



الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
العام الدراسي 2019/2020
اختصاص اتصالات

تطوير خوارزمية لتحسين أداء التوجيه في إنترنت الأشياء

Development of an algorithm to enhance routing performance in the Internet of Things

دراسة أعدت لنيل شهادة الماجستير في هندسة الاتصالات- اختصاص الشبكات

تقديم

م. رهنف الشعار

إشراف

د. خلدون خوزم د. ياسر جعمور

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

Higher Institute for Applied Sciences and Technology Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie

مؤسسة سورية حكومية للتعليم العالي أحدثت في عام 1983، بهدف إعداد أطر متميزة مؤهلة للبحث العلمي والتطوير في مجال العلوم التطبيقية والتقانة، لتساهم بفاعلية في التنمية العلمية والصناعية والاقتصادية في القطر. يشكّل التأهيل الهندسي والدراسات العليا في المعهد العالي محور عمليّة إعداد الأطر المتخصّصة. يخريج المعهد العالي مهندسين متميزين، بعد دراسة لمدة خمس سنوات، في اختصاصات الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وهندسة الطيران وعلوم وهندسة المواد. كما يمنح المعهد العالي درجة الماجستير الأكاديمي، ماجستير بحثي يمتد على سنتين، من خلال مجموعة من برامج الماجستير في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي علوم المواد وفي نظم المعلومات واتخاذ القرار وفي نظم معالجة المعطيات الكبيرة. وأخيراً يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في عدة اختصاصات موازية لما ذكر في برامج الماجستير. يعتمد المعهد العالي في تميزه على تركيزه على النوع وليس الكم، فهو ينتقي في المرحلة الهندسية شريحة الطلاب المتفوقين في شهادة الدراسة الثانوية السورية من الفرع العلمي أو من في حكمهم. أما في مرحلة الماجستير فيقبل المعهد العالي حملة الشهادات الجامعية الموازية للماجستير المطلوب، وذلك على أساس مفاضلة خاصة لاختبار الأفضل. كما يقدم المعهد للطلاب جواً متميزاً للدراسة والبحث بدءاً من كوادره المتفرغة عالية التأهيل ومناهجه المواكبة للتطورات العلمية، وانتهاءً بإمكانيات مختبراته المتميزة في القطر وبنيتها التحتية الموازية من صالات حواسيب وورش ومقدرات مادية وشبكات تعاون مع الصناعة والهيئات الأكاديمية داخل وخارج القطر. كل ذلك في وسائل للراحة والترفيه من سكن طلابي مطعم وصلات رياضية وملاعب ونشاطات طلابية متنوعة. بالإضافة إلى نشاطه الأكاديمي، يضم المعهد العالي أقساماً علمية ومخابر متنوعة ومراكز تكنولوجية، كمخبر الدراسات البيئية ومركز تقانات اللحام ومركز الحوسبة عالية الأداء. تقدم هذه الفعاليات خدمات واستشارات للقطاعين العام والخاص، بالإضافة إلى المشاريع التطويرية والنشاطات البحثية والدورات التدريبية وتنظيم ورش العمل والمؤتمرات العلمية.

مسافة الألف ميل تبدأ بخطوة

ماوتسي تونغ

من طلب العلا من غير كد سيدرکها إذا شاب الغراب

يحيى بن كثير

من لا يعمل لا يخطئ ومن لا يخطئ لا يتعلم

الإهداء

إلى من لم يبخل علي بدعائه.. إلى من كان لي العون والسند
إلى من كان قدوتي ومعلمي
أبي

إلى ينبوع الحنان... إلى الروح الطاهرة التي طالما شجعتني ودفعتني
إلى من كان بلسم الجراح وشمعة الأمل
أمي

إلى من كانوا لي الدعم في خطواتي ومنبع الحنان عندما تقسو الأيام
أخوتي

إلى من أمضيت أجمل أيام شبابي معهم... رفاق الدرب
أصدقائي

إلى من قدّر معنى الصداقة... ووقف معي بجميع مراحل حياتي
جهاد

إلى من شاركني ضحكتي ودموعي... ودعمني بخطوات نجاحي
هناء

كَلِمَةُ شُكْرٍ

أَتَقَدِّمُ بِالشُّكْرِ إِلَى الدُّكْتُورِ يَاسِرِ جَعْمُورٍ وَالدُّكْتُورِ خَلْدُونِ خَرْزَمِ عَلَي دَعْمِهِم لِهَذِهِ المَبَادِرَةِ وَعَلَى مَتَابِعَتِهَا وَمَلاحِظَاتِهِم القِيَمَةَ وَنِصَائِحِهِم الَّتِي كَانَتِ السَّنْدَ لِيَرَى هَذَا العَمَلَ النُّورِ.

الخلاصة

تزداد الحاجة يوماً بعد يوم إلى تطبيقات إنترنت الأشياء، حيث أصبحت هذه التطبيقات تُستخدم في العديد من المجالات والأنظمة، ومع هذا التزايد الواسع لاستخداماتها وطرق توظيفها، بدأت تظهر معه مشاكل جديدة في هذه الشبكات. تتطلب مسألة تطبيق إنترنت الأشياء في شبكات كبيرة نوعاً ما استخدام عدد كبير من عقد الحساسات في الشبكة، لكن زيادة عدد هذه العقد سيؤدي إلى زيادة حركة البيانات في الشبكة وبالتالي استنزاف الطاقة بشكل أسرع. طُرحت العديد من الحلول والبروتوكولات لتلائم العمل في مثل هذه الشبكات، ومن أهم البروتوكولات التي تم طرحها كان بروتوكول RPL، لكنّه يعاني من عدة نقاط ضعف منها عدم القدرة على موازنة الحمل. نهدف في هذا البحث إلى تقديم حل لمشكلة استنزاف الطاقة وتحسين أداء التوجيه في بروتوكول RPL. قمنا باقتراح خوارزمية تستخدم استراتيجية فعالة تعتمد على أربعة مقاييس في اختيار الأب الأفضل وهي: رتبة العقدة rank، مقياس ETX، مقياس الطاقة المتبقية وعدد الطرود المرسلة الخاصة بالعقدة. تمّت عملية تنجيز الخوارزمية باستخدام المحاكى cooja. كما تمّ في هذا البحث تقييم أداء الخوارزمية المقترحة من حيث متوسط استهلاك الطاقة ومعدّل تسليم الطرود (PDR (packet delivery ratio من أجل شبكات متباينة الكثافة، ومقارنة الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية ECRM. أظهرت نتائج المحاكاة تفوّق خوارزمتنا على خوارزمية ECRM من حيث تحسين استهلاك الطاقة ومعدّل تسليم الطرود.

Abstract

The need for Internet of Thing 'IoT' applications is increasing day after day, and now these applications are getting used in many domains and lots of systems. With this vast increasing, new problems arise with networks.

Applying IoT in wide networks requires large number of sensor nodes in the network which will increase the data traffic in this network, and subsequently losing more energy. Many solutions and protocols have been proposed to fix this problem and to adapt with these networks. The most important protocol was RPL, but it has many weaknesses: like inefficiency with load balancing. In this paper, we propose a solution to alleviate the problem of losing energy and to improve the performance of RPL routing protocol. We propose an algorithm which uses an efficient strategy based on 4 metrics to choose the preferred parent: (Node rank, ETX metric, Residual energy and Number of transmitted packets per node). The algorithm had been implemented using Cooja simulator. In addition, the proposed algorithm had been evaluated considering average power consumption and packet delivery ratio (PDR) of different-densities networks. Plus, a precise comparison between the proposed algorithm and ECRM algorithm had been accomplished. Simulation results show that our proposed algorithm outperforms ECRM algorithm in terms of improving the process of energy consumption and packet transmitting rate.

الفهرس

1	الفصل الأول: مشكلة البحث والهدف
1	1.1 مقدمة:
1	2.1 مشكلة البحث :
2	3.1 الهدف من البحث :
3	الفصل الثاني: انترنت الأشياء IoT وبروتوكولاتها
3	1.2 مقدمة:
3	2.2 إنترنت الأشياء:
4	3.2 الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (LLN):
6	4.2 نظرة عامة على بروتوكولات LLN
7	1.4.2 بروتوكول IEEE 802.15.4
9	2.4.2 بروتوكول IEEE 802.15.4e (TSCH):
9	3.4.2 معيار 6LoWPAN:
10	4.4.2 بروتوكول IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks:
11	5.4.2 بروتوكول COAP:
12	الفصل الثالث: بروتوكول RPL
12	1.3 مقدمة عامة عن RPL
12	2.3 رسائل التحكم في RPL
13	1.2.3 رسالة المعلومات (DIO) DODAG Information Object:
13	2.2.3 رسالة التماس المعلومات (DIS) DODAG Information Solicitation:
14	3.2.2 رسالة إعلان الوجهة (DAO) Destination Advertisement Object:
14	4.2.3 الإقرار باستلام رسالة إعلان الوجهة (DAO-ACK):

14	3.3 بناء شجرة DODAG
17	4.3 آلية الإصلاح في DODAG
17	5.3 صيانة DODAG
18	6.3 نظرة عامة على مقاييس التوجيه في RPL
19	1.6.3 مقاييس الوصلة:
19	2.6.3 مقاييس العقدة:
20	7.3 الوظائف الغرضية في RPL
20	1.7.3 الوظيفة الغرضية الصفرية (OF0) objective function zero
20	2.7.3 مقياس Minimum Rank Hysteresis Objective Function (MRHOF)
21	1.2.7.3 مقياس Minimum Rank Hysteresis Objective Function with ETX (ETXOF)
21	2.2.7.3 مقياس Minimum Rank Hysteresis Objective Function with Energy
22	الفصل الرابع: الدراسة المرجعية
22	1.4 مقدمة :
23	2.4 مشاكل موازنة الحمل في RPL
23	1.2.4 مشكلة النقطة الساخنة:
23	2.2.4 مشكلة عنق الزجاجة:
23	3.2.4 مشكلة قطيع الضحيج (Thundering Herd):
24	4.2.4 زيادة الحمل على العقد والشبكة:
24	5.2.4 عدم استقرار الشبكة:
24	6.2.4 معدّل تسليم الطرود السيئ:
24	3.4 الدراسات المرجعية المرتبطة بمشكلة البحث :
28	4.4 تقييم الوظائف الغرضية المحسّنة في RPL حسب الدراسة المرجعية:
28	1.4.4 التقييم عن طريق عدد العقد :
29	2.4.4 التقييم عن طريق مقاييس التوجيه:

29	3.4.4 التقييم عن طريق الطوبوجيا والبيئة:
30	5.4 خلاصة :
31	الفصل الخامس: الخوارزمية المقترحة لتحسين أداء التوجيه
31	1.5 مقدّمة:
31	2.5 الخوارزمية المعتمدة:
32	3.5 التطوير المقترح على الخوارزمية:
32	1.3.5 المقاييس المستخدمة في الخوارزمية:
33	2.3.5 توصيف الخوارزمية:
35	3.3.5 المخطط العام للخوارزمية:
38	4.5 المحاكاة وبيئات العمل :
40	الفصل السادس: المحاكاة والنتائج العملية
40	1.6 مقدّمة:
40	2.6 تنجيز الخوارزمية:
42	3.6 تهيئة الشبكة:
45	4.6 حساب مقاييس الأداء:
47	الفصل السابع: التقييم ومناقشة النتائج
47	1.7 مقدّمة:
47	2.7 دراسة استهلاك الطاقة من أجل عدد عقد ثابت وقيم متغيرة لـ RX :
50	3.7 دراسة استهلاك الطاقة من أجل عدد عقد متغيّر ونسب ثابتة لـ RX :
52	4.7 دراسة استهلاك الطاقة بالنسبة إلى Send Interval :
53	5.7 دراسة معدّل استلام الطرود (PDR) من أجل عدد عقد ثابت وقيم متغيرة لـ RX :
57	6.7 دراسة معدّل استلام الطرود من أجل عدد عقد متغيّرة ونسب ثابتة لـ RX :
58	7.7 دراسة متوسط معدّل استلام الطرود بالنسبة إلى Send Interval :

59	8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM:
60	1.8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM من حيث الطاقة المستهلكة:
62	2.8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM من حيث معدّل استلام الطرود:
64	9.7 بعض النقاط الهامة في الخوارزمية المقترحة:
66	الخاتمة:
66	الآفاق المستقبلية:
67	المراجع:

قائمة الأشكال

- الشكل 1: مقارنة استهلاك الطاقة للأجهزة اللاسلكية مع معدلات البيانات الخاصة بها 6
- الشكل 2 : بروتوكولات شبكات LLN 7
- الشكل 3: طوبولوجيا IEEE802.15.4 : (a) النجمة ، (b) ند إلى ند ، (c) الشجرة العنقودية 8
- الشكل 4: هيكلية شبكات LowPAN6 10
- الشكل 5: رسائل التحكم في RPL 13
- الشكل 6: بناء (DODA G): (a) بث DIO ، (b) تحديث رسائل DIO ، (c) بث وحيد لـ DAO 16
- الشكل 7: وضع التخزين وعدم التخزين في DODAG 17
- الشكل 8: مقاييس التوجيه المختلفة المستخدمة من قبل الوظيفة الغرضية 19
- الشكل 9: مشكلة موازنة الحمل في RPL 22
- الشكل 10: (أ): توزع معظم المقاييس المستخدمة في التقييم، (ب). المقاييس غير المستخدمة بشكل كبير في التقييم 29
- الشكل 11: الطوبولوجيا والبيئات المستخدمة في التقييم 30
- الشكل 12: المخطط الإنسيابي لخوارزمية موازنة الحمل وكفاءة الطاقة المقترحة 37
- الشكل 15: التحقق من ضبط معاملات RPL بعد محاكاة الخوارزمية 45
- الشكل 16: الطوبولوجيا والمعاملات المستخدمة في RPL 46
- الشكل 17: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة قيم متغيرة لـ RX من أجل 20 عقدة 47
- الشكل 18: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 40 عقدة 48
- الشكل 19: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 60 عقدة 48
- الشكل 20: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 80 عقدة 49
- الشكل 21: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 100 عقدة 50
- الشكل 22: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير عند $RX=80\%$ 51
- الشكل 23: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير عند $RX=40\%$ 51
- الشكل 24: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة قيم متغيرة لـ RX 52
- الشكل 25: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة Send Interval 53
- الشكل 26: دراسة PDR بدلالة قيم متغيرة لـ RX من أجل كثافة منخفضة 54
- الشكل 27: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 40 عقدة 54
- الشكل 29: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 80 عقدة 56
- الشكل 30: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 100 عقدة 56

- الشكل 31: دراسة PDR بالنسبة لعدد متغير من العقد من أجل $RX=40\%$ 57
- الشكل 32: دراسة PDR بالنسبة لعدد متغير من العقد من أجل $RX=80\%$ 58
- الشكل 33: متوسط PDR بدلالة Send Interval 59
- الشكل 34: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=80\%$ 60
- الشكل 35: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=40\%$ 61
- الشكل 36: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM بالنسبة إلى Send Interval 61
- الشكل 37: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=80\%$ 62
- الشكل 38: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=40\%$ 63
- الشكل 39: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM بالنسبة إلى Send Interval. 64

قائمة المصطلحات

المصطلح بالعربي	المصطلح بالإنكليزي
انترنت الأشياء	Internet of thing (IOT)
الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع	Low Power and Lossy Networks (LLN)
شبكة الحساسات اللاسلكية	Wireless Sensor Network (WSN)
مستقبل معلومات الشبكة	Sink
طبقة التحكم بالنفاز إلى الوسط	Medium Access Control (MAC)
طريقة الطيف المنثور بالتتالي المباشر	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
معدل التدفق	Throuput
جهاز كامل الوظائف	full- function device (FFD)
جهاز ذات وظائف أقل	reduced-function device (RFD).
شبكة اتصال شخصية	Personal Area Network (PAN)
منسق	coordinator
القفر المتزامن بين القنوات	Time Synchronized Channel Hopping (TSCH)
النفاز الزمني المجزأ	Time slotted access
معهد مهندسي الكهرباء والالكترون	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
فريق مهام هندسة الإنترنت	Internet Engineering Task Force (IETF)
طبقة التكيف	IPv6 Over Low Power WPAN (6LowPAN)
مجموعة عمل التوجيه عبر الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع	Routing Over Low-Power and Lossy Networks (ROLL)
الاستباقية	Proactive
التفاعلية	Reactive
بروتوكول توجيه المسافات المخصصة عند الطلب	Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)
بروتوكول توجيه IPv6 للشبكات ذات الطاقة المنخفضة والتي تعاني من ضياع	IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)
بروتوكول التطبيق المقيد	Constrained Application Protocol (CoAP)

معرّف المورد الموحد	Uniform Resource Identifier (URI)
رسم بياني موجه إلى الوجهة	Directed Acyclic Graph (DAG)
رسم بياني للاحلقة موجه إلى الوجهة	Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG)
رسالة المعلومات في DODAG	DODAG Information Object (DIO)
رسالة التماس المعلومات في DODAG	DODAG Information Solicitation (DIS)
رسالة إعلان الوجهة في DODAG	Destination Advertisement Object (DAO)
معرّف مثل	InstanceID
الوظائف الغرضية	objective function (OF)
المقاييس	Metric
وضع التشغيل	Mode of Operation (MOP)
رابط	LINK
مؤشر قوة الإشارة	Received Signal Strength Indicator (RSSI)
عدد الإرسال المتوقع	Expected Transmission Count (ETX)
الإقرار بالاستلام	Acknowledged
عدد القفزات	Hop count
الوظيفة الغرضية الصفرية	Objective Function Zero (OF0)
مقياس MRHOF	Minimum Rank Hysteresis Objective Function (MRHOF)
قطع الضجيج	Thundering Herd
قائمة الأرتال	Queue Utilization (QU)
الوظيفة الغرضية المعتمدة على السياق	Context-Aware Objective Function (CAOF)
الوظيفة الغرضية المدركة للطاقة	The Energy-Aware Objective Function (EAOF)
بروتوكول تجنب الازدحام	Congestion Avoidance RPL (CA-RPL)
انشغالية المخزن المؤقت	Buffer Occupancy (BO)
RPL المحسنة	Enhanced RPL (EN-RPL).
مقياس التوجيه الفعال المركب	Composite Efficient Routing (CER)

الفصل الأول

مشكلة البحث والهدف

1.1 مقدمة:

أصبحت انترنت الأشياء ثورة العصر ويمكن تعريفها على أنها النموذج الذي يتيح التواصل بين الأشياء، حيث تستخدم الشبكات الخاصة بإنترنت الأشياء أجهزة صغيرة الحجم ومنخفضة الكلفة، بمهّد استخدام هذه الأجهزة ظهور ونمو المزيد من تطبيقات انترنت الأشياء بدءاً من المنازل الذكية إلى المدن الذكية، وبالتالي سيؤدي ذلك إلى ربط واتصال مليارات من الأجهزة غير المتجانسة، وستكون الغالبية العظمى من تلك الأشياء المتصلة منخفضة الطاقة و بدرجات متفاوتة من التعقيد [1]. يسعى الباحثون إلى بذل الكثير من الجهود لتلبية متطلبات تطبيقات انترنت الأشياء ومواجهة التحديات الموجودة في أجهزة الشبكات المستخدمة في انترنت الأشياء لاسيّما محدودية الذاكرة والمعالجة والطاقة، وشملت هذه الجهود على دراسة البروتوكولات الحالية الموجودة وتقديم بروتوكولات جديدة تلائم هذه التطبيقات المتزايدة، حيث توصلت هيئة هندسة الإنترنت (IETF) ومعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) إلى وضع بروتوكولات مختلفة في جميع الطبقات [2]، مثل بروتوكول IEEE 802.15.4 للطبقة الفيزيائية وطبقة وصلة المعطيات، وبروتوكول RPL (IPv6 Routing Protocol for Low Power) لطبقة الشبكة، وأخيراً بروتوكول COAP لطبقة التطبيقات. نظراً لأن بروتوكول التوجيه هو أحد دعائم هيكلية الشبكة وهو المسؤول عن قرارات التوجيه حيث أن القرارات الخاطئة سوف تسبب هدراً لموارد الشبكة، لذلك اهتمّ الباحثون بدراسة وتطوير بروتوكول RPL الذي تمّ اعتماده كبروتوكول التوجيه الفعلي لـ IoT. لا يزال هذا البروتوكول بحاجة إلى مزيد من التحسينات من حيث موازنة التحميل، واستهلاك الطاقة لذلك كان الدافع في هذه البحث هو العمل على حل هذه المشكلة وطرح خوارزمية لتحسين أداء هذا البروتوكول وبالتالي تحسين الشروط التي تعمل وفقها هذه الشبكات.

2.1 مشكلة البحث :

تزداد تطبيقات انترنت الأشياء يوماً بعد يوم، والتي تولّد المزيد من المتطلبات الحرجة مثل تخفيض مستوى استهلاك الطاقة، والتأخير الزمني، ورفع مستوى الوثوقية والوثوقية وغيرها من المتطلبات. قد تؤثر هذه المتطلبات على أداء RPL وتؤدي إلى ظهور العديد من المشاكل في آلية عمله وذلك بسبب عدم قدرته على تليتها. إلى الآن، ما يزال العمل مستمراً لحل مشاكل

هذا البروتوكول والمتمثلة بعدم توازن الحمل واستهلاك الطاقة، حيث يوجد لدى العقدة أكثر من قرار في اختيار الأب، وبالتالي تكون العقدة الأب أمام: إما أن يتم اختيارها كعقدة أب بالتالي ستكون حركة مرور البيانات ضمنها كبيرة جداً، أو أن لا يتم اختيارها من قبل أية عقدة، بالتالي لن يكون هنالك حركة مرور البيانات من خلالها. إن اختيار نفس العقدة في عملية التوجيه سوف يؤدي إلى نفاذ طاقتها وانقطاع جزء من الشبكة المتصل بها وبالتالي ينعكس سلباً على أداء ووثوقية الشبكة. لذلك قمنا في هذا البحث باقتراح خوارزمية جديدة تعمل على حل هذه المشكلة وتحسين أداء بروتوكول RPL من أجل تلبية تطبيقات إنترنت الأشياء التي تتطلب استهلاك طاقة منخفض وعمر شبكة طويل، ولتكون ملائمة للشبكات المؤلفة من عدد كبير من عقد الحساسات مثل المدن الذكية التي تتألف من أجهزة كثيرة محدودة المعالجة، الذاكرة والطاقة، بالإضافة إلى تلبية التطبيقات التي تتطلب جمع البيانات مثل المراقبة البيئية. إن الخوارزمية المقترحة تساهم في تحسين أداء البروتوكول من حيث استهلاك الطاقة، معدّل تسليم الطرود واستخدام الموارد المقيدة في الشبكة.

3.1 الهدف من البحث :

نهدف في هذا البحث إلى تحسين أداء التوجيه في شبكات إنترنت الأشياء من خلال إجراء بعض التعديلات على بروتوكول RPL، الذي يمثل بروتوكول التوجيه الفعلي للشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع كبنية تحتية لإنترنت الأشياء، لتحقيق هذا الهدف قمنا باقتراح خوارزمية تضمن توازن أفضل للحمل من خلال موازنة الطاقة وبالتالي تحسين عمر الشبكة.

يمكن تنفيذ مراحل هذا البحث بالخطوات التالية:

- دراسة نظرية لبروتوكولات إنترنت الأشياء والتعمق بشكل خاص في بروتوكول التوجيه RPL .
- معرفة عيوب بروتوكول RPL من خلال التعرف على الوظائف الغرضية الخاصة بالبروتوكول ودراسة ماتوصلت إليه آخر الأبحاث لحل مشاكله.
- اقتراح خوارزمية تخفف استهلاك الطاقة وتحسن موثوقية الشبكة.
- تنجيز الخوارزمية على أداة المحاكاة المناسبة واختبارها ومقارنتها مع أفضل الخوارزميات وتقييم الأداء.

الفصل الثاني

إنترنت الأشياء IOT وبروتوكولاتها

1.2 مقدمة:

ستحدث في هذا الفصل عن مقدمة عامة لإنترنت الأشياء وتطبيقاتها الهامة في مختلف جوانب حياتنا، ثم سنتقل إلى التعريف بالشبكات منخفضة الطاقة ذات الأجهزة المقيّدة بالموارد لكونها البنية التحتية لإنترنت الأشياء ومن ثم دراسة بروتوكولاتها المختلفة.

2.2 إنترنت الأشياء:

تُعتبر شبكة إنترنت الأشياء (IOT) Internet of Things نموذجاً للاتصالات في المدى المنظور، حيث ستكون جميع التجهيزات التقنيّة الحديثة مثل: التجهيزات المنزليّة، كاميرات المراقبة، الحساسات، المحرّكات، شاشات الإظهار، المركبات،... وغيرها قادرة على التخاطب فيما بينها من جهة، ومع المستخدمين أيضاً من جهة أخرى، وستشكّل مجتمعة -رغم التباين الكبير بين تلك التجهيزات، والبنية التحتية، والخدمات المطلوبة،..- جزءاً لا يتجزأ من شبكة الإنترنت [3]. سيشكّل IOT الأساس للخدمات والتطبيقات القادمة، وسيكون الجيل الخامس 5G البيئة الرئيسية لتمكين IOT، حيث تواجه هذه البيئة تحديات كبيرة من حيث معدّلات النقل العالية وخصوصاً في الاتصالات التي تتطلب تشابكية كثيفة وحركة طرود هائلة وانخفاضاً في زمن التأخير ليصل إلى أقل من (1 MS) وانخفاضاً في استهلاك الطاقة، بالإضافة إلى القدرة على المكاملة بين الخدمات عريضة النطاق الترددي مع انترنت الأشياء التي تتميز بنقل متقطع لحزم بيانات صغيرة على الوصلات الصاعدة. من المقرّر إدخال شبكات الجيل الخامس في العام 2020 لتلائم متطلبات IOT ومواجهة التحديات المذكورة سابقاً من خلال التحسينات على الأنظمة الراديويّة وأنظمة الهوائيات بالإضافة إلى التحسينات على الطيف والشبكات التي يتم استخدامها، وحيث أننا بحاجة إلى تطبيق تكنولوجيا انترنت الأشياء في الأجيال الحالية (الجيل الثاني والثالث والرابع)، لذلك يجب إدخال تحسينات على أنظمة GSM و LTE لتتناسب اتصالات IOT وتطبيقاتها، من التحسينات المقترحة على GSM لجعلها أكثر فعالية: زيادة السعة على الوصلة الصاعدة وتوسيع التغطية على الوصلة الهابطة وتخفيض استهلاك الاستطاعة والتعقيد لأجهزتها القديمة، وللسماع لعدد أكبر من الأجهزة بالإرسال في نفس الوقت وعلى نفس التردد على الوصلة الصاعدة أقرّح استخدام التضمين multiplexing بالاعتماد على تقنيات النفاذ باستخدام الترميز (Code-

division multiplexing) حيث تستخدم الترميز لفصل الأجهزة التي ترسل في نفس الفاصل الزمني، وتم أيضاً اقتراح تحسينات أخرى، فمثلاً من أجل معالجة مساحات التغطية يتم استخدام أنظمة ضيقة الحزم narrowband، بالإضافة إلى التحسينات على رسائل التحكم مع أحمال أقل حجماً [4].

تعتبر الشبكات المنخفضة الطاقة التي يكون فيها ضياع (LLN) Low power and Lossy Network بنية تحتية مناسبة لإنترنت الأشياء حيث أنها قادرة على الحد من استهلاك الطاقة بالإضافة إلى العمل بشكل مستقل عن الإنسان. سيتم شرحها بالتفصيل في الفقرة (3.2).

سيتمسب عدد الأجهزة الهائلة التي ستتمكن من الاتصال بالإنترنت ضغطاً هائلاً على النقل عبر الشبكة، لذلك كان من الضروري إعادة النظر في البروتوكولات والتقنيات والشبكات الأساسية التي ستدعم إنترنت الأشياء وتقديم نموذج معياري موحد لبروتوكول إنترنت الأشياء والذي سيتم شرحه في الفقرة (4.2).

