

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

م. محمد الهلامي * د. أكرم مرعي ** د. ماهر عباس ***

كلية الهندسة المعلوماتية- جامعة حمص

ملخص

يُتوقع أن يشهد العقد القادم تزايداً في الأجهزة والهواتف المحمولة والمستشعرات والمشغلات التي تتواصل عبر الانترنت لتعزيز نمط الحياة البشرية. يجب أن يضمن تصميم شبكة انترنت الأشياء الكفاءة في استهلاك الطاقة، والسرعة، والموثوقية لضمان استدامة الشبكة على المدى الطويل. يعتبر توجيه وموازنة البيانات بين العقد أحد الجوانب التي تتحكم بشكل كبير في جودة الخدمة في شبكات أنترنت الأشياء. تم تصميم البروتوكول القياسي بروتوكول التوجيه للشبكات منخفضة الطاقة والتي تحتوي فقدان لرزم Routing Protocol For Low-Power And Lossy Networks (RPL) لاختيار أفضل مسار بناءً على مقياس جودة وصلة اتصال واحدة مثل عدد القفزات أو عدد الإرسال المتوقع، يؤدي هذا إلى اختيار مسارات غير موثوقة وبالتالي هدر لموارد الشبكة وزيادة عملية إعادة إرسال البيانات وعدم موازنة الحمل والتي تشكل ما يعرف بالنقاط الساخنة داخل الشبكة. في هذا البحث قمنا بعملية تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يسمى (HU_DLQ) Homs University Dynamic Link Quality يقوم باختيار المسار الأفضل من بين مجموعة من المسارات بالاعتماد على مجموعة من المقاييس كما يعمل أيضاً على موازنة الحمل بين عقد الشبكة والتخلص من مشكلة النقاط الساخنة، تمت عملية اختبار المقياس الجديد باستخدام نظام التشغيل ContikiOS والمحاكي Cooja كما تم تقييم أداء المقياس المقترح وذلك من أجل شبكات متباينة الكثافة ومختلفة الطوبولوجيا، أظهرت نتائج المحاكاة تفوق المقياس الجديد (HU_DLQ) على المقياس الأساسي (MORHF_ETX) Minimum

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

Rank Hysteresis Objective Function based on Expected Transmission Count من خلال تحسين استهلاك الطاقة وتقليل من رسائل التحكم وتحسين معدل تسليم الرزم.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المنخفضة الطاقة والتي تحتوي ضياع، انترنت الأشياء، التابع الوظيفي (MORHF_ETX)، البرتوكول RPL، عدد الارسل المتوقع (ETX).

*طالب دكتوراه في قسم النظم والشبكات الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص.

**أستاذ مساعد - قسم النظم والشبكات الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص.

***أستاذ مساعد - قسم النظم والشبكات الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة حمص

Design and implementation of a new link quality metric that achieves load balancing within IoT networks based on the RPL routing protocol.

Eng. Mohammad alholami* Dr. Akram almorei** Dr. Maher abbas***
Abstract

The next decade is expected to witness an increase in devices, mobile phones, sensors and actuators that communicate over the Internet to enhance human lifestyle. The design of the IoT network must ensure energy efficiency, speed and reliability to ensure the long-term sustainability of the IoT. Routing and balancing of data between nodes is one of the aspects that greatly controls the quality of service in IoT networks. The standard RPL protocol is designed to choose the best path based on a single link quality metric such as hop count or expected transmission number. Choosing unreliable paths leads to wasted network resources, increased data retransmission and unbalanced load, which forms what are known as hot spots within the network. In this research, we aim to design and implement a new link quality measure called (HU_DLQ) that selects the best path from a set of paths based on a set of measures. It also works to balance the load between network nodes and eliminate the problem of hot spots. The new measure was tested using the operating system (ContikiOS) and the simulator (Cooja). The performance of the proposed algorithm was also evaluated for networks of varying density and different topologies. The simulation results showed that the new measure (HU_DLQ) outperforms the basic algorithm within the (RPL) protocol, which is called (MORHF_ETX), by improving energy consumption, reducing control messages, and improving the packet delivery rate.

