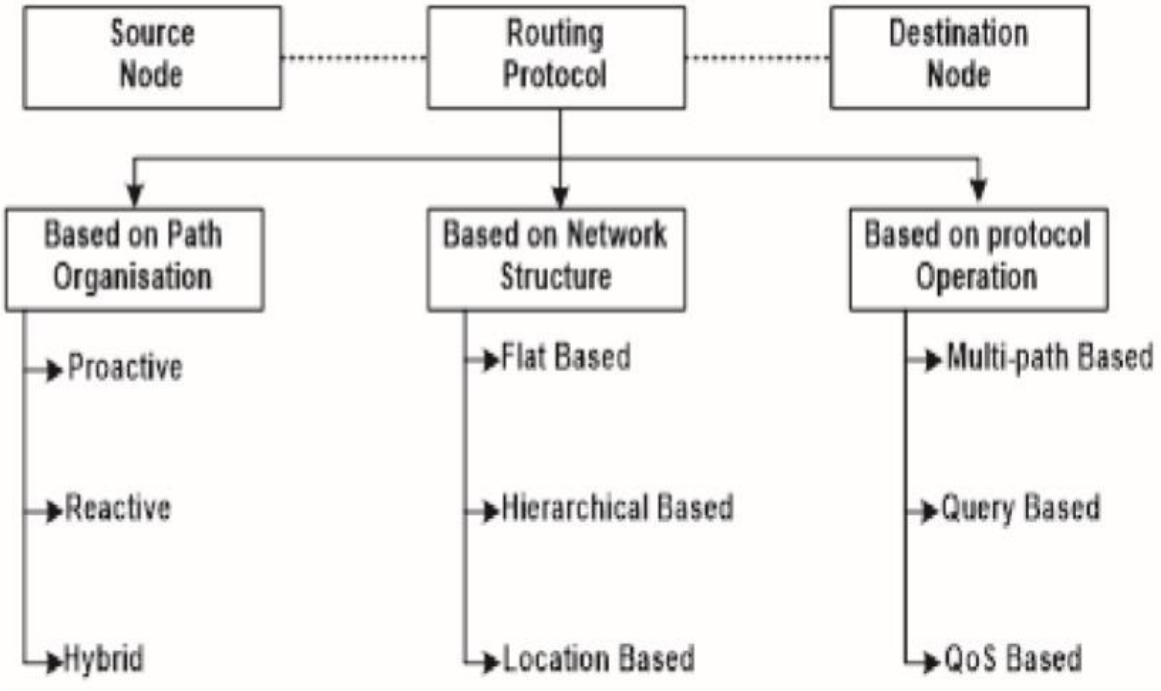
الشكل (2-10) مثال على طبولوجيا نجمية عروية هجينة[20]

2-2-2 بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية

تُحدد بروتوكولات التوجيه طريقة تواصل العقد مع بعضها البعض وكيفية نشر المعلومات عبر الشبكة[21].

ثمة العديد من الطرائق المُستخدمة في تصنيف بروتوكولات التوجيه الخاصة بشبكات المُحسّات اللاسلكية؛ نذكر منها: التصنيف بناءً على بنية الشبكة network structure أو بناءً على تشغيل البروتوكول protocol operation أو بناءً على تنظيم المسار path organization.

ويبيّن الشكل (2–11) الاستراتيجيات الأساسية في تصنيف بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs التي تُحدد المسار المناسب لتبادل المعطيات والاتصال بين العقدة المصدر والعقدة الوجهة[22].



الشكل (2–11) الاستراتيجيات الأساسية لتصنيف بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية[22]

2–2–2–1 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على تنظيم المسار

في طريقة التصنيف المعتمدة على تنظيم المسار path organization يجري التركيز على العملية المستخدمة لاكتشاف المسار في بروتوكول التوجيه. وينجم عن ذلك المناهج الآتية[22]:

- نهج التوجيه الاستباقي

يُطلق على نهج التوجيه الاستباقي proactive routing approach أيضاً مسمى نهج التوجيه المقود بالجدول table driven routing، لأنه يحافظ على جداول التوجيه للشبكة كاملة، وذلك بتمرير معلومات الشبكة من عقدة إلى عقدة، وتُحدد المسارات مسبقاً قبل استخدامها، وحتى في حالة عدم وجود جريان حركة traffic flow [21].

- نهج التوجيه التفاعلي

لا تحافظ بروتوكولات نهج التوجيه التفاعلي reactive routing approach على طبولوجيا الشبكة بالكامل، إذ يجري تنشيطها فقط عند الطلب؛ أي عندما تريد عقدة ما إرسال المعطيات إلى أي عقدة أُخرى، لذا يجري إنشاء المسارات عند الطلب عند بدء الاستفسارات[21].

- نهج التوجيه الهجين

تتمتع بروتوكولات التوجيه الهجين hybrid routing protocols بمزايا بروتوكولات التوجيه الاستباقي والتفاعلي معاً مع تجاوز عيوبهما[21].

2-2-2-2 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على بنية الشبكة

- نهج التوجيه المعتمد على التوحيد

في نهج التوجيه المعتمد على التوحيد (عدم التغاير) flat based routing approach، تعامل جميع العقد على قدم المساواة، وهذا النهج مخصص بشكل أساسي للشبكات المتجانسة، والتي تكون فيها لجميع العقد نفس الخصائص ونفس الوظائف[21].

- نهج التوجيه المُعتمد على التراتبية

في نهج التوجيه المعتمد على التراتبية (الهرمية) hierarchical based routing approach، تُقسم شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs إلى عناقيد clusters تؤدي رؤوسها بشكل أساسي مهام المعالجة (مثل التجميع) وإعادة توجيه المعلومات إلى المحطات القاعدية BSs؛ في حين تؤدي العقد الأُخرى مهام التحسس داخل العناقيد[20]. تعتمد الشبكات غير المتجانسة في الغالب على بروتوكولات التوجيه التراتبية؛ حيث تكون بعض العقد أكثر تطوراً وقدرة من العقد الأخرى، وتُعدّ العنقدة clustering أكثر مردوداً (كفاءة) في استخدام الطاقة ويمكن إدارتها بسهولة أكبر[21].

- نهج التوجيه المُعتمد على الموضع

في نهج التوجيه المعتمد على الموضع location based routing approach، تتمتع العقد بالقدرة على تحديد موقعها الحالي، وذلك باستخدام بروتوكولات المَوضَعة localization protocols المختلفة[21].

وتجري تهيئة المسارات بناءً على تقدير موضع المُحسّ. ومن أجل الحفاظ على طاقة العقدة، يجري تحويل بعض العقد إلى وضع السكون عندما لا يكون ثمة أحداث وأنشطة في موقع هذه العقد[22].

2-2-2-3 بروتوكولات التوجيه المعتمدة على تشغيل البروتوكول

- نهج التوجيه المُعتمد على تعدد المسارات

توفر بروتوكولات التوجيه المُعتمدة على تعدد المسارات multi-path based routing protocols مسارات متعددة لإيصال المعطيات إلى الوجهة؛ مما يوفر موازنة للحمل، وتأخيراً منخفضاً، وأداءً مُحسّناً للشبكة، كما أنها توفر أيضاً مساراً بديلاً في حالة فشل أي مسار. وتعدّ الشبكات الكثيفة dense networks أكثر اعتماداً على شبكات المسارات المتعددة.

ولإبقاء المسارات على قيد الحياة، يجب إرسال نوع من الرسائل الدورية periodic messages بعد بعض الفواصل الزمنية المحددة. ومن ثمّ، فإن التوجيه المُعتمد على تعدد المسارات ليس أكثر مردوداً (كفاءة) في استخدام الطاقة [21].

- نهج التوجيه المُعتمد على الاستفسار

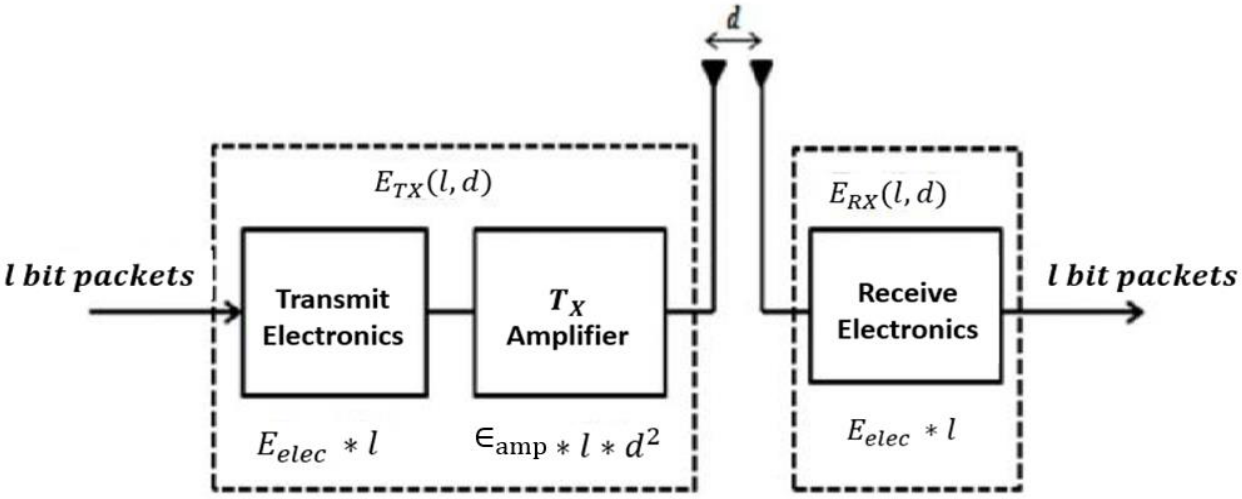
في نهج التوجيه المُعتمد على الاستفسار query based routing approach لا تقوم عُقد المُحسّات بإرسال المعطيات إلا استجابةً للاستفسارات التي تُنشئ من قبل العقدة الوجهة destination node. حيث ترسل العقدة الوجهة استفساراً لتلقي بعض المعلومات عبر الشبكة، وتتحسس العقدة الهدف المعلومات وترسلها مرة أخرى إلى العقدة التي بدأت الطلب[21].

- نهج التوجيه المُعتمد على جودة الخدمة

تحاول بروتوكولات التوجيه المُعتمد على جودة الخدمة Quality of Service (QoS) based routing protocols اكتشاف المسار من المصدر إلى المصب sink، والذي يلبي مستوى جودة الخدمة المطلوب، مثل معدل التدفق throughput وتوصيل المعطياتdata delivery والطاقة energy والتأخيرdelay؛ ولكن أيضاً مع مراعاة تحقيق الاستخدام الأمثل لموارد الشبكة[21].

2-2-3 نموذج الطاقة الراديوي

نظراً لأن معظم الطاقة المتاحة لدى العقد ضمن شبكة المُحسّات اللاسلكية تُفقد بفعل الإرسال، لذا تُستخدم عادة طرائق استمثال للطاقة. ويجري تقدير استهلاك الطاقة في شبكة المُحسّات اللاسلكية اعتماداً على نموذج الطاقة الراديوي من المرتبة الأولى، ويبيّن الشكل (2-12) نموذج الطاقة الراديوي الشائع الاستخدام. وفيه يستهلك المرسل طاقة بفعل الإلكترونيات الراديوية radio electronics والمضخم amplifier، في حين يستهلك المستقبل طاقة فقط بفعل الإلكترونيات الراديوية [23].



الشكل (2-12) نموذج الطاقة الراديوي[23]

وبناءً على هذا النموذج تُعطى كمية الطاقة اللازمة لإرسال l بت (من المرسل إلى المستقبل لمسافة d) بالعلاقة (1−2) [23].

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

وفيها يمثل E_{Tx} طاقة الإرسال ويمثل E_{elec} الطاقة المحررة released في البت في دارة المرسل أو المستقبل. وتمثل $\in_{fs}$ و $\in_{mp}$ سمتي features مضخم الإرسال. من أجل حالة الفضاء الحر free space ومن أجل حالة تعدد المسارات multipath على الترتيب. وعندما تكون المسافة بين المرسل والمستقبل أقل من قيمة العتبة d_0 يُستخدم نموذج الفضاء الحر المرتبط بمربع المسافة d^2، وبخلاف ذلك يُستخدم نموذج القناة متعددة المسارات المرتبط بالأس الرابع للمسافة d^4. وتدل E_{Rx} المُعطاة بالعلاقة (2−2) على كمية الطاقة المستهلكة لاستقبال l بت من المعطيات [23].

$$E_{RX} = l*E_{elec} \qquad (2\text{-}2)$$

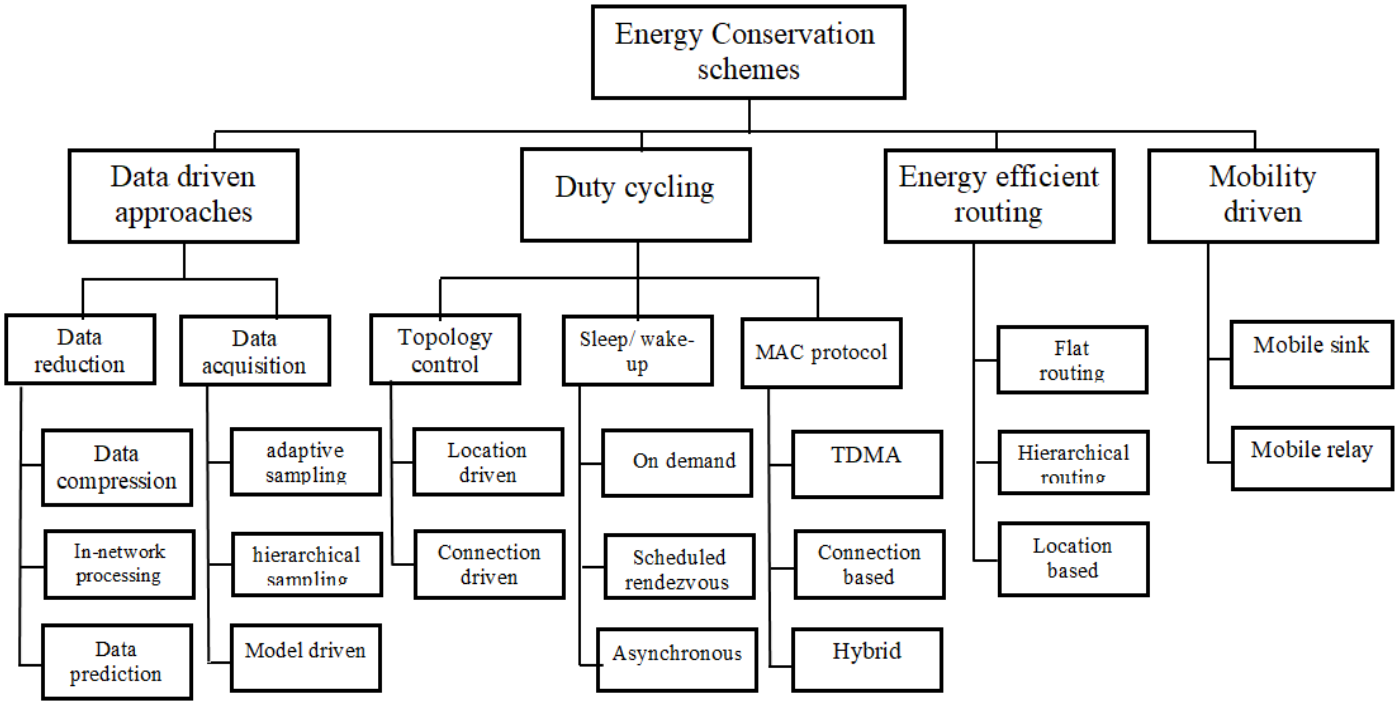
علماً أنّ قيمة العتبة d_0 تُعطى بالعلاقة (3−2) وهي جذر النسبة $\in_{fs}$ إلى $\in_{mp}$[23].

$$d_0 = \sqrt{\in_{fs}/\in_{mp}} \qquad (3\text{-}2)$$

2−3 طرائق تحسين مردود الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية

تُنشر المُحسّات في بيئات مختلفة ولتلبية متطلبات تطبيقات محددة، ويتطلب العديد من التطبيقات تشغيل العقد لعدة أشهر أو حتى عدة سنين في بعض الأحيان، لذا تعدّ المحافظة على مدة حياة الشبكة من أهم تحديات شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs. وثمة العديد من التقنيات في الأدبيات التي تهدف إلى تخفيض استهلاك الطاقة وتحسين مدة حياة الشبكة.

يمكن تصنيف مخططات الحفاظ على الطاقة في أربع فئات كما هو موضح في الشكل(2-13) وهي: المناهج المقودة بالمعطيات data driven approaches، ودورة العمل duty cycling والتوجيه الفعّال للطاقة energy efficient routing والمخططات المقودة بالحركية (التحركية) mobility driven.



الشكل(2-13) مخططات الحفاظ على الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية[24]

2-3-1 المناهج المقودة بالمعطيات

للمعطيات المأخوذة كعينات sampled من البيئة المحيطة ترابط correlation زمني أو مكاني كبير، لذا ليست ثمة حاجة لإرسال معطيات مكررة إلى المصب، لأن ذلك يتسبب باستهلاك كبير لكل من الطاقة والزمن.

وتعمل المناهج المقودة بالمعطيات كحلول فعّالة من حيث الطاقة لمشكلة حشو المعطيات data redundancy، إذ تُستخدم لخفض كمية المعطيات المأخوذة للعينات الواجب إرسالها بوساطة الحفاظ على ضبط تحسس sensing accuracy عند مستوى مقبول تفرضه متطلبات التطبيق[24].

وتقسم هذه المناهج بشكل أساسي إلى مخططين هما: تخفيض المعطيات data reduction وتحصيل المعطيات data acquisition.

2-3-1-1 تخفيض المعطيات

تهدف مناهج تخفيض المعطيات إلى خفض كمية المعطيات المطلوب تحسّها ومعالجتها وإيصالها إلى المصب. إذ تقوم بتحويل كمية كبيرة من المعطيات الكبيرة المستقبلة إلى كيان entity مفيد أصغر، والذي يمكن فك ترميزه من دون أي فقد للمعطيات وباستهلاك طاقة منخفضة.

وبدوره يعتمد تخفيض المعطيات على طريقتين رئيسيتين هما: الضغط compression والتنبؤ prediction.

تقوم تقنيات ضغط المعطيات بضغط المعطيات التي جرى توليدها بواسطة العقدة نفسها أو بواسطة العقدة المُجمِّعة aggregator، ثم تُرسل المعطيات اللازمة فقط. وعند استقبال المعطيات يجري فك ضغط المعطيات عند عقدة المصب sink، وتُطبق عدة طرائق للضغط منها الضغط عديم الفقد Lossless، ومرشحات كالمان Kalman المزدوجة، وتقنيات الضغط الحتمية، وانتقاء النموذج المتكيّف.

وتُطبق مخططات معالجة شبكية network processing لتأسيس تجميع المعطيات. وتُستخدم العقدة المُجمِّعة لجمع المعطيات من العقد المجاورة ومعالجتها، ومن ثمّ إرسالها في رزمة واحدة إلى المصب، ومن ثمّ فإنّ خفض كمية المعطيات المرسلة إلى المصب عبر الشبكة وصولاً إلى العقدة الوجهة سيخفض استهلاك استطاعة الشبكة، وسيعزز مدة حياتها.

في حين تستخدم طريقة التنبؤ بالمعطيات ثلاثة مناهج: المناهج العشوائية stochastic، والتنبؤ بالسلاسل الزمنية time series forecasting والمناهج الخوارزمياتية algorithmic. والمناهج العشوائية هي مزيج من العمليات العشوائية، بحيث يمكن استخدام النماذج الاحتمالية في طور التنبؤ. توفر هذه المناهج مستوى عالٍ من تجميع المعطيات ولكن مع أعباء جهود حسابية باهظة. ومثل هذه المناهج قابلة للتنفيذ إذا توافرت مُحسّات جبارة في الشبكة.

أمّا التنبؤ بالسلاسل الزمنية فيقدم مجموعة من القيم السابقة التي جُمعت بأخذ عينات دوري periodical sampling، والتي تساعد على التنبؤ بالقيمة المستقبلية في نفس السلاسل. وأخيراً تعتمد المناهج الخوارزمياتية على التطبيق المطلوب، إلا أن العوامل المشتركة فيما بينها هو استخدامها لنهج يسمح بالحصول على تنبؤ انطلاقاً من تحديد الخواص الاستكشافية heuristic أو السلوكية behavioral للظواهر [24].

2-3-1-2 تحصيل المعطيات

تعدّ الأبحاث الحديثة عملية التحسّس sensing هي الخدمة الأكثر استهلاكاً للطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs. وثمة أسباب عديدة تتسبب بهذه المشكلة، مثل استخدام محولات الطاقة transducers التي تستهلك استطاعة كبيرة، لأداء مهام أخذ العينات sampling، أو استخدام المبدلات التماثلية الرقمية والتي تتطلب معدلات أخذ عينات عالية وضبط عالي، أو استخدام أجهزة مُحسّات فعالة التي تتطلب إرسال إشارة سبر probing للحصول على أي معلومات ضرورية عن العينة، أو استخدام زمن تحصيل طويل والذي يمكن أن يصل إلى مئات الميلي ثانية وأحياناً إلى ثواني.

وبهدف التحكم في تبديد الطاقة أثناء عملية التحسّس، تُستخدم مناهج تحصيل معطيات فعالة من حيث الطاقة. وتُصنف هذه المناهج في ثلاث فئات رئيسية وهي: أخذ العينات التكيّفيّ adaptive sampling، وأخذ العينات التراتبي hierarchical sampling، وأخذ العينات الفعال القائم على النموذج model-based active sampling.

ويخفض أخذ العينات التكيّفيّ adaptive sampling كمية المعطيات المطلوبة من محول الطاقة اعتماداً إما على الترابط المكاني أو الزماني. وتُنفذ هذه الطرائق بوساطة بنيان مركزي centralized architecture، والذي يتطلب جهداً حسابياً عالياً لمعالجة جميع الرزم المُستقبلة في نفس المصب sink.

في حين تفترض طريقة أخذ العينات التراتبي hierarchical sampling method أن الشبكة مجهزة بأنواع مختلفة من المُحسّات؛ ولكل مُحسّ ضبط محدد، مقرون باستهلاك طاقة معين. وللحصول على مقايضة بين الضبط وتوفير الطاقة، يختار هذا النهج دينامياً أي صنف class سيجري تنشيطه.

وأخيراً، تهدف المناهج القائمة على النموذج model-based approaches إلى خفض عدد المعطيات المعتانة باستخدام النماذج المُحوسبة computed models، وفي غضون ذلك، تقوم بتوفير الطاقة باستخدام بروتوكولات تحصيل معطيات. ويُبنى النموذج المستخدم لتحسس الظاهرة على المعطيات المعتانة للتنبؤ بالعينة اللاحقة المحتملة بضبط معين[24].

2-3-2 دورة العمل

2-3-2-1 بروتوكولات التحكم بالطبولوجيا

تقترن بروتوكولات التحكم بالطبولوجيا بصورة أساسية بحشو الشبكة network redundancy، إذ تبحث عن المجموعة الجزئية الدنيا من العقد القادرة على ضمان توصيلية connectivity الشبكة، وذلك باستغلال حشو الشبكة وفي معظم الحالات، تُنشر العقد بشكل عشوائي في الشبكة، حيث لا تجري إدارة عدد العقد، مما قد يرهق الشبكة نتيجة نشر عقد إضافية وغير ضرورية. ومن ثمّ، فإن إدارة عدد العقد المنشورة أمر بالغ الأهمية لضمان توازن الشبكة واستدامتها، وحذف حشو العقد. وبذلك تسعى بروتوكولات التحكم بالطبولوجيا topology control protocols لموائمة طبولوجيا الشبكة بناءً على متطلبات التطبيق وعدد العقد الفعالة. تأخذ هذه الأساليب بالحسبان حالة العقد فعالة/غير فعالة active/passive، لتأسيس منظومة إدارة فعالة من حيث الطاقة؛ وتصنف هذه البروتوكولات في فئتين: بروتوكولات مقودة بالموضع location driven protocols وبروتوكولات مقودة بالتوصيلية connectivity .driven protocols

تُعرّف البروتوكولات المقودة بالموضع حالة العقدة (نشطة / نائمة active/sleep)، وأي عقدة ينبغي تشغيلها ومتى، وذلك اعتماداً على موضع العقدة المفترض أنه معروف مسبقاً. أما البروتوكولات المقودة بالتوصيلية فهي مسؤولة عن تفعيل/ تعطيل عقدة دينامياً بطريقة تحقق توصيلية شبكة كلية وتغطية كاملة [24].

2-3-2-2 بروتوكولات النوم /الإيقاظ

تُعرّف بروتوكولات النوم/الإيقاظ sleep/wake up بوساطة المنظومة الفرعية الراديوية radio subsystem للعقدة المُحسّ، مما يخفض زمن بقاء العقدة في حالة الراحة idle state. ويمكن تصنيف هذه البروتوكولات بشكل أساسي في ثلاث فئات: بروتوكولات بحسب الطلب on demand protocols والإلتقاءات المجدولة scheduled rendezvous والمخططات غير المتزامنة asynchronous schemes. تعدّ البروتوكولات بحسب الطلب النهج الأكثر بديهية لخفض استهلاك الاستطاعة؛ وفيها يجب إيقاظ عقدة المُحسّ فقط عندما تستقبل رزمة من الجوار، وهذه مناسبة للتطبيقات ذات دورة عمل منخفضة. كما تستخدم بروتوكولات النوم / الإيقاظ وصلات راديوية متعددة منخفضة الاستطاعة لإبلاغ العقدة النائمة بالجوار المحتملين الذين يحاولون الاتصال بها.

أما نهج الإلتقاءات المجدولة فيضمن إيقاظ جميع العقد في نفس الوقت. ووفقاً لجدول الإيقاظ wake-up schedule، تستيقظ عقد المُحسّات وتبقى فعالة لمجال زمني قصير للتواصل مع الجوار، وبعد ذلك تعود إلى وضع النوم حتى موعد الإلتقاء rendezvous القادم. ويجب مزامنة جميع المُحسّات من أجل الاستيقاظ والعمل في الوقت ذاته.

وأخيراً فإنّ الفئة الثالثة المستخدمة في نهج دورة العمل هي المخططات غير المتزامنة؛ والتي تسمح لعقد المُحسّات بإدارة جداول نومها واستيقاظها. وتختار العقد موعد الاستيقاظ عندما تكون قادرة على التواصل مع الجوار. ولتحقيق ذلك، يجب أن يكون للجوار تراكب بين أدوار استيقاظهم. والهدف الرئيسي لهذا المخطط هو عدم إلزامية مزامنة العقد

معاً، مما يسمح لكل عقدة في شبكة المُحسّات اللاسلكية بإعداد جدول النوم/الإيقاظ الخاص بها بشكل مستقل، مما يسمح بخفض التنازع contention وحمل العمل workload [24].

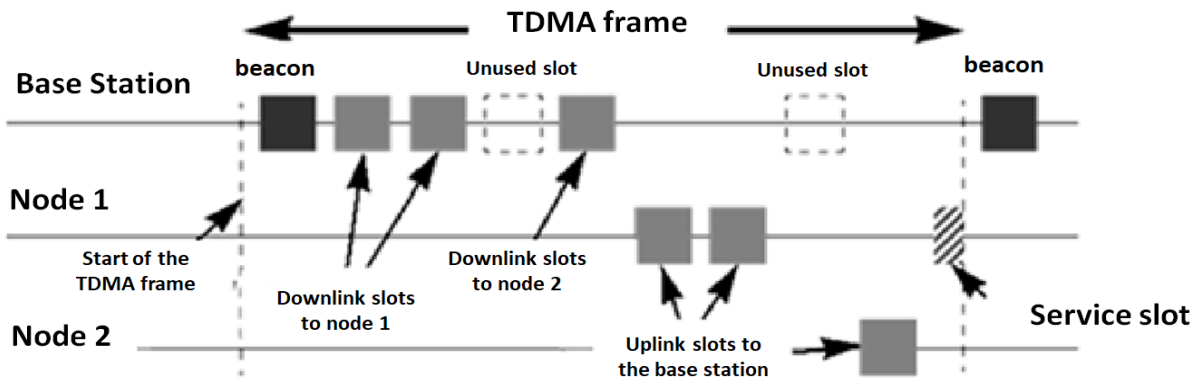
2-3-2-3 بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط مع دورة عمل منخفضة

تتمثل إحدى خصائص بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط Media Access Control (MAC) الخاصة بشبكة المُحسّات اللاسلكية في عدم تشغيل المنظومة الفرعية الراديوية على الدوام.

وحيث أنّ معدل التدفق throughput في شبكات المُحسّات اللاسلكية منخفض عادةً، يمكن للعقد تجنب أو خفض الاستماع أثناء الراحة لتوفير كميات كبيرة من الطاقة. وتعمل عُقد المُحسّات بشكل دوري على تشغيل وإيقاف المنظومة الفرعية الراديوية من أجل الحفاظ على الطاقة[25].

إنّ جوهر هذه البروتوكولات هو تضمين دورة عمل في النفاذ إلى القناة، ويجري تنفيذ مخطط دورة العمل المنخفض من قِبل معظم هذه البروتوكولات من أجل إدارة استطاعة الشبكة، وبذلك يمكن تصنيف بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC في ثلاث فئات: البروتوكولات القائمة على النفاذ المتعدد باقتسام الزمن Time Division Multiple Access (TDMA)، والبروتوكولات المُعتمدة على التنازع contention-based protocols والبروتوكولات الهجينة hybrid protocols.

يجري في بروتوكول التجكم في النفاذ إلى الوسائط MAC القائم على النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA تقسيم الزمن إلى أطر زمنية time frames، ويجري شطر كل إطار زمني أيضاً إلى عدد ثابت من الأحياز الزمنية time slots التي لها نفس الطول، كما هو مبيّن في الشكل (2-14). ويجري تحصيص (تخصيص) allocation حيز زمني في إطار زمني لكل عقدة، ويسمح لها بأن تُرسل فقط في الحيز الزمني المخصص. وعلاوة على ذلك، يمكن لعقدة بحسب جداول schedules العقد المجاورة لها البقاء في نمط نوم عندما لا يتوجب عليها الإرسال أو الاستقبال [24].



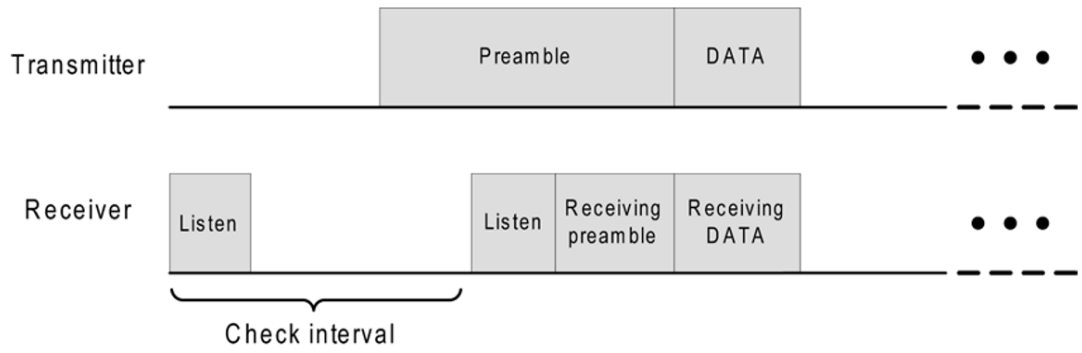
الشكل (2–14) آلية النفاذ إلى القناة بتقنية TDMA [24]

وحيث أنّ العقد تفعل منظوماتها الفرعية الراديوية فقط أثناء الأحياز المخصصة لها، ينخفض استهلاك الطاقة إلى الحد الأدنى المطلوب لإرسال/استقبال المعطيات. ويُنفذ الجدول من قِبل عقدة محددة وهي عقدة المحطة القاعدية BS التي تبث المعطيات إلى سائر الشبكة بوساطة إطار إدارة management frame يطلق عليه اسم المنارة beacon. ويتوجب على كل عقدة الالتزام بالتعليمات القادمة من المحطة القاعدية وباتباع المخطط الزمني حرفياً. وبشكل عام تكون بنية الإطار منظمة كالآتي: أحياز الوصلة الهابطة downlink slots الصادرة من المحطة القاعدية إلى سائر الشبكة، وأحياز الوصلة الصاعدة uplink slots الصادرة من سائر الشبكة إلى المحطة القاعدية[24].

وثمة نوع آخر من بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط MAC يعتمد على مكاملة وظائف النفاذ إلى القناة مع مخطط نوم/إيقاظ، ويشار إليها بالبروتوكولات المعتمدة على التنازع contention-based protocols، والتي تعتمد على النفاذ المتعدد بتحسس الحامل Carrier Sense Multiple Access (CSMA) أو على النفاذ المتعدد بتحسس الحامل مع تحاشي التصادم Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). ويقوم هذا البروتوكول بإدارة التصادم بين العقد، حيث تتراجع العقد المتصادمة لمدة زمنية عشوائية قبل محاولة النفاذ إلى القناة مرة أخرى، ومع ذلك، يجري استهلاك طاقة عالية بسبب التصادمات

والنفاذ المتعدد. ومن أشهر بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط والمعتمدة على التنازع: التحكم في النفاذ إلى الوسائط–المُحسّن Sensor-MAC (S-MAC)، والتحكم في النفاذ إلى الوسائط–بيركلي-Berkeley-MAC (B-MAC)، والتحكم في النفاذ إلى الوسائط–وقت مستقطع Timeout-MAC (T-MAC) [24].