يمكن تصنيف تطبيقات إنترنت الأشياء في الغالب إلى فئتين استناداً إلى طريقة تجميع البيانات: تطبيقات مقادة من قبل الوقت، وأخرى من قبل الحدث. في الفئة الأولى: يتم جمع البيانات بشكل دوري استناداً إلى فاصل زمني محدد مسبقاً لمراقبة البيئة أو مكان ما أو على سبيل المثال حادثة معينة أو ظاهرة ما في الطبيعة. أما الفئة الثانية فتستخدم لبدء قراءة البيانات بمجرد اكتشاف حدث معين وبهذا يتم إدارة الطوارئ. بشكل عام سيكون تطبيق إنترنت الأشياء جزءاً من كل جانب من جوانب حياتنا.

أهم هذه التطبيقات:

- المنزل الذكي (الصحة والأمن والأجهزة).
- النقل (الخدمات اللوجستية، المرور، مواقف السيارات، خدمات الطوارئ).
- الصحة (الرعاية عن بعد، المراقبة).
- المجتمع (القياس الذكي، المصانع، بيئة المراقبة).
- المجال العسكري.
- المدن الذكية.

3.2 الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (LLN):

ستتمكن إنترنت الأشياء مليارات الكائنات المادية من جمع البيانات عن طريق المراقبة والتحسس والتحكم في البيئات، وللقيام بذلك تُوزع تلك الكائنات (الكائنات الذكية أو الأجهزة) وتُدمج في شبكات فرعية مثل شبكات Wireless Sensor Network (WSN) وتُوصَل بالإنترنت باعتباره العمود الفقري لـ IOT.

يتمثل الدور الرئيسي لشبكات WSN في تحسّس البيانات وجمعها عبر الحساسات الموزّعة (العقد) ومعالجتها ونقلها إلى عقدة مستقبل معلومات الشبكة، تواجه الأجهزة المدججة الموجودة في هذه الشبكات نوعاً من القيود على موارد الطاقة والذاكرة والمعالجة المحدودة. يطلق على هذا النوع من شبكات WSN والتي تتكوّن من عدد كبير من هذه الأجهزة المدججة بالشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (LLNs)، من المتوقع أن يكون هناك عدد هائل من التطبيقات المنزليّة والتجاريّة والتي ستستخدم LLN كبنية تحتية لها لتحسين نوعية حياتنا.

تهدف شبكات LLN إلى مراقبة الظروف المادية أو البيئية في مواقع متنوعة، وتمثل المعاملات التي تتم مراقبتها بشكل عام: درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط، الجهد الكهربائي، ووظائف الجسم الحيوية وغيرها. تزوّد الأجهزة الموجودة في شبكة الحساسات والتي تسمّى (عقد جهاز الحساس) بمحوّل طاقة وحاسوب صغير وجهاز إرسال واستقبال ومصدر طاقة، يقوم المحوّل بتوليد إشارات كهربائية تعتمد على التأثيرات الفيزيائية المتحسسة والظواهر، ثمّ تقوم الحواسيب الصغيرة بالمعالجة وتخزين مخارج الحساس. أمّا جهاز الإرسال/ الاستقبال فإنّه يرسل ويستقبل الإشارات اللاسلكية، ويقوم مصدر الطاقة بتوفير التيار اللازم لهذه الأجهزة، يعتبر عامل حجم الجهاز من القيود على هذه الأجهزة فعادة ما يكون الحجم صغيراً جداً ومدعوماً إما بطارية أو الطاقة من الخلايا الشمسية أو التيار الكهربائي، وبالتالي تحتاج إلى استخدام أمثلي للموارد [5].

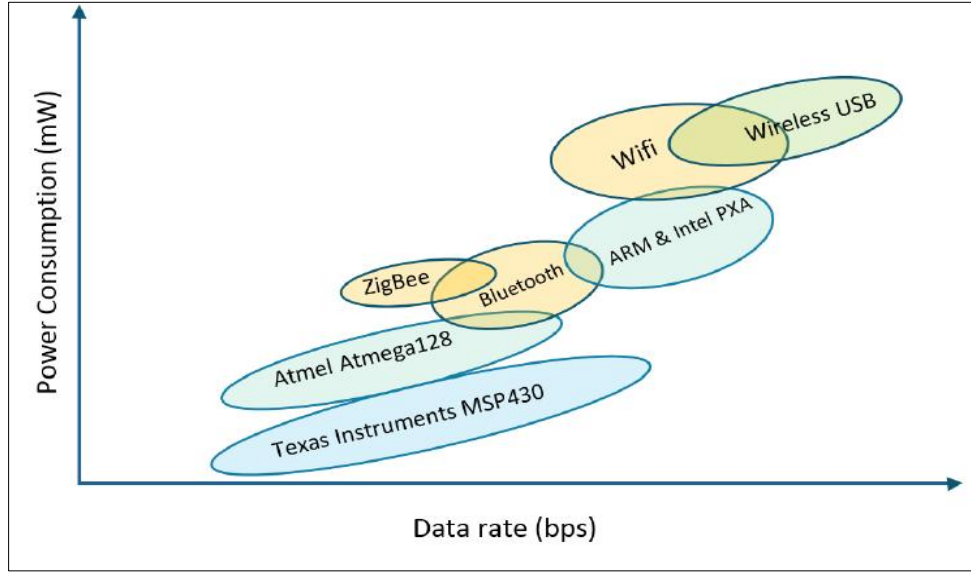
تتخصّص LLN بتطبيقات حركة المرور المنخفضة، حيث تعد حركة المرور المنخفضة أمراً شائعاً جداً بالنسبة للتطبيقات المنزلية الذكية، والحوسبة المنتشرة في كل مكان حيث يلزم وجود دورة حياة طويلة جداً. تدعم LLN ثلاثة أنواع من حركة المرور: نقطة إلى نقطة (بين الأجهزة داخل LLN)، من نقطة إلى متعددة النقاط (بين الجهاز المركزي والأجهزة الأخرى داخل LLN)، أو عدة نقاط إلى نقطة تجميع (بين أجهزة داخل LLN إلى جهاز مركزي).

يلزم التوجيه في الأجهزة الموجودة في LLN للوصول إلى بعضها البعض بسبب محدودية نطاق الإرسال، حيث يكون التوجيه هو المسؤول عن إدارة المسارات بين عقد الحساسات وإعادة توجيه الطرود على الطرق المكتشفة الأكثر كفاءة، تستخدم العقد جزء جهاز الإرسال والاستقبال لإرسال هذه الطرود أو استقبالها وهو راديو قصير المدى. يعد الوسط الراديوي المستخدم من قبل أجهزة LLN قصير المدى وأيضاً عرضة لأخطاء البتات. إن الضياع الذي يكون في LLN له تأثير قويّ على تصميم بروتوكول التوجيه، بما أن فشل الروابط متكرر وعادة ما يكون عابراً فيجب على بروتوكول التوجيه أن لا يبالي في محاولته للوصول السريع إلى استقرار الشبكة كنتيجة للفشل المؤقت [6].

نظراً لهذه الأسباب تتمثل إحدى المشكلات الصعبة في شبكات LLN العثور على أفضل الطرق لتسليم البيانات، مما يعني وجود آلية توجيه فعّالة للغاية للعثور على المسارات في الشبكة والاحتفاظ بها. تواجه آلية التوجيه صعوبات تتمثل بطبيعة قيود الموارد لعقد جهاز الحساس والضياع الذي يكون في الوسط الراديوي.

يمثّل استهلاك الطاقة أيضاً مشكلة كبيرة بالنسبة لأجهزة LLNs، فمن المهم تشغيلها بمعدل بيانات منخفض جداً وطاقة إرسال تهدف إلى إطالة العمر الافتراضي. يوضّح الشكل 1/ (1) مقارنة بين الأجهزة اللاسلكية المختلفة من حيث استهلاك

الطاقة لأجهزة الإرسال والاستقبال والمعالجات مع مراعاة معدلات البيانات الخاصة بهم. نلاحظ أنّ أجهزة MSP430 و LLNs توفر الحد الأدنى من طاقة الإرسال، بينما توجد أجهزة ZigBee و Bluetooth ضمن المجال المتوسط من حيث استهلاك الطاقة وبمعدل بيانات مماثل بأجهزة LLNs، أما عندما يتعلق الأمر بـ Wifi فإن معدل البيانات يكون أفضل بكثير مع استهلاك طاقة كبير وهذا لا يلائم أجهزة انترنت الأشياء [7] [8].

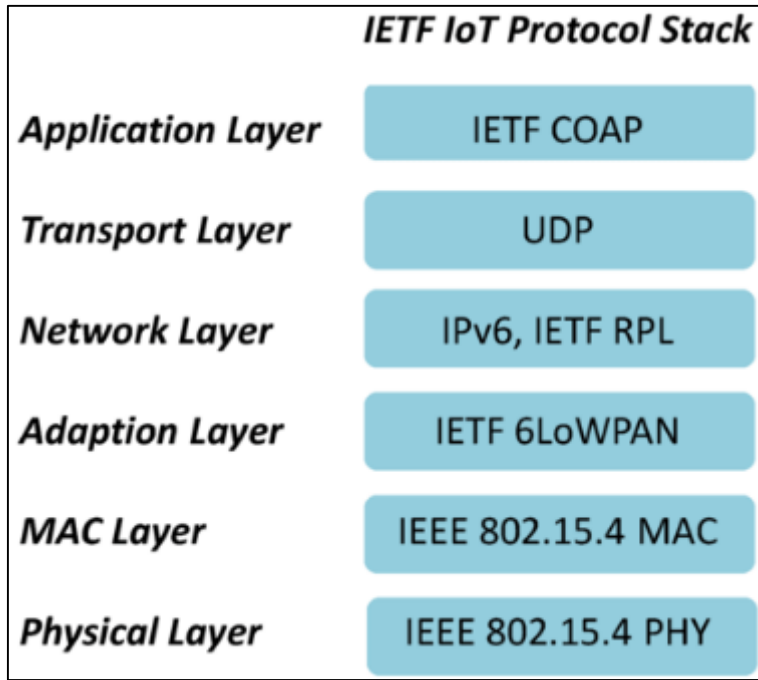


الشكل 1: مقارنة استهلاك الطاقة للأجهزة اللاسلكية مع معدلات البيانات الخاصة بها

4.2 نظرة عامة على بروتوكولات LLN

أدخلت هيئة المعايير IETF و IEEE بروتوكولات جديدة لتلبية متطلبات تطبيقات شبكات LLN كما هو مبين في

الشكل 2. سنشرح في الأقسام التالية طبقات وبروتوكولات مختلفة معيارية لـ LLNs.



الشكل 2 : بروتوكولات شبكات LLN

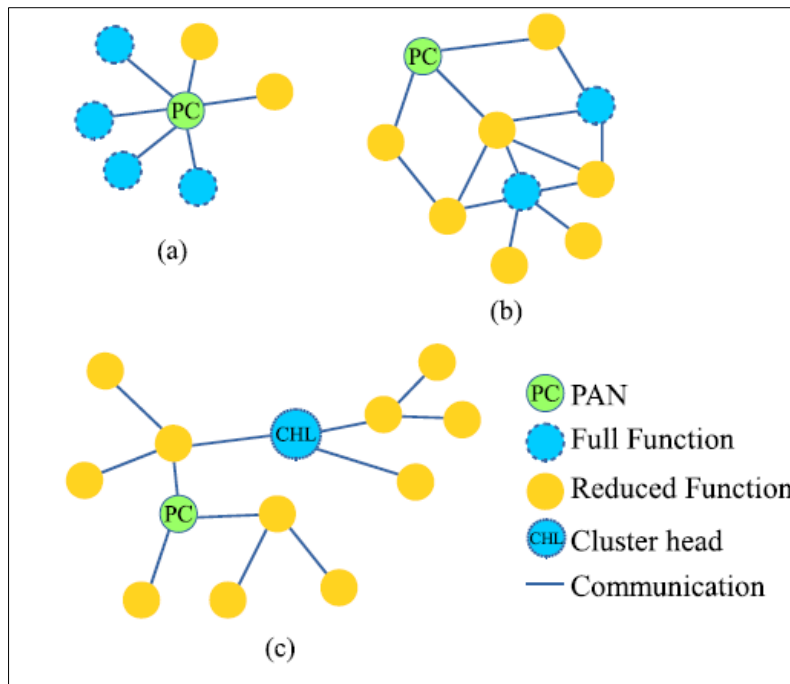
1.4.2 بروتوكول IEEE 802.15.4

يعتبر بروتوكول 802.15.4 هو البروتوكول المعياري للطبقة الفيزيائية وطبقة التحكم بالنفذ إلى الوسط (MAC) للشبكات الشخصية اللاسلكية ذات معدلات البيانات المنخفضة، حيث يتميز بشكل أساسي بالنقل الموثوق للبيانات والتشغيل قصير المدى والكلفة المنخفضة وعمر البطارية المعقول ومعدل التدفق العالي، ويمكنه أيضاً التعامل مع عدد كبير من العقد. يدعم IEEE 802.15.4 ثلاثة حزم للقنوات الترددية، ويستخدم طريقة الطيف المنثور بالتتالي المباشر (DSSS) Direct Sequence Spread Spectrum. تقوم الطبقة الفيزيائية بنقل واستقبال البيانات عبر ثلاثة معدلات للبيانات استناداً إلى القنوات الترددية المستخدمة : 250 كيلوبت في الثانية عند 2.4 جيجا هرتز و 40 كيلوبت في الثانية عند 915 ميغا هرتز و 20 كيلو بايت في الثانية عند 868 ميغا هرتز، توفر الترددات الأعلى والحزم العريضة معدل تدفق عالٍ وتأخيراً منخفضاً بينما توفر الترددات المنخفضة حساسية أفضل وتغطي مسافات أكبر. يستخدم بروتوكول IEEE 802.15.4 CSMA / CAMac لتقليل الاصطدامات المحتملة [9].

تقسم الأجهزة الموجودة ضمن هذا البروتوكول إلى جهاز كامل الوظائف (FFD) full-function device وجهاز ذات وظائف أقل (RFD) reduced-function device. يمكن أن يعمل جهاز FFD كمنسق شبكة اتصال شخصية (PAN) أو كعقدة عادية، يعتبر المنسق مسؤول عن مراقبة وصيانة الشبكة، يمكن لجهاز FDD تخزين جداول التوجيه داخل ذاكرته، ويمكنه أيضاً أن يتصل بأجهزة RFD أو أجهزة FFDs الأخرى. بينما يقتصر اتصال RFD فقط على

جهاز FFD، بالنظر إلى هذا القيد في أجهزة RFD فإن كمية البيانات التي يتم نقلها إلى FDD منخفضة. هناك اختلاف رئيسي آخر بين FDD و RFD بناءً على الدور المقصود لكل نوع، يحتاج جهاز (FFD) في حالة البوابة إلى البقاء مستيقظاً دائماً ، أما تنبيه RFD يكون عند الطلب - أي عند الحاجة- و هذا يقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة إلى أدنى مستوى [9].

تصنّف الطوبولوجيا ضمن IEEE 802.15.4 إلى ثلاثة أنواع وفقاً لمتطلبات التطبيق: التجمية، طوبولوجيا الند إلى الند أو طوبولوجيا الشجرة العنقودية كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل 3: طوبولوجيا IEEE802.15.4 : (a) النجمة ، (b) ند إلى ند ، (c) الشجرة العنقودية

تكون حركة المرور في الطوبولوجيا التجمية بين عدة أجهزة عبر وحدة تحكم رئيسية، أي كمنسق الشبكة الشخصية (PAN) Personal Network Area، تتمثل مسؤولياته في بدء وتوجيه وإنهاء الاتصالات في الشبكة، على عكس طوبولوجيا الند إلى الند حيث تتمكن أي عقدتين من الاتصال ببعضهما عندما تكونا ضمن نفس النطاق ويتم اختيار أحدهما كمنسق لـ PAN ، تتميز هذه النوع من الطوبولوجيا بالمرونة ولكن على حساب استهلاك الطاقة، لذا يوصى بإبقاء منسق PAN مزوداً بالطاقة الرئيسية بينما تزود بقية الأجهزة بالبطارية.

تجمع طوبولوجيا الشجرة العنقودية بين هياكل الشبكتين السابقتين معاً، قد تكون بعض عقد الحافة خارج التغطية الراديوية ومع ذلك لاتزال متصلة عبر العنقود.

2.4.2 بروتوكول (TSCH) IEEE 802.15.4e:

تم إصدار بروتوكول IEEE 802.15.4e في 2015 ويسمى أيضاً القفز المتزامن بين القنوات Time Synchronized Channel Hopping (TSCH)، يدمج هذا البروتوكول بين التنازح الزمني المجزأ time-slotted access مع إمكانية القفز بين القنوات، مما يسمح بإمكانية توقع كفاءة الطاقة ووثوقية الاتصال ومعدل تدفق شبكة عالٍ، بالإضافة إلى تحقيق زمن وصول حتمي من خلال القضاء على الاصطدام بين العقد المتنافسة [10].

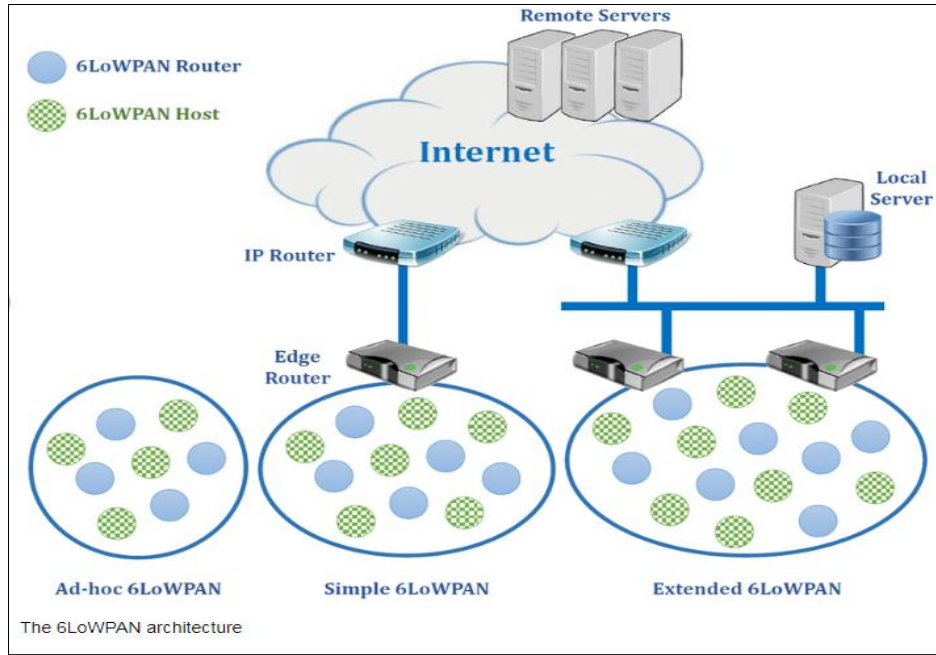
تعد مزامنة الوقت في TSCH أمراً ضرورياً لتأمين تشغيل منخفض الطاقة والقفز بين القنوات للحصول على شبكة موثوقة. يمكن استخدام بروتوكول TSCH مع جميع أنواع الطوبولوجيا (شجرة، نجمة...)، تمكن جميع مميزات هذا البروتوكول من تطبيقه في مجالات واسعة (صناعة النفط/الغاز، صناعة منتجات مختلفة، التحكم في المناخ...).

3.4.2 معيار 6LoWPAN:

طوّرت IETF معيار 6LoWPAN في عام 2007 لتحقيق الاتصال بين بروتوكول IPv6 (طبقة الشبكة) وبروتوكول IEEE802.15.4 (طبقة Mac). إن تمكين عمليّات إرسال طرود IPv6 عبر IEEE 802.15.4 للأجهزة المقيّدة مطلوبة في تطبيقات LLN ، لذلك بُذلت الكثير من الجهود لجعل هذه الأجهزة تعمل عبر الإنترنت من خلال دعم طبقة 6LoWPAN بعدد من التقنيات منها [11][12]:

- **تقنية الضغط:** بسبب عرض النطاق الترددي المحدود الذي يوفره بروتوكول IEEE 802.15.4 (127 بايت) والذي يناسب فقط 60-80 بايت لحمولة بروتوكول (UDP). تم تصغير وحدات البايت الإضافية وتغيير حجمها في هذه التقنية.
- **التجزئة:** لا تتناسب عادة حمولة IPv6 مع حمولة IEEE 802.15.4 ، وبالتالي فإن التجزئة هي الخيار الوحيد في هذه الحالة. يلعب 6LoWPAN دوراً أساسياً في ضمان التجميع الصحيح للطرود المجزأة على القفزات المتعددة.

تتألف بنية 6LoWPAN من ثلاثة أنواع: البسيطة والموسّعة والمخصّصة كما في الشكل (4). تحتاج الأنواع البسيطة والموسّعة إلى بنية تحتية للتشغيل وتستخدم في تطبيقات المنازل والمباني الذكية على عكس البنية المخصصة.



الشكل 4: هيكلية شبكات LowPAN6

4.4.2 بروتوكول IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

يعد بروتوكول التوجيه هو المسؤول عن إعادة توجيه الطرود الواردة من العقد الأخرى واتخاذ قرارات التوجيه الذكي. يعد التوجيه في شبكات LLNs أحد التحديات الرئيسية ليس فقط بسبب الضياع الذي يكون في الوسط الراديوي والموارد المحدودة لعقد الحساسات ولكن أيضاً بسبب متطلبات التوجيه المختلفة، لذلك ركزت مجموعة عمل التوجيه عبر الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (ROLL) على تصميم بروتوكول التوجيه ليتناسب مع القيود المفروضة في هذه الشبكات.

يوجد نوعان من بروتوكولات التوجيه في WSN و LLN : (Proactive و Reactive) توفر البروتوكولات التفاعلية المسارات نحو الوجهة عند الحاجة عن طريق إرسال الاستعلامات في الشبكة، من هذه البروتوكولات (AODV) An (TORA) Temporally و Dynamic Source Routing (DSR) و Ad Hoc On-Demand Distance Vector Ordered Routing Algorithm. تلعب معلومات التوجيه وأحداث اكتشاف المسار دوراً أساسياً في إنشاء جداول ذاكرة التخزين المؤقت، وهذه الأنواع من البروتوكولات مثالية فقط عندما تكون حركة التحميل منخفضة، ولكن ليست مفيدة في تطبيقات الزمن الحقيقي حيث يكون التأخير عاملاً بالغ الأهمية. في حين توفر بروتوكولات التوجيه الاستباقية المسارات قبل الحاجة إليها فعلياً حيث تقوم هذه البروتوكولات بتبادل رسائل التحكم دورياً للبحث عن الطرق في الشبكة ونشرها بمجرد الحصول عليها، حيث تحتفظ كل عقدة داخل الطوبولوجيا بجدول توجيه يقيّم باستمرار الطرق [13].

بداية قامت مجموعة العمل (ROLL) Routing Over Low-Power and Lossy Network بتحليل وتقييم بروتوكولات التوجيه الموجودة ((The Optimized Link State Routing Protocol, Open Shortest Path First (OSPF)، حيث وجدت أن بروتوكولات توجيه IP التقليدية غير قادرة على تلبية متطلبات التطبيق في شبكات انترنت الأشياء، فمثلاً بروتوكولات OSPF و OLSR تبث بشكل دوري اكتشاف الجوار وهذه يولد استنزافاً للبطاريات وأحياناً إضافية في الشبكة [14] ، لذلك قامت بوضع بروتوكول معياري يستند إلى IPv6 للعقد المقيّدة بالموارد ويدعى بروتوكول توجيه IPv6 للشبكات ذات الطاقة المنخفضة والتي تعاني من ضياع (RPL)، وأصبح بروتوكول التوجيه الفعلي ل IOT ، حيث يدعم متطلبات التوجيه الدنيا من خلال بناء طوبولوجيا قوية عبر الروابط التي يكون فيها ضياع. يدعم بروتوكول RPL ثلاثة أنواع من حركة المرور، حركة المرور من عدة نقاط إلى نقطة تجميع بشكل دوري، أي من العقد إلى جذر DODAG ، وكذلك الإرسال من نقطة المركز (الجذر) إلى الأجهزة داخل شبكة LLN بالإضافة إلى حركة المرور من نقطة إلى نقطة.

5.4.2 بروتوكول COAP :

هو بروتوكول نقل عبر الويب، الهدف من CoAP هو العمل بشكل يشبه HTTP ولكن بطريقة مدمجة داخل الشبكات المقيّدة. وبالتالي يشبه CoAP تماماً HTTP من حيث نموذج العميل / المخدم، أي يمكن للعميل تقديم طلب على مورد معين وتحديدته بواسطة معرف المورد الموحد (Uniform Resource Identifier (URI)، ثم يستجيب المخدم بواسطة الرمز، ويكون تبادل رسائل HTTP بين العميل والمخدم في وقت واحد، في حين أن تبادل CoAP غير متزامن عبر UDP وهذا يؤثر إيجاباً على توفير استهلاك الطاقة [15].

بعد أن قدمنا دراسة موجزة عن أهم بروتوكولات إنترنت الأشياء، سنتحدث في الفصل التالي بالتفصيل عن بروتوكول التوجيه الأساسي (RPL).

الفصل الثالث

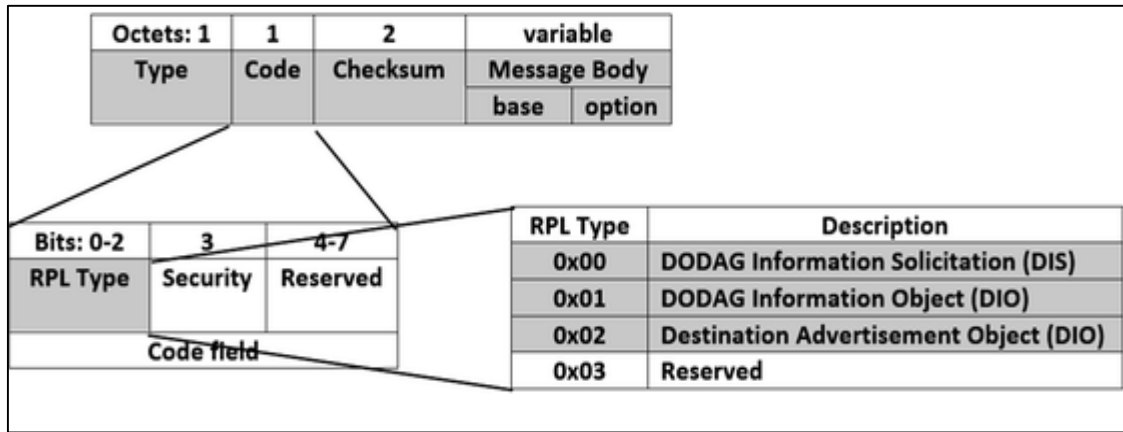
بروتوكول RPL

1.3 مقدمة عامة عن RPL

تمّ إنشاء RPL من قبل مجموعة العمل ROLL وقامت IETF (Internet Engineering Task Force) باعتماده كبروتوكول توجيه معياري لشبكات LLN، يقوم RPL بإنشاء طوبولوجيا الشبكة من خلال مخطط يسمّى رسم بياني موجّه إلى الوجهة (DAG) Directed Acyclic Graph، والذي يتكوّن من واحد أو أكثر من الرسم البياني التي يُدعى رسم بياني لاحتلي موجّه إلى الوجهة (DODAG) Destination Oriented Directed Acyclic Graph، يمثّل كل DODAG شجرة توجيه تمّ إنشاؤها بواسطة عقدة الجذر والمعروفة أيضاً باسم عقدة مستقبل معلومات الشبكة. يستخدم RPL خلافاً لبروتوكولات التوجيه المعروفة المزيد من العوامل لحساب أفضل المسارات، على سبيل المثال مقاييس التوجيه والوظائف الغرضية (OF) objective function وقيود التوجيه. سوف نتحدّث في الأجزاء التالية عن طوبولوجيا RPL، آلية التوجيه، رسائل التحكم، مقاييس التوجيه، القيود والوظائف الغرضية في RPL.