Keywords: Low Power and Lossy Networks (LLNs), Internet of Things (IOT), MORHF_ETX, RPL protocol, ETX link metric.

*PhD Student in the Department of Systems & Computer Networks of Faculty of Informatics –Homs University.

**Associated Professor in the Department of Systems & Computer Networks of Faculty of Informatics - Homs University.

1. مقدمة:

يتم ربط مليارات الأجهزة مثل عدادات الطاقة والمياه، والأجهزة المنزلية، والأجهزة القابلة للارتداء، والمستشعرات، والمشغلات بالانترنت لتكوين شبكة اتصالات ضخمة تُعرف بالانترنت الأشياء. من المتوقع أنه بحلول عام 2025، سيكون هناك أكثر من 27 مليار اتصال بالانترنت الأشياء. ستحدث انترنت الأشياء تحولاً في مجالات مراقبة الطقس، والمدن الذكية، والرعاية الصحية، والأتمتة الصناعية، والأتمتة المنزلية[1]. تتكون شبكات انترنت الأشياء وهو الجيل الجديد من شبكات الحساسات اللاسلكية من مستشعرات تعمل بالبطاريات تستخدم متحكمات دقيقة مثل (MSP430)[2] وتتمتع بسعة تخزين محدودة. بخلاف الشبكات التقليدية، يمكن أن تكون حركة المرور في هذه الشبكات واحد إلى واحد أو واحد إلى متعدد أو متعدد إلى واحد. كما أن شبكة الاتصالات هذه تعاني من عدة عيوب مثلاً عدم الاستقرار ومعدلات البيانات المنخفضة وفقدان حزم البيانات العالي ونطاق الإرسال المحدود وتغير طوبولوجيا الشبكة الديناميكي وبسبب هذه القيود العديدة على الأجهزة وتكنولوجيا الاتصالات الأساسية، يتم تصنيف شبكات انترنت الأشياء (Internet Of Things) IOT كشبكات منخفضة الطاقة وفاقة البيانات (Low Power Lossy Network) LNN ونظراً لأن بروتوكول التوجيه هو أحد دعائم هيكلية الشبكة وهو المسؤول عن قرارات التوجيه حيث أن القرارات الخاطئة سوف تسبب هدراً لموارد الشبكة صمم البروتوكول (RPL) من أجل الشبكات ذات الضياع والطاقة المنخفضة والشبكات التي تحتوي عدداً كبيراً جداً من الأجهزة الذكية، والقادرة على الاتصال بالمستخدمين عبر شبكة الانترنت حيث اهتم الباحثون بدراسة وتطوير البروتوكول (RPL) الذي يعتمد على الوظائف الغرضية (Objective Function) OF من أجل إنشاء المسارات داخل الشبكة وتشكيل طوبولوجيا الشبكة. تُستخدم مقاييس جودة وصلات الاتصال من أجل اختيار المسار الأقصر بين عقدتين وتقييم كلفته وتستخدم في داخل الوظائف الغرضية التي تعتمد على مقياس جودة وصلة اتصال وحيد فقط بحيث لا يغطي هذا المقياس جميع خصائص المسار بين العقد، كما تتطلب بعض تطبيقات (RPL) استخداماً لمقياس جودة وصلة اتصال واحد بينما تحتاج تطبيقات أخرى إلى تحديد مجموعة من مقاييس جودة وصلات الاتصال وذلك من أجل اختيار المسار الأمثل على سبيل المثال يمكن الاستفادة من مقياس جودة وصلة الاتصال (ETX)

لتجنب الروابط غير الموثوقة، ومن خلال هذا مقياس يستطيع البروتوكول اختيار المسار بناء على الروابط التي توفر مستوى محدد من الموثوقية واستخدام مقياس الطاقة المتبقية للعقدة كمقياس ثاني من أجل اختيار المسار بين العقد التي تحوي طاقة بنسبة معينة وتجنب العقد ذات الطاقة المنخفضة[14].