يعتمد بروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط–المُحسّن S-MAC على جداول نوم–استماع sleep-listen. إذ يستيقظ دورياً لمدد زمنية قصيرة من أجل البحث عن رزم متاحة في القناة. ويجري تبادل الجداول مع العقد المجاورة لتحقيق التزامن. أثناء مدة الاستماع، تحتاج كل عقدة بأن تبقى مستيقظة وبانتظار الرسائل الواردة upcoming messages، مما يستهلك المزيد من الطاقة. علاوةً على ذلك، تكون مدد الاستماع والنوم لهذا البروتوكول ثابتة من بداية نشر الشبكة؛ وهذا يحد من قابلية تصعّد(توسيع) scalability الشبكة، ويجعل تنفيذها أمراً معقداً [24]. أمّا فيما يتعلق ببروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط– بيركلي B-MAC، فإنه يشتمل على تقنية أخذ عينات تمهيدي preamble sampling، والذي يسمح للعقد بمتابعة دورات cycles النوم والإيقاظ الخاصة بها بطريقة غير متزامنة. ويوضح الشكل (2-15) تقنية أخذ العينات التمهدي. تستيقظ عقد الاستقبال بشكل دوري لمدة قصيرة وتستمع إلى القناة من أجل التأكد إن كان ثمة نشاط activity، فإذا لم يكن ثمة نشاط، فإنها تعود لوضع النوم، وتستيقظ في الدورة اللاحقة. عندما تريد عقدة إرسال رزمة، فإنها ترسل تمهيدًا طويلاً long preamble بما يكفي لضمان اكتشاف نشاط القناة هذا من قِبل عقد الاستقبال، ويحتوي هذا التمهيد على مدة النوم sleep intervall. بعد الكشف عن نشاط القناة، تمدد العقدة المستقبلة مدة نشاطها active period لاستقبال المعطيات. ويعمل بروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط– بركيلي B-MAC بشكل جيد في كل من السيناريوهات الساكنة والنقالة، نظراً لأن جميع العقد تمارس نفس دورة العمل بطريقة غير متزامنة، وليس ثمة حاجة للاحتفاظ بمعلومات العقد المجاورة. يسمح التمهيد الطويل لجميع العقد المجاورة بتلقي المعطيات التي تتبع التمهيد. ومع ذلك، فإن عمليات إعادة الإرسال مكلفة للغاية، لأن كلاً من المعطيات والتمهيد الطويل يحتاجان إلى إعادة الإرسال؛ وينجم عن ذلك هدر كبير للطاقة، وتلبث latency عالي [25].



الشكل (2–15) تقنية أخذ العينات التمهيدي[25]

أمّا بالنسبة لبروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط–وقت مستقطع Time-out- MAC (T-MAC)، فقد أُدخل لتحسين بروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط–المُحسّ S-MAC، وذلك بالسماح للعقد بالعودة للنوم مرة أخرى، إذا لم تُستقبل أي رسالة طوال زمن تأخير محدد defined delay time. وتقوم الفكرة الأساسية لهذا البروتوكول على ضبط مدد النوم والإيقاظ بتكيّف تبعاً لجريان الحركة traffic flow المقدّر. وتتمثل الميزة الأساسية لهذا البروتوكول في العودة إلى نمط النوم عندما لا يُسمع شيء في القناة؛ ولكن في بعض الحالات قد تدخل العقدة في وضع النوم في حين يكون لا يزال ثمة رسائل أخرى من جوارها.

أمّا الصنف الثالث من بروتوكولات التحكم في النفاذ إلى الوسائط وهي البروتوكولات الهجينة hybrid protocol، فتقدم اندماجاً مثالياً لبروتوكولات النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA وبروتوكولات النفاذ إلى الوسائط بتحسس الحامل CSMA، لتتلائم مع نماذج الحركة المتغيرة variable traffic؛ وهي تستخدم معلومات من الطبقات العليا لتحسين أدائها، مثل المعلومات حول الجوار وسياسات التوجيه. تتمثل الأهداف الرئيسية لهذا البروتوكول في خفض الاستماع الزائد overhearing للعقد المجاورة – أي استقبال عقدة لرزم غير مخصصة لها– وإدارة نماذج تقصي sniffing patterns القناة، مثل البروتوكول النفاذ إلى الوسائط المخطط Zebra Media Access Control (Z-MAC)، الذي ينفذ بروتوكول النفاذ إلى الوسائط بتحسس الحامل CSMA في حالة

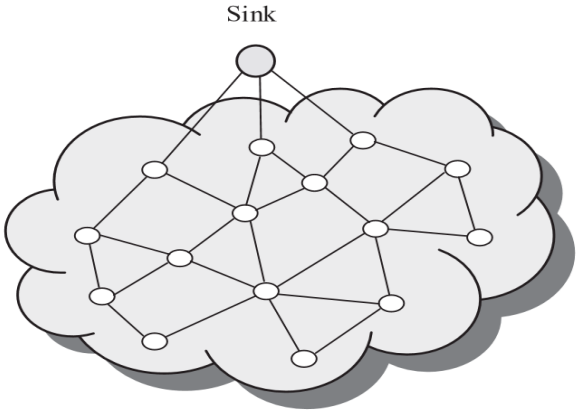
الحركة المنخفضة low traffic، وينتقل إلى بروتوكول النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA في ظروف الحركة العالية high traffic [24].

2-3-3 التوجيه الفعّال من حيث الطاقة

التوجيه routing خدمة رئيسية في شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs؛ وهي مسؤولة عن توجيه المعطيات المرسلة من عقدة المصدر إلى الوجهة عبر الشبكة. ويجري الإرسال إما بقفزة واحدة أو عبر عقدة وسيطة في اتصال متعدد القفزات. ويمكن تصنيف بروتوكولات التوجيه في شبكات المُحسّات اللاسلكية في ثلاث فئات: هي التوجيه الموحد (المسطح) flat routing (المتمركزة حول المعطيات)، والتوجيه التراتبي hierarchical routing (العنقدة)، والتوجيه المعتمد على الموضع location-based routing (الجغرافي). وتعتمد جميع التصنيفات السابقة على بنيان الشبكة وتشغيل البروتوكول[24].

2-3-3-1 التوجيه الموحد

وفيه تُعامل جميع العقد على قدم المساواة، وهذا النهج مخصص بشكل أساسي للشبكات المتجانسة homogeneous؛ والتي تكون فيها لجميع العقد نفس الخصائص [21]، ويكون لجميع العقد في الشبكة نفس الدور، وتتواصل مع بعضها البعض لأداء مهمة التحسس. وترسل العقدة المصدر رزمة المعطيات إلى عقدة محددة تُدعى المصب sink. يوضح الشكل(2-16) بنيان الشبكة الموحدة.



الشكل (2-16) بنيان الشبكة الموحدة[15]

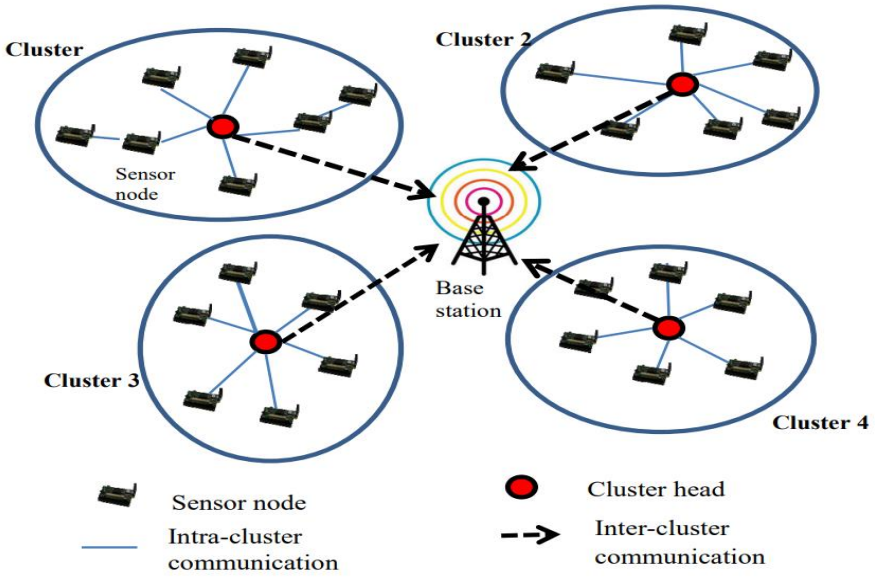
2-3-3-2 التوجيه التراتبي

في شبكات المُحسّات اللاسلكية WSNs تُنشر المُحسّات بكثافة، وقد تكون متقاربة فيما بينها؛ مما يتسبب بحشو المعطياتdata redundancy المجمعة عند نقلها إلى المحطة القاعدية BS.

لذا، تستخدم بروتوكولات التوجيه التراتبي (الهرمي) نهج العنقدة clustering من أجل خفض استهلاك الطاقة بوساطة تجنب الحشو في عملية إرسال المعطيات[22].

إنّ عملية تشكيل العناقيد clusters عبارة عن تراتبية ثلاثية المستويات؛ تشكل فيها المحطة القاعدية BS أعلى مستوى، وتشكّل عقد رأس العنقود Cluster Head (CH) المستوى المتوسط، ويشكل أعضاء العناقيد المستوى الأدنى.

يجري في العنقدة clustering تقسيم الشبكة إلى مجموعات تسمى العناقيد اعتماداً على عدد من الخوارزميات. ولكل عنقود رأس CH يجمع المعطيات من كل المُحسّات في عنقوده، ويعيد توجيهها إلى المحطة القاعدية BS، أي أنّه يؤدي دور عبّارة gateway بين عقد المُحسّات والمحطة القاعدية، ويرسل رأس العنقود إلى المحطة القاعدية إما بصورة مباشرة أو عبر قفزات متعددة. ويظهر الشكل (2-17) مبدأ العنقدة [3].



الشكل (2-17) مبدأ العنقدة في شبكات المُحسّات اللاسلكية[3]

ثمة عدة خواص للعنقدة يجب مراعاتها عند تصميم أي خوارزمية عنقدة وهي [3]:

- العدد الأمثل للعناقيد التي سيجري تشكيلها.
- الاتصال داخل العنقود وبين العناقيد (سواء أحادي القفزة أو متعدد القفزات).
- مهام المُحسّات في الشبكة.
- طرائق تشكيل العنقود التي تأخذ بالحسبان موسطات مختلفة كقابلية التصعّد (التوسيع) والطاقة والمسافة وموازنة الحمل وغيرهما.
- اختيار رأس العنقود CH الذي قد يجري قبل العنقدة أو بعد العنقدة؛ وعادةً يجري اختياره بحسب مستوى الطاقة المتبقية الأعلى.
- تداخل العناقيد clusters overlapping أثناء عملية العنقدة.

وفيما يخص الموسطات parameters التي تحدد تصميم خوارزميات العنقدة في شبكات المُحسّات اللاسلكية فهي[3]:

- عدد العناقيد number of clusters: الذي يحقق التغطية المطلوبة وموازنة الحمل، ومن ثمّ يزيد مدة حياة الشبكة. ويعتمد هذا الموسط على حجم الشبكة؛ وتحدد العديد من الخوارزميات مسبقاً حجم العنقود.
- نشر العقد node deployment: يمكن نشر المُحسّات (العقد) إما في موقع محدد مسبقاً أو في موقع عشوائي، وهذا يعتمد على التطبيق.
- استهلاك الطاقة energy consumption: حيث أنه في العديد من التطبيقات لا يمكن استبدال مصدر الطاقة الرئيسي أو البطارية بشكل متكرر، فيجب تلبية متطلبات الحفاظ على الطاقة، وذلك بتصميم خوارزمية للعمل لمدة أطول وذلك بخفض استهلاك الطاقة.

- تحمل الأخطاء fault tolerance: نظراً للعدد الكبير من تطبيقات شبكات المُحسّات اللاسلكية، واحتمال استخدامها في تطبيقات عسكرية أو حيوية. وقد يحدث فشل في المُحسّات التي يصعب استبدالها، وهنا يكون التشكيل الذاتي إلزامي self-configuration في هذه التطبيقات.
- تجميع المعطيات data aggregation: يتضمن إرسال المعطيات المُحسّوسة من العقد إلى المحطة القاعدية BS قدراً كبيراً من استهلاك الطاقة والمعطيات المحشوة. لذلك يعدّ تجميع المعطيات أمراً ضرورياً لتقليل حجمها. ولمعظم المُحسّات المعطيات ذاتها مما يتسبب بنقل معطيات متطابقة. ويمكن خفض هذا الحشو بوساطة عملية التجميع التي يقوم بها رأس العنقود CH.
- قابلية التصعّد (التوسيع) scalability: تختلف المتطلبات الخاصة بعدد العقد في شبكات المُحسّات اللاسلكية وفقاً لاختلاف التطبيقات ومساحة منطقة التغطية. لذا، يجب أن تكون منهجية العنقدة التراتبية قابلة للتصعّد (التوسيع).
- الاتصال communication: يجب أن يؤخذ الاتصال بين العناقيد وداخل العنقود بالحسبان أثناء التصميم بطريقة تستهلك أقل طاقة. تعتمد معظم الاتصالات بين العناقيد على قفزات متعددة مما يقلل الحمل على نفس العقدة بالقرب من المحطة القاعدية BS.
- تدوير رأس العنقود CH rotation: يجب تدوير دور رأس العنقود CH في كل جولة، أو يجب فحص الطاقة لتجنب الموت المبكر لرؤوس العناقيد CHs.

و تتلخص أهداف العنقدة clustering بالنقاط الآتية[3]:

- ضمان قابلية التصعّد (التوسيع) scalability للشبكة.
- إتاحة تجميع aggregation المعطيات، مما يقلل من إرسال المعطيات المحشوة.
- العمل على خفض استهلاك الطاقة والتلبث.

- تحاشي التصادمات collisions.
- موازنة الحمل بإسناد أدوار مختلفة لرؤوس العناقيد ولعُقد المُحسّات.
- زيادة مدة حياة الشبكة إلى الحد الأقصى.
- تحقيق جودة الخدمة المطلوبة.

ونعرض فيما يأتي بعض بروتوكولات التوجيه التراتبي:

2-3-3-2-1 بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة

في بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)، تُقسم الشبكة إلى عدد من العناقيد clusters، ويتكون كل عنقود من رأس عنقود Cluster Head (CH) ومجموعة من أعضاء العنقود Cluster Members (CMs)، التي تتحسس وتجمع المعطيات من البيئة المحيطة، وترسلها إلى المحطة القاعدية BS عبر رأس العنقود CH. في هذا البروتوكول تُنشئ آلية اختيار رأس العنقود CH بطريقة عشوائية، بحيث تتيح لجميع عقد المجموعة إمكانية أن تصبح رأس عنقود CH في إحدى الجولات rounds، مما يفيد بموازنة تبديد الطاقة للعقد؛ حيث أنّه من المفترض أن يكون رأس العنقود هو العقدة ذات الطاقة الأعلى في المجموعة؛ لكونها ستستهلك طاقة أكبر أثناء تأدية مهامها. إذ يعمل رأس العنقودCH كمركز معطيات محلي لجميع العناقيد، ويستخدم جدولة scheduling النفاذ المتعدد باقتسام الزمن Time Division Multiple Access (TDMA) لإرسال المعطيات المجمعة إلى المحطة القاعدية BS بدون تصادمات داخل العنقود وبين العناقيد.

في العنقدة السكونية static clustering، ترسل رؤوس العناقيد CHs المعطيات بشكل مستمر، وتستهلك المزيد من الطاقة، وتموت بسرعة. بينما يعمل بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة 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**

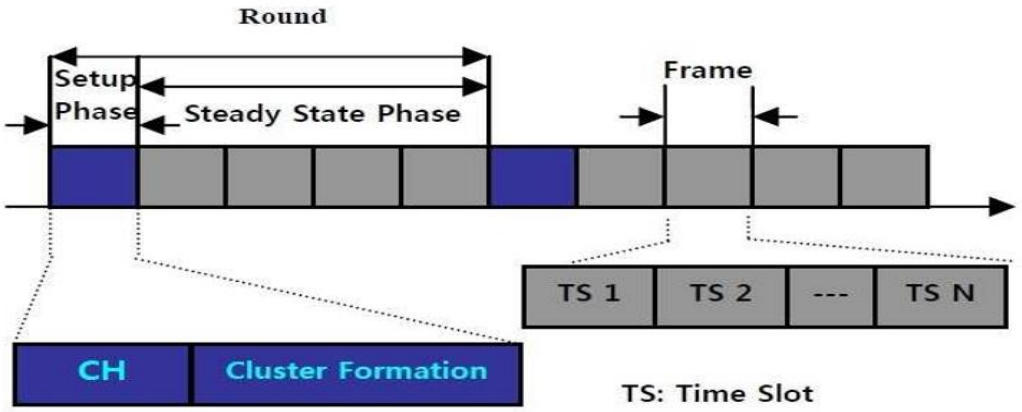
في طور الإعداد وبعد إنشاء العناقيد تقرر كل عقدة فيما إذا كانت ستشارك في عملية انتقاء رأس العنقود في الجولة الحالية أم لا. وذلك باختيار رقم عشوائي ما بين 0 و1. وتجري مقارنة هذا الرقم مع قيمة عتبة يرمز إليها بالرمز $T(N_i)$، وتعطى هذه العتبة بالعلاقة (2-4)[26].

$$T(N_i) = \begin{cases} \dfrac{p}{1 - p * \left(rmod \dfrac{1}{p}\right)} & if\ N_i \in G \\ 0 & Otherwise \end{cases} \qquad (4-2)$$

وفيها تمثل p احتمال أن تصبح العقدة رأس عنقود في الجولة الحالية r، وG مجموعة العقد التي لم يجر اختيارها كرؤوس عناقيد CHs في الجولات $\frac{1}{p}$ السابقة، وتصبح العقدة رأس عنقود CH للجولة الحالية إذا كان الرقم العشوائي أقل من العتبة $T(N_i)$.

تبث رؤوس العناقيد CHs رسالة إعلان advertisement (ADV) باستخدام البروتوكول CSMA-MAC. ولدى استقبال هذه الرسالة تقرر جميع العقد التي ليست رؤوس عناقيد إلى أي رأس عنقود ستنضم بناءً على شدة الإشارة المستقبلة Received Signal Strength (RSS). يُنشئ كل رأس عنقود CH جدول نفاذ متعدد باقتسام الزمن TDMA ويرسله إلى العقد الأعضاء Cluster Members (CMs) لتحاشي التصادمات أثناء إرسال المعطيات إلى رأس العنقود CH. ويستقبل كل عضو في العنقود CM جدول النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA، ثمّ ينتقل بناءً عليه إلى حالة النوم حتى الوصول إلى الحيز الزمني المجدول المخصص له. في تلك اللحظة فقط، يمكن لعضو

العنقود إرسال المعطيات. يوضح الشكل (2−18) عملية إنشاء جدول النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA، وفيه يشير TSi إلى الحيز الزمني رقم i [26].



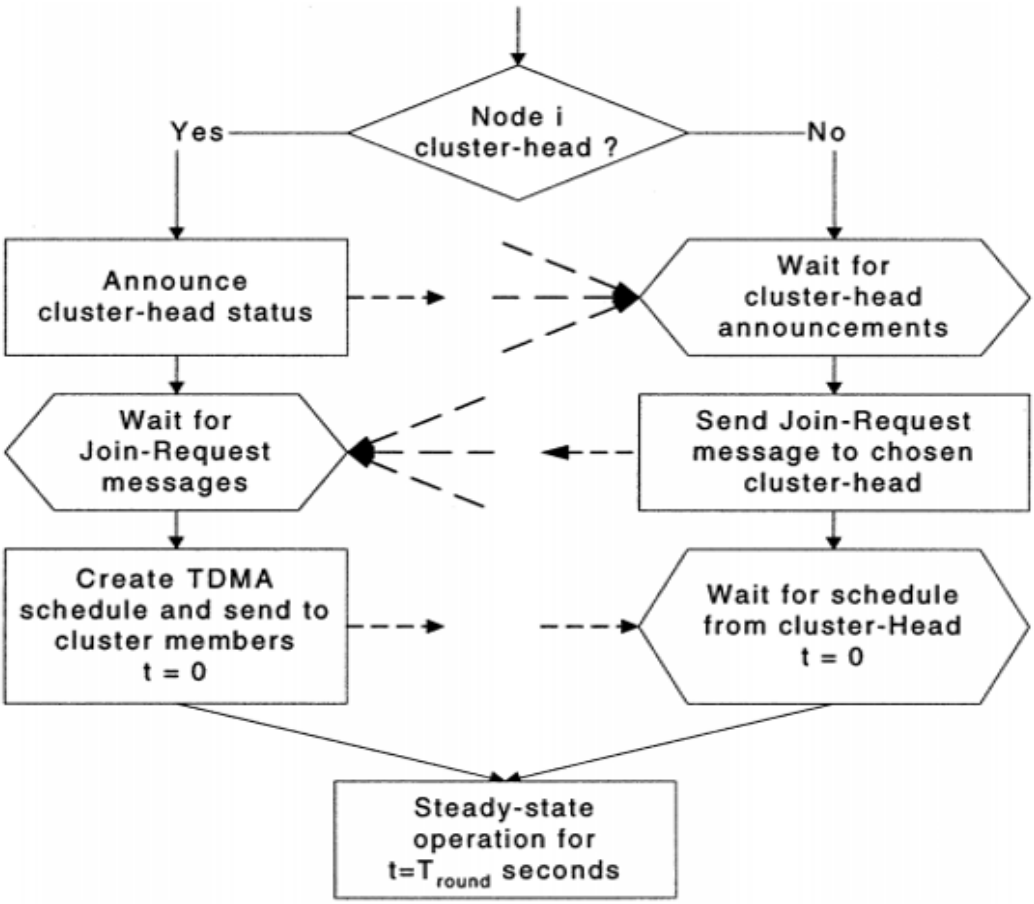
الشكل (2−18) آلية عمل إطار البروتوكول LEACH [26]

من الشكل(2−18) يمكن استنتاج أن طور الإعداد يتلخص باختيار رأس العنقود CH، ثم تشكيل العنقود وذلك بانضمام كل مجموعة عقد إلى عنقود محدد وفقاً لشدة الإشارة المستقبلة RSS من قِبل كل عقدة على حدة، ويوضح المخطط التدفقي المبيّن في الشكل(2−19) هذه الآلية.

- **طور الحالة المستقرة**

في نهاية طور الإعداد، يمكن لكل أعضاء العناقيد CMs 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 CMs. إذ يفترض البروتوكول أن لدى كل عضو عنقود معطيات للإرسال.

بالإضافة إلى ذلك، عندما ينتهي الحيز الزمني أو زمن الجولة، يقوم رأس العنقود CH بتنفيذ عملية ضغط المعطيات المستقبلة من أعضاء العنقود CMs، ويُرسل المعطيات الناتجة إلى المحطة القاعدية BS.

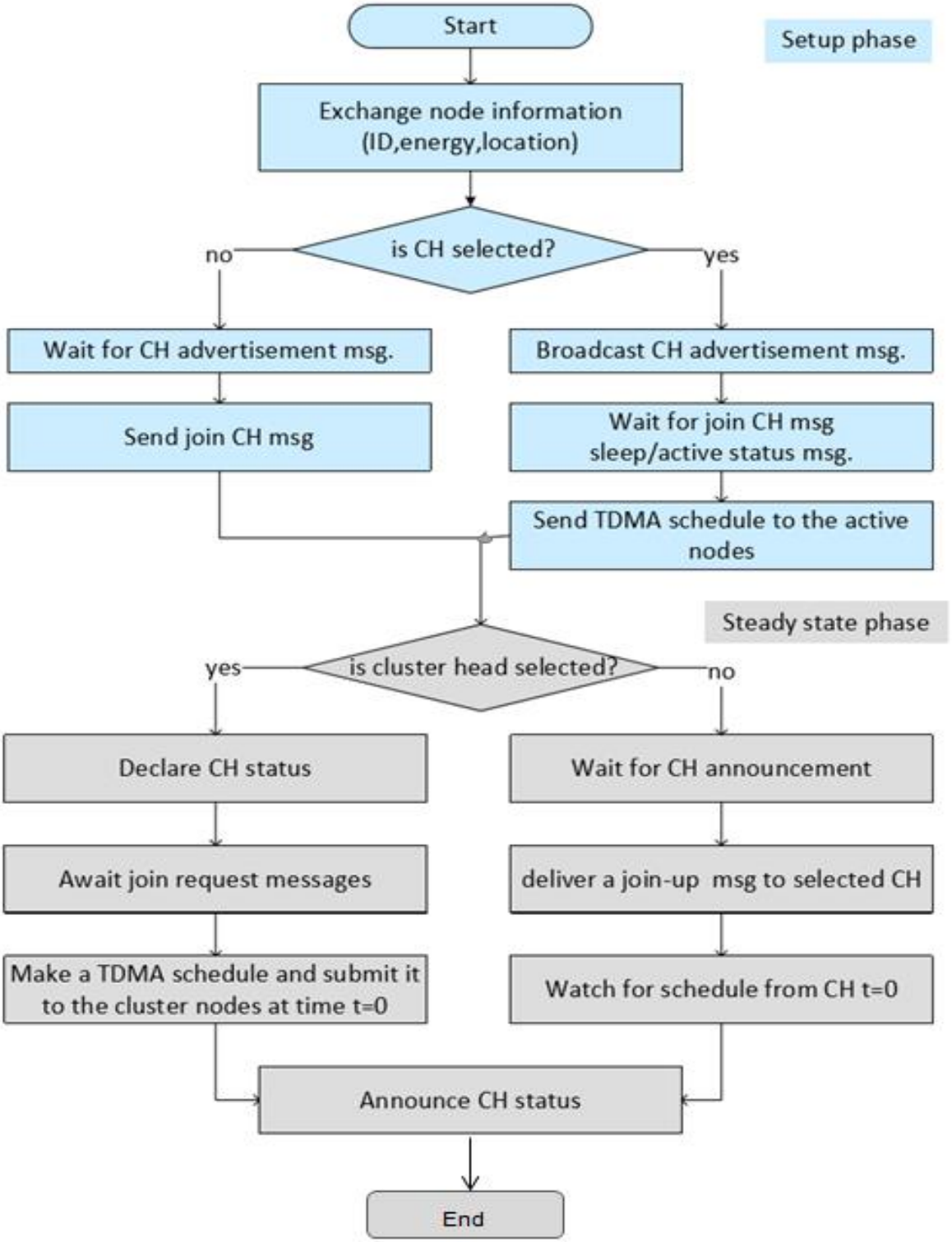


الشكل (2–19) خوارزمية تشكيل العناقيد في البروتوكولLEACH [27]

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 عملية طور الحالة المستقرة لبروتوكول تراتبية عنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة LEACH، ومن ثمّ يمكن لعقد المُحسّات التي لم تُنتخب بعد كرأس عنقود CH في الجولات السابقة، أن تصبح رأس عنقود CH في الجولات اللاحقة[26].

يوضح الشكل (2–20) طوري الإعداد والحالة المستقرة للبروتوكول LEACH.

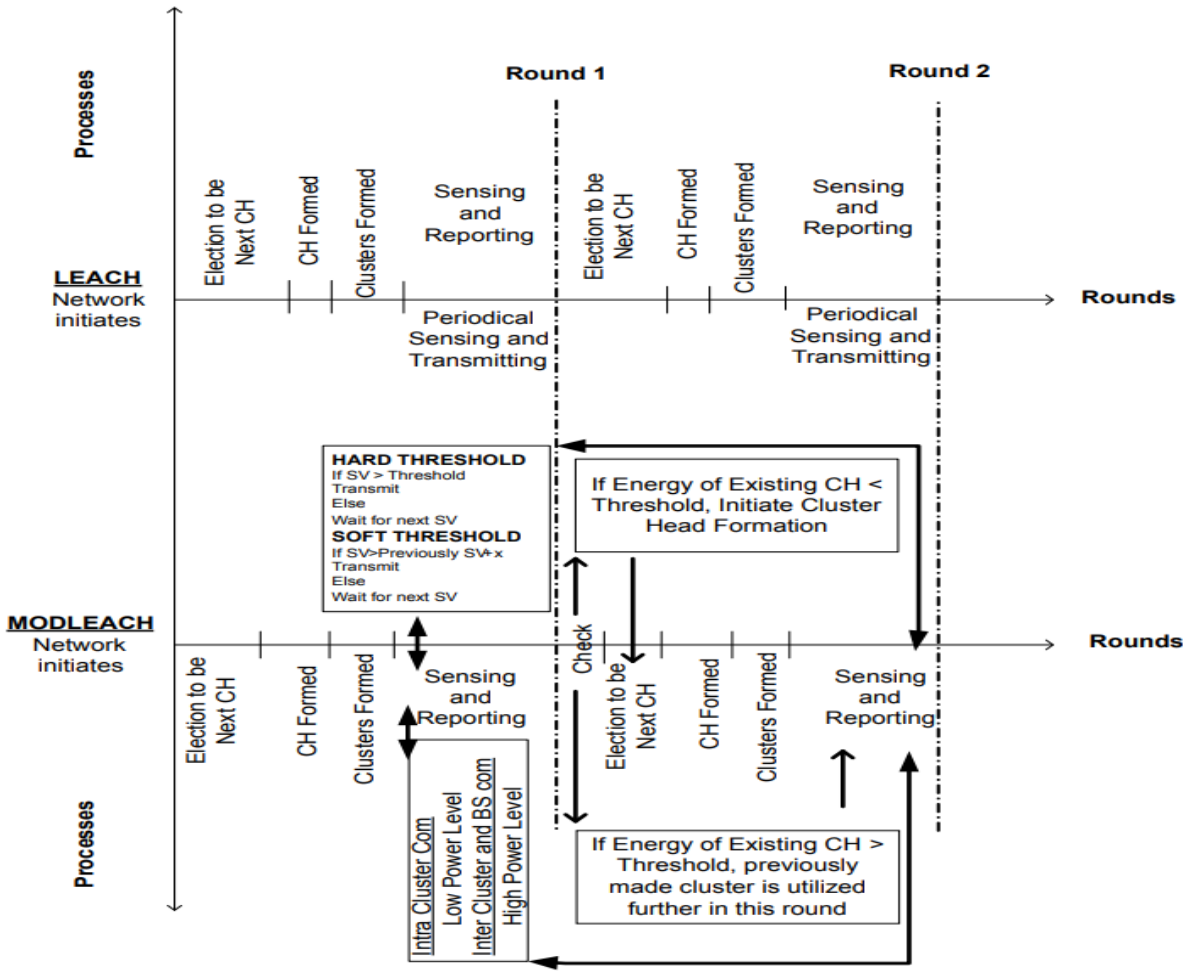


الشكل (2–20) المخطط التدفقي لطوري الإعداد والحالة المستقرة للبروتوكول LEACH [28]

2-3-2-2 بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة المُعدّل

يضيف بروتوكول التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة المُعدّل modified LEACH (MODLEACH) على البروتوكول التقليدي LEACH ميزتين هما مخطط فعال لاستبدال رأس العنقود، 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 المُعدّل 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 يكن قد استهلك 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. أمّا إذا كان لرأس العنقود طاقة أقل من العتبة المطلوبة، فيجري استبداله وفقاً للآلية المتبعة في الخوارزمية LEACH.

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؛ لذا يستخدم البروتوكول مستوى طاقة منخفض من أجل الإرسال داخل العنقود، مع مراعاة وجود مستوى طاقة أعلى للإرسال بين العناقيد، أو بين 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 المُعدّل العتبة القاسية hard والعتبة اللينة soft أثناء تحسس الظواهر، مما يعطي نتائج أفضل. ويبيّن الشكل (2-21) آلية عمل البروتوكول MODLEACH [29].



الشكل (2–21) آلية عمل البروتوكول MODLEACH [29]

2–3–3–2–3 بروتوكول الجمع الفعّال من حيث الاستطاعة في منظومات معلومات المُحسّات

يعدّ بروتوكول الجمع الفعّال من حيث الاستطاعة في منظومات معلومات المُحسّات Power-Efficient GAthering in Sensor Information Systems (PEGASIS) نسخة مُحسّنة من بروتوكول تراتبية عنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة LEACH. ويتبع البروتوكول PEGASIS نهجًا معتمداً على السلسلة chain-based، وفيه تشكل جميع عقد المُحسّات منظومة مُسلسلة chain system، ويجري اختيار عقدة رائدة leader node واحدة بشكل عشوائي لتنفيذ عملية إرسال المعطيات إلى العقدة المصب sink.