2.3 رسائل التحكم في RPL

تمّ اقتراح أنواع جديدة من رسائل التحكم ICMPV6 في RPL لبناء طوبولوجيا شبكة (DODAG) [16] كما هو موضح في الشكل (5):



الشكل 5: رسائل التحكم في RPL

تتكون رسالة التحكم في RPL من:

- ترويسة ICMPV6 التي تتألف من ثلاثة حقول (النوع، الرمز ورمز التدقيق).
- متن الرسالة التي تحتوي على نص الرسالة وبعض الخيارات .

يتم تمييز نوع طرود التحكم بواسطة حقل الرمز. تتألف هذه الطرود من أربعة أنواع:

1.2.3 رسالة المعلومات (DIO) DODAG Information Object:

تحتوي رسالة DIO على بيانات الشبكة التي تسمح للعقدة بالعثور على مثيل RPL، بناء DODAG، اكتشاف معاملات الضبط الخاصة بها واختيار قائمة الآباء في الشبكة.

بدايةً يقوم جذر DODAG ببيث رسالة DIO باتجاه هابط إلى عقد الجوار وتمكين حركة المرور من نقطة إلى عدة نقاط في اتجاه تصاعدي. تحتوي رسائل DIO على معرف جذر شجرة DODAG، معرف مثيل RPL (RPLInstanceID)، مقاييس التوجيه، الرتبة، الوظيفة الغرضية OF و DODAGID. تُرسل هذه الرسائل بشكل دوري مع رقم تسلسلي تراكمي من أجل بدء عملية اختيار الأب [16][17].

2.2.3 رسالة التماس المعلومات (DIS) DODAG Information Solicitation:

يتم استخدام DIS بواسطة أي عقدة لجلب رسائل DIO بشكل صريح من العقد المجاورة، وتستخدم أيضاً من أجل انضمام العقد إلى شجرة DODAG وفي حال لم تتمكن من تلقي DIO بعد فاصل زمني محدد مسبقاً [16][17].

3.2.2 رسالة إعلان الوجهة (DAO) Destination Advertisement Object (DAO):

يتم استخدام رسالة DAO لنشر معلومات الوجهة إلى الأعلى على طول شجرة DODAG، أي تقدم بيانات المسار العكسي لتسجيل كل عقدة تمت زيارتها عبر المسار التصاعدي المحدد. ترسل كل عقدة رسالة DAO باستثناء جذر DODAG لنشر البادئات وجداول التوجيه الخاصة بالأبناء إلى الآباء، وبعد ذلك سيتم إنشاء المسار الكامل بعد تمرير العقد لرسالة DAO عبر المسار إلى جذر DODAG [16][17].

يعد إرسال رسالة DAO استجابةً لرسالة DIO ميزةً اختياريةً في RPL للتطبيقات ذات حركة المرور من نقطة إلى عدة نقاط أو من نقطة إلى نقطة، يمكن تفعيل هذه الميزة من خلال معرف وضع التشغيل (MOP) ضمن رسالة DIO، وله حالتين وضع تخزين أو عدم تخزين، حيث تقوم العقدة الابن في وضع التخزين بإرسال رسالة DAO إلى الأب الأفضل الذي تم اختياره، بينما يتم إرسال رسالة DAO مباشرةً إلى جذر DODAG إذا كان الوضع عدم تخزين. يجدر التنويه إلى أن ميزة تلقي الإقرار بالإستلام (على سبيل المثال DAO-ACK) لـ DAO المرسله في كلا الوضعين هي ميزة اختيارية.

4.2.3 الإقرار باستلام رسالة إعلان الوجهة (DAO-ACK):

يتم إرسال رسالة DAO-ACK من مستقبل DAO (جذر DODAG أو أب DAO) كرد على رسالة DAO المستلمة بطريقة الإرسال الوحيد وذلك للإقرار باستعداد العقدة للعمل كقفزة تالية باتجاه جذر DODAG [16] [17].

3.3 بناء شجرة DODAG:

تبدأ عقدة الجذر في الخطوة الأولى بعملية بناء DODAG وذلك عن طريق إرسال رسالة DIO إلى جيرانها الشكل (6.a)، تحتوي هذه الرسالة على العديد من المعلومات مثل معلومات رتبة العقدة (للسماح للعقد بأخذ مواقعها في DODAG ومنع حلقات التوجيه)، نمط التشغيل، الوظائف الغرضية OF والمقاييس. يجب على كل عقدة تتلقى رسالة DIO أن تقوم بمعالجتها وتحديد ما إذا كانت ستضم إلى DODAG أم لا وفقاً لـ OF المستخدمة. إذا اختارت العقدة الانضمام إلى DODAG، فسيكون لها مسار للأعلى نحو الجذر وعندها تحسب العقدة ربتها وتقوم بتحديث جدول الجيران الخاص بها، وتختار الأب الأفضل والذي سيتم استخدامه لإعادة توجيه الرسائل إلى جذر DODAG، وعادةً يكون الأب الأفضل هو الجار الذي يملك الرتبة الأدنى المحسوبة وفقاً لـ OF. في حال تم تعيين عقدة كجهاز توجيه فإنه يجب تحديث وإعادة إرسال رسائل DIO إلى جيرانها الشكل (6.b)، أما في حالة عدم إعادة إرسال العقدة لرسالة DIO عندئذ تكون ورقة في شجرة التوجيه. يجب على كل عقدة تستقبل رسالة DIO أن تقوم بمعالجتها ومتابعة العملية حتى الوصول إلى جميع العقد في الشبكة [18].

يسمح RPL بانضمام العقد في أي وقت، حيث تستخدم العقد الجديدة رسالة DIS لطلب رسالة DIO من عقدة موجودة في DODAG، تحدد العقدة الجديدة الأب الأفضل لها من خلال استقبال رسالة DIO وذلك وفقاً لـ OF.

ترسل العقد رسائل DIO بشكل دوري للحفاظ على استقرار الشبكة، عندما تكون العقدة متصلة بالفعل بـ DODAG ثم تتلقى رسالة DIO جديدة، ستتم معالجتها بثلاث طرق مختلفة [18]:

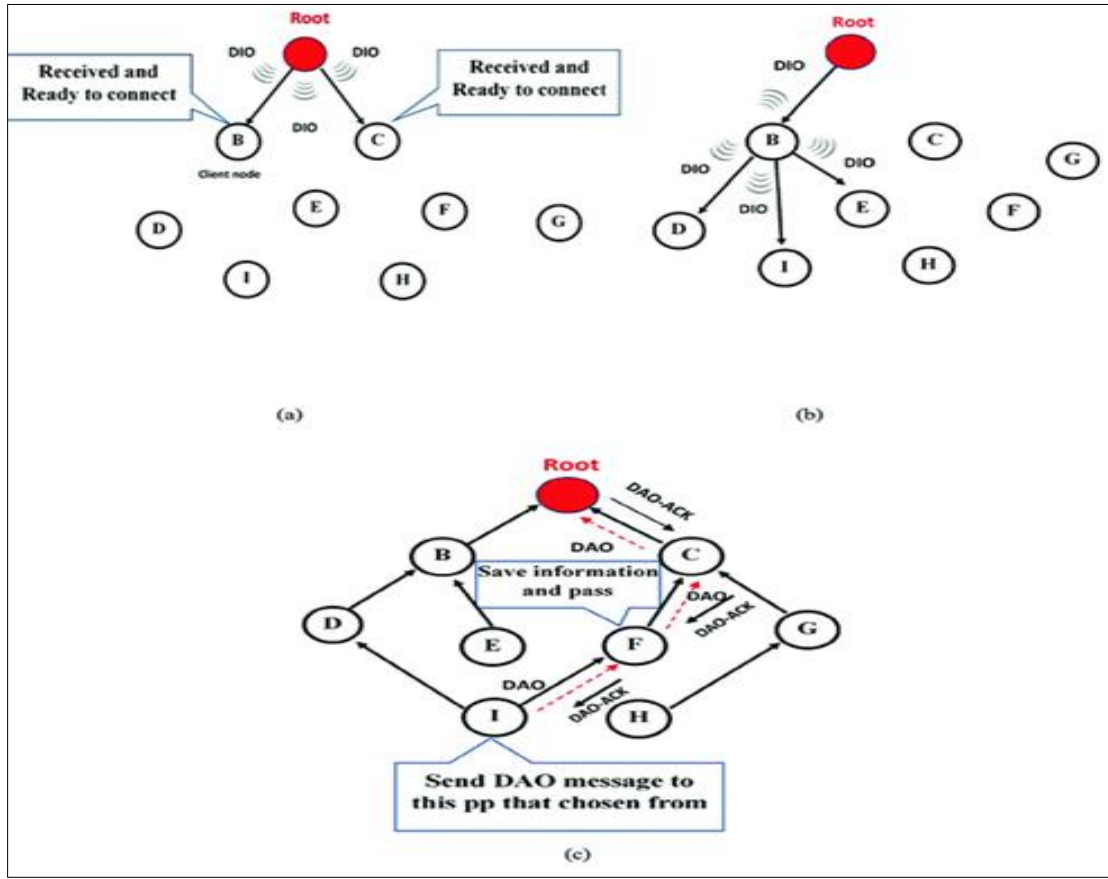
(1) التخلص من رسالة DIO وفقاً لبعض القواعد التي تحددها RPL .

(2) معالجة رسالة DIO للحفاظ على موقعها في DODAG.

(3) تحسين موقعها عبر اختيار رتبة أقل في DODAG من خلال حساب تكلفة المسار الذي تختاره الوظيفة الغرضية.

عندما تقوم العقدة بتحديث ربتها يجب أن تُحدّث قائمة الآباء الموجودة لديها لمنع حلقات توجيه DODAG. يسمح RPL بكل من التوجيه نحو الأعلى (من العقدة إلى والدها) والتوجيه نحو الأسفل (من العقدة إلى الأبناء)، وبالتالي يمكن تقسيم عمل البروتوكول إلى مرحلتين أساسيتين [19]:

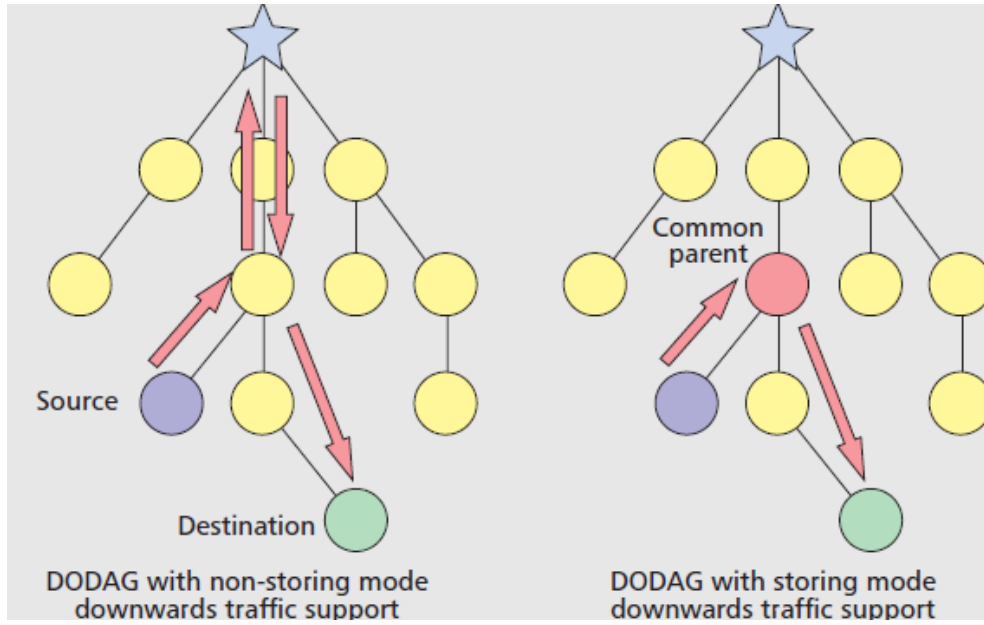
- **نمط التوجيه نحو الأعلى أو (البث الشامل لرسائل DIO):** تُنشأ المسارات نحو الأعلى أثناء العملية الأولى لإرسال رسائل DIO، يحتاج RPL فقط إلى المعلومات الموجودة في DODAG، حيث يجبر DODAG من هو الأب الأفضل للعقدة، لذلك عندما تريد العقدة إرسال طرد إلى الجذر فإنها ببساطة ترسل الطرد إلى الأب الأفضل الخاص بها في الشجرة، ومن ثم يرسل ذلك الأب الطرد إلى والده الأفضل حتى يصل الطرد إلى الجذر.
- **نمط التوجيه نحو الأسفل أو (البث الشامل لرسائل DAO):** يقوم RPL بإرسال طرود DAO و DAO-ACK في التوجيه نحو الأسفل لتحقيق اتصال من نقطة إلى نقطة أو من نقطة إلى عدة نقاط. تنتقل كل عقدة باستثناء جذر DODAG طرود التحكم DAO بطريقة البث الوحيد إلى جذر DODAG من خلال الأب الأفضل الخاص بها وذلك من أجل الإعلان عن بادئة الوجهة القابلة للوصول من خلال هذه العقدة وكذلك البادئة الخاصة بها الشكل (6.c).



الشكل 6: بناء (DODAG): (a) بث DIO ، (b) تحديث رسائل DIO ، (c) بث وحيد لطرود DAO

تعتمد طريقة معالجة رسالة DAO على طريقة التشغيل التي يدعمها RPL، يوفر RPL وضعين للعمل في حالة التوجيه كما في الشكل (7) نحو الأسفل وهما التخزين وعدم التخزين.

- **وضع التخزين:** يتم تسليم طرود DAO بطريقة البث الوحيد من ابن معين إلى أب معين، والذي يمكنه أن يحفظ طرود DAO المستلمة من العقد التابعة له (أبنائه)، أي تحتفظ كل عقدة بجدول التوجيه لأحفادها [20].
- **وضع عدم التخزين:** يتم إرسال طرود DAO إلى جذر DODAG ولا يتم تخزينها من قبل الآباء الوسيطين، أي أن الجذر هو الوحيد الذي يملك خريطة الطوبولوجيا. قد يكون الجذر متصلاً بشبكة خاصة لا تنتمي إلى شبكة LLN، وعندها نطلق على DODAG بأنها grounded [20].



الشكل 7: وضع التخزين وعدم التخزين في DODAG

4.3 آلية الإصلاح في DODAG:

تعتمد RPL عند إكتشاف تناقضات مثل (فشل أحد الروابط أو وجود حلقات توجيه) على آليتين إصلاح: إصلاح محلي أو إصلاح عام، في الإصلاح المحلي تقوم DODAG بفصل العقدة الفرعية عن طريق زيادة رتبته وتحديد أب جديد لها، وبالتالي تمّ الإصلاح بدون إعادة إنشاء DODAG من قبل الجذر. لا يوفر الإصلاح المحلي الحلول المثالية في أغلب الأحيان وذلك لأنّ الأمر يتطلب إصلاحاً عاماً، عندها سيتم إعادة إنشاء DODAG وستحصل على رقم إصدار جديد، قد تكون عملية الإصلاح العام مكلفة من وجهة نظر الشبكة من حيث الأداء لأن ذلك يؤدي إلى زيادة الحمل المضاف لرسائل التحكم في الشبكة [20].

5.3 صيانة DODAG:

تقوم كل عقدة بإنشاء طرود DIO بطريقة دورية بمساعدة مؤقت لحفظ طاقة العقد في DODAG ، الهدف الرئيسي منه هو تحسين وتيرة إرسال الرسائل بالاعتماد على ظروف الشبكة. يتم تقليل تكرار طرود التحكم المرسله عندما تكون الشبكة منتسقة ويزداد في الحالة المعاكسة. يعتمد المؤقت على ثلاثة معاملات قابلة الضبط (K, I_{max}, I_{min}) [21].

✓ معامل Imin:

يعرّف هذا المعامل الحد الأدنى للزمن الفاصل بين طرود DIOs، حيث تبدأ قيمة المؤقت من أدنى قيمة ممكنة لقيمة Imin وتتضاعف في كل مرة ترسل فيها طرود DIO إلى أن تصل إلى أقصى قيمة ممكنة لـ Imax. في حالة حدوث أي تغييرات في DODAG مثل رقم تسلسل DODAGs جديد، اختيار أب جديد، أو حلقة التوجيه وما إلى ذلك يُعاد ضبط المؤقت على Imin.

✓ معامل IMax:

يتم استخدام هذه المعامل للحد من عدد المرات التي يتضاعف فيها Imin. تُحدّد قيمة Imax بواسطة المعامل DIO Interval Doubling.

✓ ثابت التكرار (k):

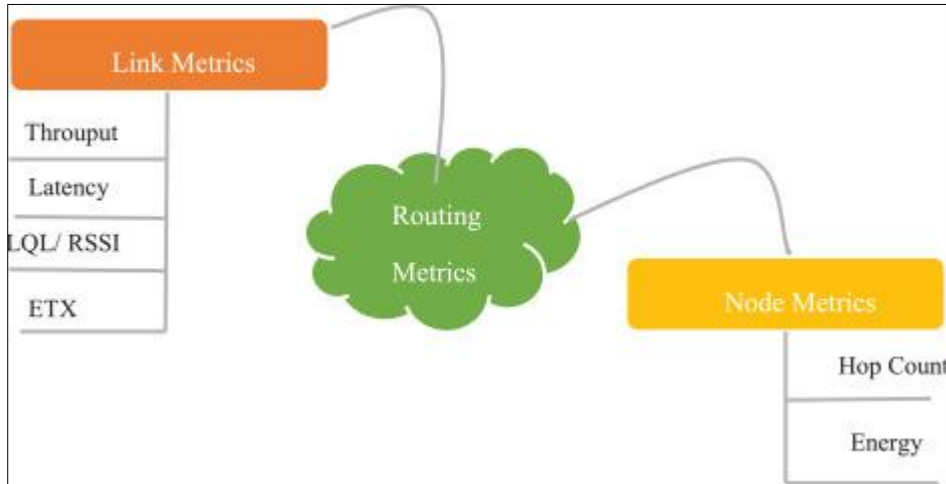
وهو رقم طبيعي أكبر من 0 ويستخدم في منع إرسال طرود DIO.

6.3 نظرة عامة على مقاييس التوجيه في RPL:

تُستخدم مقاييس التوجيه من أجل اختيار المسار الأقصر وتقييم كلفته، وتُستخدم في RPL بشكل مرّن للغاية وذلك بفضل الوظائف الغرضية. تتطلب بعض تطبيقات RPL استخدام مقياساً واحداً بينما تحتاج تطبيقات أخرى إلى تحديد مجموعة من مقاييس التوجيه والقيود، يمكن استخدام القيود والمقاييس معاً بواسطة بروتوكول التوجيه لاختيار المسار الأمثل، على سبيل المثال يمكن الاستفادة من قيد التوجيه لتجنب الروابط غير الموثوقة، ومن خلال مقياس التوجيه يستطيع البروتوكول اختيار المسار بناءً على الروابط التي توفر مستوى محدداً من الوثوقية.

يجب أن تراعي مقاييس التوجيه الديناميكية عدم الاستقرار في شبكات LLN، مثلاً يمكن اعتبار الطاقة المتبقية للعقدة كمقياس لها من أجل اختيار المسار، حيث أنه لا تستطيع العقد التي تعمل في الشبكة الحفاظ على طاقتها طوال الوقت مما يقلّل بشكل مستمر من الطاقة المتبقية لها، ولهذا السبب يتغير حساب المسار استناداً إلى هذا المقياس المحدد [22].

تُصنّف مقاييس التوجيه المختلفة على النحو التالي كما في الشكل (8):



الشكل 8: مقاييس التوجيه المختلفة المستخدمة من قبل الوظيفة الغرضية

1.6.3 مقاييس الوصلة:

نوضح فيما يلي أهم المحددات المستخدمة في قياس الوصلة:

- **مقياس Received Signal Strength Indicato (RSSI) ومقياس Link Quality Indicator (LQI)**

تسمح الطبقة الفيزيائية بتحديد خصائص الشبكة مثل الإشارة والتردد والجهد وما إلى ذلك. تشير RSSI إلى قوة الإشارة المستقبلية وهو عتاد لطبقة الوصلة والذي يعمل كجهاز إرسال واستقبال لاسلكي للتحقق من توفر إشارة التردد المستقبلية قبل إرسال البيانات. يشير LQI إلى مستوى جودة الرابط حيث يقيس وثوقية الرابط باستخدام نطاق من 0 إلى 7 للإشارة [23].

- **مقياس (ETX) Expected Transmission Count**

هو عدد مرات الإرسال المتوقع ويشير لوثوقية الشبكة، ويعرض عدد الإرسالات اللازمة لتلقي إقرار بالاستلام من الوجهة [24]، حيث يتم اختيار المسار الذي يوفر أدنى قيمة ل ETX كطريق مثالي للوصول إلى الجذر. تعكس القيمة العالية ل ETX عدم وثوقية الشبكة.

2.6.3 مقاييس العقدة:

نوضح فيما يلي أهم المحددات المستخدمة في قياس العقدة:

- **الطاقة:** هي الطاقة التي تستهلكها العقدة أثناء العمليات الخاصة بها، قد تفقد بعض العقد طاقتها بشكل أسرع من غيرها بسبب توزيعها في الشبكة وبعدها عن عقدة مستقبل معلومات الشبكة، وقد تكون هذه العقدة قريبة من الجذر أي ستكون حركة مرور البيانات ضمنها كبيرة جداً (عقد عنق الزجاجة)، وبالتالي سيؤدي ذلك إلى

فشل هذه العقد و انخفاض عمر الشبكة، لذلك من المهم مراعاة الطاقة المتبقية للعقد عند تصميم وظيفة غرضية جديدة [25].

- **عدد القفزات:** هو مقياس التوجيه الأكثر استخداماً في الشبكات اللاسلكية، حيث يتم استخدامه لقياس طول المسار في الشبكة، لكن العيب الرئيسي لهذا المقياس هو اختيار المسار الذي يوفر عدد قفزات منخفض مهما كانت جودة الرابط [26].
- **التأخير من البداية إلى النهاية:** التأخير هو أحد مقاييس التوجيه المهمة اللازمة لبناء الطريق في RPL، حيث يعرض الوقت اللازم لنقل الطرود من العقد المرسله إلى مستقبل معلومات الشبكة، وهو مقياس مهم لتطبيقات الزمن الحقيقي [27].

7.3 الوظائف الغرضية في RPL:

تعتمد عملية إنشاء DODAG على الوظائف الغرضية التي تأخذها الشبكة بعين الاعتبار [28] [29]، يعتمد استخدام الوظيفة الغرضية بواسطة بروتوكول التوجيه على ثلاثة مكونات:

1. المقياس المحدد ، والذي يمثل المقياس الذي تختاره العقدة لتحديد المسار.
 2. تكلفة المسار والتي تقيس خاصية المسار.
 3. أفضل أب والذي يؤمن أعلى تكلفة للمسار.
- وضع الباحثون الوظائف الغرضية المعيارية في RPL كما يلي :

1.7.3 الوظيفة الغرضية الصفرية (OF0) objective function zero:

يعتمد OF0 على عدد القفزات كمقياس توجيه لتحديد أفضل الآباء من الجيران المرشحين [30]، عند إنشاء DODAG تأخذ العقدة بعين الاعتبار المسار الأقصر إلى الجذر من حيث عدد القفزات، تزداد الرتب بشكل تنازلي من الجذر إلى العقد المرشحة وذلك للحصول على مسارات متنوعة، يلائم OF0 الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع، لكن مقياس العقدة هذا قد يوفر جودة روابط سيئة لأن العقد تختار المسار مع الحد الأدنى لعدد القفزات حتى لو كان غير موثوق، وبالتالي تزداد عمليات إعادة الإرسال وضياع المزيد من الطرود، بالإضافة إلى أن اختيار المسار الذي يوفر عدد القفزات الأقل بشكل متكرر قد يسمح بفشل العقد مما يؤثر على عمر الشبكة.

2.7.3 مقياس (MRHOF) Minimum Rank Hysteresis Objective Function:

يعتمد استخدام MRHOF على مقياس رابط ديناميكي مثل عدد الإرسال المتوقع (ETX) لاستعادة استقرار الرتبة [31]. اقترح MRHOF بواسطة IETF لحل مشكلات المقاييس الثابتة، يختار MRHOF أفضل مسار بالاعتماد على آليتين،

أولاً يختار المسار ذو الرتبة المنخفضة، ومن ثم يستخدم آلية التباطؤ لاختيار أقل رتبة في حالة وحيدة إذا كانت أقل من المسار الحالي. يُعرّف الباحثون تطبيقين لـ MRHOF بشكل متكرر، ونقدمهما في الأقسام التالية:

1.2.7.3 مقياس Minimum Rank Hysteresis Objective Function with ETX (ETXOF):

يستخدم MRHOF عدد الإرسال المتوقع (ETX) كمقياس توجيه لتحديد أفضل مسار، ويعرّف الحد الأقصى لعدد عمليات إعادة الإرسال اللازمة لاستلام الطرود بنجاح في الوجهة. يكون المسار أفضل كلما انخفضت قيمة ETX يعني أن المسار هو الأفضل.

تُحسب قيمة ETX من عقد المرسل بينما قيمته عند عقدة مستقبل معلومات الشبكة وفقاً للعلاقة التالية [31] (1):

$$ETX = \frac{1}{Df * DR} \quad (1)$$

حيث Df هي نسبة التسليم وتعرّف احتمال الطرود الواردة الناجحة من المصدر إلى الوجهة، وDr هو نسبة التسليم العكسي وهو احتمال الإقرار الوارد الناجح من الوجهة إلى المصدر.

تُقاس جودة الرابط من حيث الوثوقية من خلال قيمة ETX، تشير كلفة ETX المنخفضة إلى أن الروابط في الشبكة أكثر وثوقية.

2.2.7.3 مقياس Minimum Rank Hysteresis Objective Function with Energy:

يستخدم تطبيق آخر لـ MRHOF الطاقة كمعيار لاختيار أفضل مسار. تسعى العقد لتأمين روابط جيدة إلى الجذر بشكل دوري أثناء عمل الشبكة وهذا يجعل العقد تستهلك المزيد من الطاقة، ولتغلب على هذه المشكلة يختار MRHOF الأب الذي مازال لديه طاقة عالية. يعطي هذا التطبيق فقدان طرود وتأخير أعلى بالمقارنة مع (ETXOF).

سننظر في الفصل التالي بتقديم دراسة مرجعية للأبحاث التي تناولت حل مشكلة موازنة الحمل في RPL وطرق التقييم للوظائف الغرضية المحسنة.

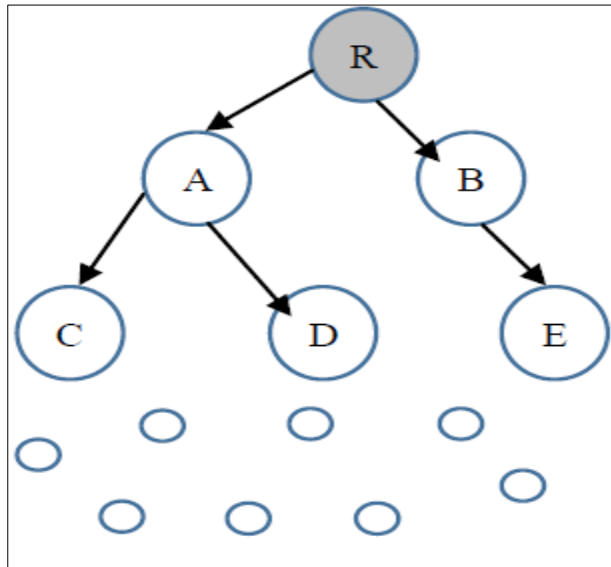
الفصل الرابع

الدراسة المرجعية

1.4 مقدمة :

يلعب تقليل استهلاك الطاقة في شبكات WSN و LLN دوراً رئيسياً في إطالة عمر الشبكة وهو محور معظم البروتوكولات الحالية، بالإضافة إلى أنّ موازنة الحمل لها دور كبير في تحسين عمر الشبكة بالكامل بحيث تستهلك كل عقدة نفس كمية الطاقة. يمكننا شرح مسألة موازنة الحمل في RPL الناتجة عن التوزيع غير المتكافئ للعقد التابعة للآباء كما يلي :

لنفترض لدينا طوبولوجيا DODAG الشكل (9)، ستختار العقد الأوراق (E,D,C) الآباء A و B وذلك بالإعتماد على الرتبة، يملك الوالدين نفس الرتبة لكن العقد A لديها عدد أكبر من الأبناء بالنسبة إلى العقدة B، ستنشأ حالة حمل غير متوازن في RPL مع انضمام المزيد من العقد إلى DODAG وذلك بسبب الاختلاف في عدد العقد الفرعية، وهذا يؤدي إلى إخفاق أحد الوالدين بسبب مشكلة موازنة الحمل هذه وبالتالي فصل العديد من العقد الفرعية المرتبطة بهذا الوالد عن الشبكة حتى يتم إجراء آلية إصلاح عام.



الشكل 9: مشكلة موازنة الحمل في RPL

2.4 مشاكل موازنة الحمل في RPL:

فقد الباحثون مشاكل موازنة الحمل في RPL [32] إلى:

1.2.4 مشكلة النقطة الساخنة:

عندما تواجه عقدة أب أو عقدة تمرير الطرود مشكلة اختناق في الشبكة بسبب مسألة عدم توازن الحمل، فتستخدم هذه العقد مواردها الخاصة وموارد النظام لإدارة حركة المرور في الشبكة، يحدث نتيجة لذلك نضوب سريع لطاقة العقدة ونضوب في موارد النظام. وتدعى هذه المشكلة بمشكلة النقطة الساخنة.

2.2.4 مشكلة عنق الزجاجة:

تحدث مشكلة عنق الزجاجة في عقد واحدة تبعد مسافة قفزة واحدة عن الجذر أو عن مستقبل معلومات الشبكة، إن هذه العقد مشغولة طوال الوقت إما بإرسال البيانات الخاصة بها إلى مصدر البيانات أو إعادة توجيه البيانات من العقد الأخرى في الشبكة، تمر جميع البيانات في الشبكة من هذه العقدة وبالتالي يؤدي إلى استنزاف مواردها بشكل أسرع من قدرتها وبالتالي خروجها عن العمل وانفصال جميع العقد والروابط المتصلة بها في DODAG، ستعاود عقد عنق الزجاجة الإنضمام إلى الشبكة من خلال العقد الآباء الموجودة في الشجرة.

3.2.4 مشكلة قطيع الضجيج (Thundering Herd):

عند انضمام عقد جديدة للشبكة وكانت قيمة رتبها التي يتم الإعلان عنها من خلال بث رسائل DIO صغيرة، فإنها تجذب نحوها فجأة الكثير من العقد الأخرى والتي هي أبناء للآباء الآخرين، مما يؤثر على استقرار الشبكة. حيث تُحسب الرتب للعقد وفقاً للمعادلتين التاليتين كما [RFC 6719]:

$$Rank(N) = Rank(PN) + RankIncrease \quad (2)$$

$$RankIncrease = MinHopRankIncrease * step \quad (3)$$

حيث:

- Rank (N): هي رتبة عقدة المرسل.

- Rank (PN): هي رتبة الأب الأفضل

- MinHopRankIncrease: تمثل الحد الأدنى للزيادة في الرتبة بين العقدة وأي من الأباء في DAG، والقيمة المعيارية لها هي 256.

- Step: القيمة الافتراضية للخطوة هي 3 كما في [RFC 6552].

4.2.4 زيادة الحمل على العقد والشبكة:

تؤدي مشكلة عدم توازن الحمل في شبكة RPL إلى اختيار العقد الجديدة نفس الأباء لتوجيه البيانات أو القيام بالإتصالات، وبالتالي ستحصل العقد الأباء أو عقد توجيه البيانات على حمل شبكة أكبر ويزداد هذا الحمل كلما كانت العقد أقرب إلى الجذر، ويؤدي هذا الحمل المتزايد للعقد الأباء إلى نضوب طاقتهم وخروجهم عن العمل وهذا يؤثر على الشبكة بطريقة سيئة.

5.2.4 عدم استقرار الشبكة:

يؤثر اختيار العقد الأباء في شبكة RPL بشكل مباشر على توازن الشبكة، ولا سيما أن التوازن الضعيف يؤدي إلى التبديل المتكرر لهذه العقد، يسبب التبديل تأخير الإتصالات وهذا يؤثر بشكل مباشر على استقرار الشبكة بالكامل، وبالتالي يُعتبر توازن الشبكة من المؤشرات المهمة على استقرارها.

6.2.4 معدّل تسليم الطرود السيئ:

تعد مشكلة تسليم الطرود مشكلة هامة في RPL القائمة على شبكات LLN والتي تتميز بالقيود على الموارد، سيؤدي فشل الروابط إلى عدم التسليم الصحيح لطرود البيانات، ينخفض معدّل تسليم الطرود في حالة فشل العقد الأباء أو عقد توجيه البيانات في تسليم البيانات أو إعادة إرسال طرود البيانات بشكل متكرر وذلك بسبب مشاكل موازنة الحمل.

3.4 الدراسات المرجعية المرتبطة بمشكلة البحث :

نوضح في هذا القسم دراسة استقصائية مفصّلة عن أبحاث موازنة الحمل المتوفرة في RPL، تهدف معظم الحلول إلى تحسين التوجيه وفعالية الطاقة وإدارة الموارد وغيرها.

اقترح الباحثون في [33] استخدام قائمة الأرتال queue utilization (QU-RPL)، يهدف هذا المقترح إلى السماح للعقدة بتحديد الأب الأفضل لها بناءً على استخدام الأرتال الخاصة بالعقد الجيران بالإضافة إلى استخدام مسافات القفز الخاصة بها إلى جهاز التوجيه الحدودي في LLN والتعبير عن ذلك بمعادلة موازنة كما يلي (4) :

$$R_{QU}(p_k) = h(p_k) + 1 + ETX(k, p_k) + \alpha Q(p_k) \quad (4)$$

حيث:

$$\begin{aligned}
 & - h(p_k): \text{عدد القفزات.} \\
 & - \text{ETX: عدد الإرسال المتوقع.} \\
 & - Q(p_k) = \frac{\text{عدد الطرود في الرتل}}{\text{حجم الرتل الكلي}}, \text{ و } \alpha \text{ معامل يتحكم بالوزن المعطى إلى QU.}
 \end{aligned}$$

يساعد هذا المقترح على تخفيف مشكلة فقدان الطرود وبالتالي تحقيق تحسّن كبير في أداء نسبة تسليم الطرود من طرف إلى طرف مقارنةً بـ RPL المعياري.

صمّم الباحثون في [34] الوظيفة الغرضية المعتمدة على السياق (CAOF) Objective Function Context-Aware والتي تسمح لـ RPL بأخذ الموارد المحدودة لعقد الحساس وتغييراتها الزمنية بعين الاعتبار، مثل مستوى طاقة البطارية. يعتمد CAOF على المقاييس التالية: درجة اتصال العقدة (دورة العمل) (W_{dc})، مستوى طاقة البطارية (W_{batt})، وموضع العقدة بالنسبة إلى عقدة مستقبل معلومات الشبكة (W_{coloc}) كما في المعادلة الموزونة التالية (5):

$$S_i = W_{dc} * U_{dci} + W_{coloc} * U_{coloci} + W_{batt} * U_{batti} \quad (5)$$

يحصّن CAOF من عمر الشبكة بسبب قدرته على توزيع الأحمال بإنصاف في الشبكة دون استنزاف موارد بعض العقد مقارنة بـ OF0 ويضمن الإنصاف في استثمار بطاريات العقد المختلفة في الشبكة كما أنه يعمل على تحسّن نسبة التسليم.

استخدم الباحثون في [35] خوارزمية تُدعى (EAOF) The energy-aware Objective Function، والتي تستخدم مقياس ETX بالإضافة إلى الطاقة المتبقية لكل عقدة من أجل حساب أفضل المسارات لتوجيه البيانات عبر شبكة الاتصالات، بدايةً تختار كل عقدة من قائمة الجيران العقد التي لديها روابط أكثر وثوقية (أي أدنى ETX) في الطريق نحو مستقبل معلومات الشبكة فتتشكل مجموعة فرعية، ومن ثمّ تختار من تلك المجموعة العقدة التي لديها أكبر طاقة متبقية لتصبح عقدة أب لهذه العقدة.

تحسّن هذه الخوارزمية بشكل كبير من عمر الشبكة واستهلاك الطاقة بالإضافة إلى تحقيق التوازن مقارنة بـ MRHOF. أيضاً اقترح الباحثون في [36] وظيفة موضوعية تعتمد على مقياسين وهما الطاقة المستهلكة و ETX كما في المعادلة (6):

$$T(n_i) = F_{EC}(n_i) + F_{ETX}(n_i) \quad (6)$$

حيث:

$F_{EC}(n_i)$: تابع يعيد الطاقة المستهلكة من قبل العقدة i منذ بداية عملها.

$F_{ETX}(n_i)$: هو التابع الذي يعيد ETX بالاعتماد على الروابط بين العقدة i ورسالة DIO للمرسل j .

في كل مرة تتلقى العقدة رسالة DIO يجب عليها حساب $T(n_i)$ ، ومن ثمّ بعد حسابها تقوم العقدة i بإعادة توجيه الرسالة للجيران مع $T(n_i)$ بالإضافة إلى $T(n_i)$ التي تم استلامها مسبقاً داخل رسالة DIO، وبالتالي يتم معرفة جودة المسار إلى نقطة الجذر.

تحسّن هذه الوظيفة الغرضية من أداء الشبكة من خلال تحسين نسبة استلام طرود البيانات وكفاءة استهلاك الطاقة للشبكة. وفي [37] اقترح الباحثون أيضاً خوارزمية تعتمد على الطاقة المتبقية للعقد الآباء من أجل إطالة عمر الشبكة واختيار الأب الأفضل، تأخذ الوظيفة الغرضية المقترحة مقياس الطاقة المتبقية للعقد ومقياس ETX بعين الاعتبار بطريقتين، أما حساب الطاقة المتبقية و ETX لجميع الآباء على طول الطريق حتى الوصول إلى مستقبل معلومات الشبكة لتحديد الأب الأفضل في كل قفزة، أو مقارنة كلا المقياسين للعقد ذات القفزات الواحدة، تساعد كلا الطريقتين في تمديد عمر أول عقدة قابلة للخروج عن العمل في شبكات كثيفة متناظرة وغير متناظرة بالإضافة إلى تحقيق استهلاك طاقة عادل بين العقد، وبالتالي فإنّ هذا المقترح مناسب للتطبيقات التي تتطلب الحفاظ على معظم العقد على قيد الحياة أطول فترة ممكنة، لكن من حيث معدّل التدفق فإنّ MRHOF تتفوق على الوظيفة الغرضية المقترحة.

اقترح الباحثون في [38] بروتوكول توجيه لتجنب الازدحام (CA-RPL) Congestion Avoidance-RPL، يستخدم مقياس التوجيه المركبة القائمة على RPL، يقلّل هذا المقترح من متوسط التأخير نحو جذر DAG ويحسّن من وثوقية الروابط بالإضافة إلى تحقيق توازن الحمل.

بينما في [39] استخدم الباحثون انشغالية المخزن المؤقت (BO) Buffer Occupancy مع ETX كمقياس مركّب لموازنة حركة المرور وتقليل عدد الطرود المفقودة.

أضاف الباحثون في [40] ميزة إضافية في RPL وهي آلية جديدة لاختيار الآباء تسمى RPL المحسّنة (EN-RPL) Enhanced RPL وذلك من أجل موازنة الحمل من خلال منع العقد الأبناء من استخدام العقد الآباء المزدحمة، بالإضافة إلى اقتراح وظيفة موضوعية جديدة من أجل التوجيه الفعال والذي يستند إلى مقياس التوجيه الفعال المركب (CER) Composite

Efficient Routing المحدد حديثاً، ويأخذ مقاييس مهمة في الاعتبار لاختيار الآباء وهي: جودة الرابط، واستخدام قائمة الأرتال، وعمر العقدة، والتأخير وعدد عقد عنق الزجاجة.

توضح نتائج المحاكاة أن EN-RPL يقلل من فقدان الطرود بنسبة تصل إلى 37% ويقلل من استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 46.5% مقارنةً ب RPL المعياري.

في [41] اقترح المؤلفون تقنية مستقبل معلومات الشبكة المتعدد والتي تسمح بالمزيد من العقدة للمشاركة في الشبكة مما يقلل من عدد القفزات مما يؤدي إلى تحسين دورة حياة الشبكة.

صمّم الباحثون في [42] بروتوكول توجيه موازنة الطاقة والذي يزيد من عمر العقد الأكثر تقييداً للطاقة، وذلك لتحسين عمر الشبكة، يجب أن تستهلك كل عقدة نفس الكمية (الدنيا) من الطاقة، تم اقتراح مقياس دورة الحياة المتوقع مع الإشارة إلى الوقت المتبقي للعقدة (الوقت إلى أن تنفذ العقدة من الطاقة). يجد هذا المقياس الاختناقات في كل مسار نحو الجذر، لكن يستخدم في حساب الرتب ETX ورتبة الأب.

يحسّن هذا البروتوكول كلاً من وثوقية التوجيه وعمر الشبكة بالإضافة إلى تقليل عدد العمليات المستخدمة في ضبط DAG. قدّم الباحثون حلولاً في [43] لحل مشكلة فقدان الطرود واستنفاد الطاقة عندما تكون حركة المرور كبيرة، أولاً اقترحوا وظيفة غرضية Context-Aware Objective Function (CAOF) لها الخصائص التالية :

أ- تأخذ بعين الاعتبار الطاقة المتبقية لمجموعة الآباء بالإضافة إلى مقياس ETX و الرتبة.

ب- تتجنب مشكلة قطع الضجيج في الشبكة.

ثانياً اقترحوا مقياساً جديداً للتوجيه، يُعرف باسم "مقياس التوجيه المعتمد على السياق" Context-Aware (CARF) Routing Metric يتميز هذا المقياس بالخصائص التالية:

أ- يأخذ في الاعتبار استخدام المخازن المؤقتة واستخدام الطاقة المتبقية لسلسلة الآباء.

ب- يساعد الشبكة في الحصول على مزيد من الطاقة المتوازنة وكذلك طرق متوازنة الحمل.

ثالثاً اقترحوا آلية لاختيار الوالدين والتي لها الخصائص التالية:

أ- تستخدم CARF كميّار القرار لاختيار أنسب الآباء.
 ب- تتجنب مشكلة " توهم المساواة " والتي يمكن تعريفها على أنها حالة وجود آباء متعددين مرشحين يتمتعون بنفس قيمة الرتبة ولكن أعداد مختلفة من الأبناء.
 حققت هذه الحلول المقترحة موازنة الحمل في الشبكة، ومنعت مشكلة الاندفاع نحو الأب المناسب والتي تخلق عدم استقرار في الشبكة وزيادة في معدّل رسائل التحكم.
 من أجل ضمان زيادة عمر العقد الموكّل إليها مهام كثيرة (عقد عنق الزجاجاة) استخدم الباحثون في [45] خوارزمية لموازنة عدد العقد الأبناء لهم وذلك من خلال :

- 1- تعديل رسالة DIO عن طريق إدخال مُعرّف الأب المختار قبل بثه.
 - 2- اقتراح تقنية استخدام جديدة لرسالة DIO المعدّلة لتجنب زيادة الأعباء الناتجة عن رسائل المصافحة و الإقرار أي التخفيف من أي تكاليف إضافية محتملة. الهدف هو التعرف على عدد الأبناء لكل والد بينما يكون DODAG قيد الإنشاء
 - 3- استخدام مقياس RPL الناتج لموازنة الحمل بين نقاط الاختناقات.
- تظهر نتائج المحاكاة أن الوظيفة الغرضية المقترحة لموازنة الحمل هي أفضل من MRHOF و OF0 من حيث استهلاك الطاقة المتوازن، معدل تسليم الطرود، العمر المتوازن وعدد الأبناء لكل عقدة.

4.4 تقييم الوظائف الغرضية المحسّنة في RPL حسب الدراسة المرجعية:

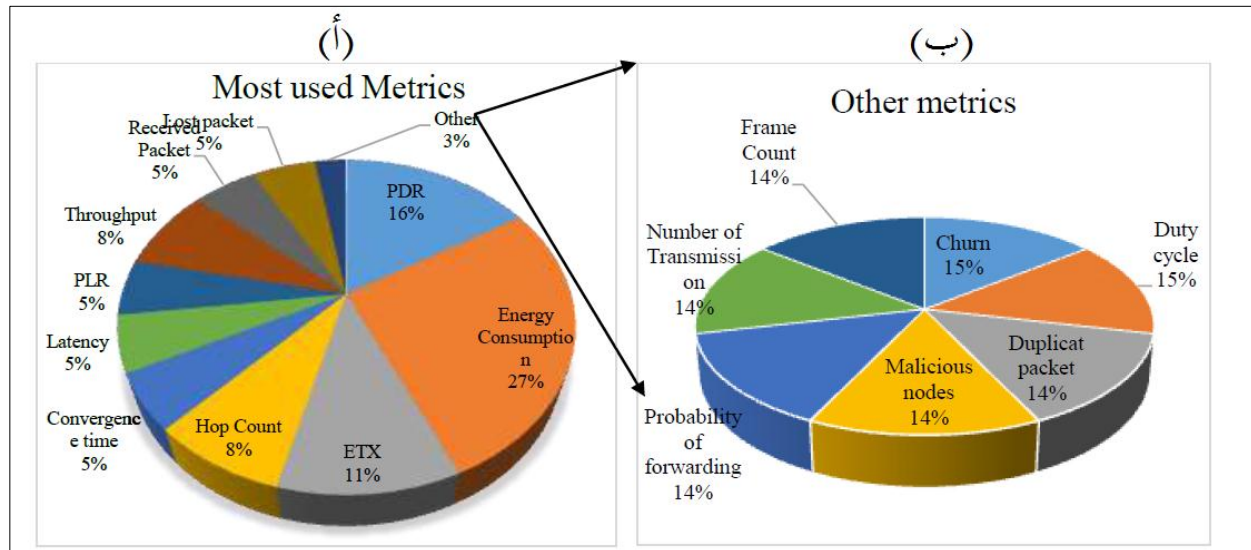
نقدّم في هذا القسم دراسة تحليلية لطرق التقييم التي تناولتها المواضيع البحثية التي درست RPL حتى الآن :

1.4.4 التقييم عن طريق عدد العقد :

يعدّ معامل كثافة الشبكة معامل رئيسي وهام في دراسات التقييم، يتم إجراء المحاكاة من أجل كثافة عالية بعدد عقد من 75 إلى 200 عقدة، بينما في الكثافة المتوسطة تبلغ عدد العقد من 35 إلى 65 عقدة وفي الكثافة المنخفضة من 10 إلى 30 عقدة. استخدمت غالبية الأبحاث السابقة 20 و 40 عقدة بنسبة 14% و 12% على التوالي، و 30 بنسبة 10% و 100 عقدة بنسبة 7% .

2.4.4 التقييم عن طريق مقاييس التوجيه:

يمثل استهلاك الطاقة التحدي الأكثر أهمية للأجهزة التي تعمل على بروتوكول RPL، لهذا السبب تركز العديد من الأبحاث على تقييم تأثير الوظيفة الغرضية على استهلاك الطاقة. يوضح الشكل (10) المقاييس الأكثر استخداماً في أبحاث تقييم RPL:



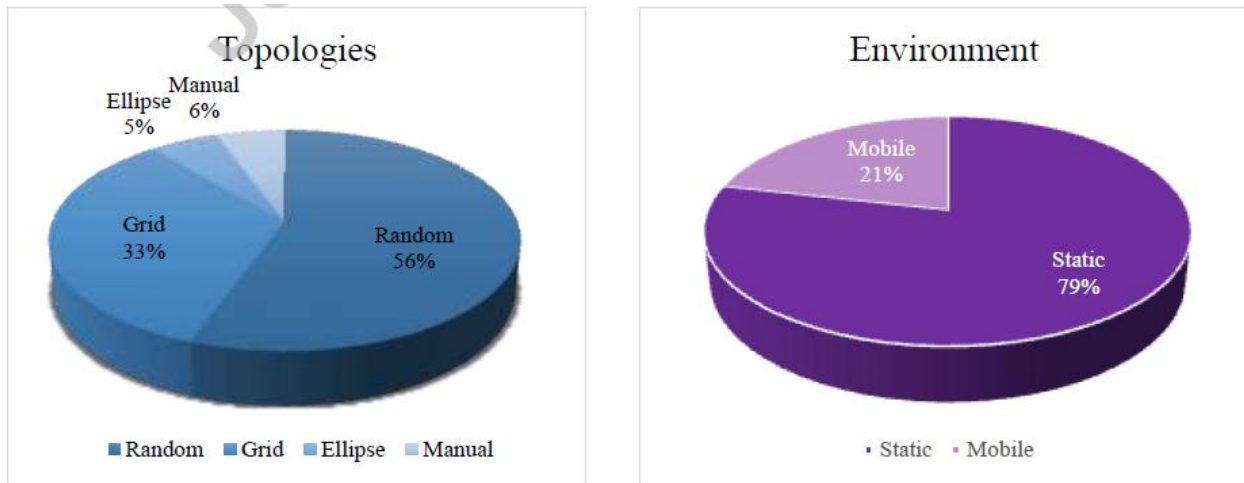
الشكل 10: (أ): توزع معظم المقاييس المستخدمة في التقييم، (ب): المقاييس غير المستخدمة بشكل كبير في التقييم

يمكننا أن نلاحظ أن 27% من الأبحاث تستخدم استهلاك الطاقة كعامل لتقييم السيناريوهات المقترحة تليها PDR بنسبة 16%، ETX بنسبة 11% وعدد القفزات ومعدل التدفق بنسبة 8%. بينما 5% للمقاييس التالية على التوالي PLR و الطرود المستلمة والطرود المفقودة و التأخير ووقت التقارب [45] [46].

توجد مقاييس أخرى مستخدمة بشكل قليل في أبحاث تقييم الوظيفة الغرضية (الشكل (10)) ، مثل الطرود المكررة، عدد الإطارات وعدد الإرسالات وغيرها. ترتبط كثافة الشبكات بعدد العقد بالإضافة إلى نطاق التداخل.

3.4.4 التقييم عن طريق الطوبوجيا والبيئة:

تؤثر الطوبولوجيا بشكل كبير على أداء التوجيه، نلاحظ من الشكل (11) أن أكثر الطوبولوجيا المستخدمة هي العشوائية (56%) مقارنة بالشبكة (33%) و بقية الأنواع [45] [46].



الشكل 11: الطوبولوجيا والبيئات المستخدمة في التقييم

توزع الحساسات بشكل عشوائي لجمع المعلومات وهذا ما يفسر استخدام الطوبولوجيا العشوائية في دراسات المحاكاة لتعكس التوزيع الحقيقي لأجهزة الحساسات. نلاحظ أيضاً أن معظم التقييمات كانت من أجل البيئات الثابتة (79%) [45] [46].

5.4 خلاصة:

لا تزال موازنة الحمل تمثل مشكلة صعبة في RPL وخاصة أن العقدة لها أكثر من قرار في اختيار الأب، وبالتالي فإنّ العقدة الأب إما فيها حركة مرور كبيرة أو لا يوجد فيها أي حركة مرور على الإطلاق، ما يزال الباحثون إلى الآن يسعون إلى إيجاد الحلول المناسبة لحل هذه المشكلة، وقد توصلوا إلى أنّه من أجل زيادة عمر الشبكة إلى جانب الكفاءة في تسليم الطرود ينبغي استخدام مقاييس الطاقة والروابط في OF من أجل الحصول على أداء شبكة فعّال من حيث استهلاك الطاقة، وإذا تمّ استخدام مقياس توجيه الطاقة بمفرده في OF فإنّ ذلك يؤدي إلى ارتفاع نسبة فقدان الطرود [47].

سنقوم في الفصل اللاحق بتطوير والتعديل على أحد الخوارزميات الحديثة والتي تعطي الأداء الأفضل وتحقق قابلية التوسع في تطبيقات إنترنت الأشياء، لأنه كلما كان عدد العقد أكبر ستزداد حركة المرور بشكل أكبر وبالتالي ستنضب طاقة عدد أكبر من العقد وهذا سيتطلب رسائل تحكم أكبر لإعادة تشكيل هيكلية الشبكة.

الفصل الخامس

الخوارزمية المقترحة لتحسين أداء التوجيه

1.5 مقدمة:

لقد تمّ تصميم بروتوكول التوجيه RPL الذي يميّز بالعديد من الميزات مثل التشكيل السريع والطوبولوجيا الخالية من الحلقة من أجل تلبية احتياجات الأجهزة المقيدة بالعتاد الصلب (إنترنت الأشياء)، لكن كما ذكرنا سابقاً، فإنّ هذا البروتوكول يعاني من مسألة عدم موازنة الحمل مما يؤثر سلباً على وثوقية الشبكة، حيث تؤدي هذه المشكلة إلى اختلاف في حركة البيانات وبالتالي استنزاف طاقة العقد الموكل إليها مهام عدة بشكل أسرع بكثير من العقد الأخرى، وبالتأكيد سوف يؤدي هذا الأمر إلى انخفاض في طاقتها وبالتالي فصل الجزء من الشبكة المتصل بها بسبب نفاذ الطاقة. يؤدي نفاذ طاقة العقدة الأب إلى مشكلة مهمة في الشبكة مثل زمن الإرسال ونتيجةً لذلك ستبدأ العقد الأبناء الخاصة بها بالبحث عن أفضل عقدة أب وتعيينها، مما يؤدي إلى حدوث حمل زائد وغير مرغوب به ضمن الشبكة.

من أجل تحسين أداء الشبكة وحل المشكلة تمّ اقتراح الخوارزمية [48] التي تأخذ بعين الاعتبار حالة الطاقة المتبقية للعقد بحيث لا يتم اختيار الأب الذي يملك طاقة تحت عتبة معيّنة لكي لا يحدث فصل في جزء الشبكة الخاص بالعقد الأبناء التابعة له، بالإضافة إلى الأخذ بعين الاعتبار لحجم الأرتال ضمن العقد المرشحة لتكون العقدة الأب الأفضل، وذلك من أجل ضمان عدم حدوث طفح overflow ضمن الأرتال مما يؤدي إلى تدمير الطرود تبعاً إما بحسب آلية First In-First (FIFO) أو Last IN-First Out (LIFO). سنشرح في القسم التالي خطوات هذه الخوارزمية والتطوير المقترح عليها.