ينطوي بروتوكول PEGASIS على طورين لتحقيق العملية السِلْسِليّة chain process وهما[22] :

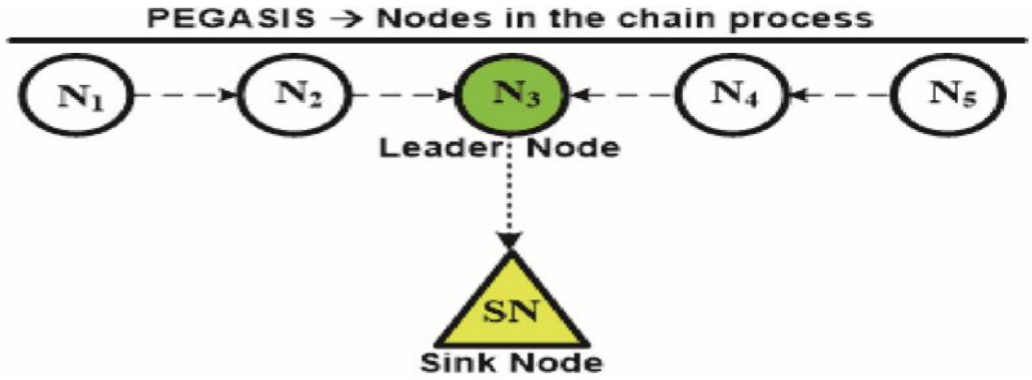
- **تشكيل السلسلة chain formulation:**

يعتمد هذا الطور في تشكيل السلسلة على طريقة جشعة greedy، أي من عقد البداية إلى العقدة الأخيرة عند العقدة المصب، ويجري انتقاء العقدة الأقرب للعقدة السابقة كالعقدة اللاحقة، وبنفس الطريقة ترتب جميع العقد نفسها وفق هذا النمط حتى تشكيل سلسلة مناسبة. وعلاوة على ذلك، فإن العقدة في السلسلة قادرة على وضع نفسها في موضع واحد فقط. وفي كل جولة، يجري انتقاء عقدة رائدة leader node بشكل عشوائي. وكما يستخدم البروتوكول خوارزمية جشعة مع عدّ جميع عقد المُحسّات مدركة شمولياً لظروف الشبكة وموضع المُحسّ. وعندما تفشل عقدة مُحسّ في عملها بسبب فقد الاستطاعة، تعيد السلسلة بناء ذاتها اعتماداً على الطريقة الجشعة، وبإهمال عقد المُحسّات الفاشلة.

- **جمع المعطيات data gathering:**

يتجنب مبدأ بروتوكول الجمع الفعّال من حيث الاستطاعة في منظومات معلومات المُحسّات PEGASIS تشكيل العناقيد ورأس العنقود CH. إذ يعتمد على عقدة واحدة فقط كعقدة رائدة بدلاً من عقد متعددة في السلسلة لإرسال المعطيات المجمعة إلى عقدة المصب sink. وهكذا يجري جمع المعطيات الخام ونقلها من عقدة إلى أُخرى، ثم يجري تجميعها، ثم تقوم العقدة الرائدة بتوجيهها إلى عقدة المصب.

يوضح الشكل (2-22) عملية تشكيل السلسلة وجمع المعطيات وعملية الإرسال؛ وفيه رتبت العقد N1 و N2 و N3و N4 و N5 نفسها في بنية سلسلة، في حين جرى اختيار N3 بشكل عشوائي كعقدة رائدة، أمّا العقد المتبقية فهي العقد المشاركة العادية. يقوم N1 بإحالة معطياته إلى N2، وبعدها تقوم N2 بتجميع المعطيات المحصلة وإرسالها إلى N3. وعند ذلك تقوم العقدة N3 ببث رسالة علّام token message إلى N5. ترسل العقدة N5 معطياتها إلىN4، ثم تقوم N4 بتجميع المعطيات المحصلة وترسلها إلى N3. تقوم العقدة N3 لكونها عقدة رائدة بالتقاط المعطيات من جارتيّها، ثم تدمجها مع المعطيات المحصلة من قبلها، وتقوم بتجميعها ثم إرسالها إلى العقدة المصب SN [22].



الشكل(2-22) تشكيل السلسلة ومعالجة المعطيات[22]

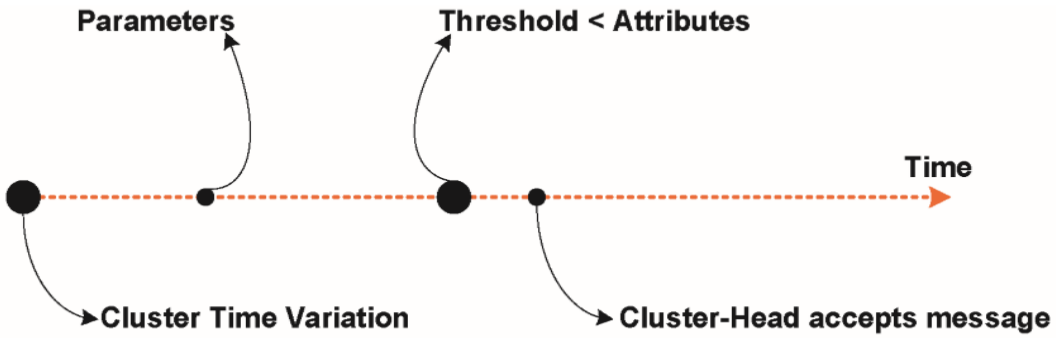
2-3-3-2-4 بروتوكول شبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبة

إنّ بروتوكول شبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبة Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network (TEEN) هو بروتوكول توجيه تراتبيّ تفاعلي؛ فهو مصمم للاستجابة للتغيرات المفاجئة في الخصائص المُتحسسة مثل درجة الحرارة والاهتزاز.

إنّ بنيان شبكة المُحسّات هو عنقدة تراتبيّة تربط عقد المُحسّات، وتشكل عنقود من العقد يجري فيه تشغيل كل عقدة من قبل رأس عنقود. وتقوم رؤوس العناقيد بجمع المعطيات من العقد الأعضاء في عناقيدها، ثم تحيلها إلى العقد رؤوس العناقيد الأعلى، ثم تقوم رؤوس العناقيد بتجميع المعطيات وتسليمها إلى العقدة المصب. في هذا السيناريو تبث رؤوس العناقيد CHs قيمتين لعتبتين إلى العقد الأعضاء بعد تشكل العناقيد هما: العتبة القاسية Hard (HT) Threshold والعتبة اللينة Soft Threshold (ST) للتحكم بكمية المعطيات المُحسّوسة المنقولة[30].

تنقل العقد المعطيات المُحسّوسة إلى رؤوس العناقيد CHs في الجولة الحالية فقط إذا كانت القيمة الحالية للخاصيّة المُحسّوسة sensed attribute أكبر من قيمة العتبة القاسية HT، ثم تُخزن هذه القيمة المُحسّوسة في متغير داخلي internal variable يسمى القيمة المُحسّوسة Sensed Value (SV)، ولا تقوم بالإرسال مرة أُخرى إلا اذا كان الفرق بين القيمة الجديدة والقيمة المُحسّوسة SV المُخزنة أكبر أو يساوي قيمة العتبة اللينة ST. وبذلك تمنع العتبة

اللينة ST عمليات الإرسال المتكرر في حال استمرت العقدة بالحصول على معطيات متماثلة، أو حصلت على معطيات تختلف عن المعطيات السابقة بفروقات طفيفة. ويمكن تعديل قيمة العتبة اللينة ST لتلبية احتياجات المستخدمين. ينجم عن جعل العتبة اللينة ST صغيرة تحسين ضبط accuracy الشبكة على حساب استخدام أعلى للطاقة. ونتيجة لذلك، يجب على المستخدمين التحكم في المقايضة بين مردود (كفاءة) الطاقة والضبط بوساطة تعديل قيمة العتبة اللينة ST [31]. يبيّن الشكل(2-23) التسلسل الزمني timeline لتشغيل بروتوكول التوجيه لشبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبة TEEN [22].



الشكل(2-23) التسلسل الزمني لتشغيل بروتوكول شبكة مُحسّات فعّال من حيث الطاقة حسّاس للعتبة TEEN [22]

2-3-3-2-5 بروتوكول شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساسة للعتبة متكيّفة

اقتُرح بروتوكول شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساسة للعتبة متكيّفة AdaPtive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network (APTEEN) لتحسين بروتوكول شبكة مُحسّات فعّالة من حيث الطاقة حسّاسة للعتبة TEEN، وبنيانه مماثل لبنيان البروتوكول TEEN [22].

ويعتمد هذا البروتوكول على بروتوكولات التوجيه الاستباقية proactive والتفاعلية reactive معاً، حيث تحافظ البروتوكولات الاستباقية على قوائم جديدة للوجهات ومساراتها؛ وذلك بنشر جداول التوجيه بشكل متكرر في جميع أنحاء الشبكة. بينما يكتشف بروتوكول التوجيه التفاعلي مساراً عند الطلب بإرسال الكثير من رزم طلب التوجيه route request packets إلى الشبكة.

إن بروتوكول شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساس للعتبة متكيّفة APTEEN هو بروتوكول هجين يجمع بين الوظائف الرئيسية لكل من البروتوكولات الاستباقية والتفاعلية. وهذا يلخص جمع المعطيات بشكل دوري والاستجابة لوقت الإجراءات الحرجة critical actions.

في هذا البروتوكول بمجرد تحديد رأس العنقود CH، يقوم ببث الموسطات الآتية[30]:

- السمات (أو الخصائص) (attributes (or characteristics: وهي عبارة عن مجموعة من الموسطات المعنية بالحصول على المعطيات.
- العتبات thresholds: كما في بروتوكول شبكة مُحسّات فعالة من حيث الطاقة حساس للعتبة TEEN؛ وتشتمل على قيمتين هما العتبة القاسية HT والعتبة اللينة ST .
- الجدولة schedule: يُستخدم جدول النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA لتعيين مدة زمنية لكل مُحسّ في شبكة المُحسّات اللاسلكية.
- مدة التعداد count time: وهي المدة القصوى بين تقريرين متتاليين يجري توجيههما من المُحسّات.

تراقب المُحسّات باستمرار محيطها، فبمجرد أن يتحسس المُحسّ لقيمة مُحسّوسة تتجاوز قيمة العتبة القاسيةHT، فإنها ترسل المعطيات، ويبدأ الإرسال اللاحق عندما تتغير قيمة السمة المُحسّوسة إلى قيمة أكبر أو تساوي قيمة العتبة اللينة ST. والاستثناء من هذه القاعدة هو أنه إذا لم تنقل المُحسّات أي معطيات أو معلومات لمدة معينة تعادل مدة التعداد CT، فتطلب المنظومة إعادة تجميع المعطيات وإعادة إرسالها.

يُستخدم النفاذ المتعدد باقتسام الزمن TDMA لإعداد الجدولة، حيث يُخصص حيز زمني TS لكل مُحسّ في المجموعة من أجل إرسال معطياته، وذلك لتجنب التصادم بين معطيات المُحسّات المختلفة ولا سيما المجاورة لبعضها البعض[30].

2-3-3-2-6 بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة

بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة Distributed Energy Efficient Clustering (DEEC) 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(2-5) [32].

$$p_j = p_o \left[1 - \frac{\bar{E}(r) - E_j(r)}{\bar{E}(r)}\right] = p_{opt} \frac{E_j(r)}{\bar{E}(r)} \qquad (5-2)$$

حيث $E_j(r)$ هي الطاقة المتبقية في العقدة j في الجولة r، و $\overline{E}(r)$ هي متوسط الطاقة المتاحة في الشبكة في الجولة r؛ والتي تعطى بالعلاقة (2-6).

$$\overline{E}(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \qquad (6-2)$$

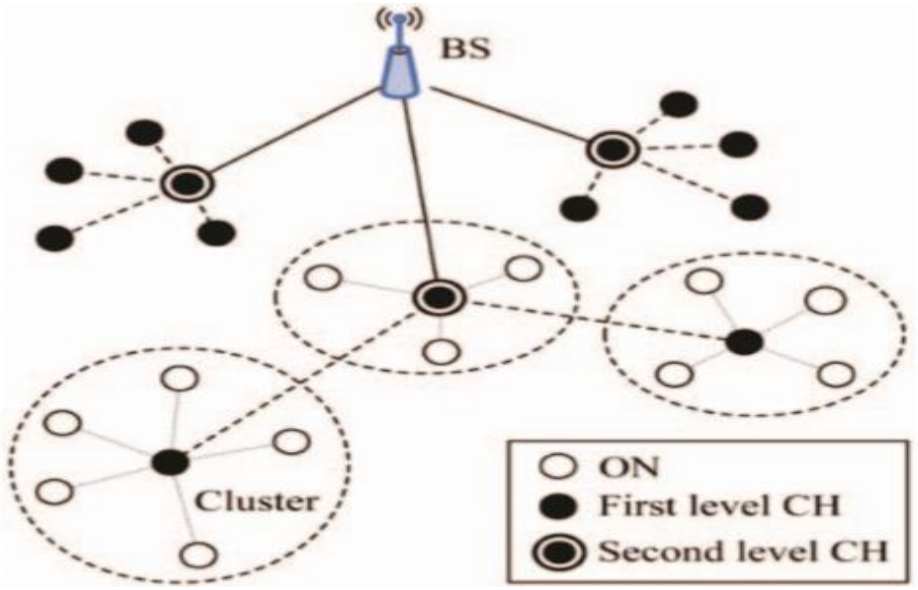
حيث E_{total} الطاقة الكلية للشبكة، وN هو العدد الكلي للعقد في الشبكة، و R هو عدد الجولات الكلي؛ والذي يُعطى بالعلاقة (2-7).

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}} \qquad (7-2)$$

ويبيّن الشكل(2-24) آلية عمل بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة DEEC، والذي يعتمد على نمط القفزات المتعددة ضمن الاتصالات بين العناقيد[32].

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

إذا أكملت عقدة المُحسّ دورة تنفيذ بروتوكول موزع فعال من حيث الطاقة هجين (HEED) Hybrid Energy Efficient Distributed من دون أن تصبح رأس عنقود CH أو أن تتصل بعنقود، فسوف تعلن عن نفسها على أنها رأس عنقود CH نهائي [22].

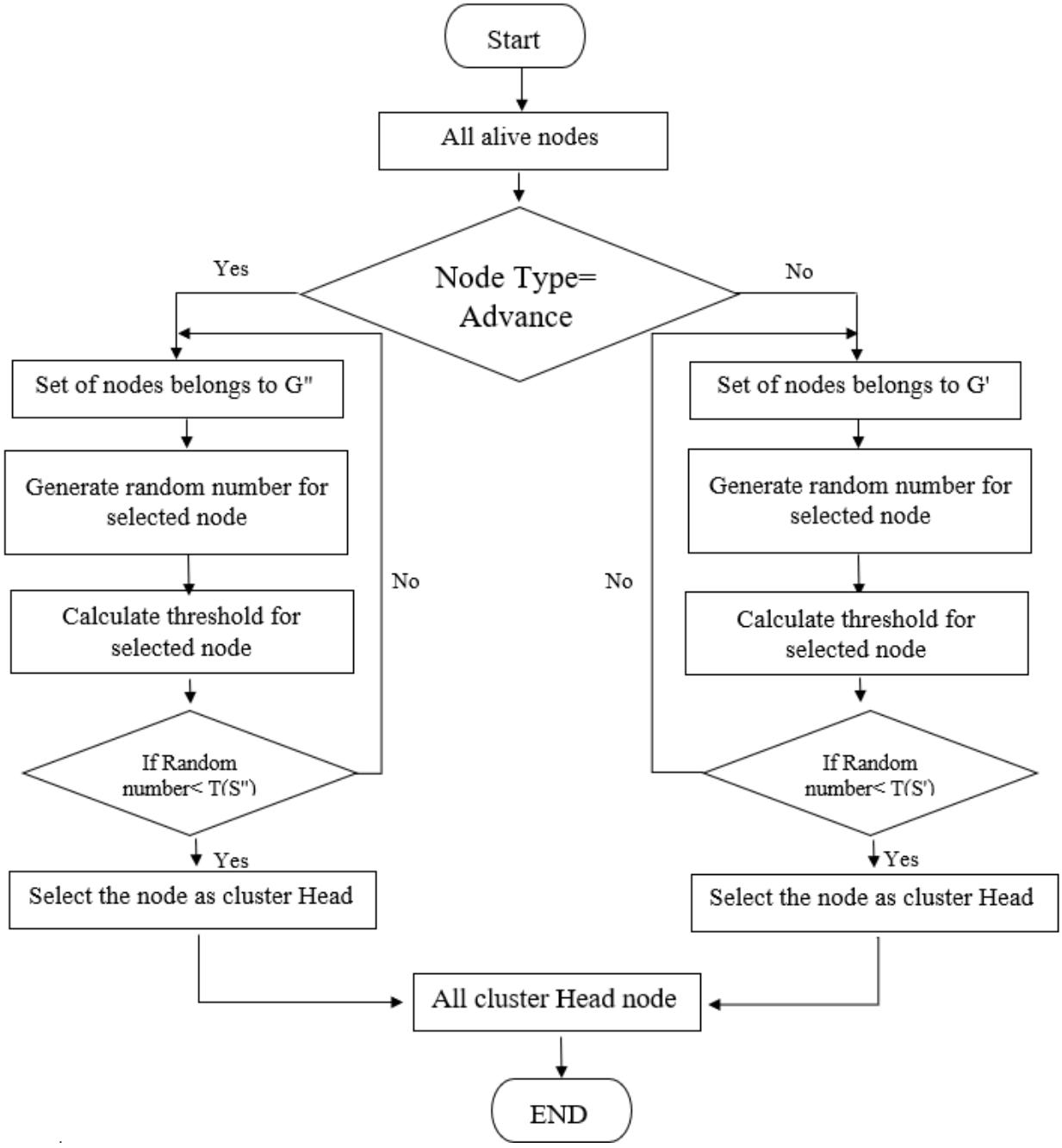


الشكل(2-24) عمل بروتوكول عنقدة موزعة فعال من حيث الطاقة DEEC [32]

2-3-3-2-7 بروتوكول الانتخاب المستقر

بروتوكول الانتخاب المستقر Stable Election Protocol (SEP) هو بروتوكول غير متجانس مكوّن من مستويين يقدم نوعين من العقد هما العقد العادية normal والعقد المتقدمة advanced. 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[33] .

يُبيّن الشكل(2-25) آلية عمل بروتوكول الانتخاب المستقر، وفيه تمثل 'G العقد العادية التي لم تصبح رؤوس عناقيد، و('T(S عتبة العقد النظامية (العادية)، و "G العقد المتقدمة التي لم تصبح رؤوس عناقيد، و("T(S عتبة العقد المتقدمة [34].



الشكل(2-25) آلية عمل بروتوكول الانتخاب المستقر SEP [34]

2-3-3-3 نهج التوجيه المُعتمد على الموضع

في نهج التوجيه المعتمد على الموضع location based routing approach، تتمتع العقد بالقدرة على تحديد موقعها الحالي، وذلك باستخدام بروتوكولات المَوضَعة localization protocols المختلفة[21].

وتجري تهيئة المسارات بناءً على تقدير موضع المُحسّ. ومن أجل الحفاظ على طاقة العقدة، يجري ابتدال بعض العقد إلى وضع النوم sleep، عندما لا يكون ثمة أحداث ونشاطات في موقع هذه العقد[22].

2-3-4 مخططات حفظ الطاقة المعتمدة على الحركية

أصبحت حركية العقد node mobility حلاً حديثاً لجمع المعطيات في شبكات المُحسّات اللاسلكية. في الواقع، يمكن نشر العقد النقالة بطريقتين: إمّا باستخدام نقّالة mobilizer مركبة على العقدة نفسها أو بوضع العقدة على عنصر نقال مثل السيارة car. وفعلياً، فإنّ النقّالات تستهلك طاقة، لذا يمكن أن تقتصر الحركية على العقد ذات الطاقة العالية.

ثمة حاجة لبنيان مخلخل sparse أثناء تصميم شبكة المُحسّات لضمان تحقيق جميع متطلبات التطبيق. ولهذا السبب يخفض عدد العقد المنشورة مع تحرير قيد التوصيلية، نظراً لأن العناصر النقّالة يمكنها بلوغ جميع أجزاء الشبكة، مما يخفض استهلاك الطاقة. وفي الواقع فإن الرزم المنقولة تعبر الشبكة إلى المصب في مسار متعدد القفزات؛ لذا عندما يكون المصب sink ساكناً، تكون بعض المسارات محمّلة أكثر من غيرها. ومن ثمّ، فإن العقد الأقرب إلى المصب عرضة لنضوب الطاقة. لذا ينبغي أن تكون الحركية تناوبية بين العقد لتبسيط عملية جمع المعطيات. أمّا بالنسبة للعقد العادية فتظل في حالة راحة idle بانتظار قيام جامع collector المعطيات النقال بتوجيه الرسائل إليها؛ وبذلك يجري تخفيض أخطاء الوصلة وتكاليف الاتصال[24].

الفصل الثالث

التنفيذ العملي والنتائج

Implementation and Results

3-1 المقدمة

في هذا الفصل سنقوم بتقييم طريقتيين من طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية وهما: طريقة دورة العمل (التشغيل) duty cycling باستخدام منهجية واعية للنوم والنشاط مقودة بالموضع، وطريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية؛ وقد اخترنا منها أربعة بروتوكولات شائعة الاستخدام هي: التوجيه التراتبي لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة LEACH، والتوجيه التراتبي المُعدل لعنقدة تكيُّفيّة منخفضة الطاقة MOD-LEACH، وبروتوكول العنقدة الموزعة الفعال من حيث الطاقة DEEC، وبروتوكول الانتخاب المستقر SEP. وقد اخترنا أربعة مقاييس أداء شائعة الاستخدام هي: مدة حياة الشبكة ومدة الاستقرار والطاقة الكلية المتبقية في الشبكة ومعدل التدفق، وذلك من أجل عدة سيناريوهات عمل متعلقة بتغيير موقع المحطة القاعدية، وتغيير عدد المُحسّات في الشبكة، وتغيير حجم رزم المعطيات.

بعد ذلك يبدأ طور إعداد الشبكة، والذي يتضمن اختيار رؤوس العناقيد وتشكيل العناقيد، ثم يجري إرسال معطيات البيئة المحيطة من المُحسّات إلى المحطة القاعدية؛ وذلك ضمن طور إرسال المعطيات.

3-2 الأدوات المُستخدمة في البحث

استخدمنا في هذا العمل برمجية ماتلاب Matlab الإصدار 2021a منصّبة على حاسوب من نوع دل DELL، له المواصفات الآتية:

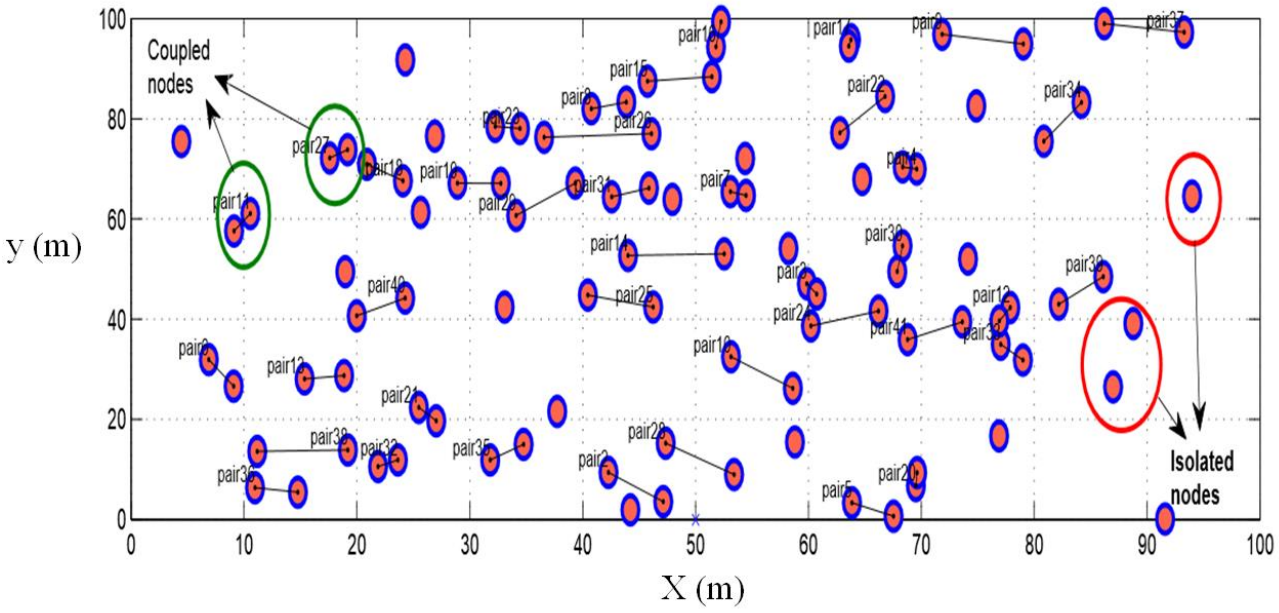
- معالج: Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHZ.
- ذاكرة نفاذ عشوائي RAM مثبتة: 12GB.

3-3 طريقة دورة العمل باستخدام منهجية واعية للنوم والنشاط مقودة بالموضع

تندرج هذه المنهجية تحت طريقة دورة العمل التي جرى عرضها بالتفصيل في الفقرة 2-3-2، والتي اشتملت على عدة تصنيفات فرعية. لذا في هذه الفقرة سنعرض تفاصيل طريقة دورة العمل التي جرى اتباعها وتنفيذها عملياً.

بعد نشر المُحسّات بشكل عشوائي في الشبكة، يجري تقسيمهم إلى أزواج pairs؛ حيث تقوم المُحسّات بمشاركة مواقعها مع المحطة القاعدية اعتماداً على المنظومة الشاملة لتحديد المواقع Global Positioning System (GPS).

تقوم المحطة القاعدية بعد ذلك بتطبيق خوارزمية ارتباط محددة تتعلق بدراسة أقرب مسافة بين المُحسّات، ويجري بناءً عليها اختيار لكل مُحسّ في الشبكة قرين خاص به، بحيث تتشكل أزواج من العقد إحداثيات كل منها (x,y)، كما هو مبيّن في الشكل (3-1).



الشكل (3-1) نموذج ارتباط الشبكة[35]

في بداية كل جولة round يتناوب كل زوج من المُحسّات بين نمطي العمل: النشاط والنوم؛ مما يقود إلى توفير مهم في استهلاك الطاقة على مستوى مجموع المُحسّات؛ وذلك لأن المُحسّات التي في نمط النوم sleep تغلق المرسل-

المستقبل transceiver الخاص بها، ومن ثمَّ تقلل من الاستماع الخامل idle listening، وتتجنب الاستماع الزائد overhearing الذي ينتج عن التحسس لمعلومات مكررة من قِبلها ومن قِبل المُحسّ المجاور لها (القرين)، نتيجة تموضعهما في مكانين قريبين من بعضهما وقد اخترتا المسافة العظمى الفاصلة والتي تُقدّر بالقيمة 10 متر[35]. وبالمقابل قد تحتوي الشبكة على مُحسّات معزولة؛ أي لا يتوافر بالقرب منها (على مدى عشرة أمتار) أي مُحسّ؛ ومن ثمَّ لن ترتبط مع مُحسّ آخر، وهذا يفرض عليها البقاء في نمط عمل النشط active بشكل دائم في كل الجولات حتى تفنى طاقتها[35].

3-4 مقاييس الأداء المختارة

اخترنا أربعة مقاييس أداء لمقارنة طرائق تحسين مردود (كفاءة) الطاقة في شبكات المُحسّات اللاسلكية المدروسة هي:

- مدة الاستقرار stability period: وهو الزمن الفاصل من بدء عمليات الشبكة حتى موت أول عقدة مُحسّ[36].

- مدة حياة الشبكة network lifetime: وهي المدة من بداية عمل الشبكة حتى موت آخر عقدة مُحسّ فيها[36].

- الطاقة المتبقية remaining energy: ينجم استهلاك الطاقة في المُحسّ عن عمليات التحسّس للبيئة المحيطة ومعالجة المعطيات وإرسالها. وتُعطى كمية الطاقة المستهلكة في كل عقدة (مُحسّ) في الشبكة بوساطة العلاقة(3-1) [37].

$$E_{consumed} = E_{initial} - E_{residual} \qquad (1-3)$$

وفيها يعبر الرمز $E_{consumed}$ عن الطاقة الكلية المستهلكة من قِبَل العقدة، و$E_{initial}$ الطاقة الإبتدائية لكل عقدة، أمّا الرمز $E_{residual}$ فيدل على الطاقة المتبقية في العقدة. وفي نهاية كل جولة يجري حساب الطاقة المتبقية[37].

وتُعطى كمية الطاقة الكلية المستهلكة في الشبكة بوساطة العلاقة(3−2) [37].

$$\sum_{c=1}^{N} E_{consumed} = \sum_{i=1}^{N} E_{initial} - \sum_{r=1}^{N} E_{residual} \qquad (2-3)$$

ومن ثمّ تُعطى قيمة الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة بالعلاقة(3-3)

$$\sum_{r=1}^{N} E_{residual} = \sum_{i=1}^{N} E_{initial} - \sum_{c=1}^{N} E_{consumed} \qquad (3-3)$$

- معدل التدفق throughput: ويعرّف على أنّه مجموع كمية رزم المعطيات الكلية المرسلة من العقد إلى رؤوس العناقيد CHs، وكمية رزم المعطيات الكلية التي تتلقاها المحطة القاعدية BS من رؤوس العناقيد CHs [36].

3−5 المحاكاة المُنفذة

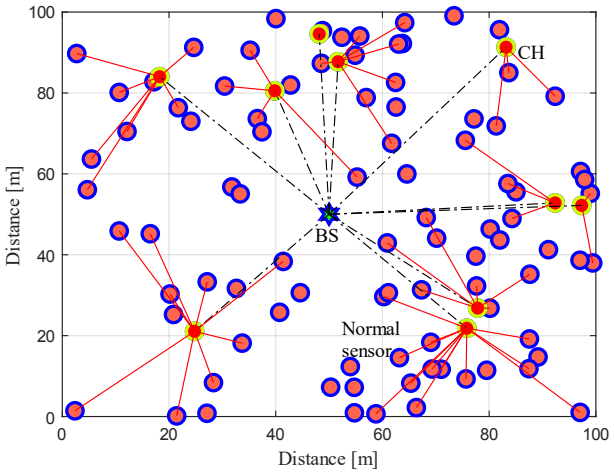
بغية إغناء الدراسة المنفذة في هذا البحث سنقوم بمحاكاة عدة سيناريوهات للشبكة؛ وتشتمل هذه السيناريوهات على تغيير موقع المحطة القاعدية، وتغيير عدد عقد المُحسّات في الشبكة، وأخيراً تغيير حجم رزم المعطيات المتبادلة في الشبكة. ويبيّن الجدول(3−1) موسطات (بارامترات) parameters المحاكاة.

الجدول (3-1) موسطات المحاكاة

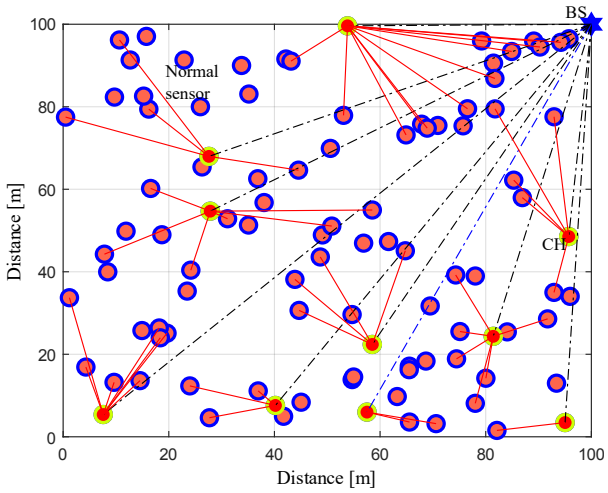
الموسطات	القيم والواحدات	ملاحظات
امتداد الشبكة (Ym, Xm)	100 x 100 (m^2)	Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[36]
موقع المحطة القاعدية BS	(25,200) ، (100,100) ، (50,50)	Krishnan, K., et al. (2021),[38]
عدد الجولات الأعظم (r)	5000	[لباحثة]
عدد المُحسّات (N)	50, 100, 200, 500	Yousif, Z., et al. (2021),[26]
طول رزمة المعطيات	2000 ، 4000 bits	Farahmand, E., et al,2021,[39] Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[36]
الطاقة الإبتدائية لكل مُحسّ (E_0)	0.5 J	Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[36]
الطاقة المحررة في البت بدارة المرسل($E_{Tx-elec}$)	50 nJ / bit	Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[36]
الطاقة المحررة في البت بدارة المستقبل ($E_{Rx-elec}$)	50 nJ / bit	Jaffri, Z. U. A., et al,2022,[36]
الطاقة المبدة بالبت من أجل التجميع (E_{da})	5 nJ / bit/signal	Farahmand, E., et al,2021,[39]
سمة مضخم المرسل بحالة تعدد المسارات (ϵ_{mp})	0.0013 pJ/ bit / m^4	Farahmand, E., et al,2021,[39]
سمة مضخم المرسل بحالة الفضاء الحر(ϵ_{fs})	10 pJ/ bit / m^2	Farahmand, E., et al,2021,[39]
سمة مضخم المرسل بحالة تعدد المسارات (داخل العنقود) عندما $d \geq d1$	$\epsilon_{mp}/10$	من أجل MODLEACH [29]
سمة مضخم المرسل بحالة الفضاء الحر (داخل العنقود) عندما $d<d1$	$\epsilon_{fs}/10$	من أجل MODLEACH [29]
المدى الأعظم بين الأزواج	10 m	من أجل duty cycling [35]

3-5-1 السيناريو الأول: دراسة تأثير تغيير تموضع المحطة القاعدية

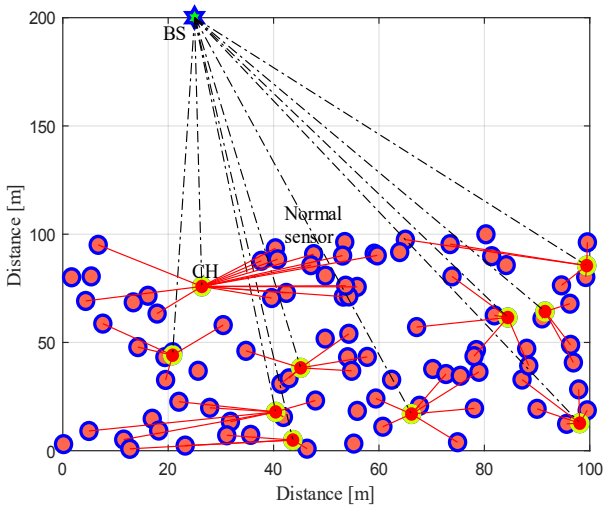
إنّ لموضع المحطة القاعدية تأثير كبير على استهلاك الطاقة في الشبكة. ومن أجل تحليل التأثير الناتج سنأخذ بالحسبان ثلاث حالات لتموضع المحطة القاعدية هي: الحالة الأولى يكون فيها تموضع المحطة القاعدية في منتصف الشبكة، وفي الحالة الثانية يكون تموضع المحطة القاعدية على حافة الشبكة، أما في الحالة الثالثة فيكون تموضع المحطة القاعدية خارج الشبكة[38]. والحالات الثلاث موضحة في الشكل (3-2) (a) و(b) و(c) على الترتيب.