2.5 الخوارزمية المعتمدة:

اقترح الباحثون في خوارزمية ECRM استخدام مقاييس وقيود جديدة مثل: عدد القفزات، مقياس ETX، الطاقة المتبقية ومعامل الرتل ((QU) الموضّح في المعادلة التالية:

$$\text{معامل الرتل} = \frac{\text{عدد الطرود في الرتل}}{\text{حجم الرتل الكلي}} \quad (7)$$

تمّ توصيف الخوارزمية كما يلي :

1. تتعرف كل عقدة على العقد المجاورة من خلال رسائل DIO المرسله دورياً بما في ذلك معلومات الرتبة، ETX ، QU والطاقة المتبقية للعقد.
2. تقوم العقدة بإنشاء مجموعة من الآباء المرشحين من العقد المجاورة.
3. تقوم كل عقدة بعملية اختيار عقدة الأب بناء على أقل رتبة وأقل قيمة ل ETX وعتبة معينة لمعامل الرتل والطاقة المتبقية.
4. في الحالة الأولى سيتم فحص الطاقة المتبقية للعقدة الأب الحالية وسيتم تبديل العقدة الأب الحالية إلى أفضل عقدة بديلة إذا كانت الطاقة المتبقية أقل من مستوى عتبة معينة .
5. إذا كانت الطاقة المتبقية موجودة ضمن عتبة، فسيتم فحص معامل الرتل للعقدة الأب الحالية.
6. إذا كان معامل الرتل للعقدة الأب الحالية أكثر من مستوى معين أو عتبة معينة، فسيتم تبديله إلى أفضل عقدة بديلة.
7. إذا كان معامل الرتل للعقدة الأب أقل من عتبة معينة سيتم تغيير العقدة الأب الحالي بالاعتماد على RPL المعياري بالاعتماد على أقل رتبة وأقل ETX.
8. بعد عملية اختيار عقدة الأب، سيتم إعادة توجيه البيانات إلى العقدة الأب الأفضل.
9. تلقي طرد إقرار بالاستلام من طبقة MAC، تعني أن الطرد تم استلامه بنجاح بواسطة العقدة الأب.
10. إذا لم يتم تلقّي أي إقرار بالاستلام من طبقة MAC، هذا يعني أنّ الطرود قد ضاعت ويجب إعادة تكرار العملية بالانتقال مرة أخرى إلى الخطوة 2.

وجدنا أنه بالإمكان تعديل هذه الخوارزمية من أجل تحسين الأداء وذلك بتعديل وإضافة بعض الخطوات عليها.

3.5 التطوير المقترح على الخوارزمية :

1.3.5 المقاييس المستخدمة في الخوارزمية:

تأخذ الخوارزمية المقترحة بعين الاعتبار المقاييس التالية:

- 1- الطاقة المتبقية والطاقة المستهلكة لكل عقدة حتى لا يتم فصل جزء الشبكة المتصل بها عند نضوب طاقتها.
- 2- مقياس ETX من أجل جودة عالية للروابط وتجنب فقدان الطرود.
- 3- عدد الطرود المرسله لكل عقدة لتجنب العبء والحمل الزائد في الشبكة وعلى العقد.

4- رتبة العقد.

2.3.5 توصيف الخوارزمية:

في بداية تهيئة الشبكة، يبث الجذر رسائل DIO والتي تحتوي على المعلومات المفيدة للتعرف على معاملات الشبكة مثل الرتبة وهوية DODAG ورقم الإصدار و OF، عندما تتلقى العقد رسائل DIO من الجذر تحسب رتبته وفقاً للمعادلة:

$$\text{Rank (N)} = \text{Rank (PN)} + \text{RankIncrease} \quad (8)$$

$$\text{RankIncrease} = \text{MinHopRankIncrease} * \text{step} \quad (9)$$

حيث:

Rank (N) : هي رتبة عقدة المرسل.

Rank (PN) : هي رتبة الوالد الأفضل.

MinHopRankIncrease: تمثل الحد الأدنى للزيادة في الرتبة بين العقدة وأي من الوالدين DAG، والقيمة المعيارية لها هي 256 أما القيمة الافتراضية للخطوة هي 3.

سيحدد موقع العقد في DODAG وفقاً لمعادلة حساب الجزء الصحيح للرتبة كما يلي :

$$\text{(DAGRank(Rank))} = \text{floor} \left(\frac{\text{Rank}}{\text{MinHopRankIncrease}} \right) \quad (10)$$

حيث floor(x) هو تابع يعيد أكبر عدد صحيح أقل أو يساوي x.

بذلك تُبنى الطوبولوجيا وتكون رتبة العقد الآباء أقل من رتبة الأبناء، بعد ذلك ستبدأ كل عقدة ببث طرود DIO بشكل دوري والتي تحتوي على معلومات حول رتبته، قيمة ETX، حالة طاقتها وعدد الطرود المرسله بالإضافة إلى هوية DODAG، عندما تتلقى العقد طرود DIO من جيرانها ستنشأ مجموعة من عقد الآباء المرشحين، لتحديد الأب الأفضل للعقدة بداية نستخدم مقياس الطاقة المتبقية للآباء وهو ممثل مدى عمر الشبكة ويسمح بتجنب اختيار العقدة ذات الطاقة المتبقية المنخفضة، وتُحسب الطاقة المتبقية كما في المعادلة التالية:

$$\text{الطاقة المتبقية} = \text{طاقة العقدة القصوى} - \text{الطاقة المستهلكة} \quad (11)$$

يعتمد استهلاك العقد للطاقة على موضعها في الشبكة بالإضافة إلى عوامل أخرى، يمكن تقدير استهلاك الطاقة استناداً إلى الطاقة التي تستهلكها العقدة في كل حالة من الحالات المحتملة التي يمكن أن تعمل فيها العقدة وهي: حالة الإرسال (Tx)، حالة الاستقبال (Rx)، وضع الطاقة المنخفضة والذي يعني بشكل أساسي وضع السكون (LPM)، وحالة خمول العقدة بشكل كامل عدا وحدة المعالجة المركزية للزوم عملها في معالجة المعلومات لدى استقبالها.

بعد التأكد من أن قيمة الطاقة المتبقية ضمن العتبة تنتقل إلى المقاييس الأخرى المعتمدة لاختيار الأب الأفضل وهي: مقياس ETX والطرود المرسله من قبل الآباء المرشحين. في هذا الجزء من الخوارزمية نعتد على ثابتين من أجل عملية موازنة الحمل:

الثابت الأول هو معدّل مقياس ETX الأعلى والذي يدعى بـ $MaxETX_{ratio}$ والذي يتحكّم بقيم معامل ETX المستخدم في قياس المسار، لنفترض لدينا العقدة N لها زوجين من الآباء المرشحين P1 و P2، ولدينا ETX_{P1} هو مقياس ETX للأب الأول، و ETX_{P2} هو مقياس ETX للأب الثاني فتكون ETX_{ratio} كما يلي:

$$ETX_{ratio} = \begin{cases} \frac{ETX_{P2}}{ETX_{P1}} * 100 & ETX_{P1} > ETX_{P2} \\ \frac{ETX_{P1}}{ETX_{P2}} * 100 & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

أثناء عملية اختيار الأب الأفضل إذا كانت ETX_{ratio} الخاصة بعقدتي الآباء أكبر من $Max ETX_{ratio}$ سنختار العقدة الأب ذات عدد الطرود المرسله الأقل.

أما الثابت الثاني هو معدّل الحمل الأعلى $MaxLoad_{ratio}$ والذي يعرف تأثير الفرق في عدد الطرود المرسله لعقد الآباء على خوارزمية التحسين، ونقوم بحساب $Load_{ratio}$ بنفس طريقة ETX_{ratio} . لنفترض $SentPkt_{p1}$ عدد الطرود المرسله من قبل الأب الأول، و $SentPkt_{p2}$ عدد الطرود المرسله من قبل الأب الثاني فيكون معدّل الحمل كما يلي:

$$Load_{ratio} = \begin{cases} \left(\frac{SentPkt_{p2}}{SentPkt_{p1}} \right) * 100 & SentPkt_{p1} > SentPkt_{p2} \\ \left(\frac{SentPkt_{p1}}{SentPkt_{p2}} \right) * 100 & otherwise \end{cases} \quad (13)$$

تُحسب قيمة $Load_{ratio}$ و ETX_{ratio} مسبقاً قبل اختيار الأب الأفضل، سيتم اختيار الأب الذي لديه أقل قيمة لـ ETX وأقل عدد للطرود التي يرسلها، نتيجة لذلك نكون قد اخترنا العقدة ذات الرابط الجيد وبأقل عدد للطرود المرسله مما يزيد من موازنة الحمل وتجنّب فقدان الطرود واستهلاك الطاقة.

يلعب $MaxLoad_{ratio}$ دوراً هاماً في منع الحمل الزائد وغير الضروري للشبكة. إذا تقاربت أو تساوت قيمة ETX للعقد المرشحة فإننا نختار الأب الذي لديه أقل حمل (أقل عدد طرود مرسله).

في حال تساوي الطرود المرسله للآباء سنختار الأب بناءً على مقياس توجيه يأخذ بعين الاعتبار مقياس ETX واستهلاك الطاقة بالإضافة إلى الرتبة، كما في المعادلة (14):

$$R = K \left(\frac{ETX}{MaxETX} \right) + (1 - K) \left(\frac{curEnergy}{MaxEnergy} \right) \quad (14)$$

إنّ الجزء الأيمن من المعادلة هو قيمة ETX ، والجزء الأيسر هو نسبة الطاقة الحالية والطاقة القصوى لكل عقدة أب مرشحة، و K هي الوزن وتعرّف كما يلي:

$$K = \frac{cur Rank}{MaxRank} \quad (15)$$

وبالتالي نختار الأب الذي له قيمة R الأقل.

يمنح هذا المقياس توازن طاقة جيد في الرتب الأدنى وروابط جيدة في الرتب الأعلى، لأن العقدة ذات الرتبة الأقل تنقل الكثير من البيانات للعديد من العقد الأبناء، لذلك يجب أن يكون لهذه العقد زمن حياة طويل.

أما بالنسبة للعقد ذات الرتبة الأعلى يجب أن يكون لها قيمة جيدة لـ ETX للحصول على معدل تسليم طرود مرتفع.

3.3.5 المخطط العام للخوارزمية:

يمكننا صياغة الخطوات العامة للخوارزمية كما يلي:

- 1- تتعرّف كل عقدة على جيرانها من خلال رسائل DIO والتي تحتوي على معلومات: الرتبة، ETX ، حالة الطاقة الخاصة بها، وعدد الطرود المرسله.
- 2- إنشاء مجموعة من عقد الآباء المرشحين.
- 3- تقوم كل عقدة بعملية اختيار عقدة الأب بناءً على أقل قيمة لـ ETX وأقل عدد طرود مرسله وعتبة معينة للطاقة المتبقية.
- 4- نطبّق الخوارزمية على كل زوج من الآباء كما يلي: في الحالة الأولى نتحقق من أن تكون الطاقة المتبقية لكل عقدة أب ضمن العتبة، وإلا سوف ننتقل إلى العقدة البديلة الأخرى.

5- نتحقق من مقياس ETX ونسبة الطرود المرسله للآباء، إذا كان مقياس ETX الخاص بهم ضمن النطاق المقبول وكان الفرق بين عدد الطرود المرسله مختلف، نختار العقدة الأب التي لها أقل قيمة ETX وأقل عدد طرود مرسله.

6- إذا كان مقياس ETX للعقدتين متقارباً أو متساوياً وأكبر من $MaxETX_{ratio}$ نختار العقدة الأب التي لها عدد طرود مرسله أقل.

7- في حال تساوي عدد الطرود المرسله للآباء، نختار الأب الذي يحقق أصغر قيمة لـ R وهي:

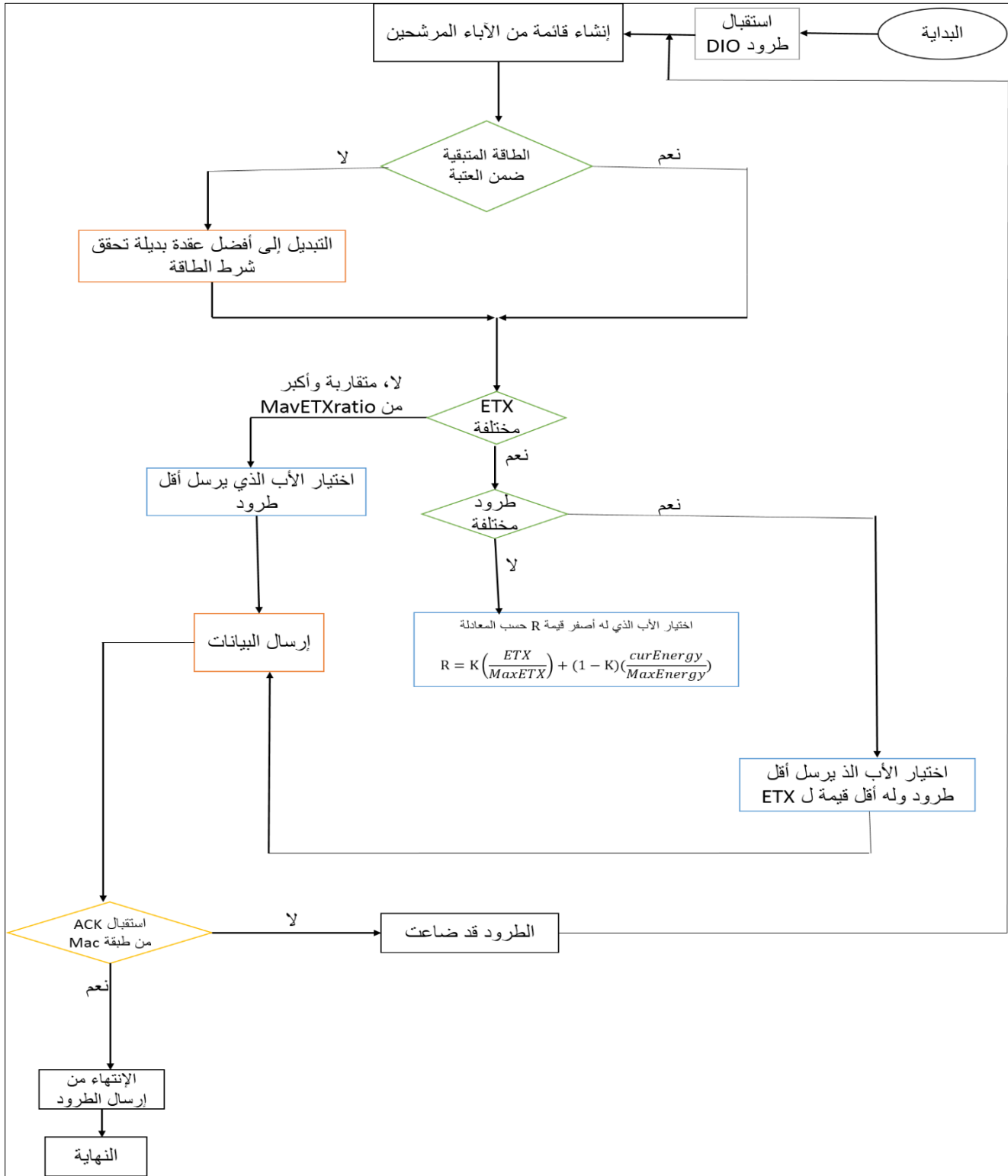
$$(16) \quad R = K \left(\frac{ETX}{MaxETX} \right) + (1 - K) \left(\frac{curEnergy}{MaxEnergy} \right)$$

8- بعد اختيار الأب الأفضل سيتم توجيه البيانات إليه.

9- عند تلقي طرد إقرار من طبقة MAC، هذا يعني أنه تم استقبال الطرود بنجاح من قبل العقدة الأب.

10- إذا لم يتم استقبال طرد إقرار من طبقة MAC هذا يعني أن الطرود قد ضاعت ويجب إعادة الإرسال، وتكرار العملية بالعودة إلى الخطوة 2.

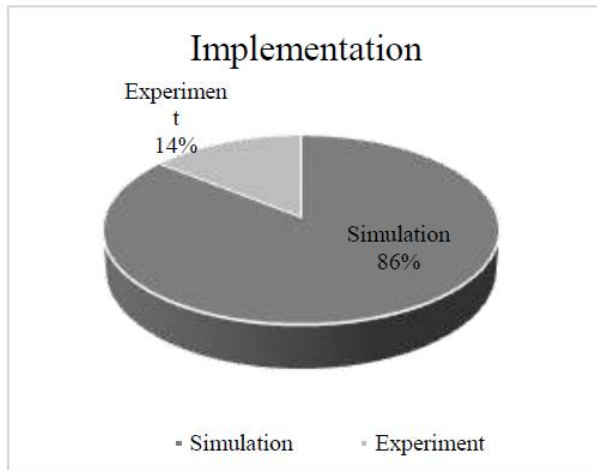
يُظهر الشكل التالي المخطط الإنسيابي للخوارزمية المقترحة:



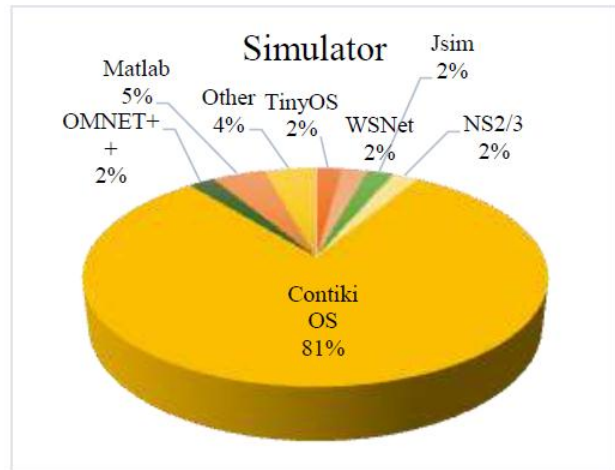
الشكل 12: المخطط الإنسيابي لخوارزمية موازنة الحمل وكفاءة الطاقة المقترحة

4.5 المحاكاة وبيئات العمل :

تركز معظم الأبحاث على المحاكاة بدلاً من التجارب وذلك بسبب توفر العتاد البرمجي وسهولة الوصول إليه، تستخدم معظم الأبحاث برامج المحاكاة بنسبة 80% كما في الشكل (14) و14% فقط للتجارب، يعود هذا الاختلاف الكبير في الإستخدام إلى عدم توفر الموارد في المخابر بالإضافة إلى ارتفاع تكلفة الأجهزة وهو أمر غير مقبول، لأن جميع الجهود تسعى لجعل RPL البروتوكول الأمثل لتطبيقات IPV6 كما أن التقييم المعتمد على عمليات المحاكاة لا يعكس الواقع لأنه لا يأخذ بعين الإعتبار مجموعة من القيود مثل تغير المناخ والعوائق الطبيعية والتفاعلات البشرية.



الشكل 14: التنفيذ في RPL



الشكل 13: بيئات العمل المستخدمة في تقييم وتطوير RPL

يعتبر ContikiOS البرنامج المستخدم على نطاق واسع في شبكات WSN و LLN كما هو موضح في الشكل (13)، وذلك لأنه مفتوح المصدر ونظام التشغيل الأكثر استخداماً لتقييم التحسين المقترح [45] [46].

تم تطوير معظم الوظائف الغرضية في RPL بالاعتماد على ContikiOS بنسبة تصل إلى 80%، بينما تم استخدام الماتلاب بنسبة 5% واستخدام بقية البرامج بنسبة 2%، ويرجع ذلك إلى مرونة ContikiOS في التعديل على المكونات الأساسية والوظائف الغرضية دون أي تأثيرات جانبية على المكونات الأخرى ل RPL [45] [46].

يؤمن contiki للمحركات الصغيرة الحجم والمنخفضة الكلفة والطاقة إمكانية الاتصال بالإنترنت، ويحتوي على قسمين رئيسيين هما البرامج الرئيسية والبرامج المحملة. يحتوي الجزء الرئيسي في contiki على النواة، المكتبات، محمل البرامج، السواقات إلى جانب مكس الاتصالات الخاص بأجهزة الاتصالات. نظراً للحجم الصغير لذاكرة الأجهزة المقيدة، تعد البرمجة التي تعتمد على الأحداث حلاً مثالياً في هذه الحالة، و تعتمد على تخصيص الذاكرة عند إجراء حدث ما.

يقوم محتمل البرامج بتحميل البرامج في الذاكرة، ويمكنه الحصول عليها من المضيف باستخدام مكدس الاتصال أو من خلال جهاز التخزين المرفق مثل EEPROM.

يستخدم المحاكي cooja بشكل واسع في الأبحاث بنسبة 63% وهو محاكي قائم على java ومخصص لشبكات WSN ويعتمد على نظام التشغيل Contiki، يمكن اعتباره أداة هجينة تُستخدم كأداة محاكاة للعقد الافتراضية (simulato) وأداة محاكاة للأجهزة الحقيقية (emulator)، بمعنى آخر يجمع بين محاكاة منخفضة المستوى للأجهزة مع محاكاة البروتوكولات عالية المستوى. يمكن تخزين المحاكاة في ملف xml مع اللاحقة 'csc'. يحتوي هذا الملف معلومات حول بيئة المحاكاة والمكونات الإضافية والعقد ومواضعها والوسط الراديوي المستخدم.

يتميز cooja بميزات عديدة تجعله المحاكي المعتمد في أغلب الأبحاث وهي:

- 1- إجراء محاكاة لأنواع مختلفة من العقد ضمن محاكاة واحدة.
 - 2- يدعم أوساط مختلفة للراديو.
 - 3- يمكن إضافة مكونات جديدة له بسهولة.
 - 4- يسمح بالمحاكاة المتزامنة على ثلاثة مستويات: مستوى الشبكة، مستوى نظام التشغيل، ومستوى تعليمات رماز الآلة.
 - 5- يعطي الكثير من التفاصيل فيما يخص العتاد الصلب للعقد (emulator).
- من خلال هذه الميزات المذكورة أعلاه اعتمدنا في بحثنا على المحاكي cooja المعتمد على نظام التشغيل contiki، لذلك سنطبق خوارزمتنا المقترحة على هذا المحاكي في سيناريوهات مختلفة وندرس الأداء العام لها ونقوم بمقارنتها مع نتائج خوارزمية ECRM.

الفصل السادس

المحاكاة والنتائج العملية

1.6 مقدمة:

تنقسم التجارب التي أُجريت إلى سيناريوهات مختلفة وكثافات مختلفة، اعتمدنا في التجارب على الطوبولوجيا العشوائية وذلك بسبب اختلاف حركة المرور في أغلب الأحيان نظراً للتوزيع الغير منتظم لعقد الحساسات. تعد عملية محاكاة الوسط اللاسلكي الذي يكون فيه ضياع، مسألة مهمة للغاية لأنها تحاكي البيئة الحقيقية التي تعمل فيها عقد الحساسات، لذلك نستخدم الوسط (UDGM) Unit Disk Graph Model الذي يعرّف الضياع من خلال المسافات النسبية للعقد في الوسط الراديوي، ويستخدم معاملان مختلفان للنطاق أحدهما للإرسال والآخر للتداخل مع الأوساط الراديوية. تؤثر موازنة الحمل بشكل كبير على استهلاك الطاقة وعمر الشبكة وخاصة إذا كانت العقد تعمل بالبطارية، لذلك فإن أكثر المقاييس التي يجب مراعاتها في التقييم هي نسبة تسليم الطرود (PDR) واستهلاك الطاقة.

سوف نقوم بهذا الجزء بتطبيق الخوارزمية المقترحة مع عدد مختلف من المعاملات لتقييم أداء المقاييس المذكورة أعلاه للشبكة، نوضح بدايةً كيميّة تنجيز الخوارزمية ومن ثمّ حساب مقاييس الأداء من البيانات التي نحصل عليها من هذه المحاكاة وأخيراً عرض النتائج ومناقشتها.

2.6 تنجيز الخوارزمية:

لتنجيز خوارزمتنا وتعريف التابع الوظيفي الجديد والمقاييس الجديدة المضافة مثل عدد الطرود المرسله ومقياس الطاقة، نستخدم محاكي cooja الذي يستخدم نظام التشغيل Contiki 3.0، ونقوم بالتعديل على الملفات البرمجية المصممة لبروتوكول RPL الخاصة بعملية التوجيه والمصنفة تبعاً للوظائف التي تؤديها وهي: (rpl-icmp.c) : من أجل رسائل icmp، (rpl-conf.h) : من أجل تغيير معاملات RPL، (rpl-dag.c) : من أجل تشكيل DAG، و (rpl-marhof.c) : من أجل التعديل على الوظيفة الغرضية (mrhof). سوف نستخدم عقد من نوع Sky mote والتي تتميز بمعدل نقل عالي للبيانات 250Kb/s وذاكرة وصول عشوائي 10KB. بدايةً نتحقق من أنّ الطاقة المتبقية للعقد المرشحة ضمن العتبة وذلك من خلال حساب الطاقة المستهلكة كما يلي:

1. استخدام آلية powerTrace الموجودة ضمن contiki وذلك لاستخلاص قيم المعاملات (المبينة في البند 2 تالياً) مقاسةً بـ "تكة" أو Ticks أي وحدة أجزاء الساعة الخاصة بالنظام.

2. استخدام المعادلة التالية :

$$power (mw) = current * voltage \quad (17)$$

$$Current = \frac{TX * Current_{tx} + Rx * current_{rx} + CPU * current_{cpu} + CPU_{idl} * current_{idl}}{RTIMER_ARCH_SECOND} \quad (18)$$

حيث :

- **TX**: زمن تشغيل المرسل الراديوي في العقدة بوحدة أجزاء الساعة (تكة).
 - **RX**: زمن تشغيل المستقبل الراديوي في العقدة بوحدة أجزاء الساعة (تكة).
 - **CPU**: زمن تشغيل وحدة المعالجة المركزية بوحدة أجزاء الساعة (تكة).
 - **CPU_{idl}**: زمن تشغيل وحدة المعالجة المركزية في وضع الطاقة المنخفض بوحدة أجزاء الساعة (تكة).
- نبيّن في الجدول (1) التالي قيم التيارات المأخوذة من النشرة التعريفية للعقدة وهي كما يلي :
- الجدول(1). قيم التيارات المأخوذة من النشرة التعريفية للعقدة.

$current_{cpu}$	1800 μA
$current_{rx}$	21.8 mA
$current_{tx}$	19.5 mA
$current_{idl}$	54.5 μA

RTIMER_ARCH_SECOND: وهي مدة المؤقت (وهو ثابت قيمته 32768 تكة بالثانية) أو يسمّى تردد المتحكّم 32768 HZ.

بعد حساب الطاقة المتبقية والتعديل على الملفات البرمجية المصمّمة لبروتوكول RPL نستخدم التتابع التالية لتنحيز بقية الخوارزمية وهي:

1- تابع اختيار الأب الأفضل (best_parent (parent1, parent2): يقوم هذا التابع بمقارنة الوالدين ويعيد الأب الأفضل وفقاً للوظيفة الغرضية الجديدة المقترحة، ويعتبر من التتابع المهمة في تشكيل المسار بعد اختيار أفضل DAG. يتم اختيار الأب في الحالات التالية:

✓ التشكيل الأولي للشبكة.

✓ عندما تتغير تكلفة المسار إلى العقد الجيران.

✓ ظهور عقدة جديدة في الجوار.

2- تابع مقياس المسار `path_metric`: الذي يحسب قياس المسار بالاعتماد على المقاييس المقترحة (الفقرة 1.3.4) ويتم استدعاؤه من قبل تابع `best_parent(parent1, parent2)`.

3- تابع حساب الرتبة `calculate_rank(parent, base_rank)`: يحسب هذا التابع رتبة العقدة الجديدة بالاعتماد على رتبة الوالدين والرتبة الأساسية حيث لدينا الحالات التالية :

- إذا كانت الرتبة الأساسية صفراً ولم يكن للعقدة أب فإن رتبة العقدة لا نهائية.
- إذا كانت الرتبة الأساسية صفراً وكان الأب موجوداً تصبح الرتبة الأساسية مساوية لرتبة الأب.
- إذا كانت الرتبة الأساسية غير معدومة وكان الأب غير موجود تزداد الرتبة الأساسية بواسطة زيادة افتراضية مقدارها `(MinHopRankIncrease)` مقدارها 256.

• إذا كانت الرتبة الأساسية غير معدومة وكان الأب موجوداً تزداد الرتبة الأساسية باستخدام معلومات الأب.

4- تابع تحديث حقل المقاييس `update_metric_container(dag)`: يقوم بتحديث حقل المقاييس لرسائل DIO الخاصة في DAG. إنَّ المقاييس هنا هي رتبة العقد وعدد الطرود المرسله ومقياس ETX ومقياس الطاقة.

5- تابع استدعاء حالة الربط مع الجيران `neighbor_link_callback(parent, status, etx)`: مهمته استقبال المعلومات الخاصة بحالة الاتصال مع الجيران.