(a)



(b)



(c)

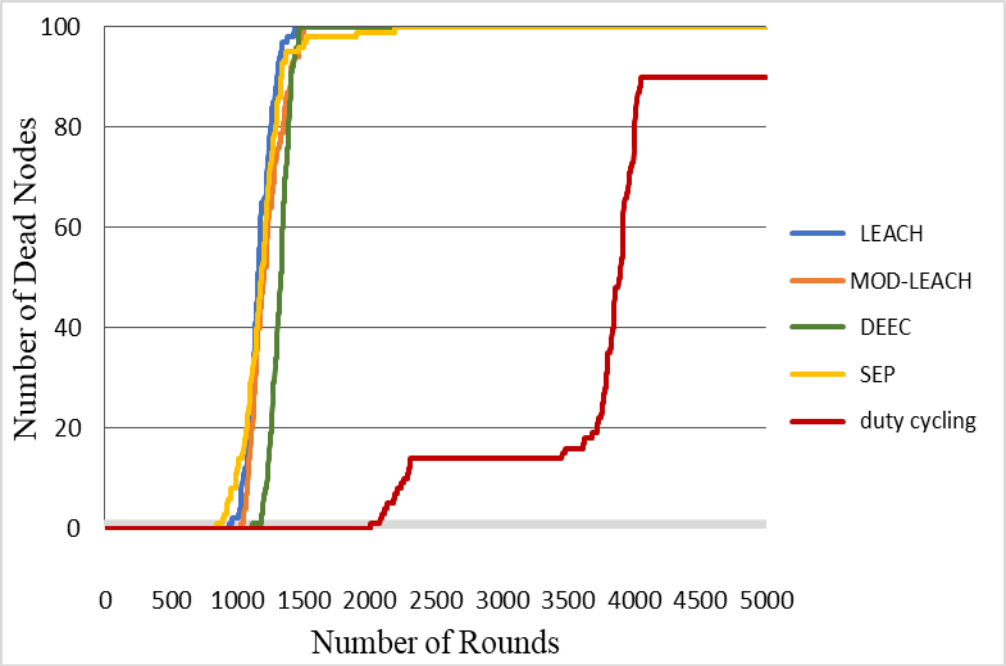
الشكل (3-2) تموضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة [الباحثة]

سنقوم فيما يأتي باستخراج مقاييس الأداء المُعتمدة من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية، مع تثبيت عدد المُحسّات المنشورة عند 100 مُحسّ، ومن أجل حجم رزم المعطيات عند 4000 بت.

3-5-1-1 تحليل استهلاك الطاقة

كل عقدة في شبكات المُحسّات اللاسلكية مزودة بمصدر طاقة محدود أو ببطارية، لذلك يجب أن تُستخدم طاقة العقد بطريقة فعّالة لتحقيق استدامة أفضل للشبكة. وتتناسب مدة حياة العقدة عكساً مع سرعة استهلاك طاقتها[26].

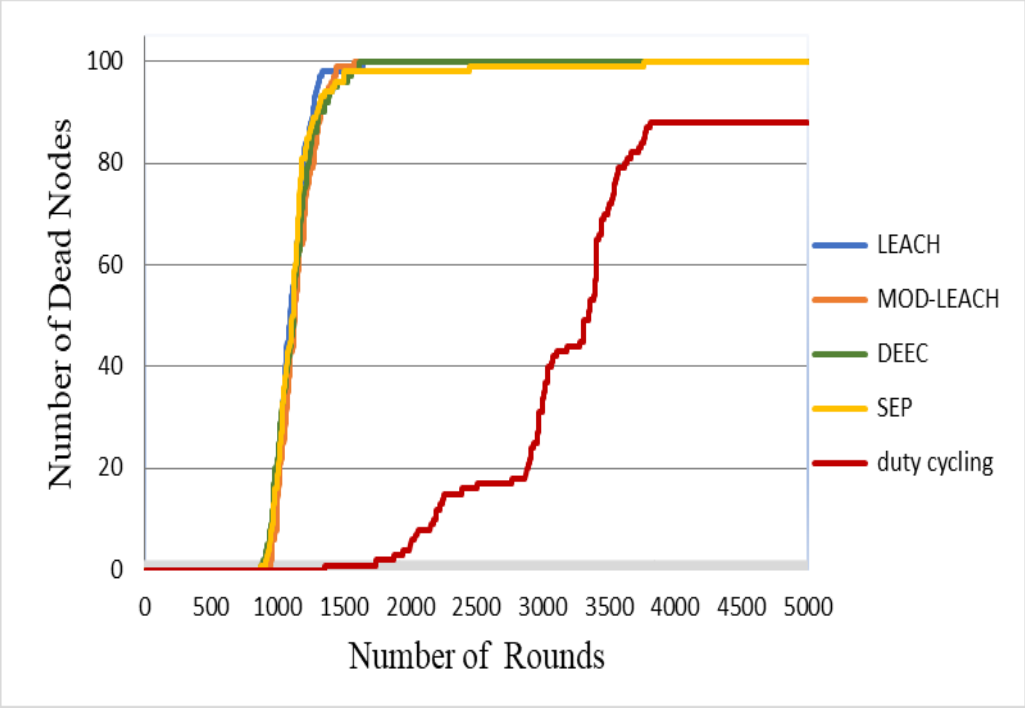
تبيّن الأشكال (3–3) و(3–4) و(3–5) تغير عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة المعتمدة LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP، والتي تندرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، بالإضافة إلى طريقة دورة العمل duty cycling؛ وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة على الترتيب لتموضع المحطة القاعدية.



الشكل(3–3) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لتموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة [الباحثة]

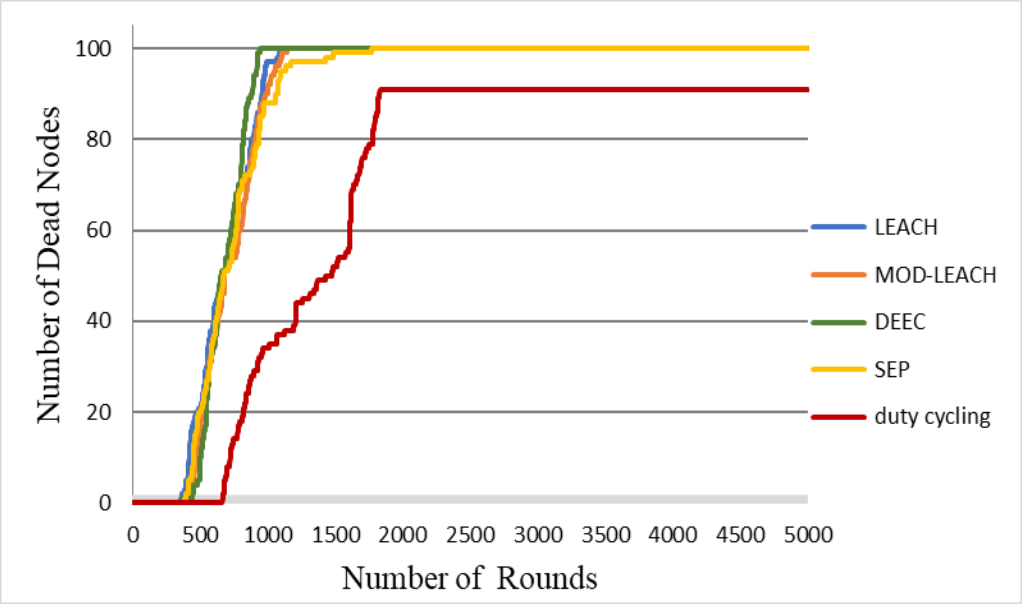
من المنحني المُعبّر عن العلاقة بين عدد العقد الميتة وعدد جولات العمل يمكن استخراج مقياسين أداء هما: مدة استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة. فمن الشكل (3–3) جرى استخراج المقياسين من أجل حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة. فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة والتي تساوي الجولة الموافقة لموت أول مُحسّ في الشبكة، يُلاحظ بأنّ بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة وهي 848 و943 و1031 و1113 جولة للبروتوكولات SEP وLEACH وMOD-LEACH وDEEC على الترتيب، بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة، وكذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة حيث تفوقت طريقة دورة العمل

بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة؛ أي أنه أثناء كامل مدة الاختبار وهي 5000 جولة، لم تنفذ طاقة أي مُحسّ في الشبكة. ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة، والتي تساوي 2196 جولة، أمّا بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة راوحت من 1400 إلى 1500 جولة.



الشكل (3–4) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لتموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة [الباحثة]

لوحظ من الشكل (3–4) بأن بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة تتراوح بين 870 و935 جولة، أمّا من أجل مدة حياة الشبكة فحقق البروتوكولSEP أعلى مدة حياة وهي 3767 جولة، بالمقارنة مع بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية، والتي حققت مدد حياة شبكة متقاربة راوحت من 1570 إلى 1650 جولة. في حين حققت طريقة دورة العمل مدة استقرار تساوي 1353 جولة ومدة حياة شبكة 5000 جولة (أي كامل مدة الاختبار).

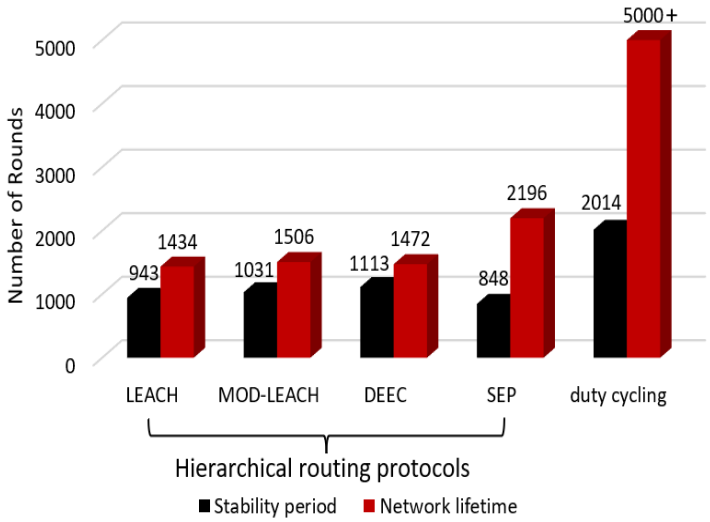


الشكل (3–5) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لتموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة [الباحثة]

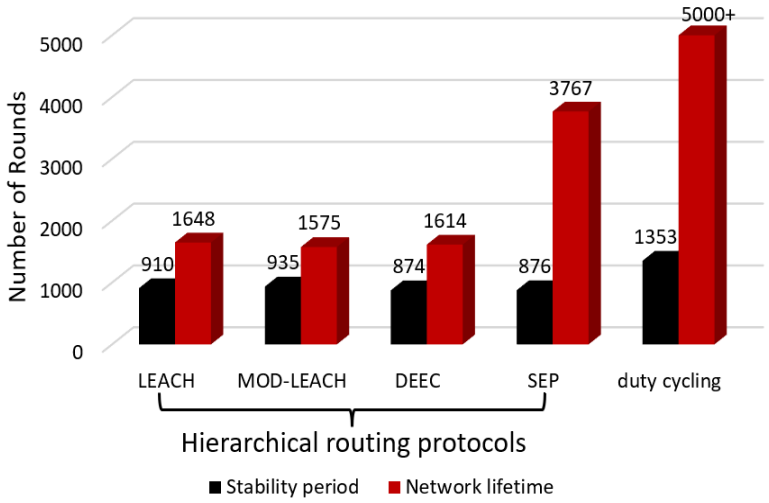
يلاحظ من الشكل (3–5) تحقيق بروتوكولات التوجيه التراتبية لمدد استقرار متقاربة جداً راوحت من 350 إلى 390 جولة، بينما حققت طريقة دورة العمل مدة استقرار بمقدار الضعف، والتي تساوي 664 جولة. وحققت بروتوكولات التوجيه التراتبية مدد حياة شبكة راوحت من 950 إلى 1766؛ وبالمقابل حققت طريقة دورة العمل مدة حياة شبكة قدرها 5000 جولة.

يبيّن الشكل (3–6) (a) و(b) و(c) تفصيلاً عن مدد استقرار ومدد حياة الشبكة لكلتا الطريقتين المدروستين من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية.

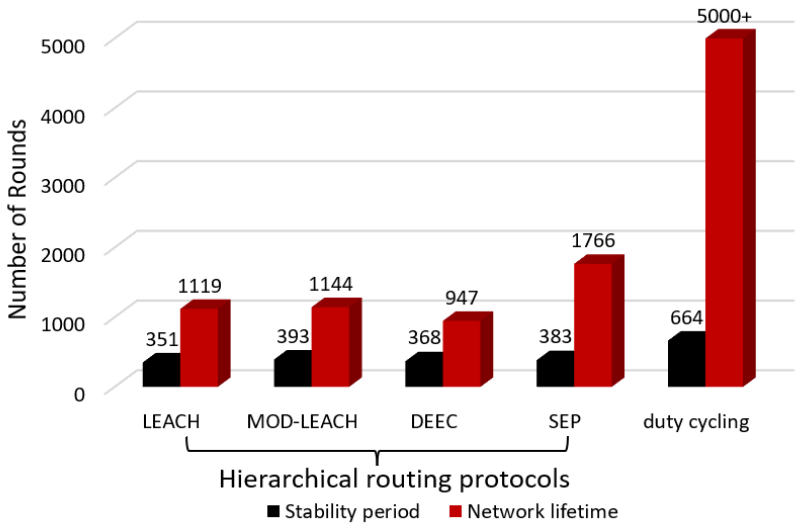
يُلاحظ من الشكل (3–6) انخفاض مدد استقرار ومدد حياة الشبكة مع ازدياد بُعد المحطة القاعدية عن البيئة المدروسة، وهي نتيجة منطقية لأن الطاقة المصروفة للإرسال والاستقبال تتعلق بالمسافة بين المرسل والمستقبل. فعندما زادت المسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية، نجم عن ذلك صرف طاقة أكبر في دارتي الإرسال والاستقبال.



(a)



(b)



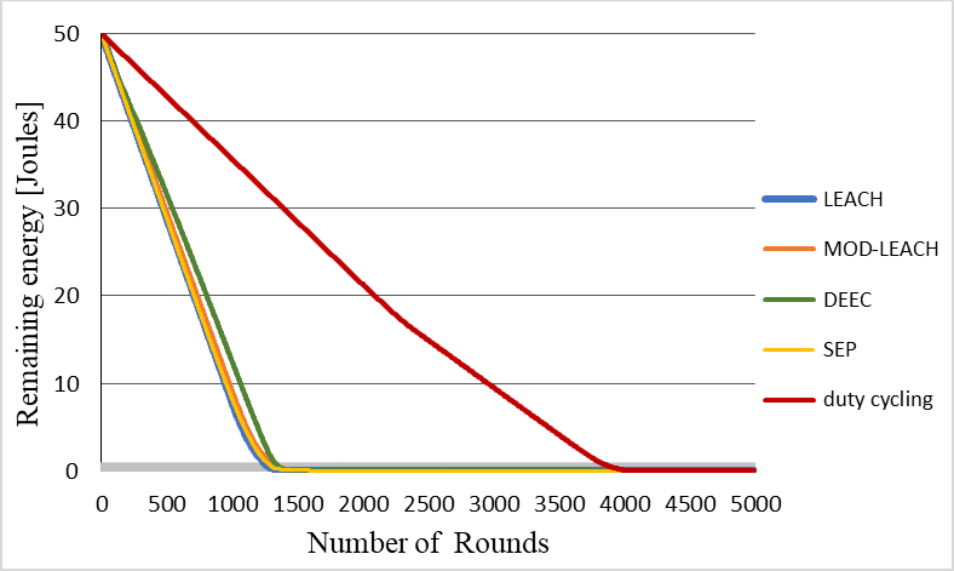
(c)

الشكل (3–6) مدد استقرار ومدد حياة الشبكة من أجل تغيير موضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى، (b) الحالة الثانية، (c) الحالة الثالثة [الباحثة]

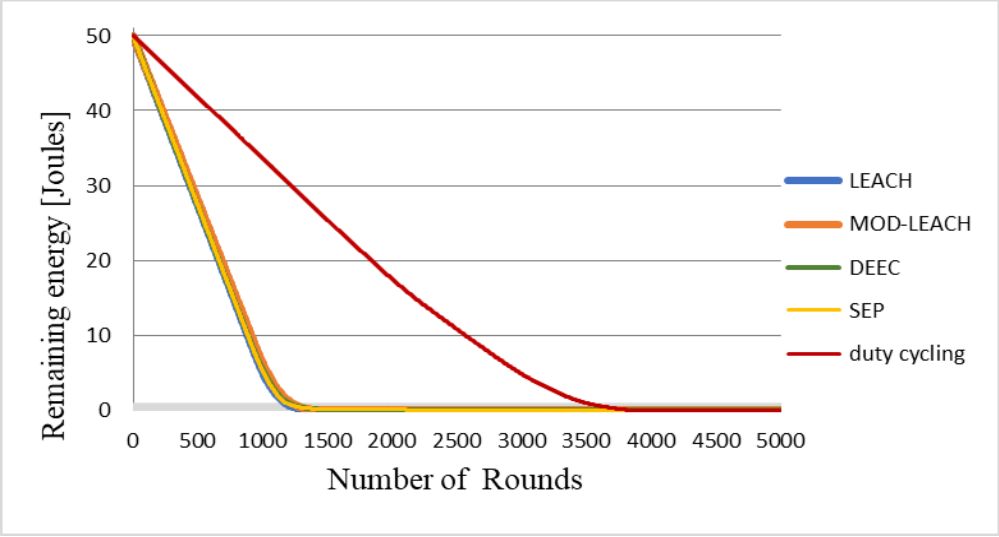
كما نلاحظ من الشكل (3–6) تفوق طريقة دورة العمل على جميع بروتوكولات التوجيه التراتبية المدروسة، حيث أنها حققت مدة حياة شبكة تامة تساوي عدد جولات العمل الكلية الأعظمي المختار وهو 5000 جولة، وذلك من أجل الحالات الثلاث المختلفة لتموضع المحطة القاعدية.

وفيما يخص المقارنة بين بروتوكولات التوجيه التراتبية الأربعة فقد أظهرت النتائج تحقيق البروتوكول SEP لأعلى مدة حياة للشبكة؛ إذ حقق 2196 و 3767 و 1766 جولة من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية على الترتيب.

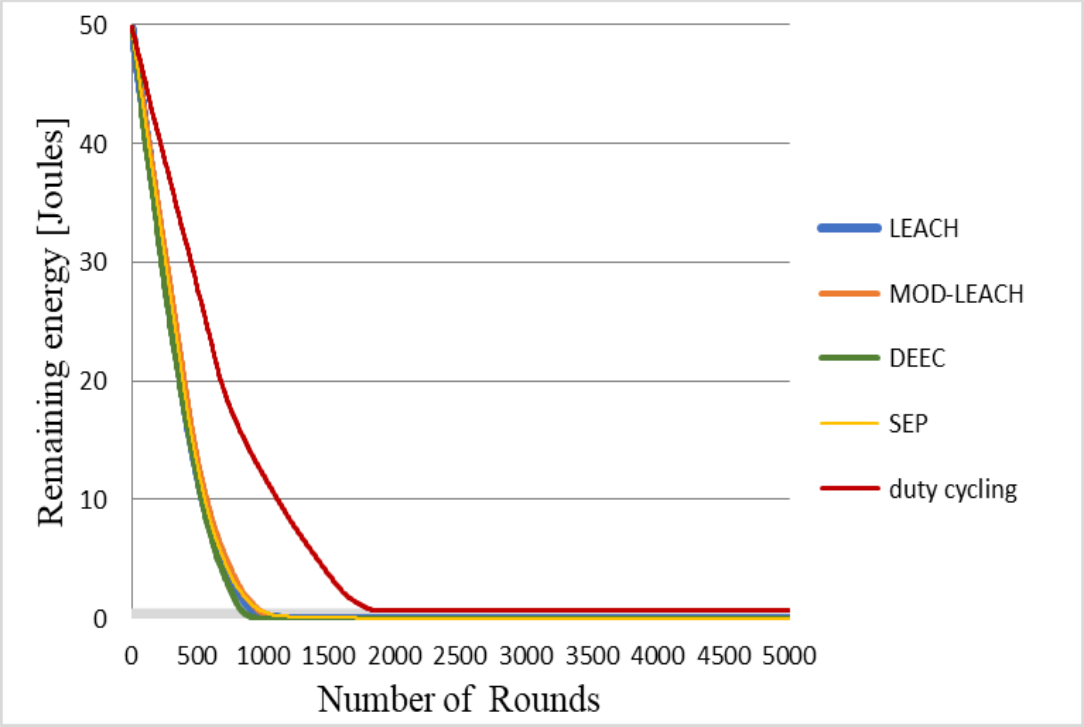
وتبيّن الأشكال (3-7) و(3-8) و(3-9) الطاقة المتبقية في الشبكة و على مدى جولات العمل، وذلك من أجل الحالات الأولى والثانية والثالثة على الترتيب لتموضع المحطة القاعدية.



الشكل(3-7) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة]



الشكل (3-8) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة[الباحثة]



الشكل (3–9) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة[الباحثة]

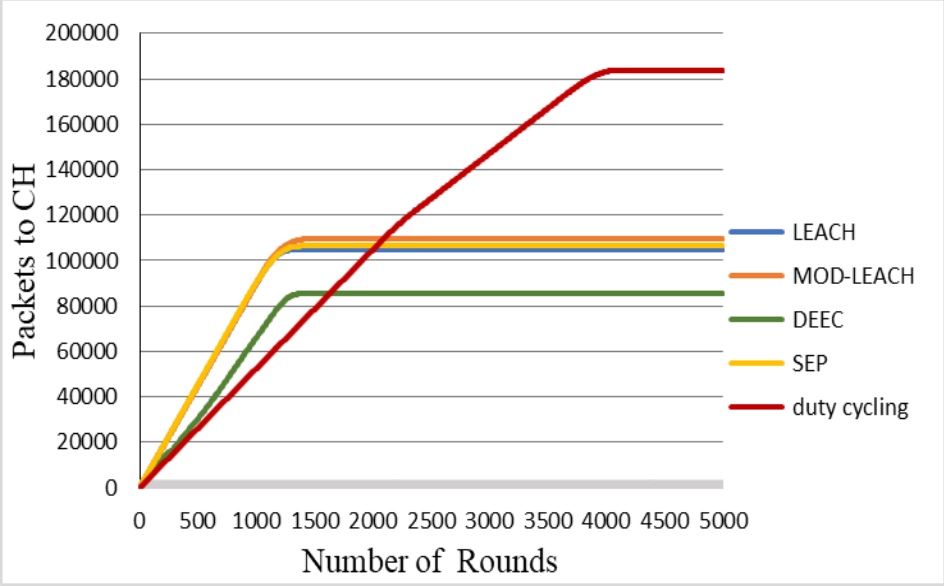
نلاحظ من الأشكال (3–7) و(3–8) و(3–9) المُعبرة عن منحنيات الطاقة المتبقية الكلية في الشبكة بأنّ ميل المنحنيات يزداد حدة عند ازدياد بُعد المحطة القاعدية عن البيئة المدروسة، وهذا يدل على سرعة استهلاك الطاقة وعلاقتها بالمسافة.

كما لاحظنا أن بروتوكولات التوجيه التراتبية تستهلك طاقة كلية أكبر بالمقارنة مع طريقة دورة العمل من أجل ذات عدد الجولات، وذلك من أجل الحالات الثلاث لتموضع المحطة القاعدية. فعلى سبيل المثال يمكن الملاحظة من الشكل (3–8) عندما تقع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة وعند الجولة 1000 بأن الطاقة المتبقية في طريقة دورة العمل تساوي 33 جول، أما الطاقة المتبقية لبروتوكولات التوجيه التراتبية فرواحت من 5.5 إلى 6.5 جول.

3-5-1-2 تحليل معدل التدفق في الشبكة

حيث أنّ معدل التدفق throughput يُعرّف على أنّه إجمالي كمية رزم المعطيات المرسلة من العقد إلى رؤوس العناقيد CHs، والرزم التي تتلقاها المحطة القاعدية BS من رؤوس العناقيد CHs [36]، فإذا حقق البروتوكول مدة حياة شبكة أطول، فيمكنه إرسال المزيد من الرزم، وينجم عن ذلك زيادة معدل تدفق الشبكة.

تبيّن الأشكال (3-10) و(3-11) و(3-12) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد، وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة لتموضع المحطة القاعدية على الترتيب.

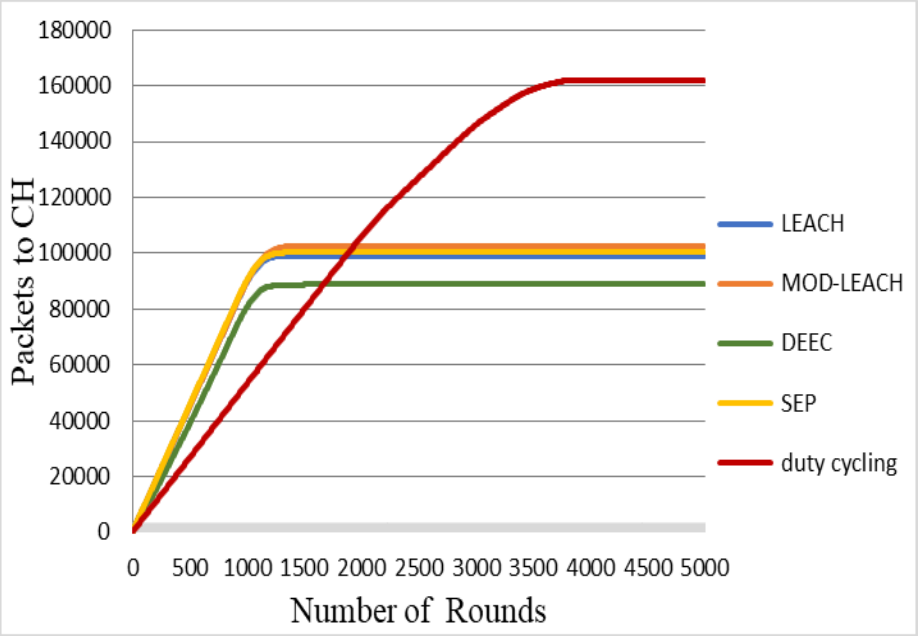


الشكل(3-10) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة]

يلاحظ من الشكل(3-10) بأن عدد الرزم الأعظمي المُرسل إلى رؤوس العناقيد في طريقة دورة العمل يساوي 182 ألف رزمة، بينما في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أرسل البروتوكول DEEC ما يقارب 85 ألف رزمة إلى رؤوس العناقيد، وهو أقل من عدد الرزم الأعظمي المرسل من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية، حيث راوح عدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد من 105 ألف إلى110 ألف رزمة تقريباً.

كما يمكن الملاحظة بأنّه جرى إرسال عدد رزم أقل في طريقة دورة العمل قبل الجولة رقم 1500 مقارنة مع عدد الرزم المرسلة من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية. ويعود ذلك إلى طبيعة آلية عملها في تناوب مُحسّات الشبكة بين وضعي النشاط والنوم، ومن ثمّ يكون عدد الرزم المرسلة ناتجاً فقط عن المُحسّات النشطة وليس عن العدد الإجمالي وهو 100 مُحسّ كما هو الحال مع بروتوكولات التوجيه التراتبية.

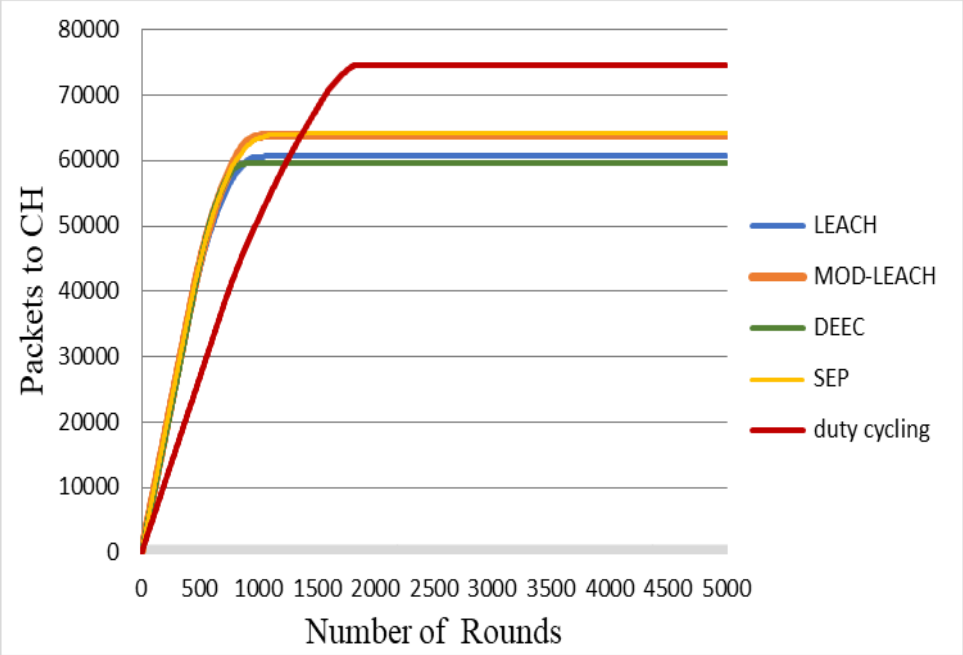
في حين حققت طريقة دورة العمل عدد رزم مرسلة أكبر بعد الجولة رقم 1500 بسبب بدء موت مُحسّات الشبكة المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية، ومن ثمّ توقف تحسّس المعطيات وإرسالها كرزم إلى رؤوس العناقيد. وهذا ينطبق أيضاً على الشكلين (3-11) و(3-12) الموافقين لحالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة وخارجها على الترتيب.



الشكل(3-11) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة[الباحثة]

يلاحظ من الشكل(3-11) بأن عدد الرزم الأعظمي المُرسل إلى رؤوس العناقيد في طريقة دورة العمل يساوي 162 ألف رزمة، بينما في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أرسل البروتوكولDEEC ما يقارب 85 ألف رزمة إلى

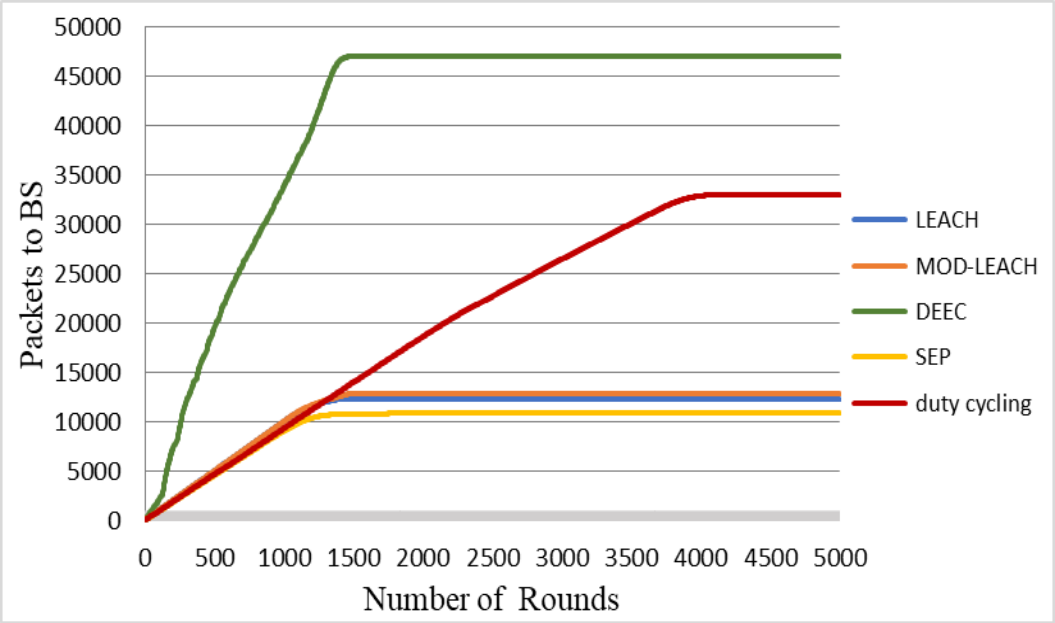
رؤوس العناقيد، وهو أقل من عدد الرزم الأعظمي المرسل من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية؛ حيث راوح عدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد من 99 ألف إلى 100 ألف رزمة. وتعدّ جميع هذه القيم متقاربة مع قيم حالة تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة (الشكل3–10).