3.6 تهيئة الشبكة:

تجري عملية المحاكاة ضمن طوبولوجيا عشوائية مؤلفة من عقدة مخدّم server تعمل كجذر للعقد في DODAG ومجموعة من عقد العملاء clients، تتراوح كثافة المنطقة التي تعمل ضمنها هذه العقد من الكثافة المنخفضة (بعدد عقد 20) إلى الكثافة العالية (بعدد عقد 100). لإدخال الضياع في الوسط اللاسلكي، استخدمنا النموذج (UDGM) والذي يعرّف الضياع بناءً على المسافات النسبية بين العقد في الوسط الراديوي، يمكننا من خلاله ضبط نسبة الإرسال والاستقبال، حيث قمنا بالمحافظة على نسبة الإرسال (TX) 100% لأننا نهتم بالضياع عند طرف المستقبل، بينما قمنا بتغيير نسبة الاستقبال RX، والتي تُعرّف بأنها نسبة نجاح استقبال الطرود عند المستقبل، وتشير إلى الضياع في الوسط اللاسلكي حيث يزداد احتمال نجاح استقبال الطرود الخاصة بعقدة كلما نقصت المسافة بينها وبين مدى إرسال العقدة الأخرى. نضبط نطاق الإرسال على 50 متر ونطاق

التداخل على 60 متر، نقوم بتشغيل المحاكاة لمدة (7200 ثانية). يوصف الجدول التالي المعاملات المستخدمة في السيناريوهات المختلفة :

الجدول(2). المعاملات المستخدمة في السيناريوهات المختلفة.

المعاملات	القيمة
المحاكي	Cooja Contiki 3.0
الوسط الراديوي	UDGM
نطاق الإرسال	50 meters
نطاق التداخل	60 meters
TXنسبة الإرسال	100%
RXمعدّل نجاح الإستقبال	20% 40% 60% 80% 100%
عدد العقد	(20-40-60-80-100 nodes)
الفاصل الزمني للإرسال (send Interval)	10 s
المعامل DIO Interval Minimum	12
المعامل DIO Interval Doublings	8
المعامل Radio Duty-Cycling Interval	16HZ
زمن المحاكاة	7200 S

نعرف بقية المعاملات كما يلي :

- **الفاصل الزمني للإرسال (send Interval):** هو الفاصل الزمني بين رسالتين متتاليتين على مستوى التطبيق، أي يضبط معدّل الرسائل التي ترسلهم العقدة على مستوى التطبيق إلى مستقبل معلومات الشبكة، ونأخذ قيم مختلفة له من أجل التقييم.
- **المعامل DIO Interval Minimum:** يتحكم هذا المعامل بمعدل إرسال DIO ، وبالتالي فهو مهم للتحكم في حركة المرور العامة واستهلاك الطاقة ووقت استقرار الشبكة وغيرها، وكلما زادت سرعة إرسال DIOs زادت سرعة استقرار

الشبكة ولكن على حساب التحكم في حركة المرور وزيادة استهلاك الطاقة. هذا المعامل له تأثير على أداء البروتوكول بالكامل و يعد التغيير والتبديل الدقيق له ضرورياً لتحسين الأداء، نضبط DIO Mins على القيمة الافتراضية في Contiki الموضحة في الجدول(2).

- **المعامل DIO Interval Doublings:** يتحكم هذا المعامل بعدد المرات التي يمكن فيها مضاعفة الفاصل الزمني الأدنى لإرسال رسائل DIOs، وبالتالي هو مفيد في الحفاظ على حركة مرور منخفضة في ظروف شبكة مستقرة، نضبطه أيضاً على القيمة الافتراضية في contiki الموضحة في الجدول(2).

- **تقنية Radio Duty-Cycling:**

يجب إيقاف تشغيل جهاز الاستقبال والإرسال اللاسلكي في شبكات LLN قدر الإمكان لتوفير الطاقة، يتم ذلك في contiki بواسطة تقنية Radio Duty-Cycling ولها ثلاثة أنواع: contikiMac، X-Mac و NullRDC. إنَّ تقنية contikiMac هي التقنية الافتراضية في Contiki والتي توفر كفاءة طاقة جيدة جداً ومصممة من أجل بروتوكول 802.15.4 وهي التي استخدمناها في الخوارزمية (الشكل (15))، أما X-Mac فهي تقنية قديمة لاتوفر نفس كفاءة طاقة ContikiMac، أما NullRDC: هي التقني التي لا يتم فيها إيقاف تشغيل جهاز الإرسال والإستقبال اللاسلكي ويمكن استخدامها للاختبار أو المقارنة مع التقنيات الأخرى.

- **المعامل Radio Duty-Cycling Interval:** يتحكم هذا المعامل بضبط عدد المرات التي يتم فيها تحسُّس الوسط في الثانية الواحدة لأي حركة مرور، أي يحدد عدد المرات التي تحتاج فيها العقدة إلى الاستيقاظ من أجل إرسال واستقبال الطرود للحدِّ من استهلاك الطاقة. نضبط هذا المعامل على القيمة الافتراضية في contiki (16 Hz) أي أنه قد تمَّ فحص القناة 16 مرة في الثانية الشكل (15). إنَّ الإعدادات المعيارية لمعدّلات فحص الوسط هي (2،4،8،12،16).

```

01.723 ID:16 nullsec CSMA ContikiMAC, channel check rate 16 Hz, radio chan
01.734 ID:16 Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0212:741
01.736 ID:16 Starting 'UDP client process'
01.738 ID:16 UDP client process started
01.743 ID:16 Client IPv6 addresses: aaaa::212:7410:10:1010
01.746 ID:16 fe80::212:7410:10:1010
01.752 ID:16 Created a connection with the server :: local/remote port 8765
01.909 ID:1 nullsec CSMA ContikiMAC, channel check rate 16 Hz, radio chan
01.920 ID:1 Tentative link-local IPv6 address fe80:0000:0000:0212:741
01.922 ID:1 Starting 'UDP server process'
01.924 ID:1 UDP server started
01.928 ID:1 created a new RPL da
01.932 ID:1 Server process id: 85588, aaaa::212:7410:10:101

```

الشكل 15: التحقق من ضبط معاملات RPL بعد محاكاة الخوارزمية

4.6 حساب مقاييس الأداء

يوضح الشكل (16) مثلاً عن أحد السيناريوهات المستخدمة المؤلف من 40 عقدة، حيث ترسل كل عقدة طرد UDP (وهو طرد Hello N حيث N هو رقم متسلسل) إلى مستقبل معلومات الشبكة بفواصل إرسال زمني (10 ثوان). يقوم العميل بطباعة رسالة HelloN بمجرد إرسالها إلى المخدم، ويقوم المخدم بطباعة رسالة HelloN عند استقبالها من العميل .M

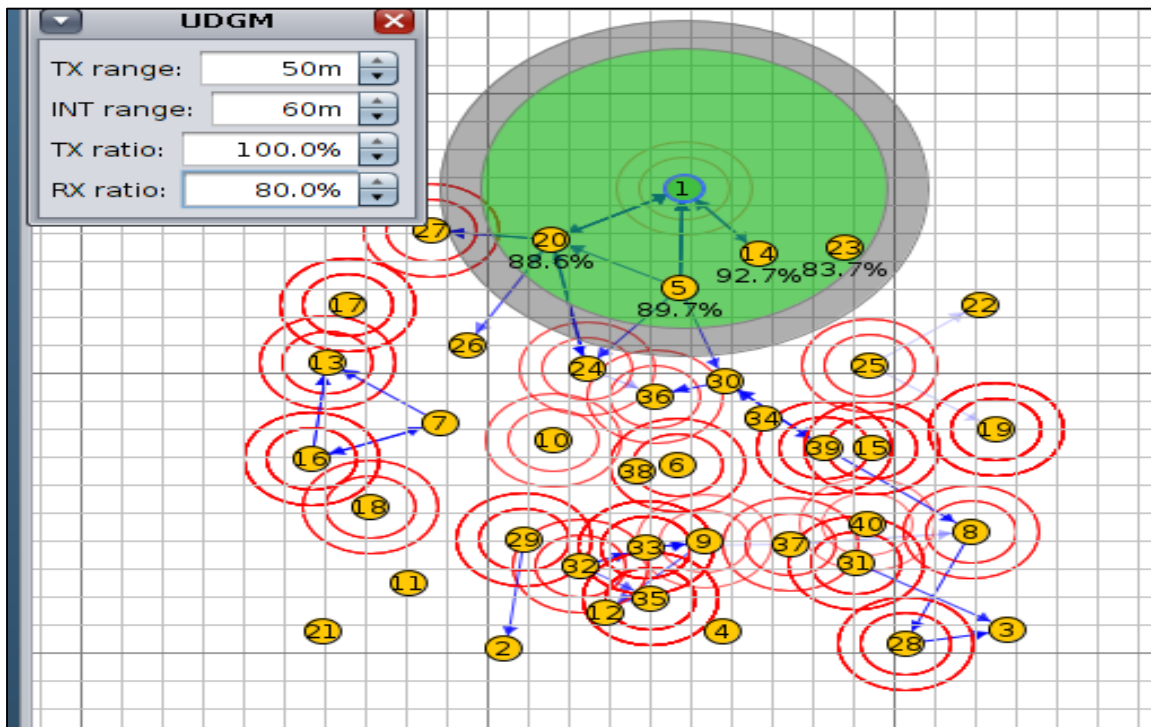
يستغرق الحصول على البيانات الناتجة عن تحليل تأثير المعاملات المختلفة على أداء RPL وقتاً طويلاً. من أجل التحليل الدقيق لبيانات الشبكة وتقييم الأداء نعرض النتائج باستخدام أداة Script Editor الموجودة في cooja من خلال كتابة الرمز المناسب. لحساب متوسط معدّل تسليم الطرود نقيس الطرود المرسل من جميع العقد إلى مستقبل معلومات الشبكة ونقسمها على عدد الطرود المستلمة بنجاح في مستقبل معلومات الشبكة كما في المعادلة:

$$(19) \quad \text{معدّل تسليم الطرود} = \frac{\text{إجمالي عدد الطرود المستقبلية}}{\text{إجمالي عدد الطرود المرسل}}$$

يشير هذا المقياس إلى مستوى وثوقية الشبكة ويستخدم من قبل شبكة الحساسات اللاسلكية لحساب أفضل مسار واستهلاك الطاقة و معدّل الإرسال الأمثل [49][50]، أما استهلاك الطاقة فهو مقدّر بالملي واط ويشير إلى مقدار الطاقة المستهلكة لكل عقدة والموزعة كمايلي:

- طاقة الإرسال والتي تشير إلى عمليات الاتصال عند العقدة.
- طاقة الاستقبال.
- طاقة وحدة المعالجة المركزية CPU.
- الطاقة المستهلكة في حالة سكون العقدة، وهو وضع الطاقة المنخفض.

نستخدم آلية Powertrace المتاحة في contiki كما شرحنا سابقاً.



الشكل 16: الطوبولوجيا والمعاملات المستخدمة في RPL

بعد تنجيز الخوارزمية وضبط معاملات الأداء سنقوم بالتقييم ومناقشة النتائج بالفصل التالي.

الفصل السابع

التقييم ومناقشة النتائج

1.7 مقدمة:

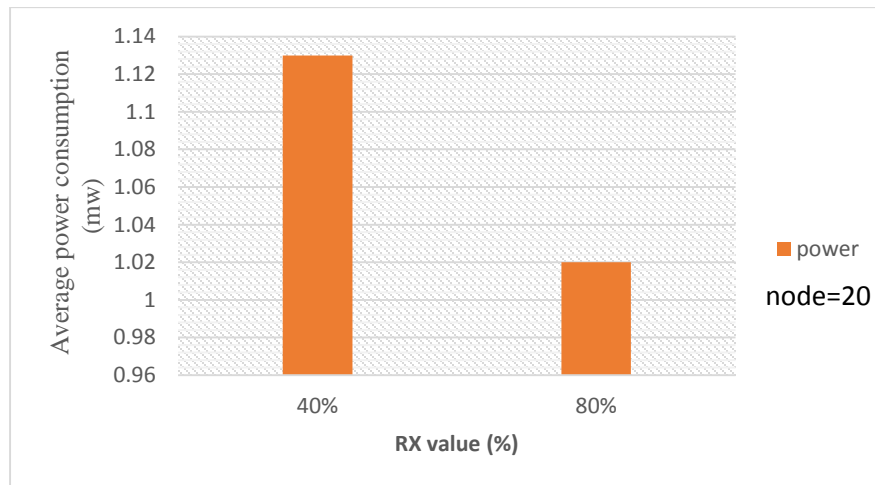
سنقوم بتقييم أداء الخوارزمية من أجل سيناريوهات مختلفة ومناقشة النتائج التي نحصل عليها، ومن ثم إجراء مقارنة مع خوارزمية ECRM.

2.7 دراسة استهلاك الطاقة من أجل عدد عقد ثابت وقيم متغيرة ل RX:

نقوم في هذه السيناريوهات بتقييم متوسط استهلاك الطاقة لكل عقدة بدلالة RX (نسبة نجاح استقبال الطرود عند المستقبل)، حيث نختار عدد عقد ثابت ونغيّر في قيم RX.

• السيناريو الأول:

نختار كثافة منخفضة للعقد (20 عقدة) ونعيد السيناريو من أجل قيمة جيدة نسبياً ل RX وهي 80%، وقيمة سيئة لها RX=40% فكانت النتيجة التالية:

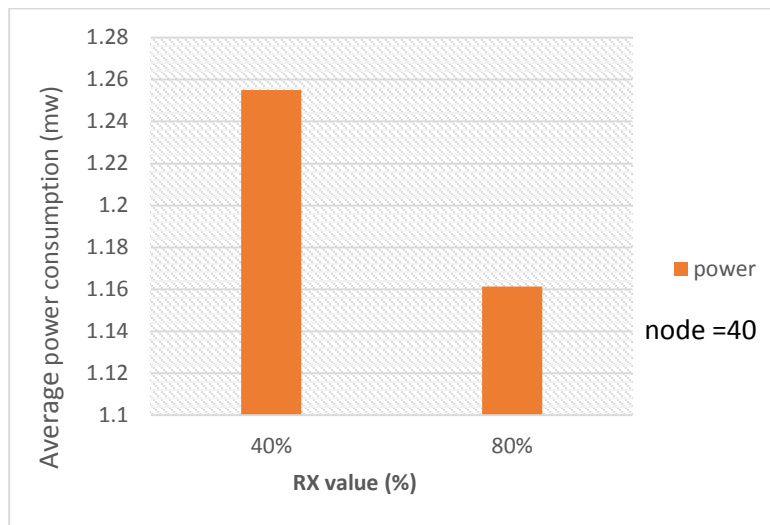


الشكل 17: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة قيم متغيرة ل RX من أجل 20 عقدة

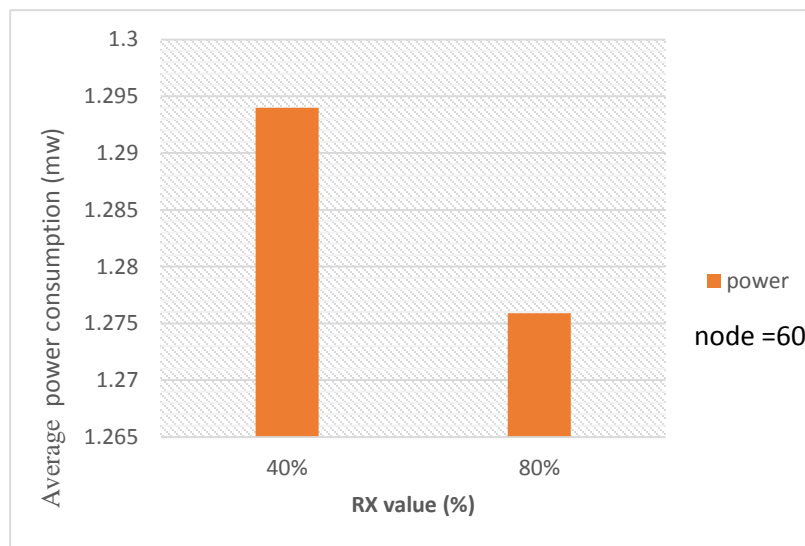
نلاحظ من الشكل أعلاه أن متوسط استهلاك الطاقة ل 20 عقدة من أجل معدّل نجاح استقبال طرود جيّد نسبياً أفضل بنسبة 12% من معدّل سيء لاستقبال الطرود.

• السيناريو الثاني :

نزيد عدد العقد من أجل كثافة متوسطة (40-60 عقدة) وندرس استهلاك الطاقة بدلالة النسب المتغيرة ل RX كما في الأشكال (19) و(20):



الشكل 18: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 40 عقدة

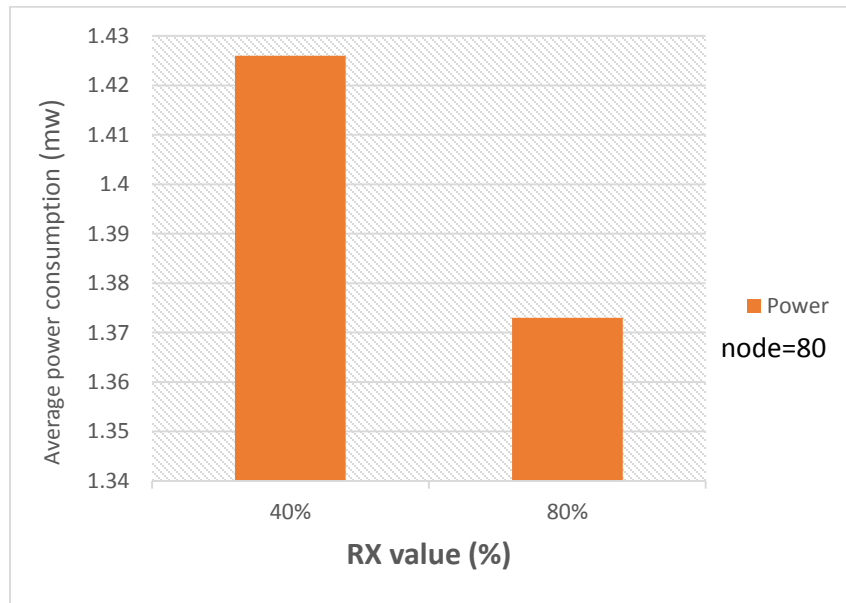


الشكل 19: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 60 عقدة

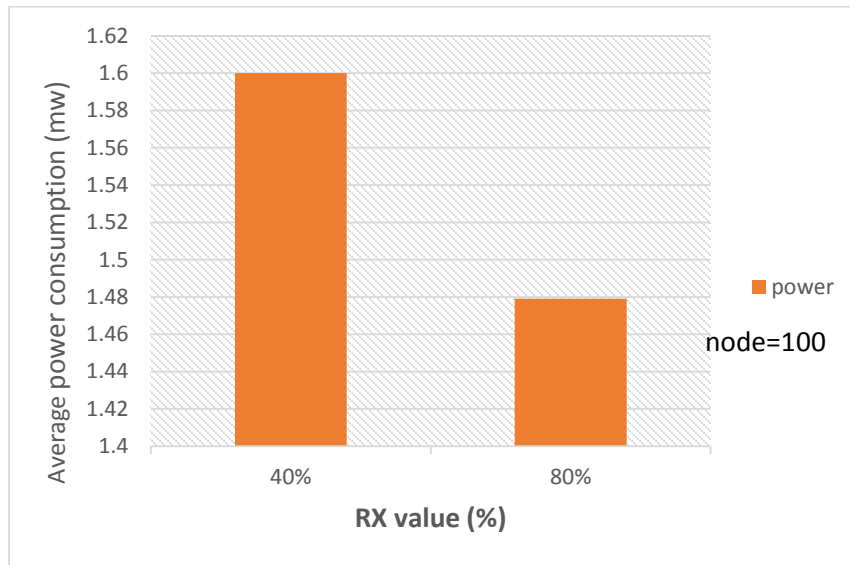
تبيّن الأشكال السابقة أن استهلاك الطاقة من أجل كثافة منخفضة يزداد في حالة معدّل سيء لاستقبال الطرود مقارنةً بمعدّل نجاح استقبال طرود جيّد نسبياً، حيث نجد أنّه في حال 40 عقدة يزداد متوسط استهلاك الطاقة عند $RX=40\%$ بمقدار 8% مقارنةً بمتوسط الاستهلاك عند $RX=80\%$ ، وكذلك الأمر في حال 60 عقدة يزداد متوسط استهلاك الطاقة بمقدار 4% مقارنةً بمتوسط استهلاك الطاقة عند $RX=80\%$.

• السيناريو الثالث:

ندرس استهلاك الطاقة في حالة الكثافة العالية أي من أجل (80-100 عقدة) بدلالة القيم المتغيرة ل RX ، فنجد أيضاً أنّ استهلاك الطاقة يزداد بازدياد عدد العقد وبنقصان معدّل نجاح استقبال الطرود كما في النتائج التالية:



الشكل 20: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 80 عقدة



الشكل 21: دراسة استهلاك الطاقة بدلالة RX من أجل 100 عقدة

مناقشة النتائج :

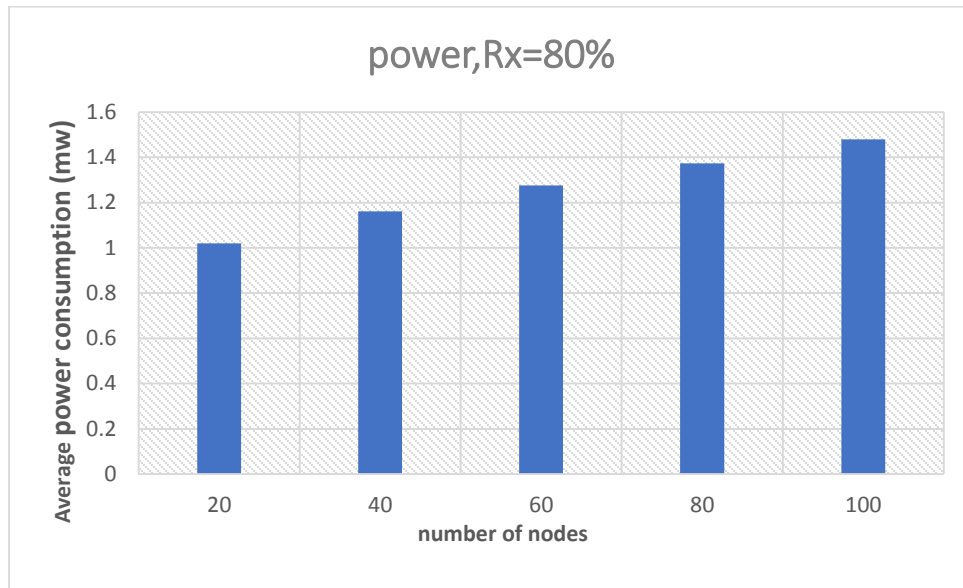
نلاحظ عند تثبيت عدد العقد وأخذ حالتين لقيم RX (الحالة الجيدة والحالة السيئة نسبياً) أنّ متوسط استهلاك الطاقة يكون أعلى عند القيمة الدنيا لـ RX، وذلك لأنه عند زيادة معدّل الاستقبال الناجح تقل الضياعات في الشبكة، وكلما نقص هذا المعدّل تزداد نسبة الضياعات والشبكات التي تكون فيها ضياعات عالية تتطلب المزيد من عمليات الإرسال وبالتالي تستهلك قدر أكبر من الطاقة.

3.7 دراسة استهلاك الطاقة من أجل عدد عقد متغير ونسب ثابتة لـ RX:

نقوم في هذه السيناريوهات بدراسة متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير من الكثافة المنخفضة إلى الكثافة العالية وذلك عند تثبيت معدّل نجاح استقبال الطرود عند قيمة جيدة وسيئة نسبياً.

• السيناريو الأول:

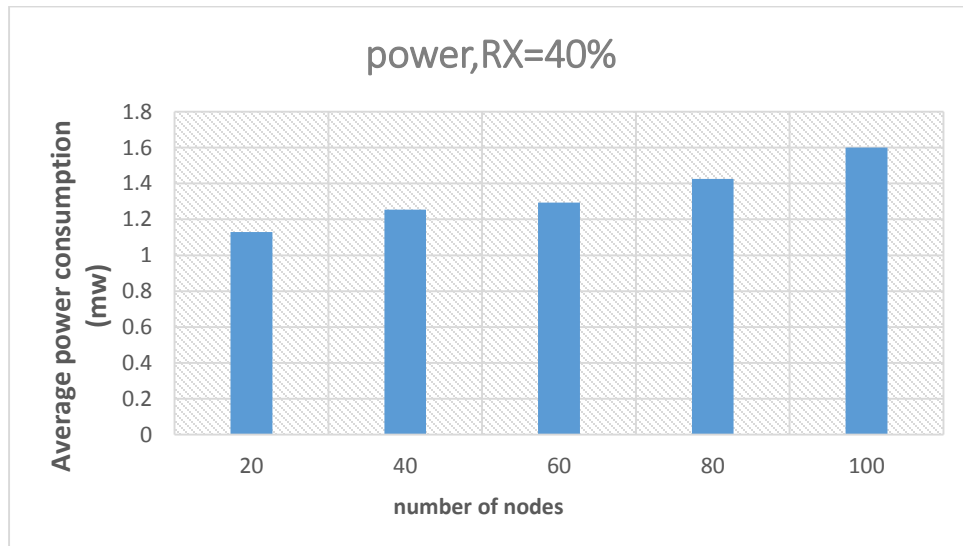
نجد متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير من 20 عقدة إلى 100 عقدة عند معدّل نجاح استقبال طرود جيّد نسبياً أي $RX=80\%$ ، يتراوح من 1mw حتى 1.4mw كما في الشكل (22):



الشكل 22: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير عند RX=80%

• السيناريو الثاني :

من أجل معدّل نجاح طرود سيء أي RX=40% نجد أنّ متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد العقد كما يلي :



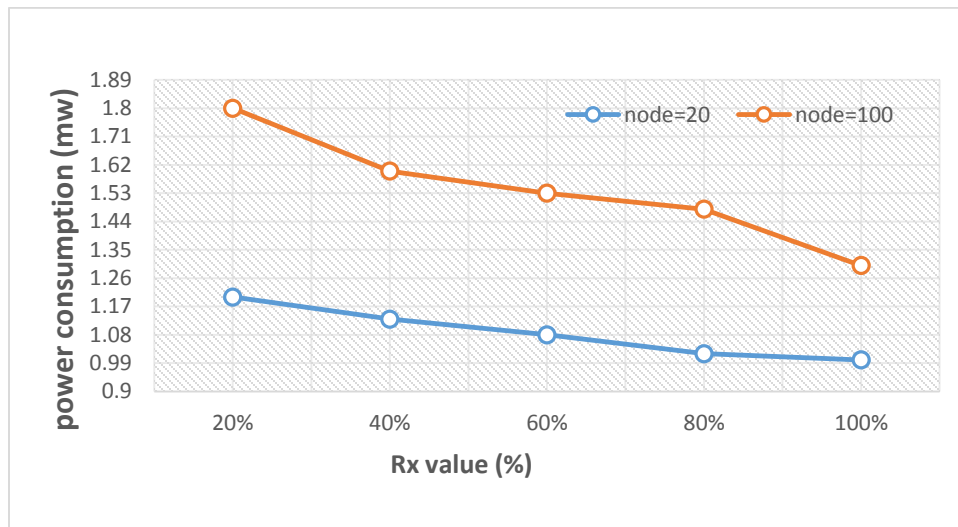
الشكل 23: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة عدد عقد متغير عند RX=40%

من الشكل (23) نلاحظ أنّ متوسط استهلاك الطاقة يزداد بمقدار 31% من أجل الكثافة العالية (أي 100 عقدة) مقارنة مع الكثافة المنخفضة (عقدة).

مناقشة النتائج :

نلاحظ من الأشكال السابقة أنه عند زيادة عدد العقد يزداد استهلاك الطاقة وذلك بسبب ازدياد عمليات إرسال واستقبال الطرود أي ازدياد حركة المرور وبالتالي ستنفذ طاقة عدد كثير من العقد وتصبح الطاقة المتبقية لهم أقل من العتبة، وهذا يتطلب أن تقوم الشبكة بآلية إصلاح من أجل إعادة اختيار الأب المناسب وبث رسائل تحكّم مرة أخرى لبناء الشبكة ممّا يزيد من استهلاك الطاقة.