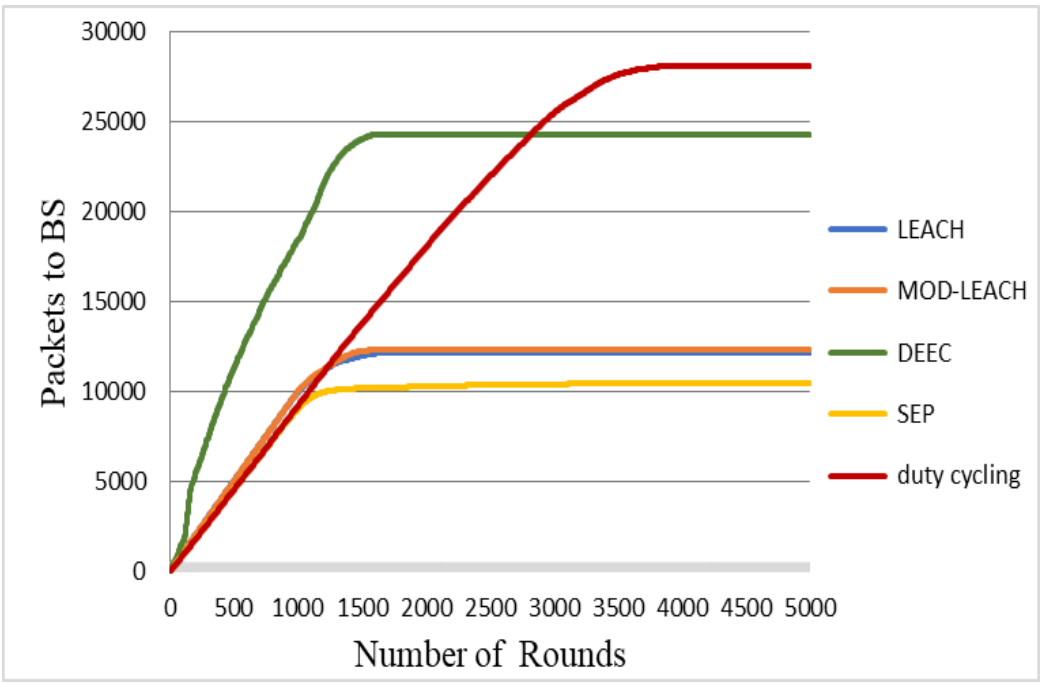
الشكل(3–12) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة [الباحثة]

يظهر الشكل(3–12) انخفاضاً كبيراً في عدد الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد، وخاصة في طريقة دورة العمل التي حققت عدد رزم أعظمي مرسل إلى رؤوس العناقيد يساوي 75 ألف رزمة، بينما راوح عدد الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في بروتوكولات التوجيه التراتبية المدروسة من 60 ألف إلى65 ألف رزمة.

وتبيّن الأشكال (3-13) و(3-14) و(3-15) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة لتموضعها على الترتيب.



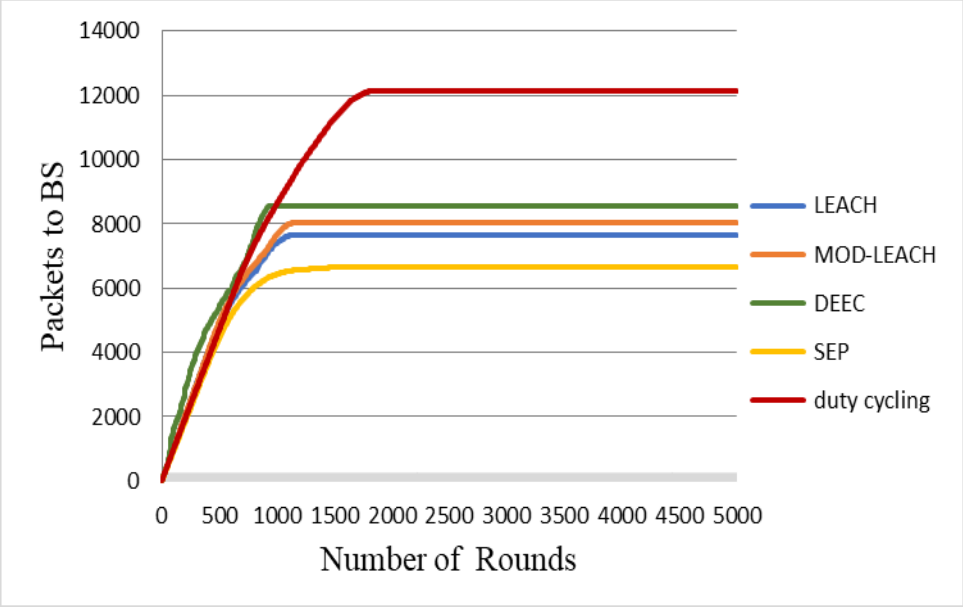
الشكل(3-13) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها في منتصف البيئة المدروسة[الباحثة]



الشكل(3-14) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها على حافة البيئة المدروسة[الباحثة]

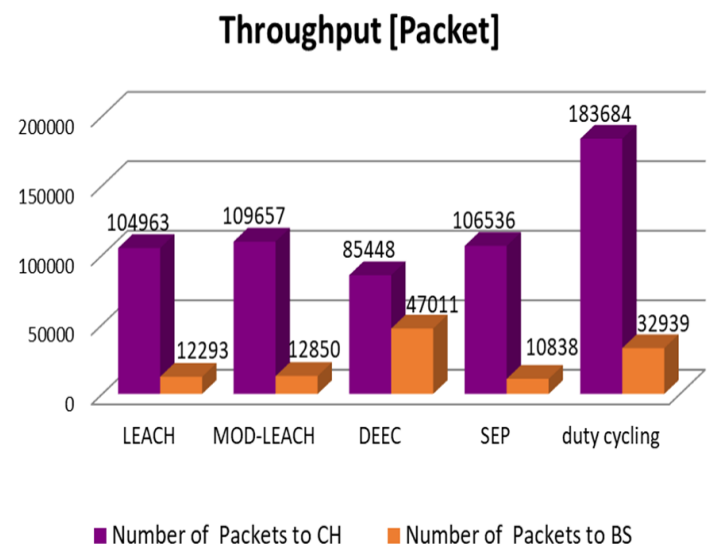
يُلاحظ من الأشكال (3-13) و (3-14) و (3-15) بأن البروتوكول DEEC حقق أعلى عدد رزم مرسلة إلى المحطة القاعدية مقارنة مع بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية، ومن أجل حالات تموضع المحطة القاعدية الثلاث؛

على خلاف ما تبيّن في الأشكال (3–10) و (3–11) و (3–12)؛ والتي أشارت بأن البروتوكول DEEC حقق أقل عدد من الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد، ويعود ذلك إلى أن عدد رؤوس العناقيد المنتخبة في الجولة الواحدة في البروتوكول DEEC أكبر من بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية.

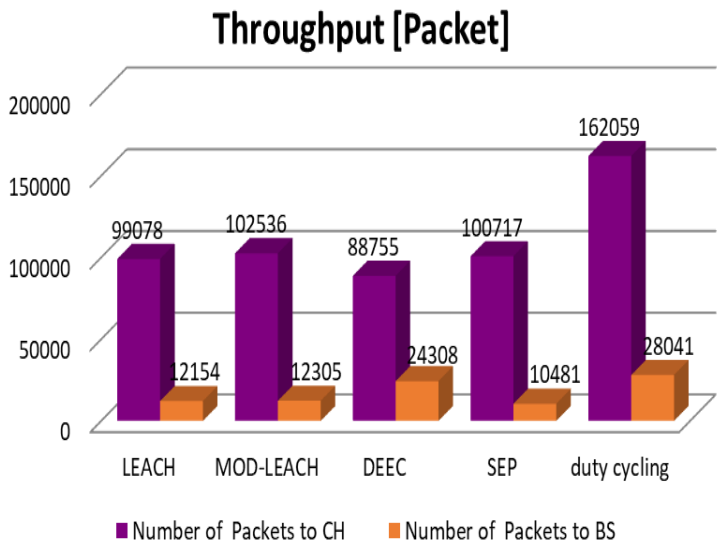


الشكل(3–15) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة تموضعها خارج البيئة المدروسة[الباحثة]

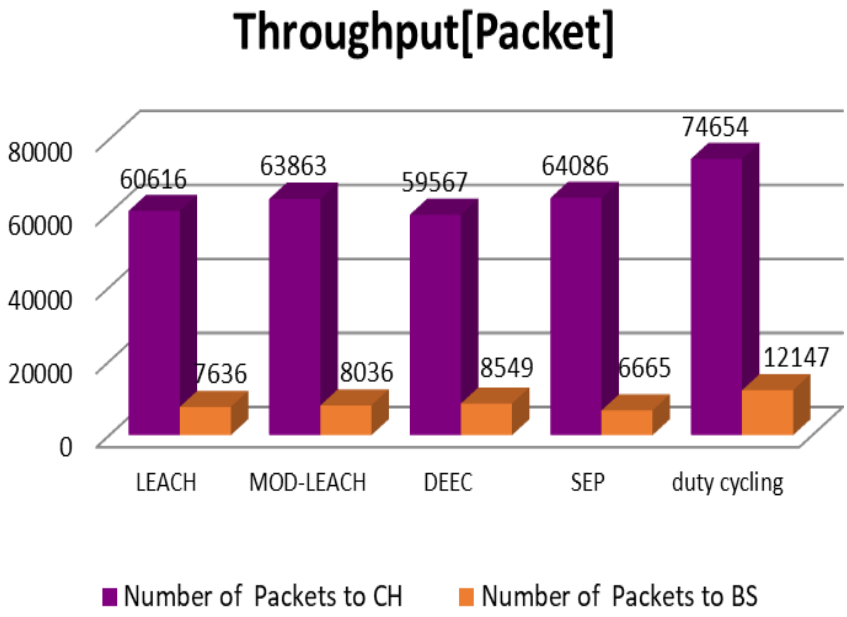
ويبيّن الشكل (3–16) معدل تدفق الشبكة الأعظمي للطريقتين المدروستين والذي يجري حسابه كمجموع كمية الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد وإلى المحطة القاعدية، والمستخلص من الأشكال من (3–10) إلى (3–15) ووفقاً للحالات الثلاثة لتموضع المحطة القاعدية.



(a)



(b)



(c)

الشكل (3–16) معدل تدفق الشبكة من أجل تغيير تموضع المحطة القاعدية (a) الحالة الأولى: المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة، (b)الحالة الثانية: المحطة القاعدية على حافة البيئة المدروسة، (c) الحالة الثالثة: المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة[الباحثة]

يلاحظ من الشكل(3-16) بأن معدل التدفق ينخفض بابتعاد المحطة القاعدية عن البيئة المدروسة، حيث أنّ معدل التدفق الأعظمي المحقق(والناتج عن جمع عدد الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد وعدد الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية) من قبل طريقة دورة العمل يساوي 216 ألف تقريباً و190 ألف تقريباً و86 ألف رزمة تقريباً، وذلك من أجل تموضع المحطة القاعدية في منتصف الشبكة، وعلى حافة الشبكة، وخارج الشبكة على الترتيب. ويعزى ذلك إلى المسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية؛ فبازدياد المسافة يزداد الزمن اللازم لإرسال الرزم بينها، وهذا بدوره سيخفض كمية الرزم الكلية المُرسلة أثناء عدد الجولات الأعظمي المحدد وهو 5000 جولة.

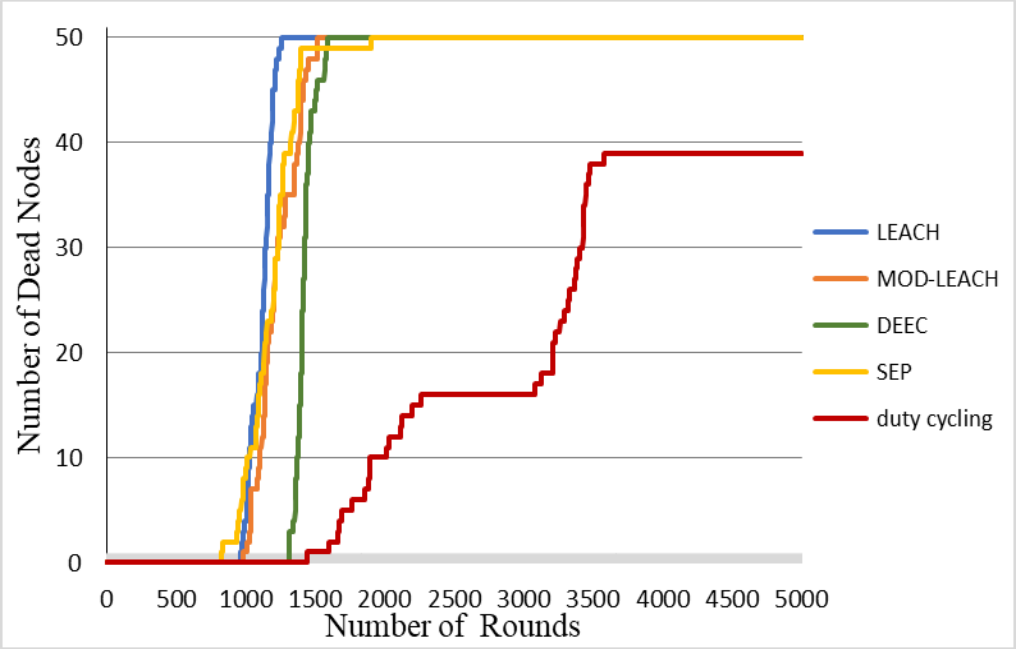
كما لوحظ تحقيق طريقة دورة العمل لمعدل تدفق أعلى مقارنة مع بروتوكولات التوجيه التراتبية في حالتي تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة وعلى حافتها، بينما تتقارب منهم في حالة تموضع المحطة القاعدية خارج البيئة المدروسة.

3-5-2 السيناريو الثاني: دراسة تأثير تغيير عدد المُحسّات المنشورة

في هذا السيناريو سنقوم بدراسة تأثير تغيير عدد المحسّات في الشبكة على مقاييس الأداء المدروسة، حيث سنقوم بتقييم الأداء من أجل 50 و100 و200 و500 مُحسّ في الشبكة[26]، ضمن امتداد شبكة (m^2) 100 x 100؛ وذلك مع تثبيت تموضع المحطة القاعدية في منتصف البيئة المدروسة، ومن أجل حجم رزم معطيات 4000 بت.

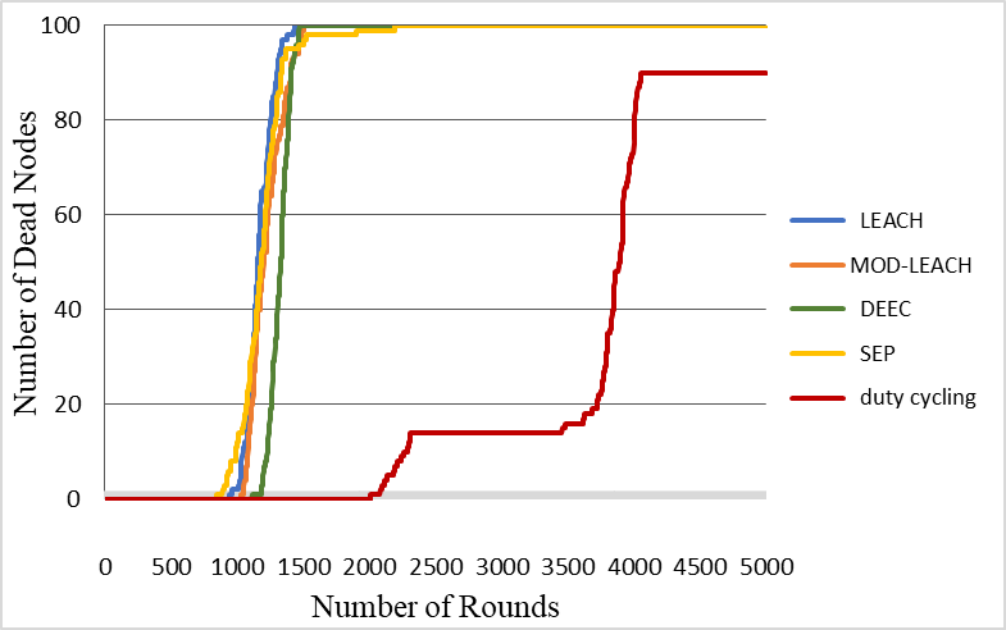
3-5-2-1 تحليل استهلاك الطاقة

تبيّن الأشكال (3-17) و(3-18) و(3-19) و(3-20) تغير عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP؛ والتي تندرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، إلى جانب طريقة دورة العمل، وذلك من أجل الحالات الأربع لعدد المحسّات في الشبكة.



الشكل(3–17) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الأولى لشبكة ذات 50 مُحسّ[الباحثة]

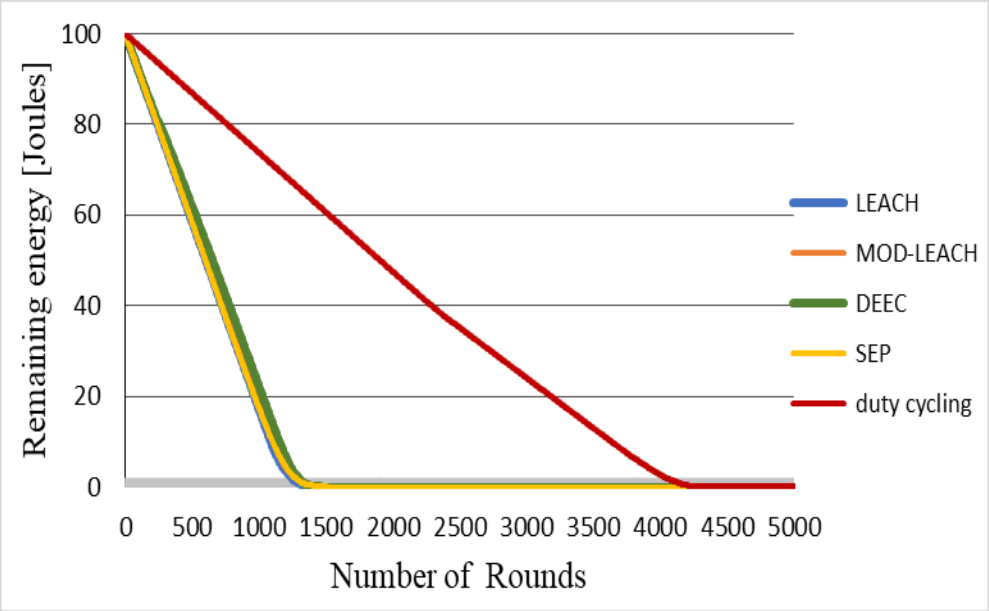
من المنحني المُعبّر عن العلاقة بين عدد العقد الميتة وعدد جولات العمل يمكن استخراج مقياسين أداء هما: مدة استقرار الشبكة ومدة حياة الشبكة، فمن الشكل (3–17) جرى استخراج المقياسين من أجل حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ. فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة والتي تساوي رقم الجولة الموافقة لموت أول مُحسّ في الشبكة، جرت الملاحظة بأنّ بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار تساوي 824 و 964 و 982 و 1311 جولة للبروتوكولات SEP وLEACH وMOD-LEACH وDEEC على الترتيب، بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار، والتي تساوي 1446 جولة؛ وفيما يخص مدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل أيضاً وذلك بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة أي أنه لم تنفذ طاقة كل المُحسّات. ومن بين بروتوكولات التوجيه التراتبية حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 1902 جولة، أما بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة راوحت من 1000 إلى 1400 جولة تقريباً.



الشكل(3–18) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثانية لشبكة ذات 100 مُحسّ[الباحثة]

جرت الملاحظة من الشكل (3–18) بأنّ بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة وهي 848 و943 و1031 و1113 جولة للبروتوكولات SEP وLEACH وMOD-LEACH وDEEC على الترتيب؛ بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة. كذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة حيث تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة؛ في حين حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة من بين بروتوكولات التوجيه التراتبية، والتي تساوي 2196 جولة، أمّا بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة راوحت من 1400 إلى 1500 جولة.

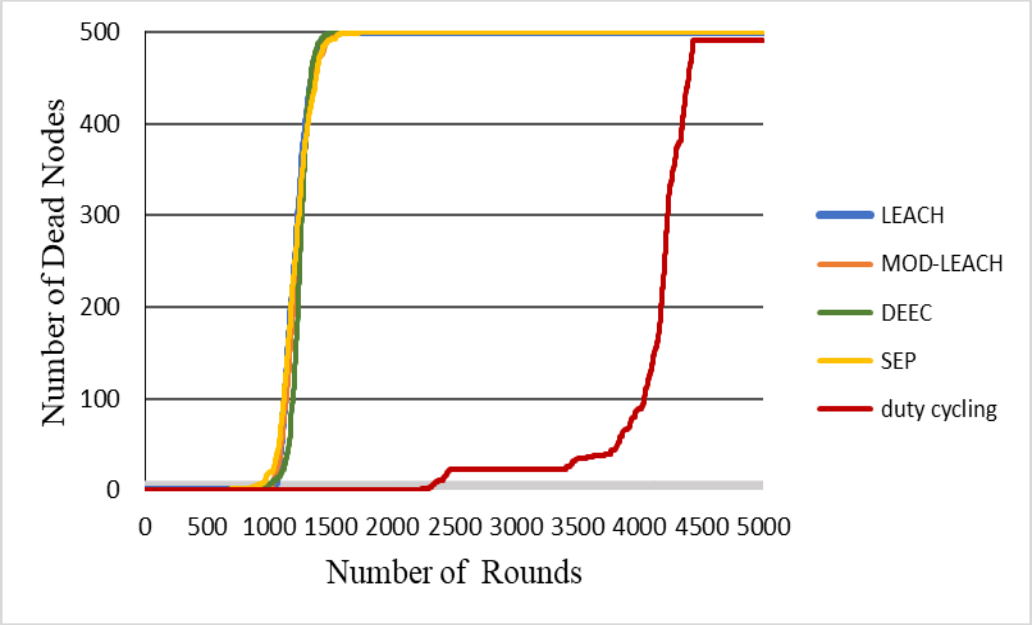
ويعود السبب في ثبات عدد العقد الميتة في حالة دورة العمل بين الجولة 2500 والجولة 3500 إلى أن العقد المعزولة التي لم تجد قريناً لها لتشكيل زوج من العقد قد استهلكت طاقتها وأصبحت عقد ميتة عند الجولة 2500؛ في حين بقيت العقد المكوّنة للأزواج حية بسبب التناوب في عملها بين النشاط والنوم إلى أن بدأت طاقتها بالنفاذ وغدت بدورها عقد معزولة فتسارع معدل موتها بعد الجولة 3500.



الشكل(3–19) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الثالثة لشبكة ذات 200 مُحسّ[الباحثة]

يلاحظ في الشكل (3–19) بأنّ بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة وهي 942 و1041 و 1045 و840 جولة للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP على الترتيب. بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 1983 جولة؛ وكذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة إذ تفوقت طريقة دورة العمل أيضاً وذلك بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة، أمّا بروتوكولات التوجيه التراتبية فحققت مدد حياة شبكة قدرها 1463 و1544 و1581 و 2536 جولة للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH و DEEC وSEP على الترتيب.

وهنا أيضاً نلاحظ في الشكل (3–19) ثبات عدد العقد الميتة في الشبكة بحالة دورة العمل(التشغيل) لذات السبب المبيّن في تفسير سلوك المنحني في الشكل (3–18).

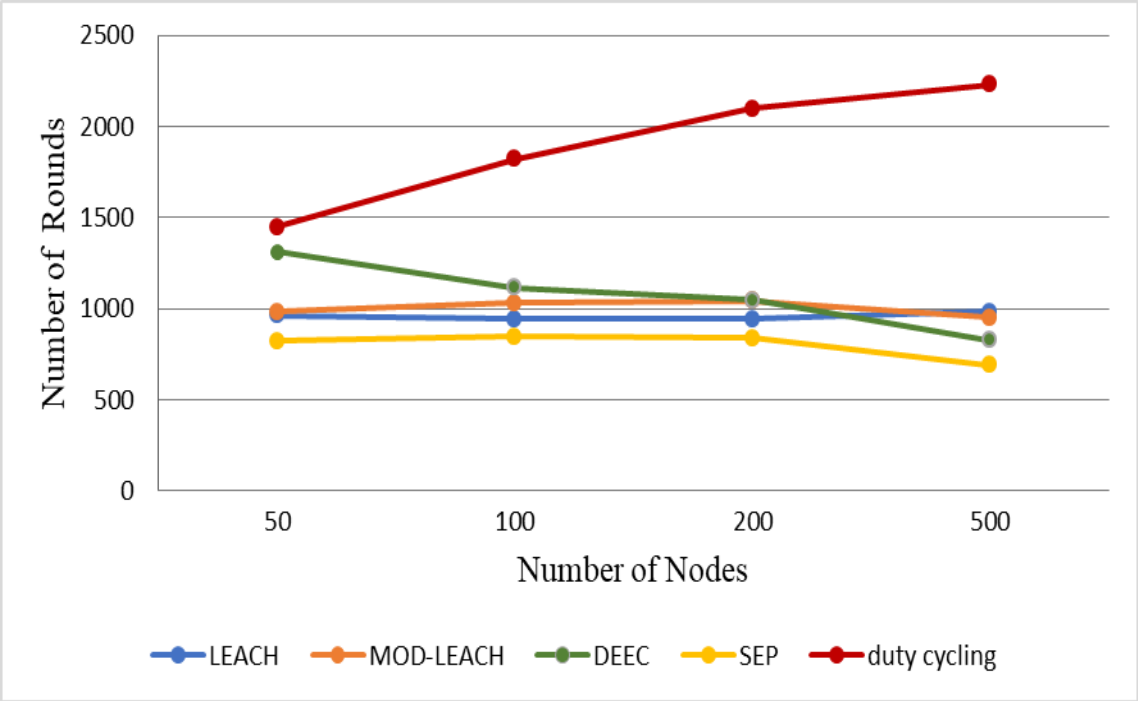


الشكل(3–20) عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات في الحالة الرابعة لشبكة ذات 500 مُحسّ[الباحثة]

يبيّن الشكل (3–20) بأن بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة تساوي 983 و 949 و825 و690 جولة للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP على الترتيب، بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2232 جولة. وفيما يخص مدة حياة الشبكة تفوقت طريقة دورة العمل أيضاً بتحقيقها لمدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة، إذ بقيت عندها تسعة مُحسّات لم تنفذ طاقتها؛ أمّا بروتوكولات التوجيه التراتبية فقد حققت مدد حياة شبكة 1500 و1599 و1617 و 3406 جولة للبروتوكولات LEACH و-MOD LEACH و DEEC وSEP على الترتيب.

وهنا أيضاً نلاحظ في الشكل (3–20) ثبات عدد العقد الميتة في الشبكة بحالة دورة العمل(التشغيل) لذات السبب المبيّن في تفسير سلوك المنحني في الشكل (3–18).

يبيّن الشكل (3–21) تغير مدد استقرار الشبكة أي عدد الجولات بدلالة عدد العقد لكلتا الطريقتين المدروستين، من أجل عدة قيم لعدد المُحسّات المنشورة في الشبكة.

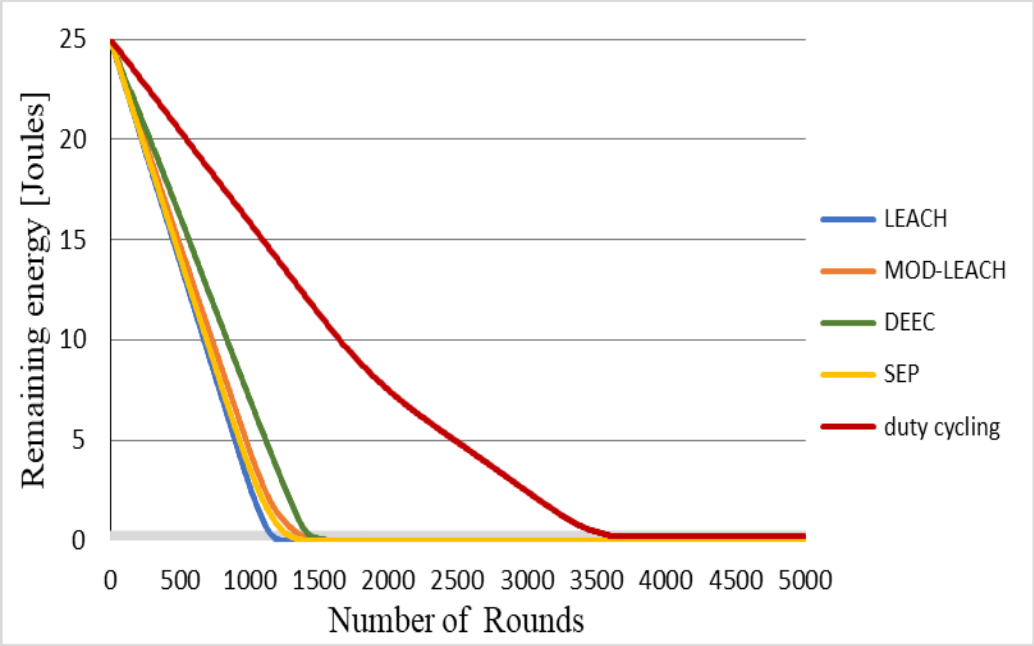


الشكل (3-21) مدد استقرار الشبكة من أجل عدة قيم من المُحسّات[الباحثة]

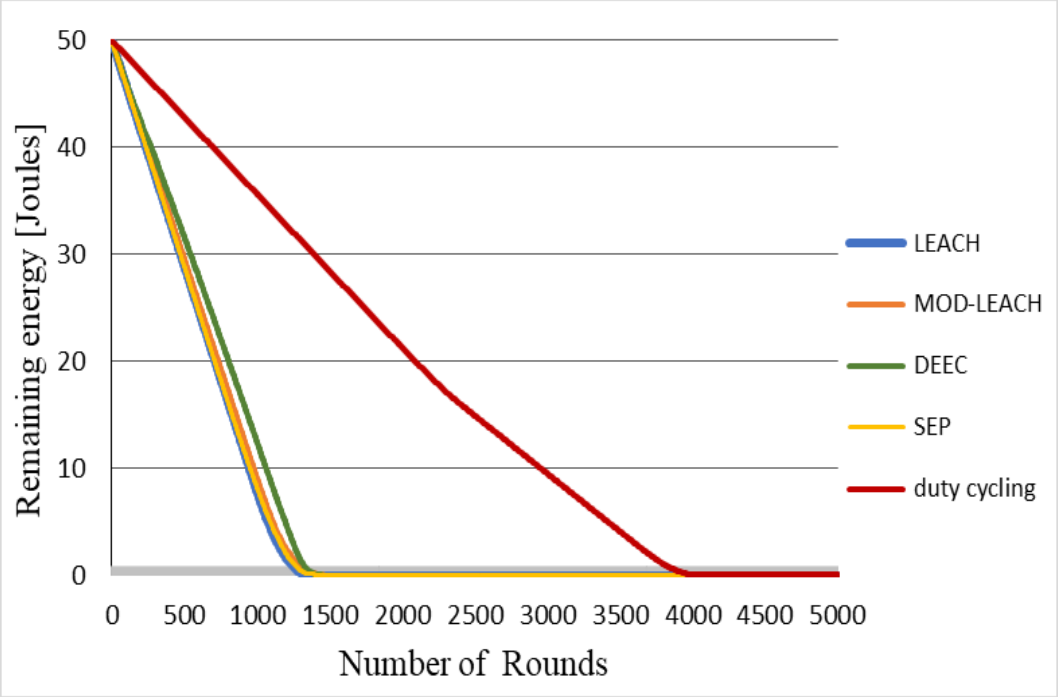
يلاحظ من الشكل (3-21) عموماً في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أنه بازدياد عدد مُحسّات الشبكة تزداد سرعة موت المُحسّات باستثناء حالة البروتوكول LEACH الذي لم يتأثر كثيراً بتغيير عدد مُحسّات الشبكة، أمّا بالنسبة لطريقة دورة العمل فكان سلوكها معاكس لسلوك بروتوكولات التوجيه التراتبية، حيث ازدادت مدد الاستقرار بازدياد عدد المُحسّات في الشبكة إذ حققت القيم 1446 و1822 و2097 و2232 جولة والمقابلة لعدد عقد في الشبكة 50 و100 و200 و500 مُحسّ على الترتيب. ويعود ذلك إلى أنه في طريقة دورة العمل، يبلغ المدى الأعظمي المحدد بين المُحسّات 10 متر، لتصبح أزواج وتتناوب في عملها بين جولة وأُخرى، ومع انخفاض عدد المُحسّات قد يصعب تحقيق شرط تشكيل الأزواج؛ مما سيتسبب في عمل بعض المُحسّات بشكل دائم، وهذا ما يقود إلى تخفيض فعالية طريقة دورة العمل من أجل عدد مُحسّات قليل.

تبيّن الأشكال (3–22) و(3–23) و(3–24) و(3–25) منحنيات الطاقة المتبقية في الشبكة بدلالة عدد الجولات؛ وذلك من أجل الحالة الأولى والثانية والثالثة والرابعة لعدد مُحسّات الشبكة؛ علماً بأنّ الطاقة الابتدائية في الشبكة تساوي جداء عدد المُحسّات المنشورة في الشبكة في الطاقة الإبتدائية لكل مُحسّ (والتي تساوي 0.5 جول).