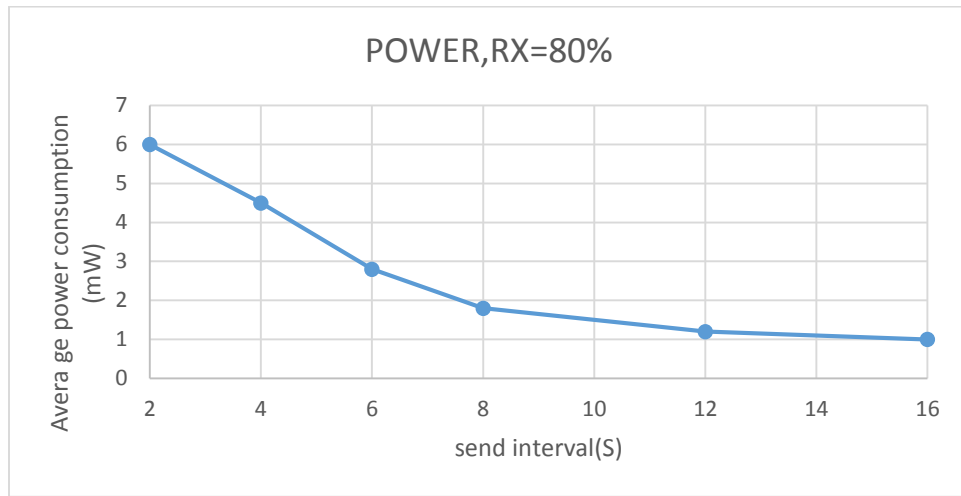
يمكننا مقارنة متوسط استهلاك الطاقة في حالة الكثافة المنخفضة (20 عقدة) مع متوسط استهلاك الطاقة في حالة الكثافة العالية (100 عقدة) بدلالة نسب متغيرة لمعدل استقبال الطرود الناجح عند المستقبل كما في الشكل (24):
يوضح الشكل أن متوسط استهلاك الطاقة في حالة الكثافة العالية أعلى بنسبة 30% من حالة الكثافة المنخفضة عند معدّل استقبال طرود سيء (RX=20%)، لكن عند زيادة معدّل نجاح استقبال الطرود حتى تصبح (RX=100%) يكون معدّل استهلاك الطاقة أعلى فقط بـ 23% في حالة الكثافة العالية مقارنة بالكثافة المنخفضة.



الشكل 24: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة قيم متغيرة لـ RX

4.7 دراسة استهلاك الطاقة بالنسبة إلى Send Interval:

نقوم في هذا السيناريو بدراسة متوسط استهلاك الطاقة من أجل قيم مختلفة للفواصل الزمنية بين الرسائل وذلك من أجل معدّل نجاح طرود جيّد نسبياً RX=80% فكان لدينا الشكل التالي (26):



الشكل 25: متوسط استهلاك الطاقة بدلالة Send Interval

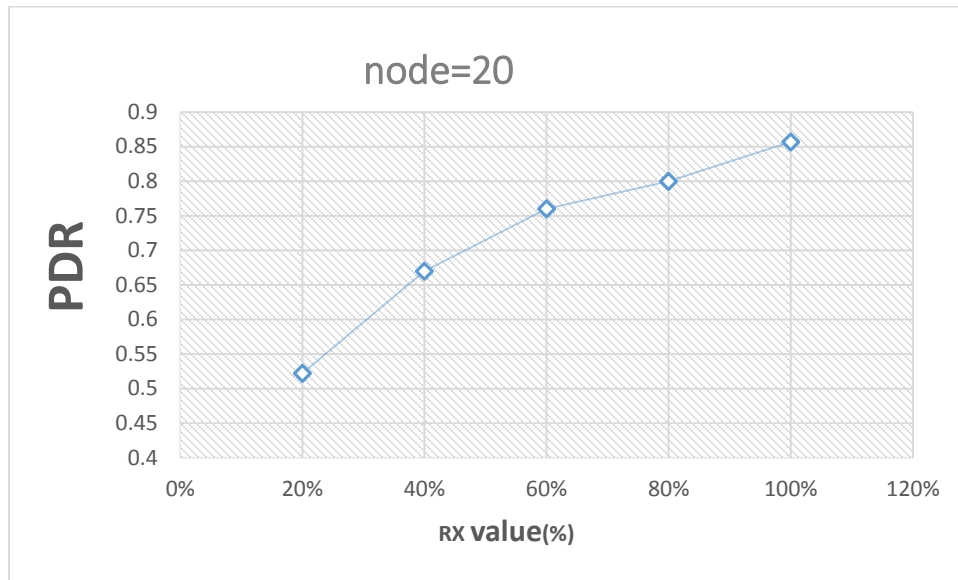
نلاحظ من الشكل (25) أنّ متوسط استهلاك الطاقة ينخفض بطريقة خطيّة مع زيادة الفاصل الزمني Send Interval، أيّ أنّ الفاصل الزمني يتناسب عكسيّاً مع استهلاك الطاقة، وكلما ازدادت وتيرة رسائل التطبيق ازداد استنزاف موارد الشبكة بسرعة أكبر وازدادت حركة المرور في الشبكة وهذا يعني المزيد من التصادمات اللاسلكية وبالتالي استهلاك المزيد من الطّاقة.

5.7 دراسة معدّل استلام الطرود (PDR) من أجل عدد عقد ثابت وقيم متغيرة لـ RX:

في هذا الجزء من المحاكاة نقوم بدراسة معدّل استلام الطرود من أجل عدد عقد ثابت في جميع حالات الشبكة (حالة الكثافة المنخفضة والمتوسطة والعالية) ونقوم بتغيير نسبة نجاح استقبال الطرود عند المستقبل من أجل قيمة سيئة وجيدة نسبياً.

• السيناريو الأول :

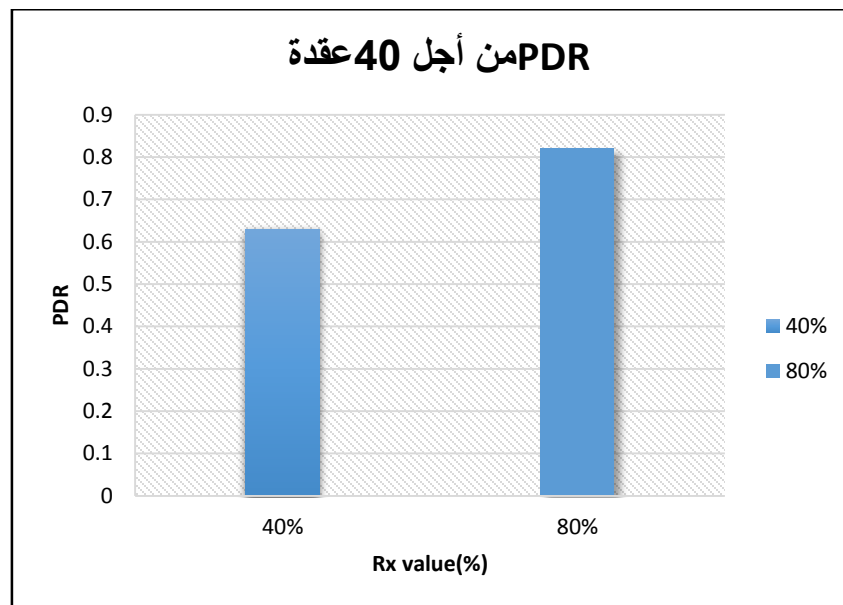
نقوم بمحاكاة طوبولوجيا شبكة عشوائية مؤلفة من 20 عقدة ودراسة PDR بالنسبة إلى قيم متغيرة لـ RX، فنجد أنّ نسبة PDR 50% عند RX=20% بينما تزداد إلى النسبة 85% عند معدّل استقبال طرود ناجح 100% كما في الشكل (26)، وذلك بسبب انخفاض نسبة الضياعات في الشبكة كلما زادت RX وبالتالي تقل عمليات إعادة الإرسال بسبب وصول واستلام الطرود عند المستقبل.



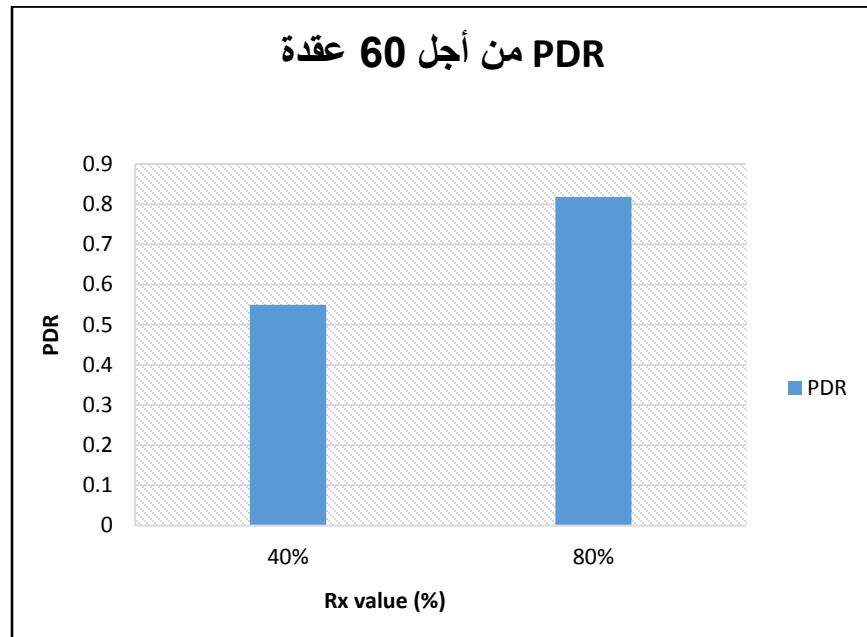
الشكل 26: دراسة PDR بدلالة قيم متغيرة لـ RX من أجل كثافة منخفضة

• السيناريو الثاني :

ندرس معدل استلام الطرود في حالة الكثافة المتوسطة أي من أجل (40-60 عقدة) وذلك عند قيمتين متغيرتين لـ RX أي في حالة معدّل نجاح استقبال طرود سيء وعالي نسبياً (40% = و 80% RX) كما في الأشكال (27) و (28) :



الشكل 27: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 40 عقدة

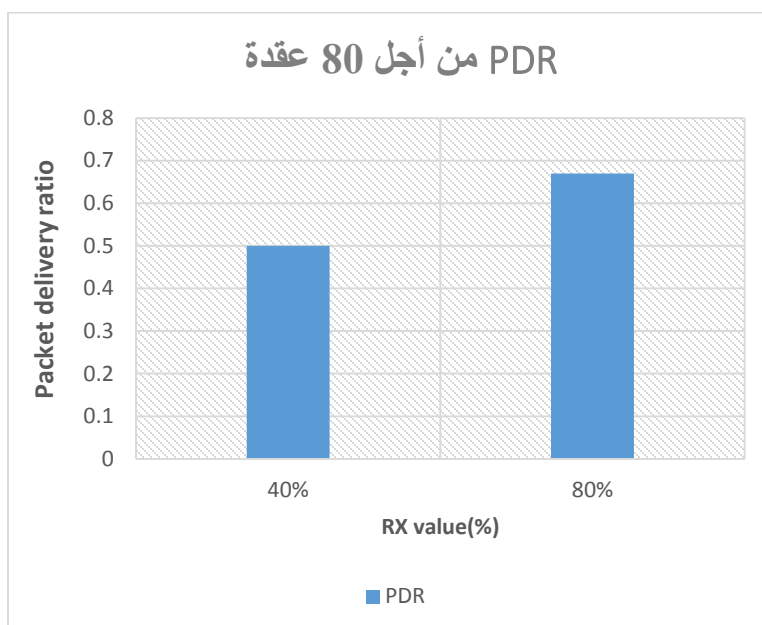


الشكل 28: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 60 عقدة

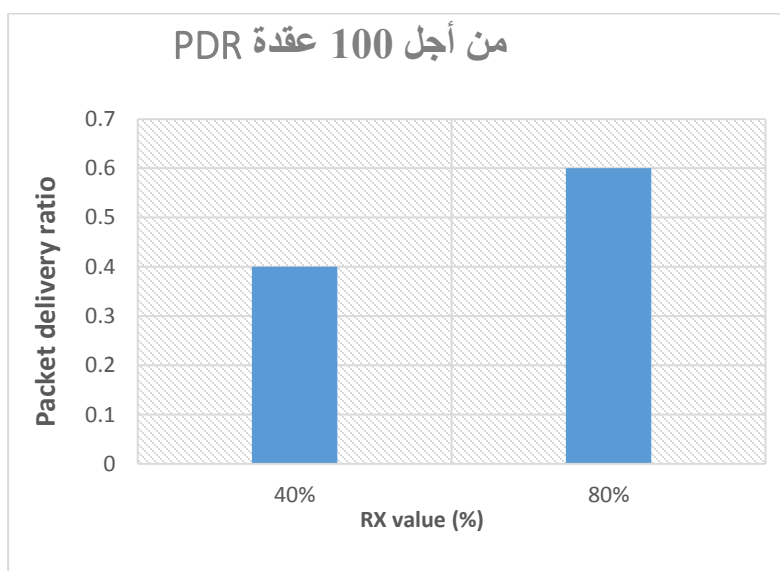
يبدو لنا من الأشكال أنّ قيم PDR تتراوح من النسب 55% و60% عند معدّل نجاح استقبال طرود سيء نسبياً إلى النسبة 81% تقريباً عند معدّل نجاح استقبال طرود عالي في حالة الكثافة المتوسطة.

• السيناريو الثالث:

قمنا بدراسة معدّل استلام الطرود PDR في حالة الكثافة العالية (80-100 عقدة) بدلالة قيم RX المتغيرة من أجل معدّل استقبال سيء وعالي نسبياً، حيث نلاحظ من الشكل (29) و (30) أنّه تنخفض نسبة PDR في حالة الكثافة العالية عندما يكون معدّل نجاح استقبال الطرود عند المستقبل سيئاً نسبياً حيث تكون 50% في حالة 80 عقدة و40% في حالة 100 عقدة، أمّا في حالة RX=80% يكون معدّل استلام الطرود 67% في حالة 80 عقدة و 60% في حالة 100 عقدة أي نسبة منخفضة نوعاً ما.



الشكل 29: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 80 عقدة



الشكل 30: دراسة PDR بدلالة RX من أجل 100 عقدة

مناقشة النتائج:

نجد من الأشكال السابقة أن PDR تنخفض عند معدّل نجاح استقبال طرود سيء مقارنةً بمعدّل نجاح استقبال طرود عالي، وذلك لأنّ استهلاك الطاقة يكون أعلى عند القيم الدنيا لـ RX أي حدوث انخفاض في مستوى طاقة الآباء ووجود عقد أخرى

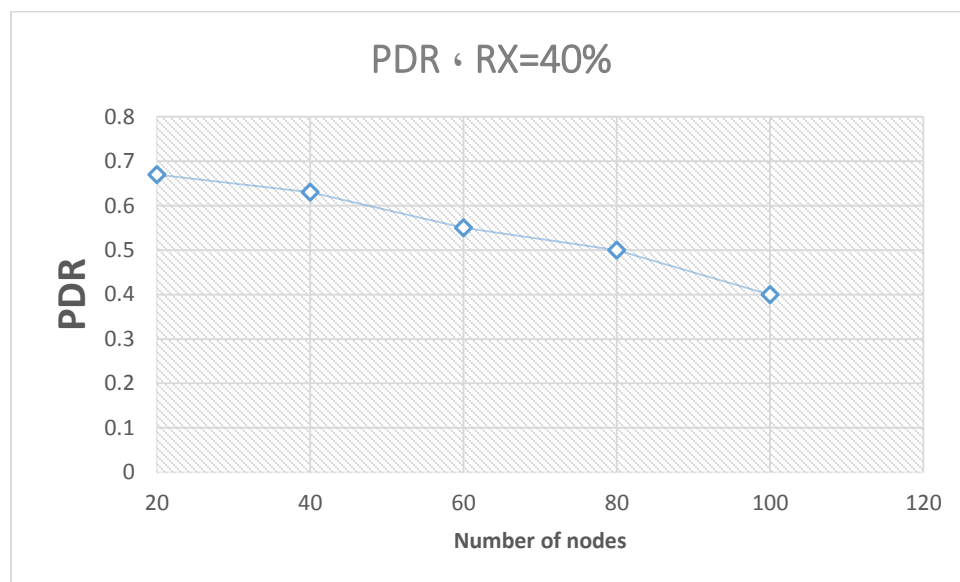
مثالية لتكون عقد مرشحة جديدة وهذا يتطلب إعادة تشكيل DODAG. تساهم هذه التغييرات في إضاعة الطرود وبالتالي انخفاض نسبة الـ PDR.

6.7 دراسة معدّل استلام الطرود من أجل عدد عقد متغيرة ونسب ثابتة لـ RX:

ندرس في هذه السيناريوهات أداء الخوارزمية من حيث معدّل استلام الطرود من أجل كثافة شبكة متغيرة عند قيم ثابتة لـ RX.

• السيناريو الأول :

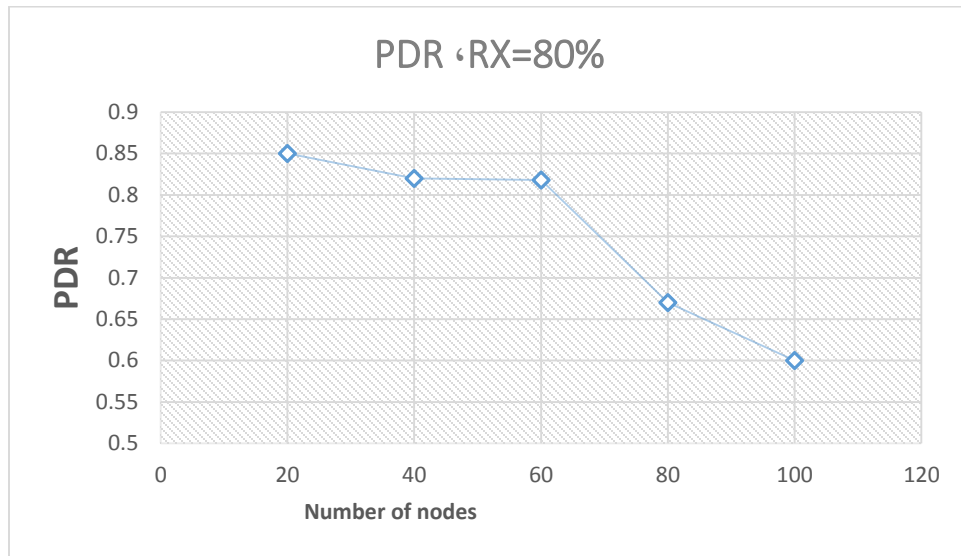
نجد من الشكل (31) أنّ معدل استلام الطرود عند حالة معدّل نجاح استقبال طرود سيء نسبياً أي $RX=40\%$ ينخفض بطريقة خطية وبنسب قليلة مع زيادة عدد العقد من النسبة 67% في حالة 20 عقدة إلى النسبة 40% في حالة 100 عقدة.



الشكل 31: دراسة PDR بالنسبة لعدد متغير من العقد من أجل $RX=40\%$

• السيناريو الثاني :

عندما ندرس معدل استلام الطرود في حالة قيمة جيدة لـ RX، نجد أنّها تتغير بنسب قليلة كلما زاد عدد العقد حيث تنخفض من النسبة 85% من أجل 20 عقدة إلى النسبة 60% من أجل 100 عقدة كما في الشكل (32):



الشكل 32: دراسة PDR بالنسبة لعدد متغير من العقد من أجل $RX=80\%$

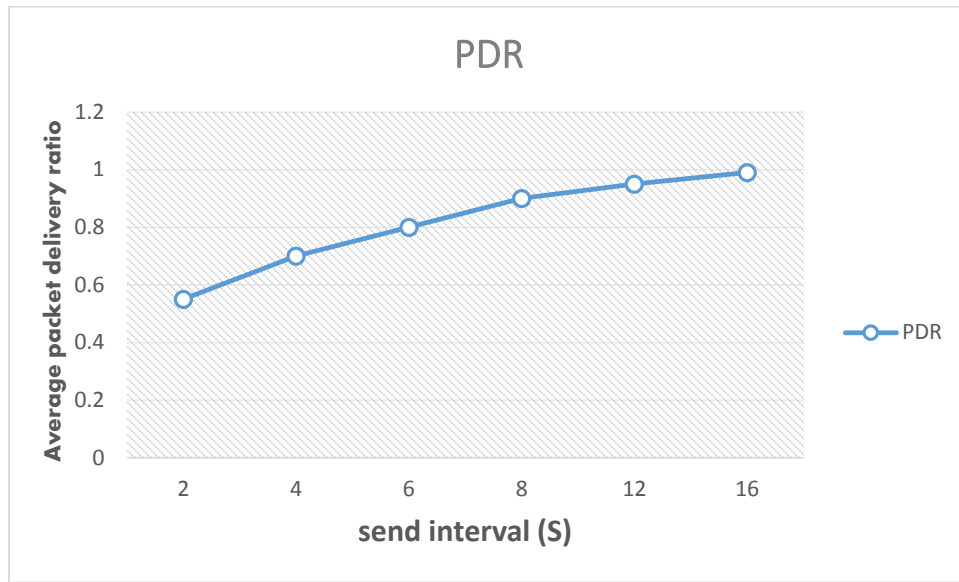
مناقشة النتائج:

نجد من الأشكال الموضحة سابقاً أنّ نسبة استلام الطرود تبقى متقاربة مع زيادة عدد العقد بسبب تحسين استهلاك الطاقة حيث لا تواجه العقد مشاكل في استنزاف طاقة البطارية، وبالتالي لا يحصل فقدان للطرود بسبب استنزاف الطاقة وتبقى قيم PDR مرتفعة نسبياً.

7.7 دراسة متوسط معدّل استلام الطرود بالنسبة إلى $Send Interval$:

ندرس في هذا السيناريو معدّل استقبال الطرود من أجل قيم مختلفة للفواصل الزمنية بين رسائل التطبيق وذلك من أجل معدّل نجاح طرود عالي نسبياً $RX=80\%$ فكان لدينا الشكل التالي (33).

نلاحظ من الشكل أنّ متوسط معدّل استقبال الطرود يزداد بإزدياد الفاصل الزمني بين الرسائل وينخفض كلما زاد تردد هذه الرسائل، لأنّه كلما زاد تردد الرسائل يزداد استهلاك الطاقة في الشبكة بشكل كبير ويؤدي إلى نضوب طاقة عدد كبير من العقد وبالنتيجة ستحتاج الشبكة إلى إعادة انتخاب الأب الأفضل، هذه التغييرات تؤدي إلى ضياع الطرود وانخفاض متوسط PDR.



الشكل 33: متوسط PDR بدلالة Send Interval

8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM:

تعتمد خوارزمية ECRM على أربعة مقاييس في اختيار الأب الأفضل وهي: الرتبة الأقل، القيمة الأقل لـ ETX، عتبة معينة لمعامل الطاقة المتبقية ومعامل الرتل، في حين أنّ خوارزمتنا المقترحة تعتمد على المقاييس التالية: رتبة العقدة، مقياس ETX، عتبة معينة لمعامل الطاقة المتبقية، بالإضافة إلى عدد الطرود المرسلّة الأقل.

تمّ تصميم الخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM لتكون مناسبة لتطبيقات إنترنت الأشياء التي تتطلب استهلاك طاقة قليل وعمر شبكة طويل ولتكون ملائمة للشبكات المؤلفة من عدد كبير من عقد الحساسات مثل المدن الذكية التي تتألف من أجهزة كثيرة محدودة في البطارية والمعالجة والذاكرة. قمنا بتحسين على خوارزمية ECRM من خلال تحسين متوسط استهلاك الطاقة للعقد في الشبكة، وتحسين وثوقية الشبكة من خلال تحسين معدّلات استلام الطرود، وبالتالي تحسين عمر الشبكة بالكامل.

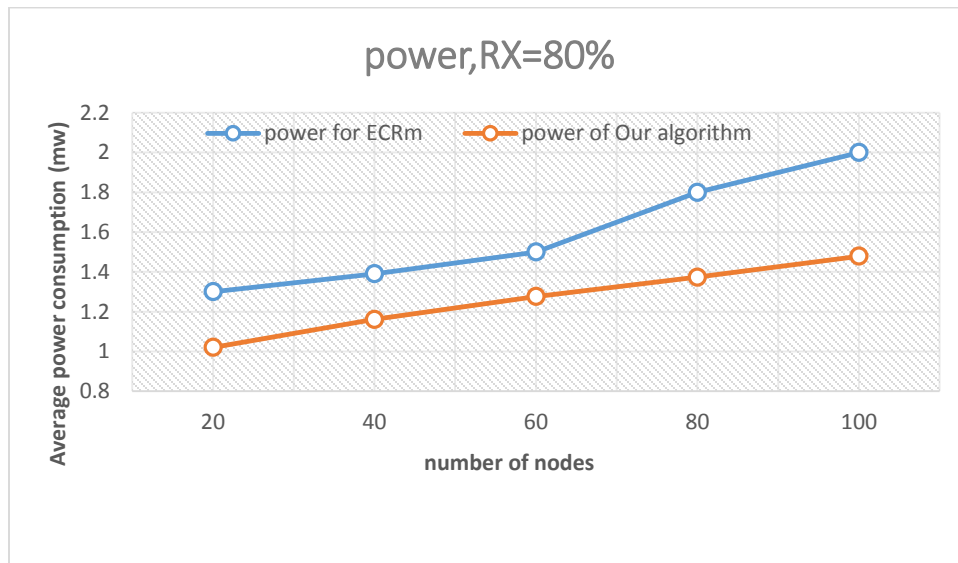
بعد دراسة أداء الخوارزمية من حيث متوسط استهلاك الطاقة ومعدّل تسليم الطرود بالنسبة للعديد من المعاملات سنقوم بمقارنتها مع أداء خوارزمية ECRM.

1.8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM من حيث الطاقة المستهلكة:

• الحالة الأولى :

نقارن في هذا الجزء بين الطاقة المستهلكة للخوارزمية المقترحة الجديدة والطاقة المستهلكة لخوارزمية ECRM بدلالة عدد العقد المتغير من أجل معدّل نجاح استقبال الطرود جيّد نسبياً ($RX=80\%$) كما في الشكل (34):

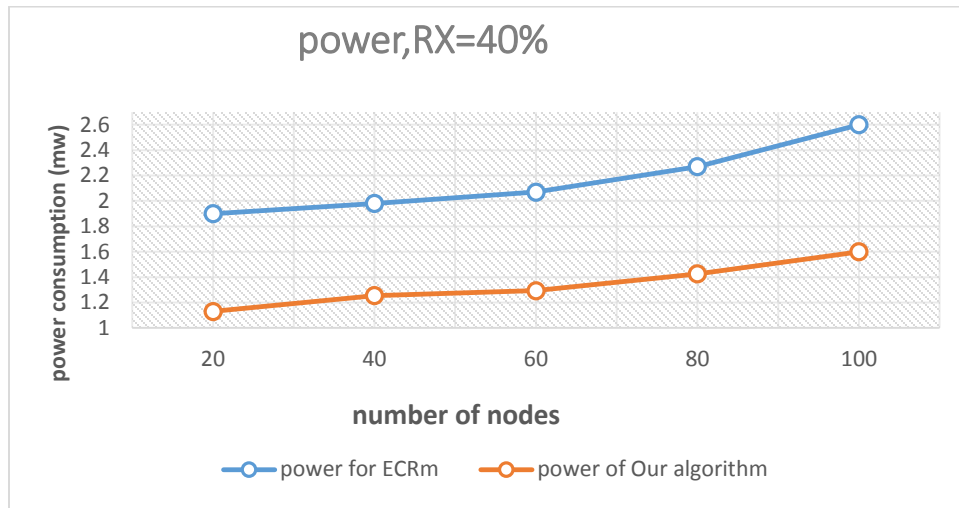
تتفوق خوارزمتنا على خوارزمية ECRM في متوسط استهلاك الطاقة في حالة الكثافة العالية بنسبة 30%، في حين أنّ متوسط استهلاك الطاقة أفضل بمقدار 27% في حالة الكثافة المتوسطة، وأفضل بنسبة 23% في حال الكثافة المنخفضة.