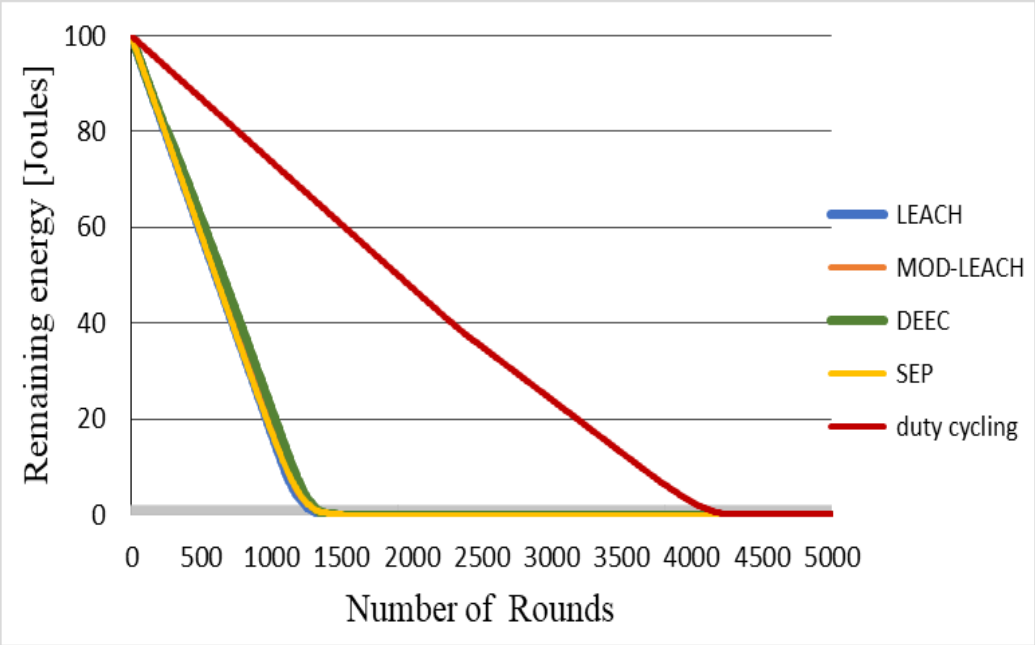
فعند شبكة مكوّنة من 50 محسّ تكون قيمة الطاقة الابتدائية للشبكة تساوي 25 جول، وفي حالة شبكة مكوّنة من 100 محسّ تكون قيمة الطاقة الابتدائية للشبكة تساوي 50 جول، وفي حالة شبكة مكوّنة من 200 محسّ تكون قيمة الطاقة الابتدائية للشبكة تساوي 100 جول، وفي حالة شبكة مكوّنة من 500 محسّ تكون قيمة الطاقة الابتدائية للشبكة تساوي 250 جول.



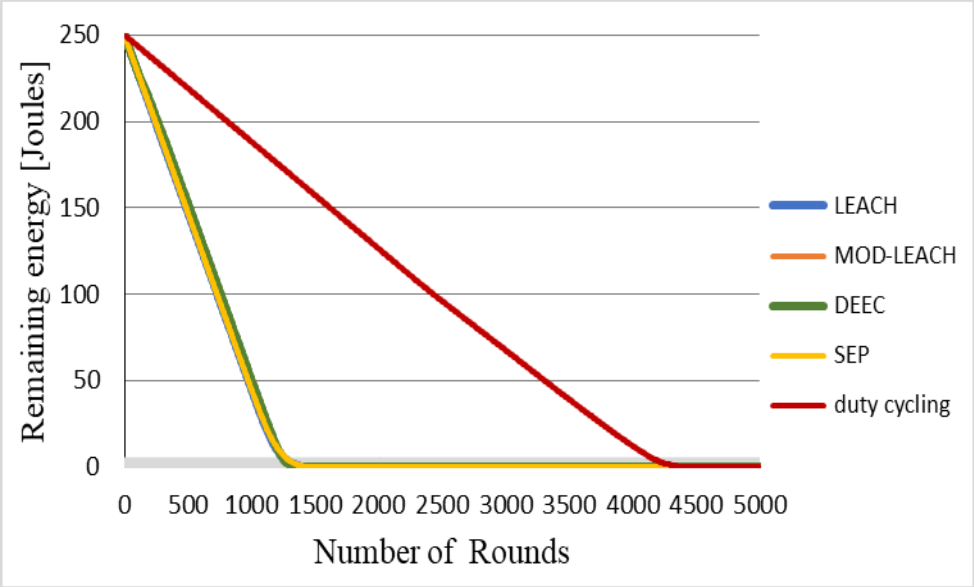
الشكل (3–22) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]



الشكل (3–23) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]



الشكل (3–24) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]



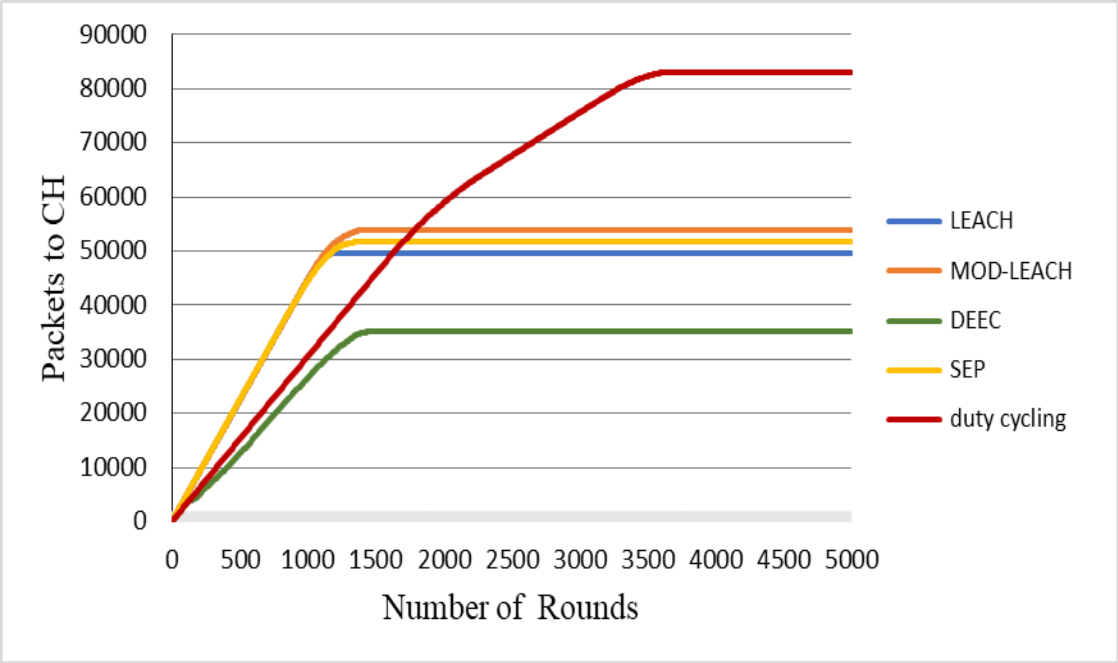
الشكل (3–25) الطاقة المتبقية في الشبكة في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]

نلاحظ من الأشكال (3–22) و(3–23) و(3–24) و(3–25) بأن المنحنيات المُعبرة عن سلوك الطاقة المتبقية في الشبكة في بروتوكولات التوجيه التراتبية تأثرت بشكل طفيف بتغيير عدد المحسات في الشبكة؛ حيث أن ميل المنحني يزداد بزيادة عدد المُحسّات بمقدار بسيط جداً، أمّا بالنسبة لمنحني طريقة دورة العمل فنلاحظ أن الطاقة المتبقية تتناقص تدريجياً مع زيادة عدد المُحسّات وهذا دليل على بطء استهلاك الطاقة؛ وهو مؤشر على كفاءة هذه الطريقة في ترشيد الطاقة وخاصة في الشبكات ذات الكثافة الكبيرة.

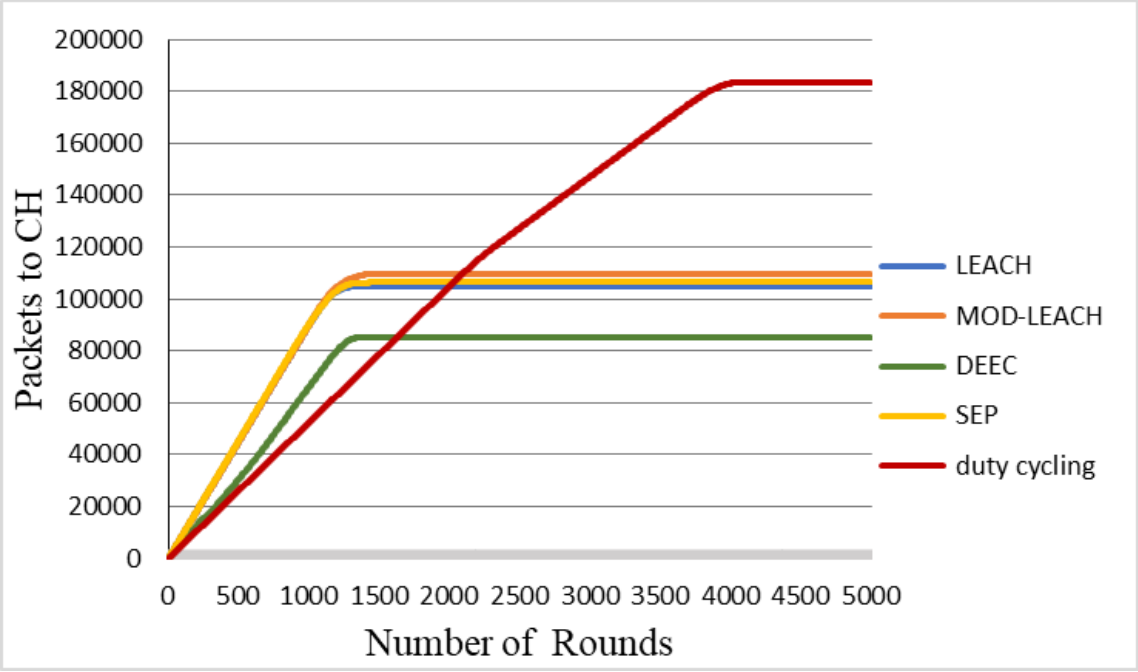
3–5–2 تحليل معدل التدفق في الشبكة

بغية حساب معدل تدفق الشبكة سيُجرى في هذه الفقرة استعراض المنحنيات المُعبرة عن عدد الرزم المرسلة من العقد العادية إلى رؤوس العناقيد وعدد الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية.

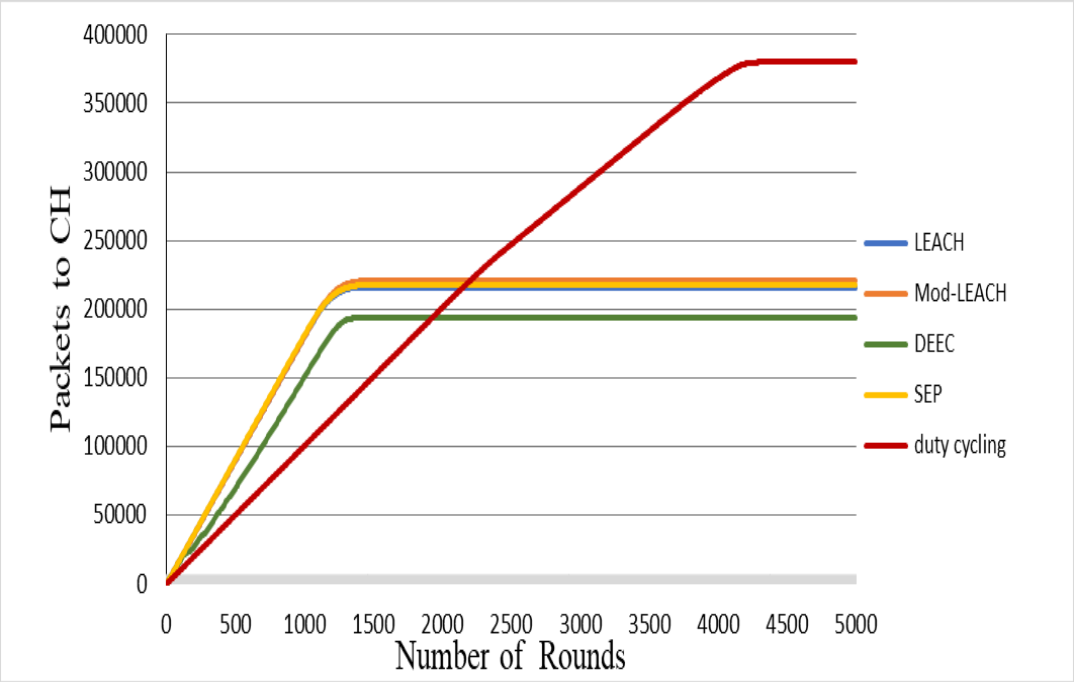
تبيّن الأشكال (3-26) و (3-27) و(3-28) و (3-29) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد، وذلك من أجل الحالات الأربع لعدد المُحسّات في الشبكة.



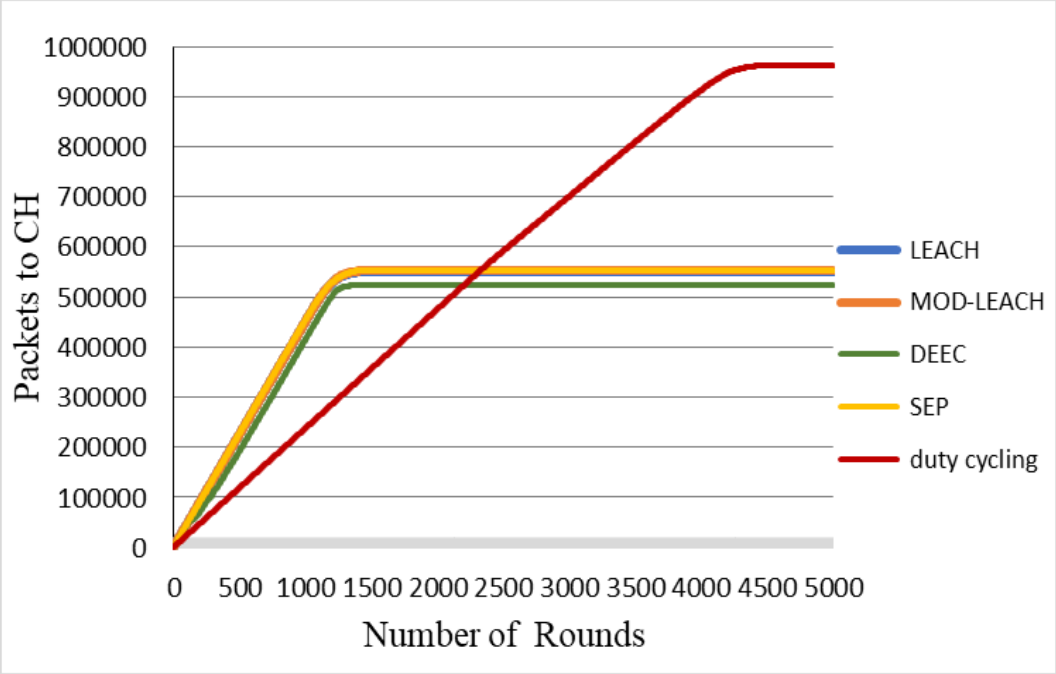
الشكل(3-26) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]



الشكل(3-27) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]



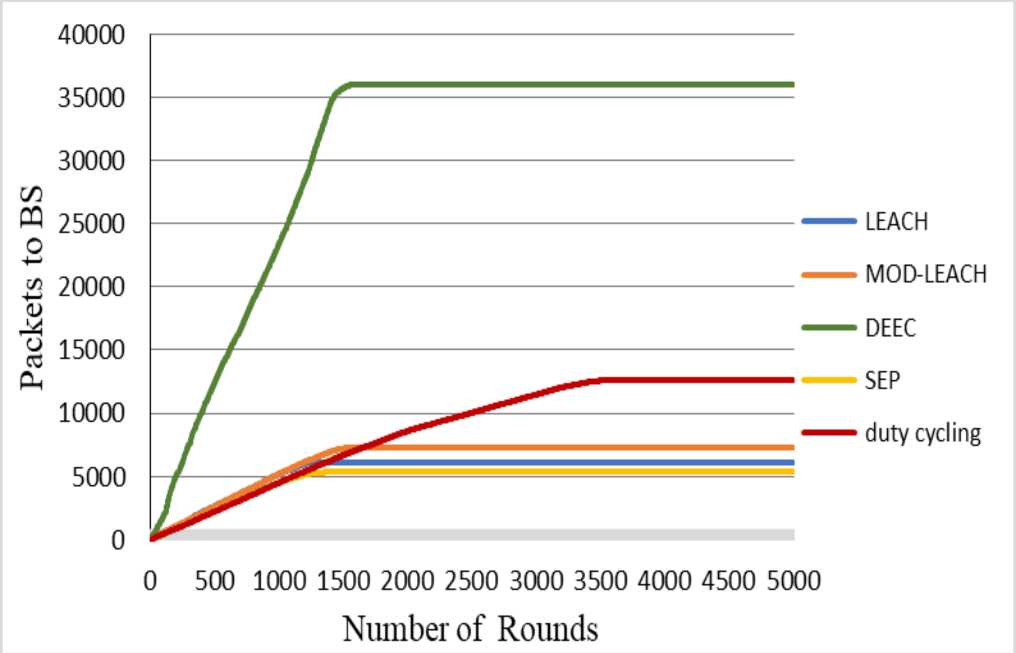
الشكل(3–28) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]



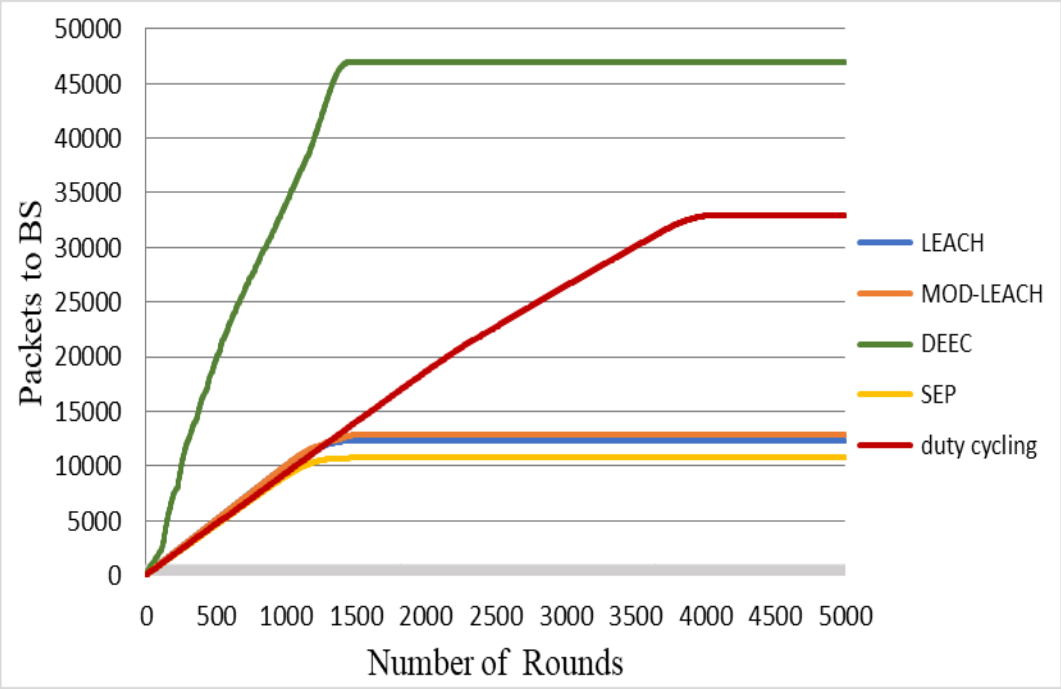
الشكل(3–29) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]

يلاحظ من الأشكال (3-26) و(3-27) و(3-28) و(3-29) الموافقة للحالات الأربع لعدد المحسّات في الشبكة بأنه في طريقة دورة العمل جرى إرسال العدد الأكبر للرزم إلى رؤوس العناقيد والتي حققت 82000 و182000 و380000 و 960000 رزمة من أجل الحالات الأربع لعدد عقد المحسّات في الشبكة على الترتيب، بعد ذلك تقاربت البروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وSEP في عدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد لتصل إلى ما يقارب 50000 و110000 و 225000 و550000 رزمة من أجل الحالات الأربع لعدد العقد في الشبكة على الترتيب، أمّا عند تطبيق بروتوكول DEEC فكان عدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد أقل إذ بلغت 35000 و82000 و190000 و510000 رزمة من أجل الحالات الأربع لعدد عقد المحسّات الشبكة على الترتيب.

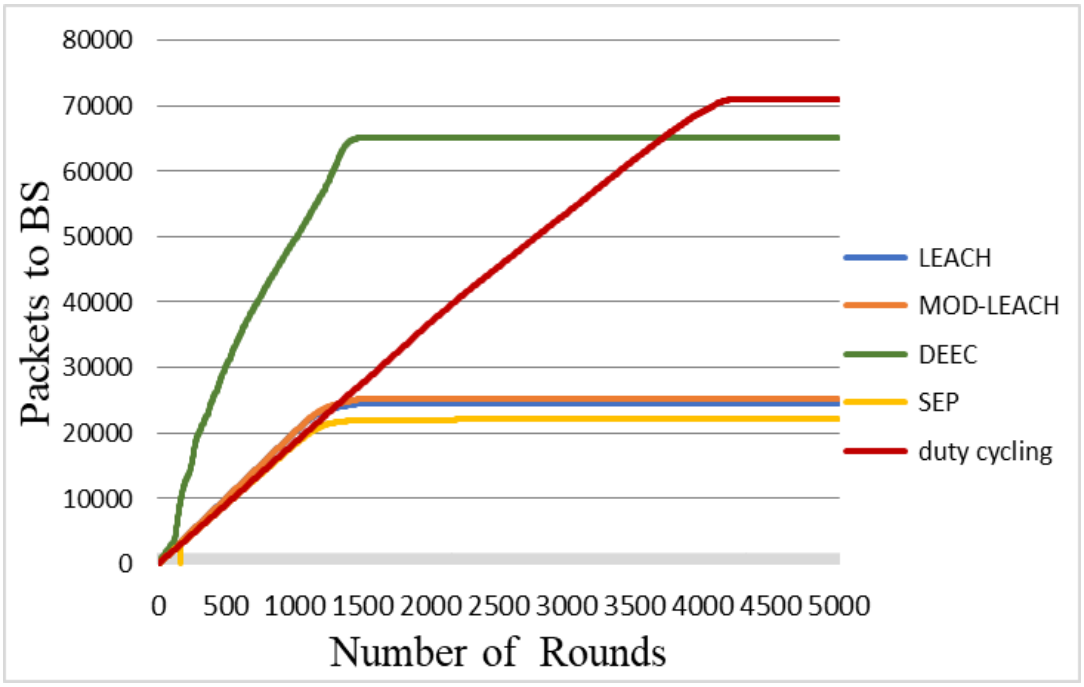
وتبيّن الأشكال (3-30) و(3-31) و(3-32) و(3-33) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية وذلك من أجل الحالات الأربع لعدد المُحسّات في الشبكة.



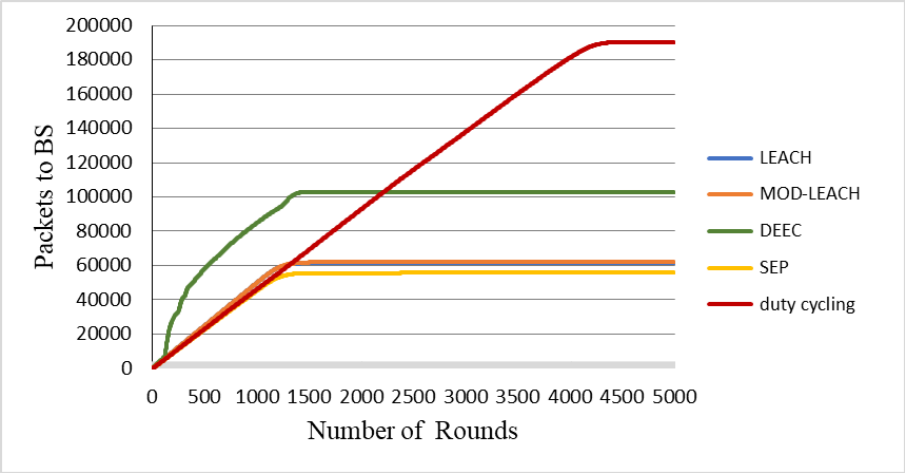
الشكل(3-30) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ[الباحثة]



الشكل(3-31) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ[الباحثة]



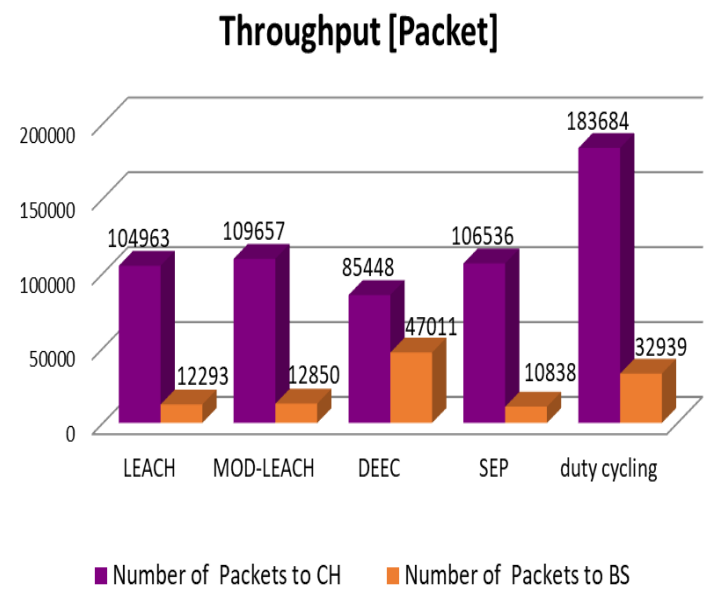
الشكل(3-32) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ[الباحثة]



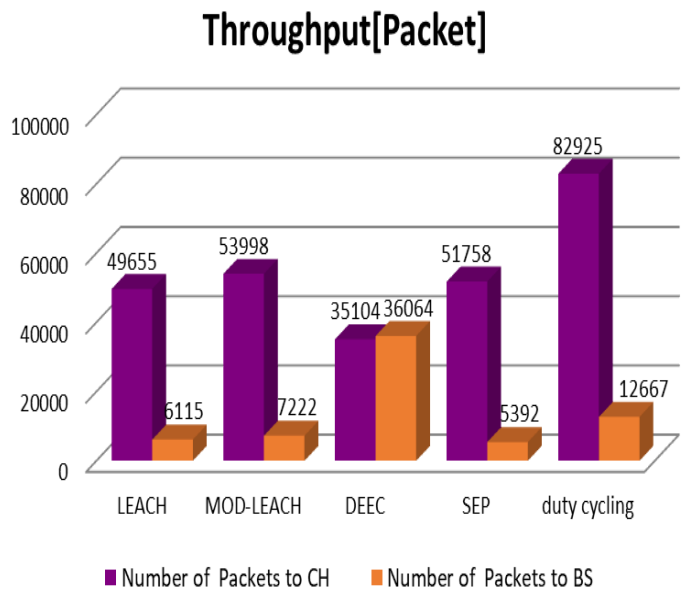
الشكل(3–33) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية في حالة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ[الباحثة]

يلاحظ من الأشكال (3-30) و(3-31) و(3-32) و(3-33) أنه في حالتي شبكة مكوّنة من 50 و100 مُحسّ بأنّ البروتوكول DEEC قد حقق العدد الأكبر من الرزم المرسلة إلى المحطة القاعدية؛ والذي وصل إلى 36 ألف رزمة عند شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ و46 ألف رزمة عند شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ. بينما في حالتي الشبكة المكوّنة من عدد أكبر من العقد وهو 200 و500 مُحسّ، فقد حققت طريقة دورة العمل العدد الأكبر المُرسل من الرزم إلى المحطة القاعدية؛ والذي يساوي71 ألف رزمة في حالة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ و185 ألف رزمة في حالة شبكة مكوّنة 500 مُحسّ. أمّا البروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وSEP فكان أداؤها متقارباً حيث حققت ما يقارب 6 آلاف رزمة مرسلة إلى المحطة القاعدية، وذلك من أجل شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ؛ بينما حققت ما يقارب 60 ألف رزمة من أجل شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ. وهذا يدل على تناسب طردي لعدد الرزم المرسلة بدلالة عدد العقد في الشبكة؛ حيث نجم عن زيادة عدد المُحسّات بمقدار 10 أضعاف زيادة في عدد الرزم المرسلة إلى المحطة القاعدية أيضاً بمقدار عشر أضعاف.

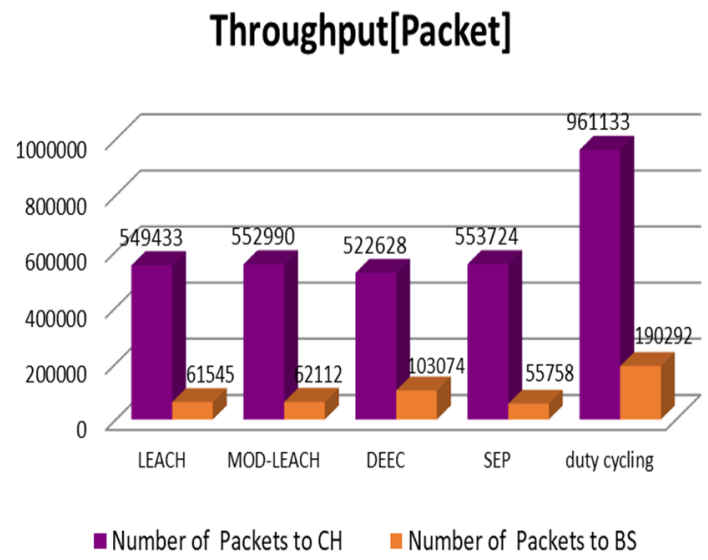
ويبيّن الشكل (3–34) تغير معدل تدفق الشبكة الذي يجري حسابه كمجموع كمية الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية[36]، والتي جرى عرضها في الأشكال من الشكل(3–26) وحتى الشكل(3–33) من أجل كلتا الطريقتين المدروستين، ووفقاً لأربع حالات لعدد العقد في الشبكة.



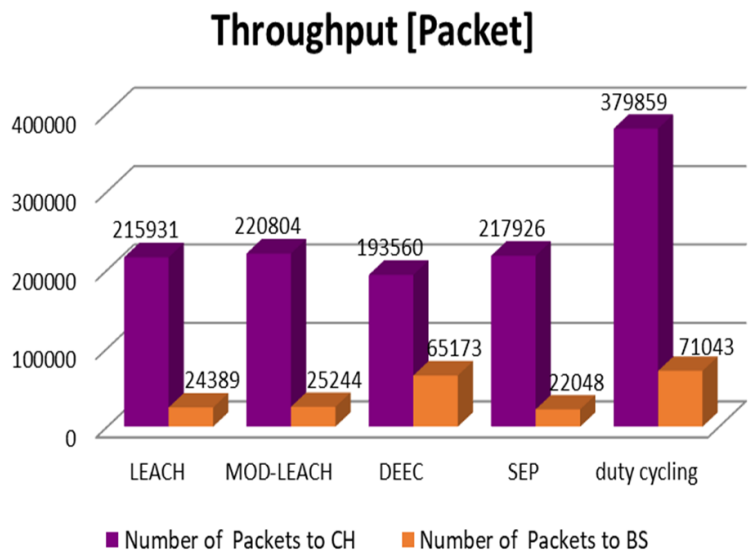
(b) الحالة الثانية شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ



(a) الحالة الأولى شبكة مكوّنة من 50 مُحسّ



(d) الحالة الرابعة شبكة مكوّنة من 500 مُحسّ



(c) الحالة الثالثة شبكة مكوّنة من 200 مُحسّ

الشكل (3 –34) معدل تدفق الشبكة من أجل أربع حالات لعدد المُحسّات في الشبكة (a) الحالة الأولى 50 محسّ،(b) الحالة الثانية 100 محسّ،(c) الحالة الثالثة 200 محسّ، (b)الحالة الرابعة 500 محسّ [الباحثة]

نلاحظ من الشكل (3–34) تفوق طريقة دورة العمل بتحقيق أعلى معدل تدفق شبكة كلي من أجل كافة حالات عدد العقد في الشبكة؛ إذ حققت معدل تدفق يساوي 95592 و216623 و450902 و1151425 رزمة (ناتجة عن

جمع عدد الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد وعدد الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية) من أجل القيم الأربعة لعدد المُحسّات وهي 50 و100 و200 و500 مُحسّ على الترتيب، وذلك من أجل الخمس آلاف جولة المعتمدة في دراستنا. في حين حققت بروتوكولات التوجيه التراتبية معدل تدفق متقارب، مع الملاحظة أنه ينتج عن مضاعفة عدد مُحسّات الشبكة مضاعفة معدل التدفق. وتعدّ هذه النتيجة مبررة لأن زيادة عدد المُحسّات تزيد من كمية المعطيات المُحسّوسة من البيئة المحيطة، والتي سيجري تناقلها وصولاً إلى المحطة القاعدية. فمثلاً نلاحظ تزايد معدل تدفق البروتوكول MOD-LEACH من 61220 رزمة عند 50 مُحسّ، إلى 122507 رزمة عند 100 مُحسّ، ثمّ 246048 رزمة عند 200 مُحسّ، وصولاً إلى 615102 رزمة عند 500 مُحسّ؛ أي ازداد بمقدار 2.5 مرة؛ وهذا ينطبق على بقية البروتوكولات التراتبية، وكذلك على طريقة دورة العمل.