الشكل 34: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=80\%$

• الحالة الثانية :

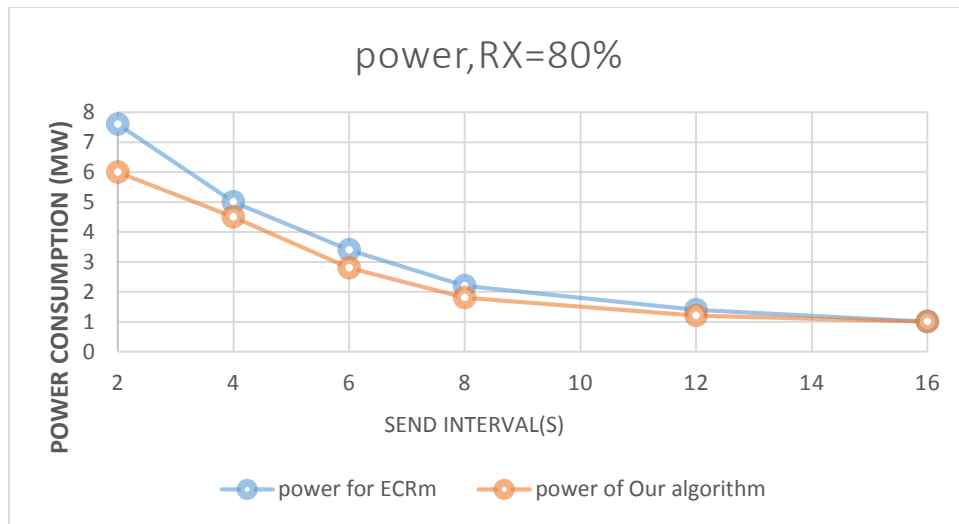
عندما يصبح معدّل نجاح استقبال الطرود سيء نسبياً أي $RX=40\%$ فإن خوارزمتنا المقترحة تتفوق على ECRM من حيث استهلاك الطاقة في حالة الكثافة العالية والكثافة المنخفضة بنسبة 40% وفي حال الكثافة المتوسطة بنسبة 37% كما في الشكل (35):



الشكل 35: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند RX=40%

• الحالة الثالثة :

نقارن بين متوسط استهلاك الطاقة في كلا الخوارزميتين بالنسبة إلى Send Interval، يبدو لنا من الشكل (36) أن استهلاك الطاقة في كلا الخوارزميتين متقارب ويزداد كلما زادت تواتر الرسائل، ويمكننا التقليل من استهلاك الطاقة من خلال زيادة الفاصل الزمني بين الرسائل. تبقى خوارزمتنا متفوقة على ECRM بنسبة 20% في حال الفواصل الزمنية القصيرة جداً. الشكل (36) :



الشكل 36: مقارنة بين متوسط استهلاك الطاقة للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM بالنسبة إلى Send Interval

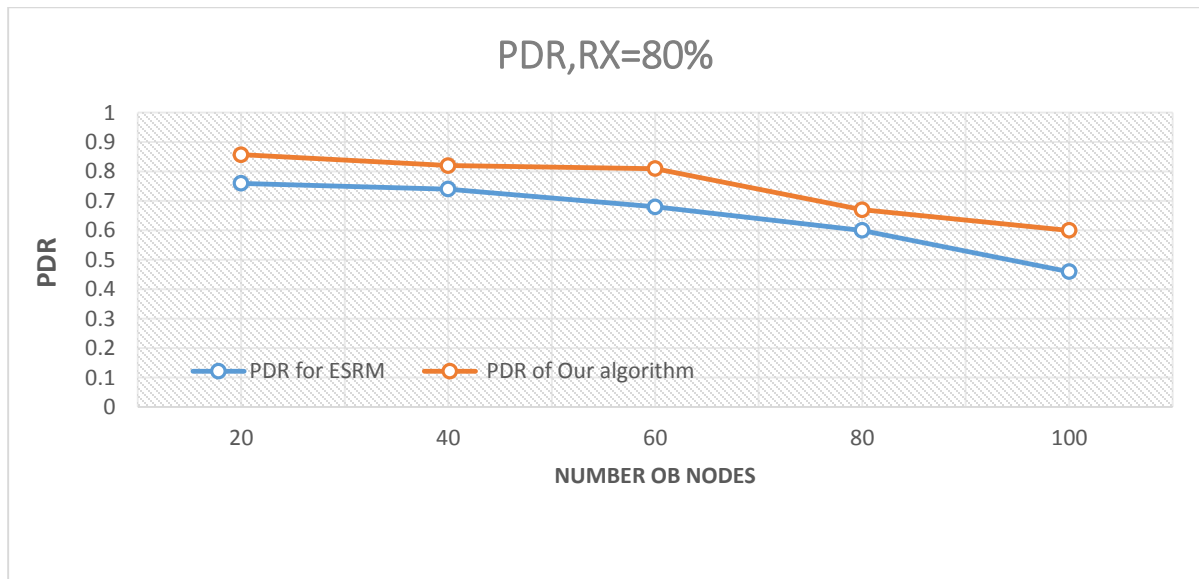
مناقشة النتائج :

نجد من الدراسة والمقارنة بين الخوارزميتين أنّ استهلاك الطاقة يكون أعلى في ECRM في جميع الحالات المذكورة أعلاه وذلك لأنّ طاقة العقد تتبدّد بسبب تجاوز سعة المخزن المؤقت وفقدان الطرود، وبالتالي الحاجة إلى عمليّات إعادة الإرسال التي تستهلك المزيد من الطّاقة، أمّا في خوارزمتنا المقترحة يكون استهلاك الطاقة أفضل لأنّه يتم اختيار الأب الذي يرسل عدد قليل من الطرود أي عبء العمل أقل وبالتالي يقل تبدّد الطّاقة.

2.8.7 مقارنة الخوارزمية الجديدة المقترحة مع خوارزمية ECRM من حيث معدّل استلام الطرود:

• الحالة الأولى:

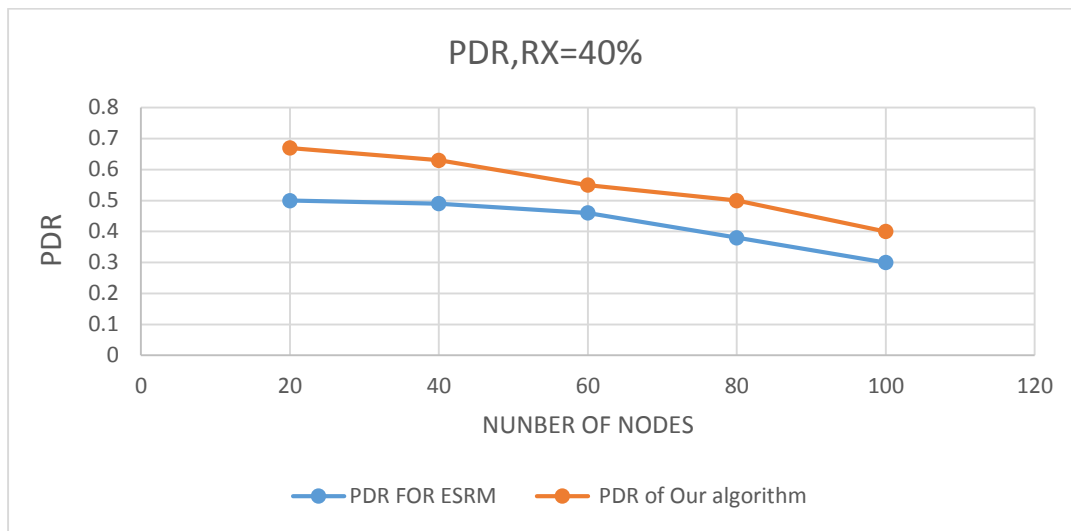
في هذا الجزء نقارن معدّل استلام الطرود بالنسبة لعدد العقد المتغيّر من الكثافة المنخفضة إلى الكثافة المرتفعة من أجل $RX=40\%$ ، فنجد تحسّن معدّل استلام الطرود في خوارزمتنا المقترحة فكان من أجل الكثافة العالية 60% و 67% ، وفي الكثافة المتوسطة 82% تقريباً، أمّا في الكثافة المنخفضة فحققنا نسبة عالية في استلام الطرود 85% ، في حين بلغت نسبة استلام الطرود في ECRM من أجل الكثافة العالية 45% فقط ، وفي الكثافة المتوسطة بلغت نسبة استلام الطرود حوالي 70% ، أمّا من أجل عدد عقد قليل فقد بلغت النسبة حوالي 75% كما في الشكل (37).



الشكل 37: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=80\%$

• الحالة الثانية :

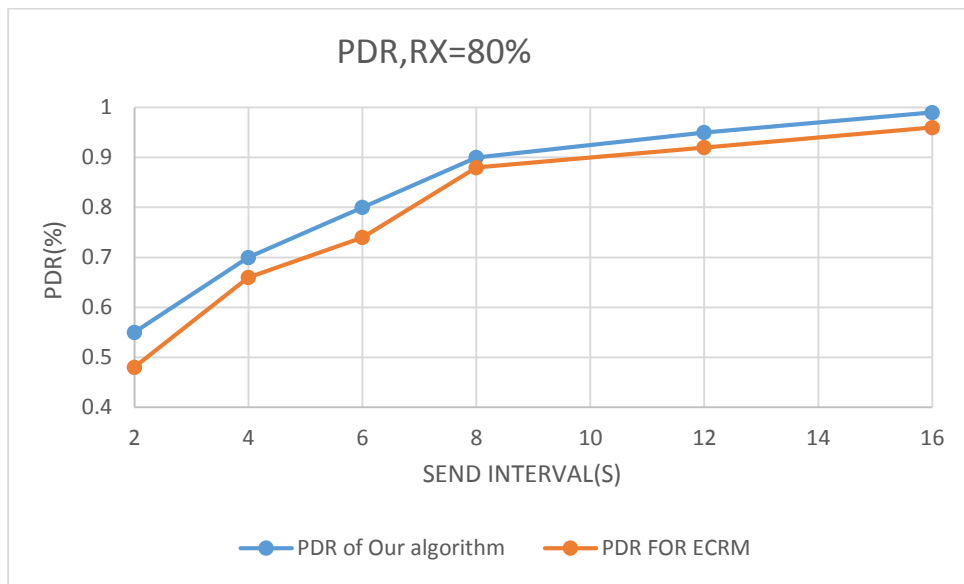
نغيّر من نسبة نجاح استقبال الطرود من القيمة الجيدة إلى القيمة السيئة نسبياً أي $RX=40\%$ ونقوم بمقارنة معدّل استلام الطرود للخوارزمتين من أجل عدد عقد متغيّر، فنلاحظ كما في الشكل (38) أنّ خوارزمتنا تحسّن من معدل استلام الطرود بشكل جيّد، حيث كان معدّل تسليم الطرود في الكثافة المنخفضة في ECRM 50% وارتفع في خوارزمتنا إلى النسبة 67% ، في حين بلغ في الكثافة المتوسطة حوالي 47% وأصبح في خوارزمتنا حوالي 60% ، أما في حالة الكثافة العالي فقد تحسّن من النسبة 30% إلى النسبة 40% .



الشكل 38: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM عند $RX=40\%$

• الحالة الثالثة :

الحالة الأخيرة هي مقارنة معدّل استلام الطرود في الخوارزمتين بالنسبة إلى Send Interval الشكل (39)، نلاحظ أنّ معدّل استلام الطرود يزداد كلما زاد الفاصل الزمني بين الرسائل فقد بلغ بنسبة 99% في خوارزمتنا عند زمن 16 ثانية وفي خوارزمية ECRM حوالي 95% ، في حين أن هذه النسبة تنخفض كلما زاد تواتر هذه الرسائل ليصبح 55% في خوارزمتنا و 48% في خوارزمية ECRM من أجل زمن قليل جداً 2 ثانية.



الشكل 39: مقارنة بين معدّل استلام الطرود للخوارزمية المقترحة وخوارزمية ECRM بالنسبة إلى Send Interval

• مناقشة النتائج :

نحصل في خوارزمتنا المقترحة على تحسّن ملحوظ في معدّل استلام الطرود في جميع الحالات المذكورة أعلاه مقارنةً بخوارزمية ECRM، والسبب وراء الأداء الأفضل للبروتوكول الجديد المقترح هو تحسين مستوى استهلاك الطاقة في الشبكة من خلال اختيار الأب الذي يرسل عدد قليل من الطرود وبالتالي لا يحصل فقدان عال للطرود وترتفع نسبة PDR، في حين أنّ خوارزمية ECRM يحصل فيها تجاوز سعة المخزن المؤقت وخاصة عندما يزداد عدد العقد وتزداد عمليّات الإرسال والإستقبال وبالتالي فقدان الكثير من الطرود وهذا يؤدي إلى استلام عدد قليل من الطرود عند الوجهة وبالتالي ينخفض ال PDR.

9.7 بعض النقاط الهامة في الخوارزمية المقترحة :

يعدّ التوجيه عاملاً مهماً في شبكة الحساسات لأنه يتقدّر قرارات توجيه الطرود، حيث أنّ اختيار الطرق السيئة في التوجيه يسبّب المزيد من عمليات إعادة الإرسال وإهدار الموارد. بناءً على نتائج المحاكاة وتحليل الأداء نجد أنّ الخوارزمية المقترحة لها أداء متفوّق بشكل عام مقارنة بالبروتوكولات الأخرى، يأتي تفوّق الأداء من الاستراتيجية في اختيار الأب الأفضل وبالتالي اختيار أفضل المسارات لتوجيه الطرود. نسلط الضوء على أهم النقاط الرئيسية في البروتوكول الجديد المقترح:

- تتمثل ميزة مقاييس التوجيه المستخدمة في الخوارزمية المقترحة من خلال استخدام موارد الشبكة بشكل فعال، مقياس ETX لتوفير الوثوقية في الشبكة، مقياس الطاقة المتبقية من أجل اختيار العقدة ذات الطاقة العالية، ومقياس عدد الطرود الأقل من أجل تخفيف العبء في الشبكة.
- إنّ الطرق المثالية هي الطرق التي توفر انخفاض في استهلاك الطاقة بالإضافة إلى جودة روابط عالية، من خلال أخذ هذين العاملين بعين الاعتبار سوف تنقص عدد العقد الفاشلة ويزداد عمر الشبكة، لذلك تتفوق خوارزمتنا على بقية الخوارزميات من حيث العمر الافتراضي للشبكة حتى لو أصبحت الشبكة أكثر كثافة حيث يأتي هذا التفوق من العاملين السابقين.
- على الرغم من كفاءة خوارزمتنا في المحاكاة إلا أنه إذا ضبطنا أحد الثوابت المقترحة في الخوارزمية وهو $MaxETX_{ratio}$ إلى قيمة منخفضة سوف يزداد توازن الشبكة لكن على حساب معدل فقدان الطرود، أي أن هناك مقايضة بين عمر الشبكة ومعدل استلام الطرود في حال خفضنا هذا الثابت، ويعود سبب ذلك إلى اختيار العقد ذات الروابط منخفضة الجودة كأب مفضل وبالتالي فقدان الطرود.
- من الصعب جداً تصميم أو بناء خوارزميات تقوم بتحسين معامل أو أكثر دونما أن تؤثر على معاملات أخرى، بالتالي تُعزى مسألة التحسين والتطوير في الخوارزمية إلى التطبيق الذي سيتم تطبيق هذه الخوارزمية ضمنه. إذاً علينا أولاً تحديد المعامل الذي نرغب بتحسينه من ثم تتم عملية التطوير، بالنسبة لخوارزمتنا فإنها تناسب التطبيقات التي تتطلب استهلاك طاقة منخفض بالدرجة الأولى وعمر شبكة طويل، وبالتالي لا تعدّ مسألة الحصول على قيمة منخفضة جداً للتأخير أمراً هاماً أو حرجاً. يمكن التحسين على الخوارزمية المقترحة إذا أردنا تطبيقها في سيناريوهات الطوارئ مثل أنظمة الكشف عن الحرائق، في مثل هذه الأنظمة تكون قيمة التأخير فيها حرجة للغاية، كما أنّ هذه الأنظمة تحتوي على آلاف العقد التي تعمل ببطارية محدودة ويكون من الصعب جداً استبدالها، لذلك أيضاً تحتاج إلى استهلاك منخفض جداً من الطاقة.
- على الرغم من التحسن الملحوظ في استهلاك الطاقة ومعدل تسليم الطرود، إلا أنه في عالم الاتصالات دائماً لا يوجد شيء دون مقابل (Tradeoff)، بالتالي صحيح بأننا حصلنا على نتائج جيدة نتيجة التعديل الذي قمنا به إنّما أدى ذلك إلى نشوء بعض المشاكل البسيطة سيّما زيادة التعقيد الحسابي في الخوارزمية وإشغال وحدات المعالجة المركزية بشكل أكبر استهلاك مساحات أكبر من الذاكرة، لكن يمكن مستقبلاً تلافي مثل هذه المشاكل من خلال تطوير التجهيزات وتوسيع إمكانياتها واستخدام وحدات معالجة مركزية موزعة وزيادة أحجام الذاكر المستخدمة.

الخاتمة:

تمتلك الشبكات اللاسلكية العديد من القيود مثل الطاقة وعرض النطاق الترددي والحوسبة والذاكرة، مما يجعل التوجيه في هذه الأجهزة معقداً. تم اختيار بروتوكول RPL كبروتوكول توجيه فعلي للشبكات ذات الموارد المقيّدة. يختار RPL الطرق استناداً إلى مقاييس التوجيه والوظائف الغرضية، لكن يملك هذا البروتوكول العديد من نقاط الضعف منها عدم القدرة على موازنة الحمل واستنزاف طاقة العقد، لذلك قمنا في هذا البحث بحل المشكلة وتحسين أداء التوجيه في بروتوكول RPL من خلال اقتراح خوارزمية تستخدم أربعة مقاييس في اختيار الأب الأفضل وهي: رتبة العقدة، مقياس ETX لتوفير الوثوقية في الشبكة، مقياس الطاقة المتبقية من أجل اختيار العقدة ذات الطاقة العالية، ومقياس عدد الطرود الأقل من أجل تخفيف العبء في الشبكة. بعد ذلك قمنا بتنفيذ الخوارزمية باستخدام المحاكى cooja وتقييم الأداء من حيث متوسط استهلاك الطاقة ومعدل تسليم الطرود من أجل شبكات متباينة الكثافة، ساهمت هذه الخوارزمية في تحسين استهلاك الطاقة للشبكة بأكملها ورفع معدل استلام الطرود، وعند مقارنتها مع خوارزمية ECRM بيّنت نتائج المحاكاة تفوق خوارزمتنا عليها من حيث متوسط استهلاك الطاقة و PDR.

الآفاق المستقبلية :

على الرغم من التحسينات التي أجريت في البحث ، إلا أننا يمكننا طرح المزيد من التوقعات لتحسين هذا البحث في المستقبل منها:

- دراسة أداء الخوارزمية من أجل مقاييس مختلفة وفي سيناريوهات مختلفة.
- تحسين أداء الخوارزمية المقترحة من خلال التعديل وتحسين العديد من المعاملات مثل DIO Interval Doublings، DIO Interval Minimum و Radio Duty-Cycling Interval، حيث أن هذه المعاملات مهمة في للتحكم في حركة المرور العامة واستهلاك الطاقة.
- دراسة وتقييم أداء الخوارزمية من أجل عقد متنقلة في الشبكة .

- [1] Vasseur, Jean-Philippe, and Adam Dunkels. Interconnecting smart objects with ip: The next internet. Morgan Kaufmann, 2010.
- [2] Palattella, Maria Rita, et al. "Standardized protocol stack for the internet of (important) things." IEEE communications surveys & tutorials 15.3 (2012): 1389-1406.
- [3] Zanella, Andrea, et al. "Internet of things for smart cities." IEEE Internet of Things journal 1.1 (2014): 22-32.
- [4] Stanley, Uzairue, et al. "IOT AND 5G: THE INTERCONNECTION." *development* 1: 2, 2018.
- [5] Shelby, Zach, and Carsten Bormann. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet. Vol. 43. John Wiley & Sons, 2011.
- [6] Winter, T., et al. "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks. Draft-ietf-roll-rpl-19." (2011).
- [7] Fotouhi, Hossein. "Reliable Mobility Support in Low-Power Wireless Networks." University of Porto (2015).
- [8] Varga, Liviu-Octavian. Multi-hop energy harvesting wireless sensor networks: routing and low duty-cycle link layer. Diss. 2015.
- [9] Al-Fuqaha, Ala, et al. "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications." IEEE communications surveys & tutorials 17.4 (2015): 2347-2376.
- [10] De Guglielmo, Domenico, et al. "Analysis and experimental evaluation of IEEE 802.15. 4e TSCH CSMA-CA algorithm." IEEE Transactions on Vehicular Technology 66.2 (2016): 1573-1588.
- [11] Thubert, Pascal, and Jonathan W. Hui. "Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15. 4-based networks." (2011).
- [12] Pavkovic, Bogdan, Marko Batic, and Nikola Tomasevic. "The importance of cross-layer considerations in a standardized WSN protocol stack aiming for IoT." Magazine Ubiquity (2015).
- [13] Jangra, Ajay. "An Analysis on Routing Protocols for Internet of Things." International Journal 7.5 (2017).
- [14] Ko, JeongGil, et al. "Connecting low-power and lossy networks to the internet." IEEE Communications Magazine 49.4 (2011): 96-101.
- [15] Shelby, Zach, Klaus Hartke, and Carsten Bormann. "The constrained application protocol (CoAP)." (2014).
- [16] Conta, Alex, and Mukesh Gupta. "Internet control message protocol (icmpv6) for the internet protocol version 6 (ipv6) specification." (2006).

- [17] Aljarrah, Emran, Muneer Bani Yassein, and Shadi Aljawarneh. "Routing protocol of low-power and lossy network: Survey and open issues." 2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). IEEE, 2016.
- [18] Sobral, José VV, et al. "Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks in Internet of Things Applications." *Sensors* 19.9 (2019): 2144.
- [19] Sobral, José VV, et al. "Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks in Internet of Things Applications." *Sensors* 19.9 (2019): 2144. Abbou, A.N., Baddi, Y. and Hasbi, A., 2019, July. Routing over Low Power and Lossy Networks protocol: Overview and performance evaluation. In 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE) (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Ko, JeongGil, et al. "Connecting low-power and lossy networks to the internet." *IEEE Communications Magazine* 49.4 (2011): 96-101.
- [21] T. Clausen, O. Gnawali, J. KO, P. Levis, and J. Hui, "The Trickle Algorithm" [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6206>.
- [22] Barthel, Dominique, et al. "Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks." (2012).
- [23] Ruckebusch, Peter, et al. "An evaluation of link estimation algorithms for RPL in dynamic wireless sensor networks." *International Internet of Things Summit*. Springer, Cham, 2015.
- [24] Sanmartin, Paul, et al. "Sigma routing metric for RPL protocol." *Sensors* 18.4 (2018): 1277.
- [25] Lamaazi, Hanane, and Nabil Benamar. "OF-EC: A novel energy consumption aware objective function for RPL based on fuzzy logic." *Journal of Network and Computer Applications* 117 (2018): 42-58.
- [26] Liu, Xiyuan, et al. "Performance analysis of routing protocol for low power and lossy networks (RPL) in large scale networks." *IEEE Internet of Things Journal* 4.6 (2017): 2172-2185.
- [27] Gaddour, Olfa, Anis Koubâa, and Mohamed Abid. "Quality-of-service aware routing for static and mobile IPv6-based low-power and lossy sensor networks using RPL." *Ad Hoc Networks* 33 (2015): 233-256.
- [28] Bendouda, Djamila, Lynda Mokdad, and Hafid Haffaf. "Method for fault management with RPL protocol in WSNs." *Procedia Computer Science* 73 (2015): 395-402.
- [29] Lamaazi, Hanane, Nabil Benamar, and Antonio J. Jara. "Study of the Impact of Designed Objective Function on the RPL-Based Routing Protocol." *International Symposium on Ubiquitous Networking*. Springer, Singapore, 2016.
- [30] Thubert, Pascal. "Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)." *RFC 6552* (2012).
- [31] Gnawali, Omprakash. "The minimum rank with hysteresis objective function." *RFC 6719* (2012).

- [32] Sebastian, A., and S. Sivagurunathan. "A Survey on Load Balancing Schemes in RPL based Internet of Things." *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication* 6.3 (2018): 43-49.
- [33] Kim, Hyung-Sin, Jeongyeup Paek, and Saewoong Bahk. "QU-RPL: Queue utilization based RPL for load balancing in large scale industrial applications." *2015 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*. IEEE, 2015.
- [34] Sharkawy, Bassam, Ahmed Khattab, and Khaled MF Elsayed. "Fault-tolerant RPL through context awareness." *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE, 2014.
- [35] Abreu, Carlos, Manuel Ricardo, and P. M. Mendes. "Energy-aware routing for biomedical wireless sensor networks." *Journal of Network and Computer Applications* 40 (2014): 270-278.
- [36] Sousa, Natanael, et al. "ERAOF: A new RPL protocol objective function for Internet of Things applications." *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. IEEE, 2017.
- [37] Nurmio, Juuso, Ethiopia Nigussie, and Christian Poellabauer. "Equalizing energy distribution in sensor nodes through optimization of RPL." *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. IEEE, 2015.
- [38] Tang, Weisheng, et al. "Toward improved RPL: A congestion avoidance multipath routing protocol with time factor for wireless sensor networks." *Journal of Sensors* 2016 (2016).
- [39] Al-Kashoash, Hayder AA, Yaarob Al-Nidawi, and Andrew H. Kemp. "Congestion-aware RPL for 6LOWPAN networks." *2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. IEEE, 2016.
- [40] Singh, Parmod, and Yaw-Chung Chen. "RPL Enhancement for a Parent Selection Mechanism and an Efficient Objective Function." *IEEE Sensors Journal* 19.21 (2019): 10054-10066.
- [41] Sebastian, A., and S. Sivagurunathan. "Multi Sink RPL based Internet of Things for Emergency Response in Smart Cities." *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 118.18 (2018): 2875-2881.
- [42] Iova, Oana, Fabrice Theoleyre, and Thomas Noel. "Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network." *Ad Hoc Networks* 29 (2015): 45-62.
- [43] Taghizadeh, Seyedreza, Hossein Bobarshad, and Halima Elbiaze. "CLRPL: context-aware and load balancing RPL for IoT networks under heavy and highly dynamic load." *IEEE Access* 6 (2018): 23277-23291.
- [44] Qasem, Mamoun, et al. "A new efficient objective function for routing in Internet of Things paradigm." *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, 2016.
- [45] Kim, Hyung-Sin, et al. "Challenging the IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks (RPL): A survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.4 (2017): 2502-2525.
- [46] Lamaazi, Hanane, and Nabil Benamar. "A comprehensive survey on enhancements and limitations of the RPL protocol: A focus on the objective function." *Ad Hoc Networks* 96 (2020): 102001.

- [47] Nuvolone, Marco. "Stability analysis of the delays of the routing protocol over low power and lossy networks." (2010).
- [48] Ullah, Rehmat, Yasir Faheem, and Byung-Seo Kim. "Energy and congestion-aware routing metric for smart grid AMI networks in smart city." *IEEE access* 5 (2017): 13799-13810
- [49] De Couto, Douglas SJ, et al. "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing." *Wireless networks* 11.4 (2005): 419-434.
- [50] Draves, Richard, Jitendra Padhye, and Brian Zill. "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks." Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2004.