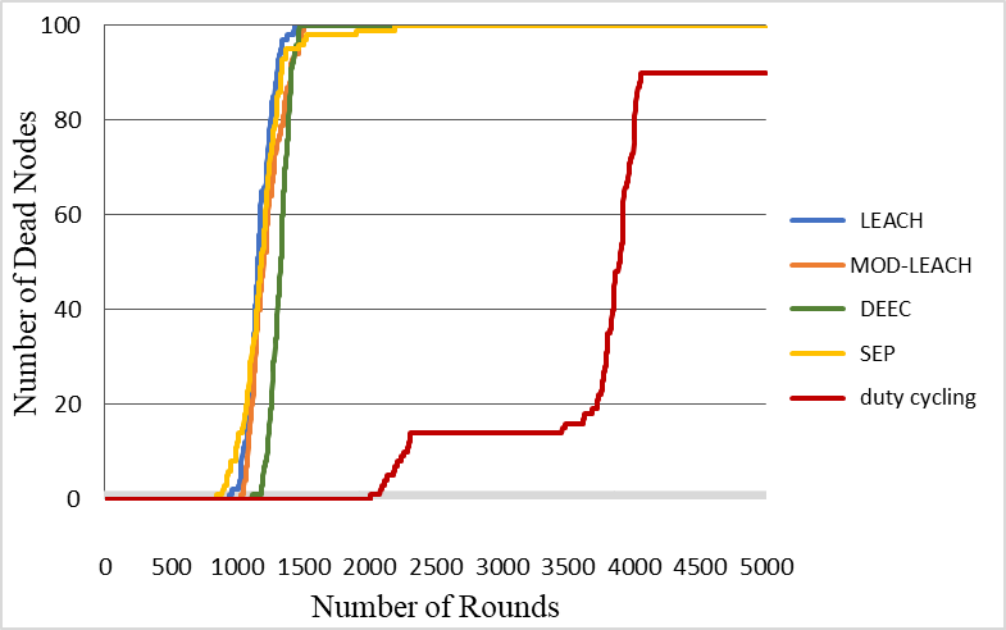
3-5-3 السيناريو الثالث: دراسة تأثير تغيير حجم رزمة المُعطيات

تستخدم شبكات المُحسّات اللاسلكية في الكثير من التطبيقات العملية؛ والتي تختلف فيما بينها بطبيعة الظواهر المُحسّوسة؛ وينعكس هذا الاختلاف على حجم رزم المعطيات المنقولة أثناء كل جولة. ومن هذا المنطلق دعت الحاجة لدراسة تأثير تغيير حجم رزمة المُعطيات على مردود (كفاءة) الطاقة ومدة حياة الشبكة.

لذا قمنا بمحاكاة شبكة مُحسّات لاسلكية من أجل حالتين: الحالة الأولى جرى تنفيذها مع اعتماد حجم رزمة المعطيات يساوي 4000 بت، بينما في الحالة الثانية جرى تنفيذ المحاكاة باعتماد حجم رزمة المعطيات يساوي 2000 بت؛ وذلك من أجل شبكة مكوّنة من 100 مُحسّ، ومحطتها القاعدية متموضعة في منتصف البيئة المدروسة.

3-5-3-1 تحليل استهلاك الطاقة

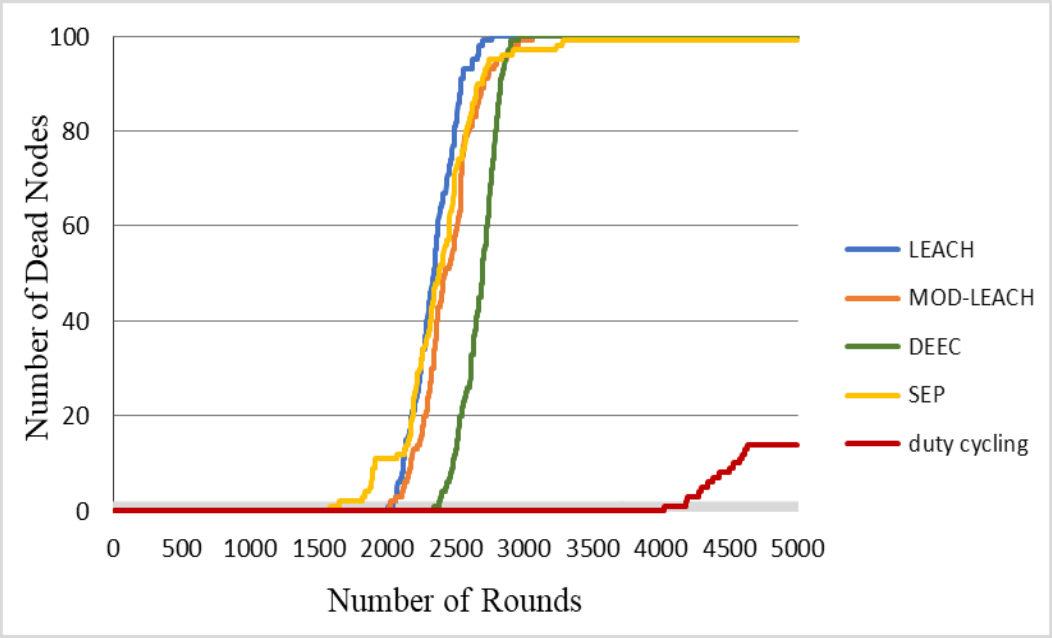
يبيّن الشكلان (3-35) و(3-36) تغير عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات rounds للبروتوكولات الأربعة LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP، والتي تندرج تحت مسمى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، إضافةً إلى طريقة دورة العمل؛ وذلك من أجل حالتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة.



الشكل(3-35)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]

من الشكل (3-35) قمنا باستخراج مدة استقرار ومدة حياة الشبكة من أجل شبكة حجم رزم معطياتها المتبادلة 4000 بت. فبالنسبة لمدة استقرار الشبكة، والتي تساوي الجولة المقابلة لموت أول مُحسّ في الشبكة، لاحظنا أن بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد استقرار متقاربة تساوي 848 و943 و1031 و1113 جولة للبروتوكولات SEP وLEACH وMOD-LEACH وDEEC على الترتيب؛ بينما حققت طريقة دورة العمل أعلى مدة استقرار والتي تساوي 2014 جولة. وكذلك الأمر بالنسبة لمدة حياة الشبكة، إذ تفوقت طريقة دورة العمل بتحقيق مدة حياة شبكة تساوي 5000 جولة، أي لم تنفذ أثناءها طاقة عدد من المُحسّات، أما من بين بروتوكولات التوجيه التراتبية فقد حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة شبكة والتي تساوي 2196 جولة، أمّا بقية البروتوكولات فحققت مدد حياة متقاربة تراوح من 1400 إلى 1500 جولة.

كما نلاحظ في الشكل (3-35) وفي حالة دورة العمل وحجم رزمة معطيات4000 بت، ثبات عدد العقد الميتة بين الجولة 2300 تقريباً والجولة 3500 بسبب نفاذ طاقة العقد المعزولة قبل الجولة 2300، وتناوب العقد المشكلة للأزواج بين حالة النشاط والنوم حتى بدء نفاذ الطاقة بعضها اعتباراً من الجولة 3500.

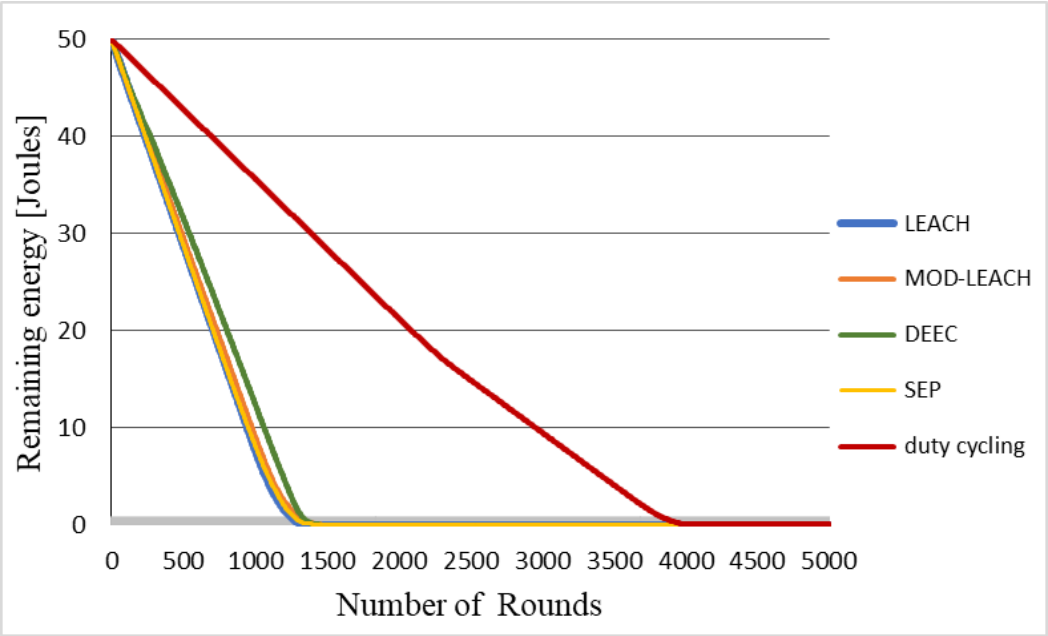


الشكل(3–36)عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]

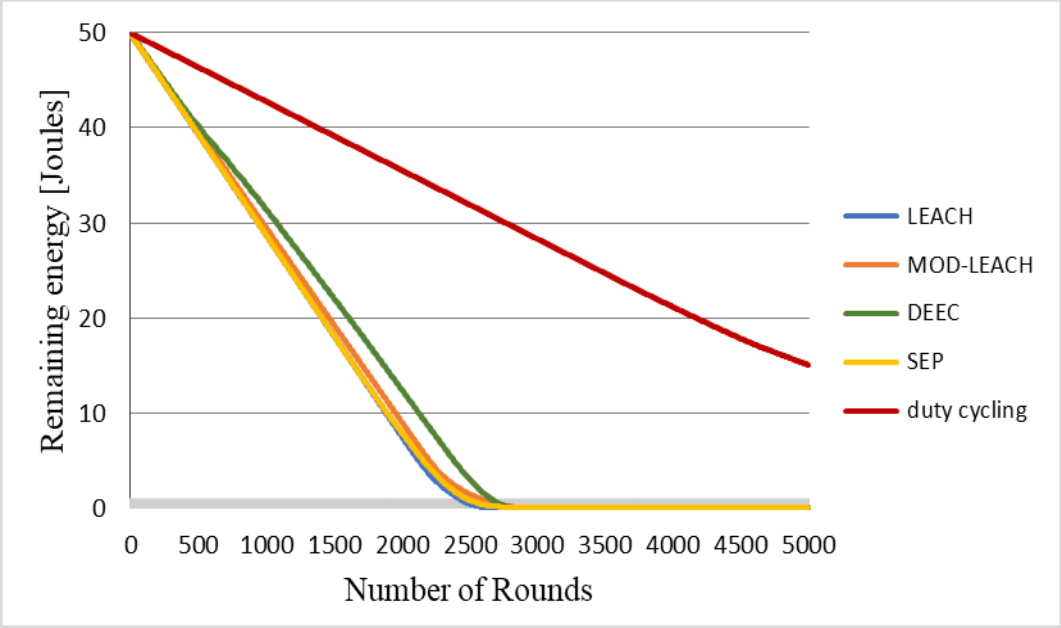
نلاحظ من الشكل(3–36) بأنّ بروتوكولات التوجيه التراتبية حققت مدد الاستقرار الآتية: 2002 و2015 و 2337 و 1579 جولة للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP على الترتيب، ومدد حياة شبكة تساوي 2767 و3064 و2958 جولة للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC على الترتيب؛ في حين حقق البروتوكول SEP مدة حياة شبكة كاملة على مدى 5000 جولة عمل. أمّا بالنسبة لطريقة دورة العمل فقد حققت مدة استقرار شبكة تساوي4027 جولة تقريباً، ومدة حياة شبكة كاملة، إذ لم تستنفذ الشبكة طاقة جميع مُحسّاتها في أي جولة من الجولات المدروسة. وتجدر الملاحظة بأن كلّاً من طريقة دورة العمل والبروتوكول SEP قد حققا مدة حياة شبكة كاملة. لكن يجب التنويه بأنه عند الجولة رقم 5000 كان عدد العقد الميتة في طريقة دورة العمل 14 عقدة، بينما في حالة البروتوكول SEP كان عدد العقد الميتة يساوي99 عقدة.

إنّ جميع القيم المُستنتجة من الشكل(3–36)، 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 جرى استخراجها من الشكل(3–35).

تبيّن الأشكال (3-37) و(3-38) منحنيات الطاقة المتبقية في الشبكة وتغير سلوكها بدلالة عدد جولات العمل، وذلك من أجل الحالتين المعتمدتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة.



الشكل(3-37) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]

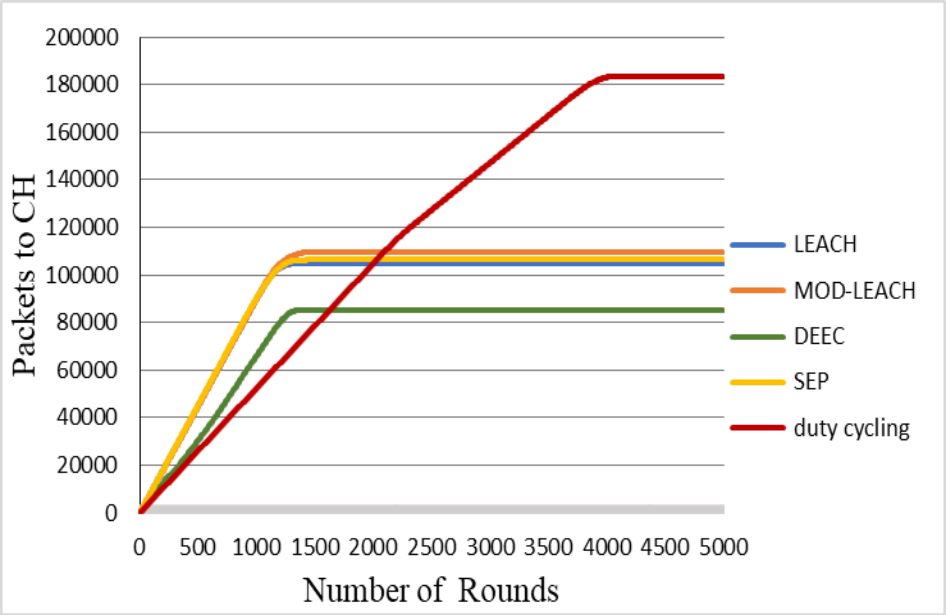


الشكل(3-38) الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]

نلاحظ من الشكلين (3–37) و(3–38) المعبرين عن منحنيات الطاقة المتبقية الكلية في الشبكة بأنّ ميل المنحنيات ينقص بانخفاض حجم رزم المعطيات في الشبكة، وهذا يدل على تباطؤ استهلاك الطاقة، لأنه بانخفاض حجم الرزمة تنخفض الطاقة المستهلكة بفعل عمليات المعالجة، إضافةً إلى انخفاض الطاقة اللازمة لإرسال رزمة واحدة من المعطيات واستقبالها، ففيما يخص طريقة دورة العمل نلاحظ أنّه عند الجولة رقم 3000، بلغت الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة من أجل حجم رزمة يساوي 4000 بت القيمة 9.5 جول؛ بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها يساوي 2000 بت بلغت الطاقة الكلية المتبقية القيمة 28.3 جول، أي بزيادة نسبية في الطاقة تساوي 2.98 (28.3/9.5). بينما على سبيل المثال عند الجولة رقم 1000 نلاحظ بأن الطاقة الكلية المتبقية في الشبكة عند حجم رزمة يساوي 4000 بت تساوي 35.6 جول تقريباً؛ بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها يساوي 2000 بت بلغت 42.7 جول تقريباً، أي أنّ الزيادة النسبية في الطاقة هي 1.2 تقريباً (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 ومن أجل شبكة ذات حجم رزم معطيات يساوي 4000 بت تساوي 7.8 و9.1 و12.4 و 8.2 جول تقريباً للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP على الترتيب، بينما عند ذات الجولة في شبكة حجم رزم معطياتها يساوي 2000 بت تكون الطاقة الكلية المتبقية 28.8 و 29.5 و 31.4 و 28.8 جول تقريباً للبروتوكولات LEACH وMOD-LEACH وDEEC وSEP على الترتيب، أي أنّ الزيادة النسبية هي 3.7 و 3.2 و 2.5 و 3.5 تقريباً للبروتوكولات المدروسة على الترتيب.

3–5–3–2 تحليل معدل التدفق في الشبكة

تبيّن الأشكال (3-39) و (3-40) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد، وذلك من أجل حالتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة 4000 بت و2000 بت.

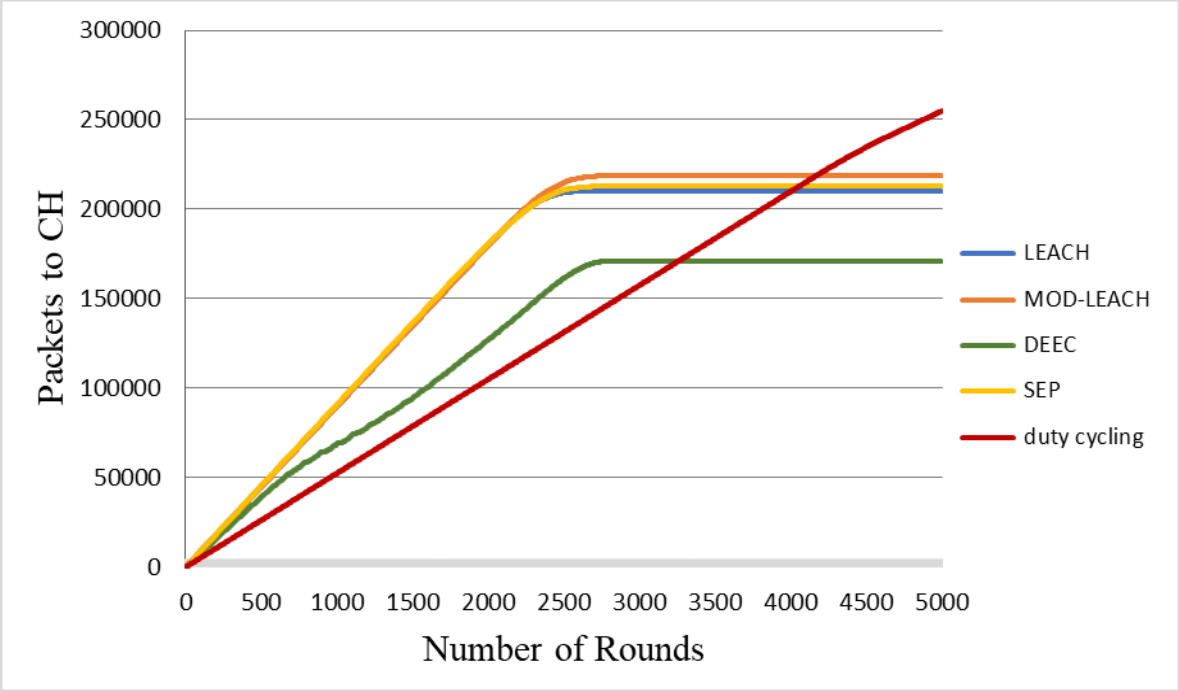


الشكل(3–39) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]

يلاحظ من الشكل(3–39) بأن عدد الرزم الأعظمي المُرسل إلى رؤوس العناقيد في طريقة دورة العمل يساوي 182 ألف رزمة، بينما في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أرسل البروتوكولDEEC ما يقارب 85 ألف رزمة إلى رؤوس العناقيد، وهو أقل من عدد الرزم الأعظمي المرسل من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية؛ والتي رواح عدد رزمها المرسلة إلى رؤوس العناقيد من 105 ألف إلى110 ألف رزمة تقريباً.

كما يمكن الملاحظة بأنّه جرى إرسال عدد رزم أقل في طريقة دورة العمل وذلك قبل الجولة رقم 2000؛ بالمقارنة مع عدد الرزم المرسلة من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية. ويعود ذلك إلى طبيعة آلية عمل طريقة دورة العمل في تناوب مُحسّات الشبكة بين وضعي النشاط والنوم؛ ومن ثمّ فإن عدد الرزم المرسلة ينتج فقط عن المُحسّات النشطة وليس عن كامل 100 مُحسّ كما هو الحال مع بروتوكولات التوجيه التراتبية.

بينما حققت طريقة دورة العمل عدد رزم مرسلة أكبر بعد الجولة رقم 2000؛ بسبب بدء موت مُحسّات الشبكة المستخدمة لبروتوكولات التوجيه التراتبية، ومن ثمّ توقف عملية تحسس المعطيات وإرسالها كرزم إلى رؤوس العناقيد.



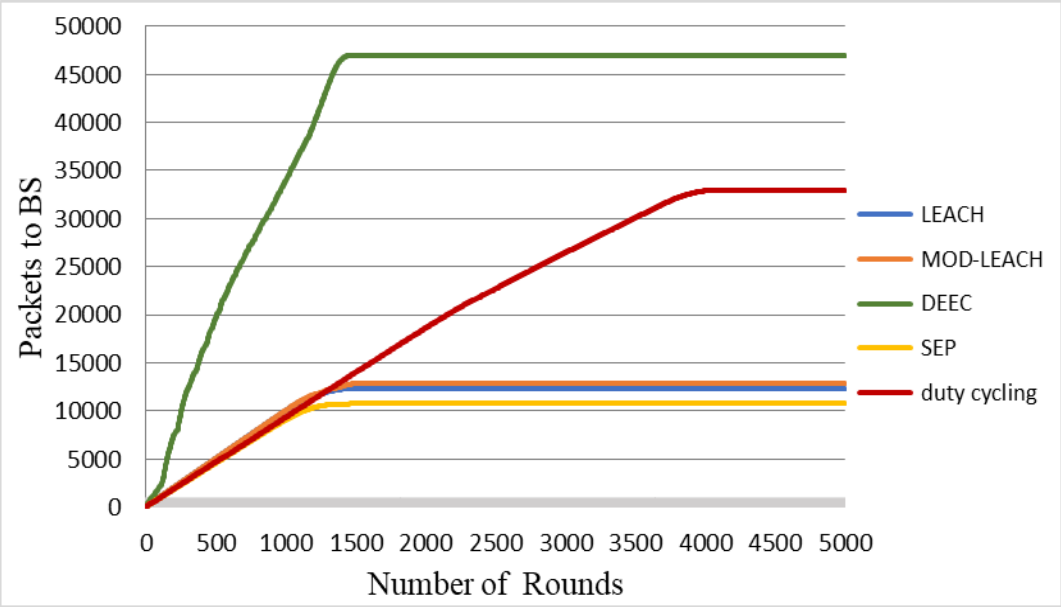
الشكل(3–40) كمية الرزم المُرسلة إلى رؤوس العناقيد من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]

يلاحظ من الشكل(3–40) بأن عدد الرزم الأعظمي المُرسل إلى رؤوس العناقيد في طريقة دورة العمل يساوي 250 ألف رزمة تقريباً، بينما في طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية أرسل البروتوكول DEEC ما يقارب 170 ألف رزمة إلى رؤوس العناقيد؛ وهو أقل من عدد الرزم الأعظمي المرسل من قبل بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية حيث رواح عدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد من 210 ألف إلى 218 ألف رزمة تقريباً.

نلاحظ من الشكلين (3–39) و(3–40) أنّ جميع بروتوكولات التوجيه التراتبية وكذلك طريقة دورة العمل قد حافظت على نفس السلوك من حيث تحقيق طريقة دورة العمل عدد أكبر من الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد، وتحقيق البروتوكول DEEC أقل عدد رزم مرسلة إلى رؤوس العناقيد، وتقارب بقية البروتوكولات من حيث عدد الرزم المرسلة.

لكن جرت الملاحظة بأنه عندما انخفض حجم رزمة المعطيات إلى النصف، زاد معدل الرزم المرسلة بمقدار الضِعف.

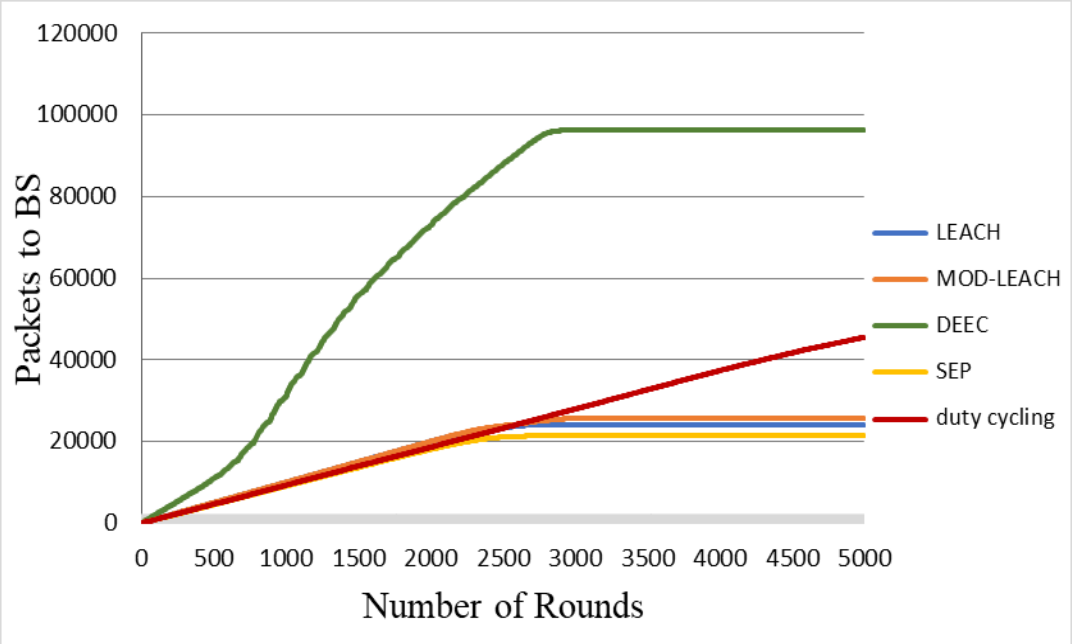
كما تبيّن الأشكال (3-41) و (3-42) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية، وذلك من أجل الحالتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة وهما 4000 و 2000 بت.



الشكل(3-41) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 4000 بت[الباحثة]

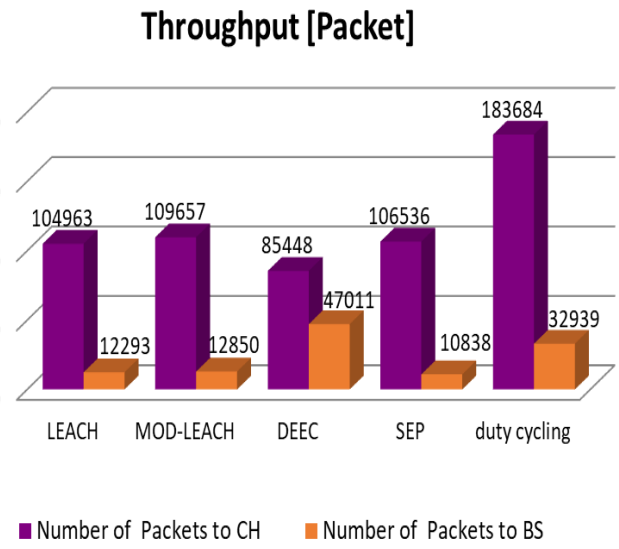
يلاحظ من الشكل(3-41) بأن البروتوكول DEEC قد حقق أعلى قيمة لعدد الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية والذي يساوي 47 ألف رزمة تقريباً وذلك عند الجولة 5000؛ ويعود ذلك إلى أن عدد رؤوس العناقيد المنتخبة في الجولة الواحدة في البروتوكول DEEC أكبر من بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية ، يليه طريقة دورة العمل التي حققت عند الجولة 5000 عدد رزم أعظمي مرسلة إلى المحطة القاعدية قدره 33 ألف رزمة تقريباً، بينما حققت بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية عدد رزم مُرسلة إلى المحطة القاعدية تراوح من 10.8 ألف إلى 12.8 ألف رزمة تقريباً وذلك عند الجولة 5000.

يلاحظ من الشكل(3-42) بأن البروتوكول DEEC قد حقق أعلى قيمة لعدد الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية و يساوي 90 ألف رزمة عند الجولة 5000، يليه طريقة دورة العمل التي حققت عدد رزم أعظمي مرسلة إلى المحطة القاعدية قدره 46 ألف رزمة تقريباً عند الجولة 5000، بينما حققت بقية بروتوكولات التوجيه التراتبية عدد رزم مُرسلة إلى المحطة القاعدية تراوح من 21 ألف إلى 25 ألف رزمة عند الجولة 5000.



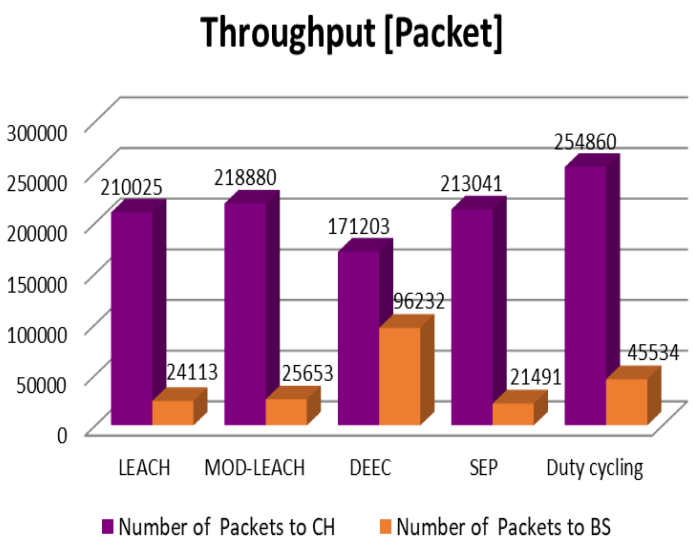
الشكل(3–42) كمية الرزم المُرسلة إلى المحطة القاعدية من أجل حجم رزمة معطيات يساوي 2000 بت[الباحثة]

يبيّن الشكل (3–43) تغير معدل التدفق في الشبكة، والذي يجري حسابه كمجموع كمية الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية، والتي جرى عرضها من الشكل(3–39) وصولاً إلى الشكل (3–42)، وذلك من أجل كلتا الطريقتين المدروستين، ووفقاً لحالتين مختلفتين لحجم رزم المعطيات في الشبكة.



الحالة الثانية

حجم رزم معطيات 4000 بت



الحالة الأولى

حجم رزم معطيات 2000 بت

الشكل (3-43) معدل تدفق الشبكة من أجل تغيير حجم رزم المعطيات(a) الحالة الأولى حجم رزم معطيات 2000 بت ،(b) الحالة الثانية حجم رزم معطيات 4000 بت [الباحثة]

نلاحظ من الشكل (3-43) بأن طريقة دورة العمل قد حققت أعلى معدل تدفق في الشبكة من أجل كلتا الحالتين لحجم رزم المعطيات، يليها البروتوكول DEEC، ثم تتقارب قيم معدل التدفق لبقية البروتوكولات التراتبية. وكما جرت الملاحظة بأنه عند حجم رزم معطيات يساوي 2000 بت ازدادت قيمة معدل تدفق الشبكة مقارنةً مع معدل التدفق المحقق في حال شبكة حجم رزم معطياتها 4000 بت، وذلك بالنسب الآتية 1.38 و1.99 و2 و1.99 و1.99 لطريقة دورة العمل وبروتوكول SEP و DEEC و MOD-LEACH و LEACH على الترتيب.

3-6 مقارنة النتائج مع نتائج دراسات سابقة

بالمقارنة مع الدراسة المرجعية لجفري Jaffri [36]؛ والتي تتضمن تقييم مردود (كفاءة) بروتوكول قياس كفاءة المنطقة المدركة للطاقة المعتمدة على العتبة Threshold-based Energy-aware Zonal Efficiency

Measuring (TEZEM)؛ والتي اعتمدت على الموسطات المبيّنة في الجدول (3–2)، والتي قمنا أيضا باعتمادها في الدراسة الآتية لضمان صحة المقارنة.

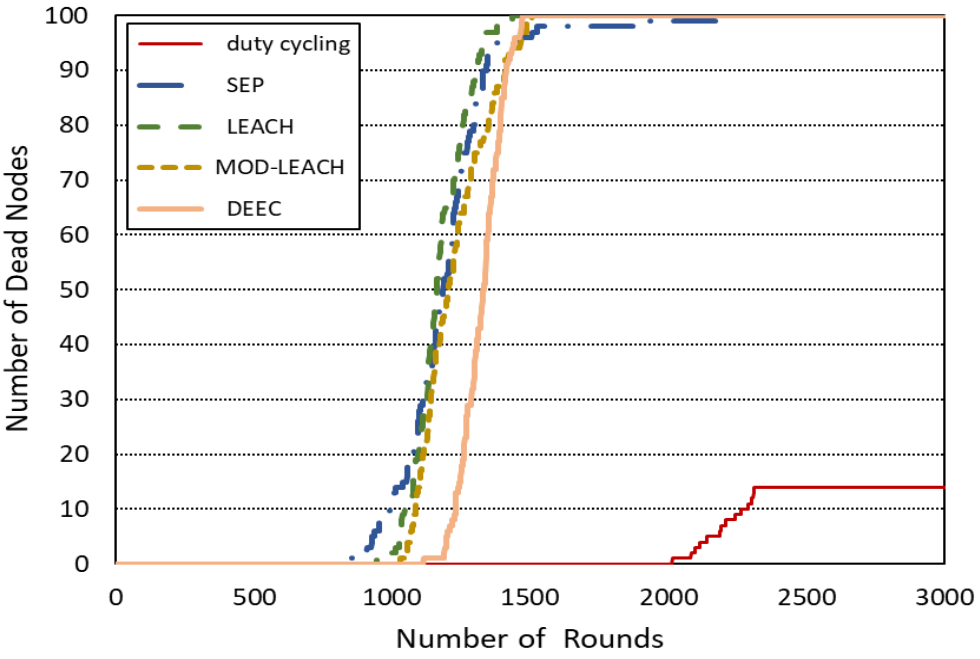
الجدول (3–2) موسطات المحاكاة لدراسة المقارنة مع الدراسة المرجعية لجفري [36]

الموسط	القيمة
المساحة المدروسة	100x100(m2)
موقع المحطة القاعدية	ثابت (50,50)
عدد الجولات	3000
عدد العقد (المُحسّات)	100
توزع العقد	عشوائي
الطاقة الإبتدائية لكل عقدة	0.5J
الطاقة المحررة في البت بدارة المرسل(ETx–elec)	50 nJ / bit
الطاقة المحررة في البت بدارة المستقبل (ERx–elec)	50 nJ / bit
حجم رزمة معطيات	4000 bit
المحاكي	Matlab

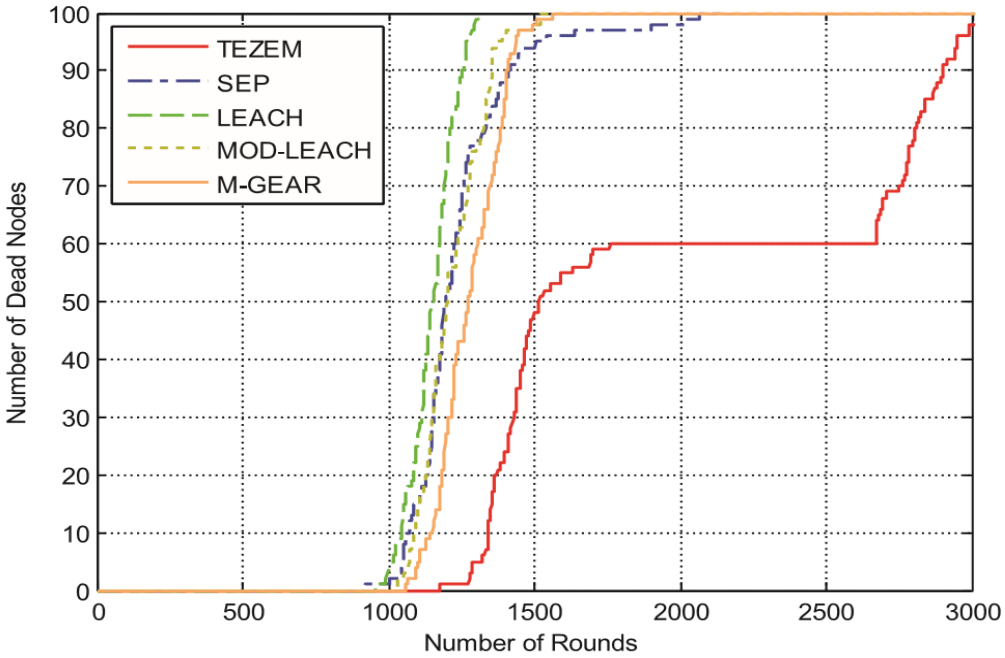
3–6–1 مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات

تتقاطع دراستنا مع الدراسة المرجعية لجفري Jaffri وآخرون [36] في ثلاثة بروتوكولات تنتمي إلى طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية وهي SEP وLEACH وMOD-LEACH، ولاحظنا بمقارنة النتائج بأن سلوك المنحني المعبر عن عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات متقارب جداً كما هو مبيّن في الشكل(3–44).

كما تبيّن من المقارنة تفوق طريقة دورة العمل على البروتوكول المقترح في الدراسة المرجعية لجفري Jaffri وآخرون [36]؛ حيث على سبيل المثال عند الجولة 2500 كان عدد العقد الميتة في طريقة دورة العمل يساوي 15 عقدة، بينما في البروتوكول المقترح من قبلهم TEZEM كان مساوياً للقيمة 60 عقدة عند ذات الجولة.



(a) [الباحثة]

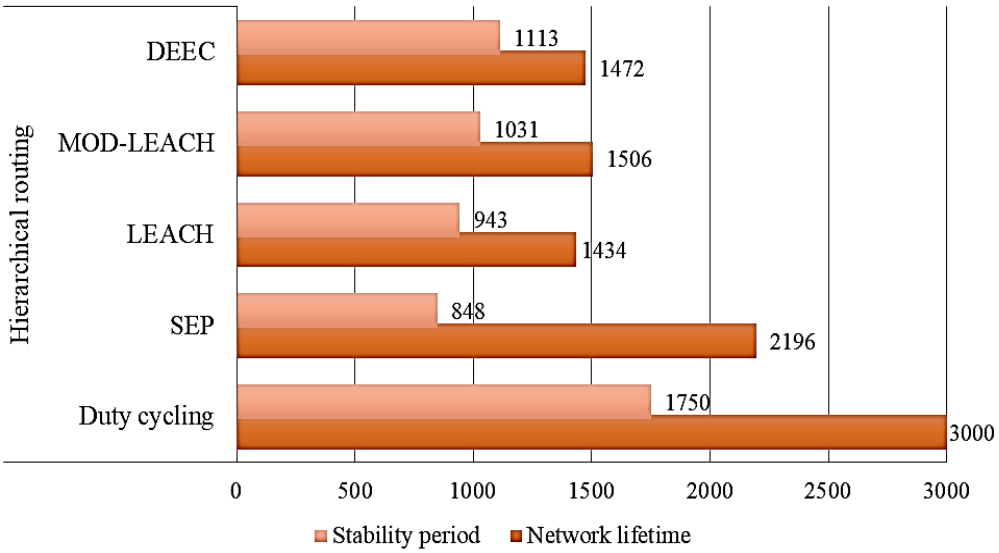


(b) [الدراسة المرجعية 36]

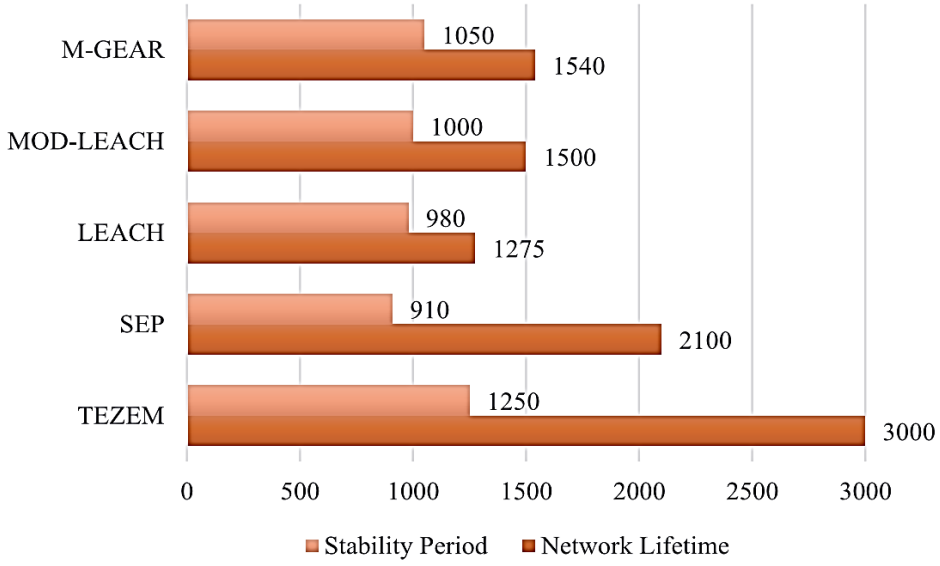
الشكل(3-44) مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36]

3-6-2مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة

قمنا أيضاً بمقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة المدروسة التي حصلنا عليها مع نتائج الدراسة المرجعية لجفري[36].



(a) [الباحثة]



(b) [الدراسة المرجعية 36]

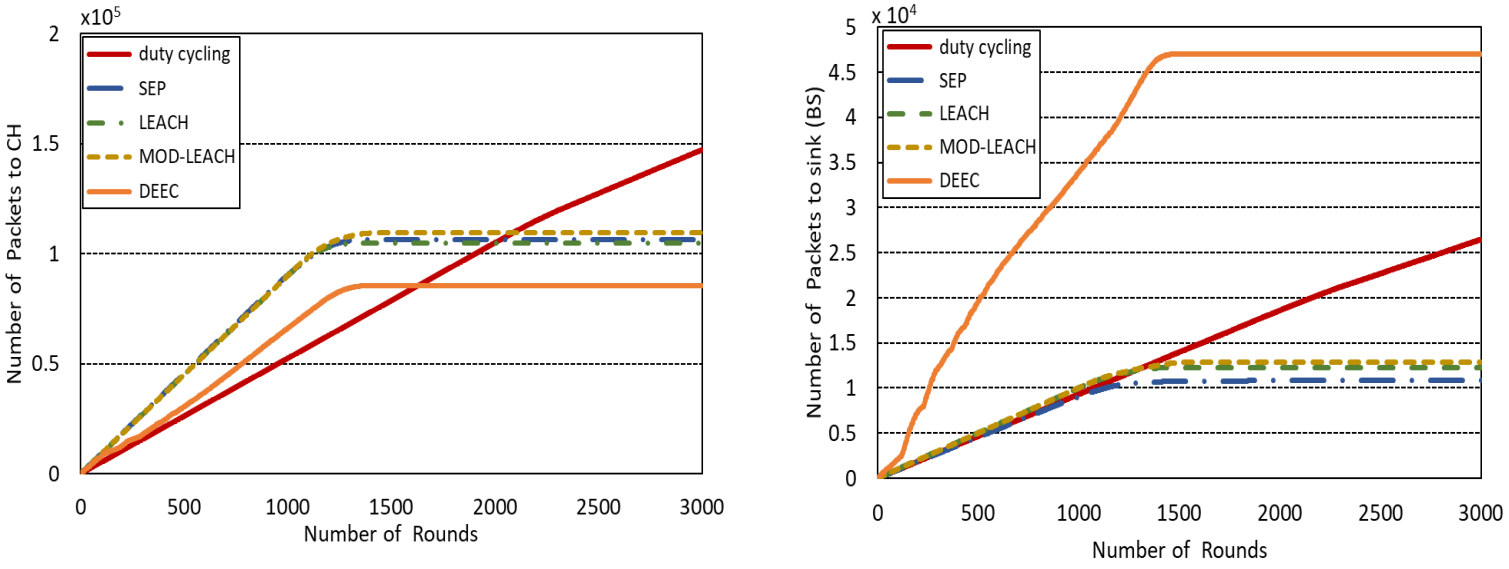
الشكل(3-45) مقارنة مدد استقرار ومدد حياة الشبكة (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36]

يلاحظ من الشكل(3-45)، وبالمقارنة بين نتائج دراستنا ونتائج الدراسة المرجعية[36] بأن البروتوكولات المشتركة بين الدراستين وهي SEP وLEACH و MOD-LEACH قد حققت قيم متقاربة للغاية لمدد استقرار وحياة الشبكة مع الحفاظ على سلوك متماثل؛ كما حقق البروتوكول SEP أعلى مدة حياة للشبكة من بين هذه البروتوكولات، وأيضاً أقل مدة لاستقرار الشبكة، ومما يؤكد صحة دراستنا.

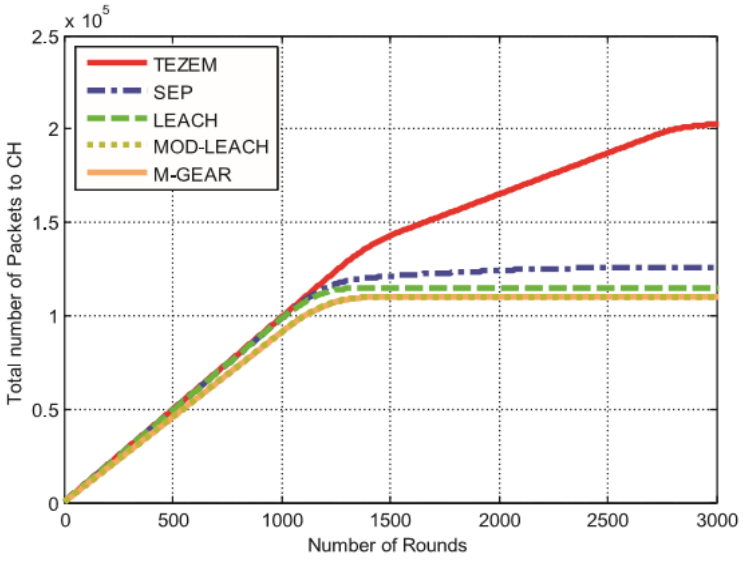
كما يمكن الاستنتاج من المقارنة تفوق طريقة دورة العمل على البروتوكول المقترح TEZEM في الدراسة المرجعية لجفري [36] لكونها إضافةً إلى تحقيقها لمدة حياة شبكة كاملة، قد حققت مدة استقرار أكبر تساوي 1750 جولة.

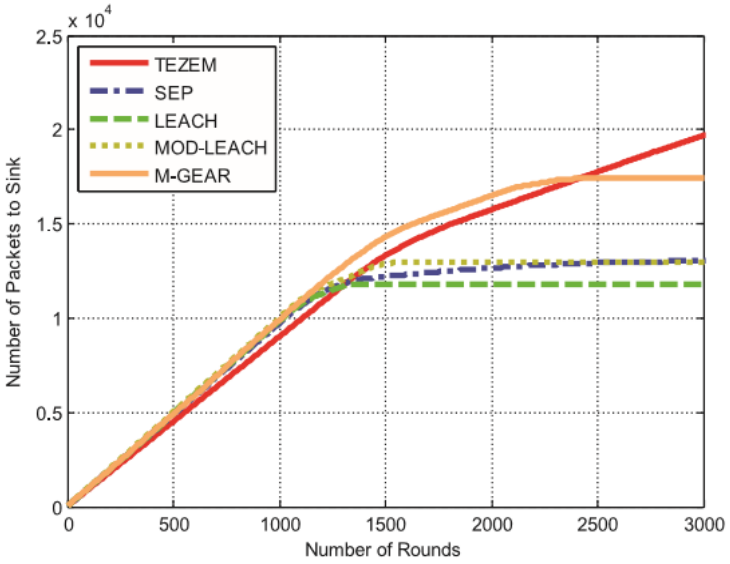
3-6-3مقارنة معدل التدفق في الشبكة

فيما يتعلق بعدد الرزم المرسلة إلى رؤوس العناقيد، وجدنا بالمقارنة بين نتائج دراستنا ونتائج الدراسة المرجعية[36] بناءً على المنحنيات في الشكل(3-46) بأن البروتوكولات المشتركة بين الدراستين قد حققت عدد رزم مرسلة إلى رؤوس العناقيد ضمن المجال $x10^5$ [1.2 - 1.3]. كذلك الأمر بالنسبة لعدد الرزم المرسلة إلى المحطة القاعدية حيث حققت البروتوكولات عدد رزم ضمن المجال $x10^4$ [1.1 - 1.3] في كلتا الدراستين؛ وهذا يثبت صحة النتائج المستخلصة من دراستنا.



[الباحثة] (a)



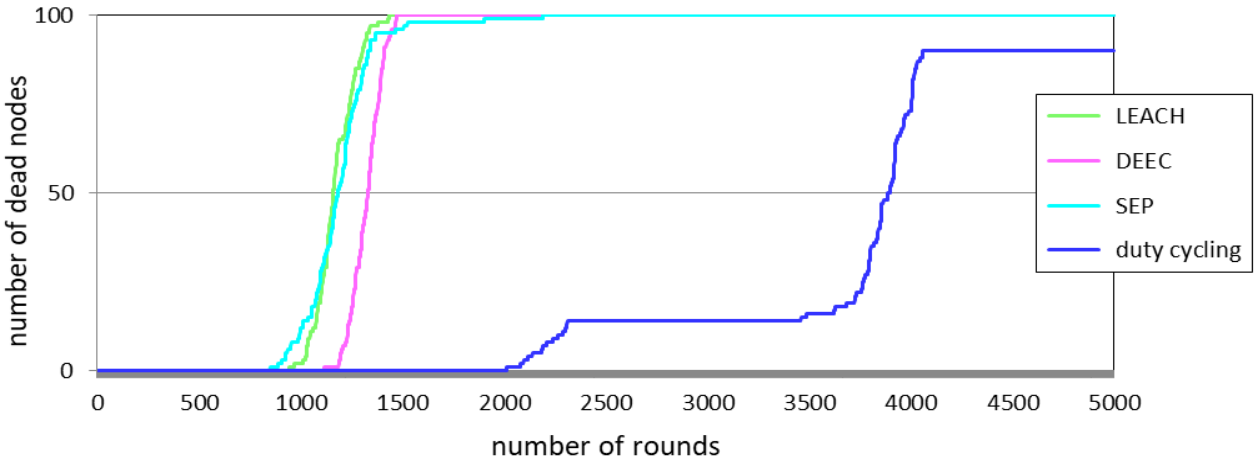


(b) [الدراسة المرجعية 36]

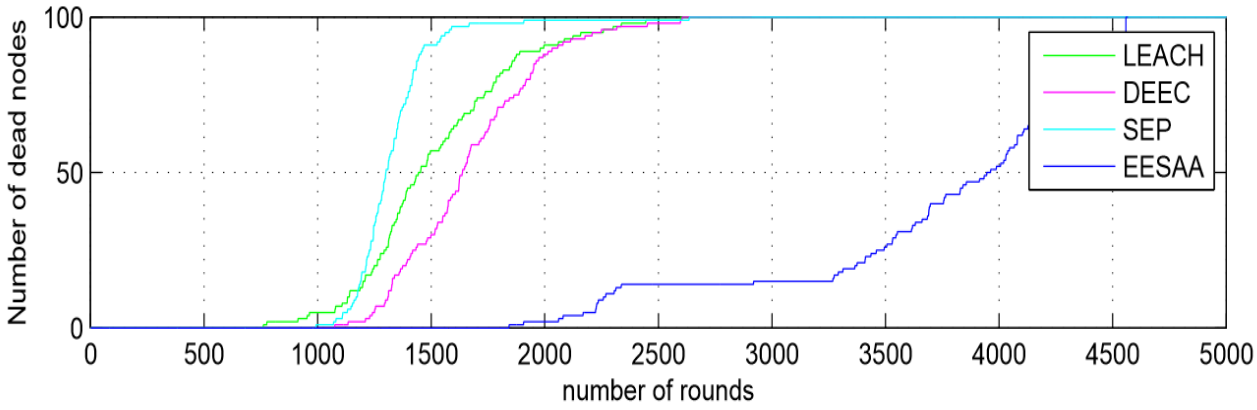
الشكل(3-46) مقارنة معدل التدفق في الشبكة (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [36]

قمنا أيضاً بإجراء مقارنة لنتائجنا مع نتائج الدراسة المرجعية لشاه shah وآخرون [35] التي اقترحوا فيها بروتوكول توجيه فعّال للطاقة لشبكات المحسّات الذكية المدركة للنوم والنشاط Energy Efficient Sleep Awake Aware Intelligent Sensor Network Routing Protocol (EESAA)؛ والذي يعتمد على تناوب المحسّات في عملها، وذلك باستخدام نفس موسطات الدراسة المرجعية لشاه [35]، والتي كانت مطابقة لتلك المبيّنة في الجدول (3-2) ولكن مع تمديد عدد جولات العمل إلى 5000 جولة.

لاحظنا من الشكل(3-47) الذي يعبّر عن عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات أن البروتوكولات المشتركة وهي LEACH وDEEC وSEP لها سلوك شبه مطابق في كلتا الدراستين. إذ حققوا مدد استقرار قريبة من 1000 جولة. كما حققت طريقة دورة العمل مدة استقرار تساوي 2000 جولة، وهي قيمة مقاربة لقيمة الاستقرار المحققة من قبل البروتوكول ESSAA موضوع الدراسة المرجعية لشاه [35] وبسلوك مشابه لكونهما معتمدتان على تناوب عمل المحسّات، مما يشكل إقراراً بصلاحية المحاكاة المنفذة في هذا البحث.



(a) [الباحثة]



(b) [الدراسة المرجعية 35]

الشكل(3-47) مقارنة عدد العقد الميتة بدلالة عدد الجولات (a) الباحثة (b) الدراسة المرجعية [35]

3-7 تحليل النتائج العملية والاستنتاجات

نبيّن فيما يأتي تحليلاً لأهم النتائج التي حصلنا عليها في دراستنا، ومجموعة من الاستنتاجات العامة

- تفوقت طريقة دورة العمل المعتمدة على منهجية واعية لنوم المُحسّات ونشاطها والمقودة بالموضع على طريقة بروتوكولات التوجيه التراتبية، وذلك في جميع السيناريوهات المدروسة ومن أجل معظم مقاييس الأداء المُعتمدة.

- حافظت كلتا الطريقتين المدروستين على مدة حياة شبكة أطول في حالة تموضع المحطة القاعدية داخل البيئة المدروسة، وذلك حسب النتائج المبيّنة في الشكل (3-6)، وذلك لأن الطاقة المصروفة للإرسال والاستقبال تتعلق

بالمسافة بين المرسل والمستقبل، فعندما زادت المسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية أدى ذلك لصرف طاقة أكبر في دارتي الإرسال والاستقبال، وهذا موضح رياضياً في نموذج الطاقة الراديوي وعلى وجه التحديد بالعلاقة

(2–1). ولكون مدة حياة شبكة طويلة يستدعي إرسال المزيد من الرزم، فهذا يقود إلى زيادة في معدل التدفق في الشبكة، أي أنّ معدل التدفق في شبكة يكون أعلى كلما كانت المحطة القاعدية أقرب للبيئة المدروسة وهذا ما هو مبيّن في الشكل(3–16).

– أدت زيادة عدد المُحسّات في الشبكة إلى زيادة مدة استقرار الشبكة في طريقة دورة العمل وذلك حسب النتائج المبيّنة في الشكل (3–21)، ويعود ذلك إلى أنه في طريقة دورة العمل يحدد المدى الأعظمي بين المُحسّات بالمسافة 10م ويجري تشكيل أزواج تتناوب في عملها بين جولة وأُخرى. أما عند انخفاض عدد المُحسّات فقد يصعب تحقيق شرط تشكيل الأزواج، مما سيؤدي إلى عمل بعض المُحسّات بشكل دائم، وهذا ما يقود إلى تخفيض فعالية طريقة دورة العمل من أجل عدد مُحسّات قليل، بينما لم تتأثر بروتوكولات التوجيه التراتبية بشكل كبير عند زيادة عدد العقد في الشبكة؛ لكون كل مُحسّ مجهز بطاقته الابتدائية بشكل مستقل، وحتى أنّ عمله مستقل عن العقد المجاورة.

– جرى التوصل إلى أن مضاعفة عدد المُحسّات قاد إلى مضاعفة معدل التدفق في الشبكة، وذلك نتيجة زيادة عدد الرزم المُرسلة من المُحسّات وصولاً إلى المحطة القاعدية بوساطة رؤوس العناقيد. وتعدّ هذه النتيجة مبررة لكون زيادة عدد المُحسّات تزيد من كمية المعطيات المُحسّوسة من البيئة المحيطة، والتي سيجري تناقلها وصولاً إلى المحطة القاعدية وهذا مبيّن بالمنحنيات في الشكل(3–34).

– 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 رزمة واحدة من

المعطيات واستقبالها، وذلك على مستوى جميع أدوار عقد الشبكة (مُحسّات عادية، ورؤوس عناقيد، ومحطة قاعدية)؛ وهذا بدوره سيحسن من مدة حياة الشبكة ويساهم بإطالتها، وجرى تبيان النتائج عددياً في الشكلين(3–35) و (3–36).

– يزداد معدل التدفق الكلي في الشبكة بانخفاض حجم رزم المعطيات المُرسلة في الشبكة، حيث عندما انخفض حجم رزمة المعطيات إلى النصف، ازداد معدل التدفق في الشبكة المعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية بمقدار الضِعف، بينما في طريقة دورة العمل زاد معدل التدفق النسبي بمقدار1.38، وذلك حسب نتائج المحاكاة والمبيّنة في الشكل (3–43)، وهذا يُبرر بأن انخفاض حجم رزمة المعطيات سينخفض الزمن اللازم لمعالجة كل رزمة، ومن ثمَّ أثناء نفس عدد الجولات سيجري إرسال عدد أكبر من الرزم.

الآفاق المستقبلية Future Works

يمكن تطوير هذا البحث في عدة محاور منها:

- بناء بروتوكول قابل للتكيّف مع بعد المحطة القاعدية عن حقل العمل، واستخدام مُحسّات نقّالة في الشبكة مزودة بطاقة أكبر من المُحسّات 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 ترشيد استهلاك مخزون طاقة المُحسّات العادية وعدم تأثره ببعد المحطة القاعدية.
- بناء بروتوكول هجين يجمع بين بساطة التنفيذ البرمجي لبروتوكولات التوجيه التراتبية وفعالية طريقة دورة العمل في حفاظها على الطاقة. وبما أنّ أداء الطريقتيين يكون شبه متماثل في بداية مدة حياة الشبكة فيمكن اعتماد نهج بروتوكولات التوجيه التراتبية في المرحلة الأولى من عمل الشبكة، ثم بعد عدد مختار من الجولات يجري اعتماد آلية عمل طريقة دورة العمل فقط.
- تقييم أداء الشبكة المدروسة اعتماداً على مقاييس أداء إضافية مثل معدل فقد الرزم، بحيث يُستفاد منه باختيار الطريقة المثلى التي تجمع بين تحسين مردود الطاقة وموثوقية الشبكة معاً.

الأبحاث المنشورة Published Papers

أولاً– جرى قبول المقالة البحثية المعنونة:

تقييم أداء بروتوكولات التوجيه التراتبية في شبكات المُحسّات اللاسلكية اعتماداً على كفاءة الطاقة

Performance Evaluation of Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks Based on Energy Efficiency

- المجلة: مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
- تاريخ الإيداع: 2023/6/23
- تاريخ القبول: 2023/9/10

ثانياً– جرى قبول المقالة البحثية المعنونة:

مقارنة أداء شبكات المُحسّات اللاسلكيّة المُعتمدة على طريقة دورة العمل مع أداء تلك المُعتمدة على بروتوكولات التوجيه التراتبية

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

- المجلة: مجلة جامعة البعث – سلسلة العلوم الهندسية
- تاريخ الإيداع: 2024/2/17
- تاريخ القبول: 2024/3/17

References قائمة المراجع

[1] Muhammad, S. A., et al. (2023). Information and Communication Technology Issues & Challenges for Wireless Sensor Networks. *Savannah Journal of Science and Engineering Technology*, 1(3), 31-36.

[2] Gulati, K., et al. (2022). A Review Paper on Wireless Sensor Network Techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*, 51, 161-165.

[3] Varsa, G. S., and Sridharan, D. (2021). A Performance Preview of Contemporary Hierarchical Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 27(1), 1-50.

[4] Sonawane, R. C., and Muthukrishnan, A. (2024). SMART Clustering A Methodical Approach to Increasing Energy Efficiency in Diverse Wireless Sensor Network. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, 45(1), 2786 - 2798.

[5] Kim, J., et al. (2021).Wireless Sensor Network (WSN) Configuration Method to Increase Node Energy Efficiency through Clustering and Location Information. *Symmetry*,13(3), 390,1-11.

[6] Deshpande, V. V., and Shukla, R. K. (2024). DCOR: Enhancing Network Lifetime and Performance in IoT-Based Wireless Sensor Networks through Distributed Clustering and Optimized Routing. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, *12*(12), 445-457.

[7] El-Sayed, H., and Al Bayatti, H. (2021). Comparisons of Some Multi-Hop Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Information Sciences Letters*, 10 (3), 503-509.

[8] Al-Sulaifanie, A. I., and Al-Sulaifanie, B. K. (2021). Hybrid Access and Adaptive Duty Cycle Clustering Protocol for Ultra-Low Power Wireless Sensor Networks. *IET Communications*,15(9), 1158-1173.

[9] Khan, M. A., et al. (2022). Algorithm for Increasing Network Lifetime in Wireless Sensor Networks Using Jumping and Mobile Sensor Nodes. *Electronics*, 11(18), 2913, 1-15.

[10] 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*, 4(1), 17-31.

[11] Ahmmad, B.A., and Alabady, S.A. (2022). Energy-Efficient Routing Protocol Developed for Internet of Things Networks. *IET Quantum Communication*, 4(1), 25-38.

[12] Mohammed, A. (2023). Review Study about Hierarchical Routing Protocol in Wireless Sensor Networks. *Iraqi Journal of Intelligent Computing and Informatics (IJICI)*, 2(2), 80-89.

[13] Dalal, B., and Kukarni, S. (2021). *Wireless Sensor Networks: Applications. In S. Yellampalli (Ed.), Wireless Sensor Networks-Design, Deployment and Applications*. IntechOpen.

[14] Sharma,V., and Pughat, A.(2017). *Energy-Efficient Wireless Sensor Networks*. CRC Press.

[15] Zheng, J., and Jamalipour, A. (2009). *Wireless Sensor Networks:a Networking Perspective*. John Wiley & Sons.

[16] Ukhurebor, K. E. et al. (2021). *Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges. In S. Yellampalli (Ed.), Wireless Sensor Networks-Design, Deployment and Applications*. IntechOpen.

[17] El Emary, I. M., and Ramakrishnan, S. (2013). *Wireless Sensor Networks: Current Status and Future Trends*. CRC Press.

[18] Kandris, D., et al.(2020). Applications of Wireless Sensor Networks: an Up-to-Date Survey. *Applied System Innovation*, 3(1), 14, 1-24.

[19] Vaid, R., and Kumar, V. (2013). Security Issues and Remidies in Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Computer Applications*, 79(4), 31-39.

[20] Selmic, R. R, et al. (2016). *Wireless Sensor Networks: Security, Coverage, and Localization*. Springer International Publishing.

[21] Shabbir, N., and Hassan, S. R.(2017*). Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs). In P.J. Sallis (Ed.),Wireless Sensor Networks - Insights and Innovation*. IntechOpen.

[22] Parvathi, C., and Talanki, S. (2021). *Energy Saving Hierarchical Routing Protocol in WSN*. In S.Yellampall: (Ed.), *Wireless Sensor Networks-Design, Deployment and Applications*. IntechOpen.

[23] Ghorbanvirdi, M., and Mazinani, S. M. (2022). Energy Efficient Multi-Clustering Using Grey Wolf Optimizer in Wireless Sensor Network. *International Journal of Information and Communication Technology Research*, 14(1), 1-12.

[24] Khriji, S., et al. (2018). Energy-Efficient Techniques in Wireless Sensor Networks. *In O.Kanovn (Ed.), Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks: Technology, Components and System Design*. De Gruyter Oldenbourg.

[25] Jin, H., and Jiang, W. (Eds.). (2010). *Handbook of Research on Developments and Trends in Wireless Sensor Networks: From Principle to Practice*. IGI Global.

[26] 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*, 10(3), 50, 1-21.

[27] 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*, 8(3), 214-222.

[28] Salih, M. A., and Sulaiman, D. R. (2023). Throughput and Energy Efficiency Evaluation of WSN Using Efficient Routing Protocols. *University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences*, 13(1), 25-33.

[29] Mahmood, D., et al. (2013). MODLEACH: a Variant of LEACH for WSNs. *Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications,*158-163.

[30] Jain, K., et al. (2017). A Review on Routing Protocols of Wireless Sensor Network . *International Journal of Advance in Scientific Research and Engineering*, 6(4), 836-843.

[31] Wodajo, H. H., et al. (2021). Performance Evaluation of LEACH, PEGASIS and TEEN Routing Protocols in Wireless Sensor Networks Based on Network Lifetime. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 13(3), 4955-4961.

[32] 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.

[33] Faisal, S.,et al. (2013). Z-SEP: Zonal-Stable Election Protocol for Wireless Sensor Networks. *Journal of Basic and Applied Scientific Research (JBASR)*, 3(5), 132–135.

[34] Martey, A.S. and 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*, 26(2), 1135-1147.

[35] Shah, T., et al. (2012). Energy Efficient Sleep Awake Aware (EESAA) Intelligent Sensor Network Routing Protocol. IEEE. *15th International Multitopic Conference (INMIC)*,317-322.

[36] 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*, 18(6), 1-18.

[37] Vijayan, S., and Munusamy, N. (2022). Deterministic Centroid Localization for Improving Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks. *Cybernetics and Information Technologies*, 22(1), 24-39.

[38] Krishnan, K., et al. (2021). Energy-Efficient Cluster-Based Routing Protocol for WSN Based on Hybrid BSO–TLBO Optimization Model. *The Computer Journal*, 64(10).

[39] Farahmand, E., and Mahani, A. (2021). A Novel Energy-Efficient Weighted Multi-Level Clustering Protocol. *Journal of applied research in electrical engineering*, 1(1), 69-78.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Damascus University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Department of Electronics and Communication Engineering

Evaluation of Energy Efficiency Enhancement Methods for Wireless Sensors Networks

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in Advanced Communications Engineering

Prepared by

Eng. Aseel Al Homsi

Scientific supervisor

Dr. Eng. Mohamed Khaled Chahine

Academic Year

2023-2024