في هذا البحث، قمنا بإنشاء مقياس جودة وصلة اتصال جديد وقمنا بتسميته (HU_DLQ)، بحيث يقوم هذا المقياس باختيار أفضل مسار بين العقد بناءً على معايير جودة وصلات متعددة، تقوم هذه المعايير بأخذ نظرة شاملة عن طبيعة الشبكة وخصائصها من حيث (الطاقة المتبقية في العقدة، مقياس جديد مقترح يسمى معدل تمرير الرسائل، مقياس عدد الإرسال المتوقع (ETX) وعدد القفزات ومتوسط طول المسار). حيث ينجح هذا النهج في أخذ نظرة شاملة عن طبيعة الشبكة وتحسين موازنة الحمل داخل عقد الشبكة واختيار المسارات بين العقد التي تملك كميات طاقة أكبر والتقليل من عمليات إعادة الإرسال وفقد البيانات وتخفيف استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة ككل[5].

2. مشكلة البحث:

صمّم البروتوكول (RPL) من أجل الشبكات ذات الضياع والطاقة المنخفضة والشبكات التي تحتوي عدداً كبيراً جداً من الأجهزة الذكية، والقادرة على الاتصال بالمستخدمين عبر شبكة الانترنت، اهتم الباحثون بدراسة وتطوير بروتوكول (RPL) الذي يعتمد على الوظائف الغرضية (OF) من أجل انشاء المسارات داخل الشبكة وتشكيل طوبولوجيا الشبكة، على الرغم من أن بروتوكول (RPL) كان قادراً على حل المشاكل الرئيسية، إلا أنه لا يزال هناك بعض القيود التي تحتاج إلى معالجة على سبيل المثال يتخذ بروتوكول (RPL) القياسي قرار التوجيه معتمداً على مقياس جودة وصلة اتصال واحدة داخل الوظائف الغرضية مما يؤدي إلى اختيار مسارات غير مثالية وتحتوي على ضياعات وتشكيل ما يسمى بالنقاط الساخنة والتي يمكن تعريفها بـ(عقدة داخل الشبكة تعاني من الاختناق الشديد في مسألة تمرير الطرود وتبقى طوال الوقت مشغولة) مما يسرع في عملية هدر طاقة العقدة داخل الشبكة وبالتالي تقليل عمر الشبكة ككل.

3. الهدف من البحث:

نهدف في هذا البحث إلى تحسين أداء التوجيه واستهلاك الطاقة في شبكات الانترنت الأشياء وذلك من خلال تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يعتمد على الوظيفة الغرضية الجديدة (HU_DLQ_OF) والتي تعتمد على معيار جودة وصلة اتصال مركب والتي تأخذ بعين

الاعتبار أهم السمات التي تمثلها الشبكة ولتحقيق هذا المقياس قمنا باقتراح خوارزمية جديدة تقوم باختيار المسار الأفضل من بين مجموعة مسارات وذلك بالاعتماد على أربع معايير من مقدرات جودة وصلة الاتصال بحيث يتم اختيار المسار بناءً على القيمة الأعلى من حيث كمية الطاقة المتبقية والقيمة الأقل بالنسبة للمقياس معدل تمرير الرزم وللمقياس ETX داخل العقدة ، وعند تساوي كلفة المسارات نقوم بإخذ متوسط طول المسار ونختار القيمة الأقل لكلفة المسار بحيث نضمن أن هذا المسار الذي تم اختياره لا يحوي على مسارات جزئية تشكل عنق زجاجة (bottleneck) داخل الشبكة.

4. أدوات وطرائق البحث:

في هذا البحث تم استخدام حاسوب شخصي يحتوي على معالج من نوع (corei7-4th_generation) ومقدار ذاكرة عشوائية تقدر ب(8GB) ونظام تشغيل من نوع (Ubuntu) وتم تثبيت نظام التشغيل الخاص بأنترنت الأشياء (Contiki_Os) بالإضافة إلى المحاكي الخاص بنظام التشغيل الخاص بأنترنت الاشياء (Cooja Simulator).

5. الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (LLN):

مكنت انترنت 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 WSN (Wireless Sensor Network) وتُوصّل بالشبكة العالمية الأنترنت باعتباره العمود الفقري لـ (IOT) يتمثل الدور الرئيسي لشبكات (IOT) في تحسس البيانات وجمعها عبر الحساسات الموزعة (العقد) ومعالجتها ونقلها إلى عقدة مستقبل معلومات الشبكة، يطلق على هذا النوع من شبكات (IOT) والتي تتكون من عدد كبير من هذه الأجهزة المدمجة بالشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (والخسارة) (LLN) [3] من المتوقع أن يكون هناك عدد هائل من التطبيقات المنزلية والتجارية والتي ستستخدم (LLN) كبنية تحتية لها لتحسين نوعية حياتنا. تتخصص شبكات (LLN) بتطبيقات حركة مرور البيانات المنخفضة، حيث تعد حركة المرور البيانات المنخفضة أمراً شائعاً جداً بالنسبة للتطبيقات المنزلية الذكية، والحوسبة المنتشرة في كل مكان حيث يلزم وجود دورة حياة طويلة جداً للحساسات. تدعم (LLN) ثلاثة أنواع من حركة المرور: نقطة إلى نقطة (بين الأجهزة داخل شبكة LLN) من نقطة إلى متعددة النقاط (بين الجهاز

المركزي والأجهزة الأخرى داخل شبكة 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 بروتوكول 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 [14]. يعد الوسط الراديوي المستخدم من قبل أجهزة (LLN) قصير المدى عرضة لأخطاء البتات. حيث يكون الضياع في شبكة (LLN) له تأثير قوي على تصميم بروتوكول التوجيه، نظراً لهذه الأسباب تتمثل إحدى المشكلات الصعبة في شبكات (LLN) العثور على أفضل الطرق لتسليم البيانات، مما يعني وجود آلية توجيه فعالة للغاية للعثور على المسارات في الشبكة والاحتفاظ بها. تواجه آلية التوجيه صعوبات تتمثل بطبيعة قيود الموارد لعقد جهاز الحساس والضياع في الوسط الراديوي. يمثل استهلاك الطاقة أيضاً مشكلة كبيرة بالنسبة لأجهزة (LLN)، فمن المهم تشغيلها بمعدل بيانات منخفض جداً وطاقة إرسال تهدف إلى إطالة العمر الافتراضي للحساسات بشكل كبير [3].

6. بروتوكول التوجيه للشبكات منخفضة الطاقة والتي تحتوي فقدان لرزم (RPL):

يعد بروتوكول التوجيه هو المسؤول عن اتخاذ قرار التوجيه الذكي عن طريق اختيار المسار الأفضل بين عدة مسارات [4]. يعد التوجيه في شبكات (LLN) أحد التحديات الرئيسية ليس فقط بسبب الضياع الذي يكون في الوسط الراديوي والموارد المحدودة لعقد الحساسات ولكن أيضاً بسبب متطلبات التوجيه المختلفة [16] ، لذلك ركزت مجموعة عمل التوجيه عبر الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع (ROLL) Routing Over Low Power and Lossy Networks على تصميم بروتوكول توجيه لينتاسب مع القيود المفروضة في هذه الشبكات حيث قامت مجموعة العمل (ROLL) [4] بتوجيه من قبل مجموعة مهندسي مهام الانترنت (IETF) Internet Engineering Task Force باعتماد وإنشاء البروتوكول (RPL) كبروتوكول توجيه معياري لشبكات (LLN) وتم توصيفه بالملف (RFC 6550) [3] كبروتوكول معياري يستند إلى الإصدار الجديد من بروتوكول عنونة الشبكات (IPv6) للعقد المقيّدة بالموارد وأصبح بروتوكول التوجيه الفعلي لشبكات (IOT) كما يدعم متطلبات التوجيه الدنيا من خلال بناء طوبولوجيا قوية عبر الروابط التي

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

يكون فيها ضياعات، كما تم تطويره وأصبح معياراً أساسياً لبروتوكولات توجيه البيانات وتم استخدامه في العديد من أنظمة التشغيل مثل Contiki OS، TinyOS، كبروتوكول توجيه قياسي [5].

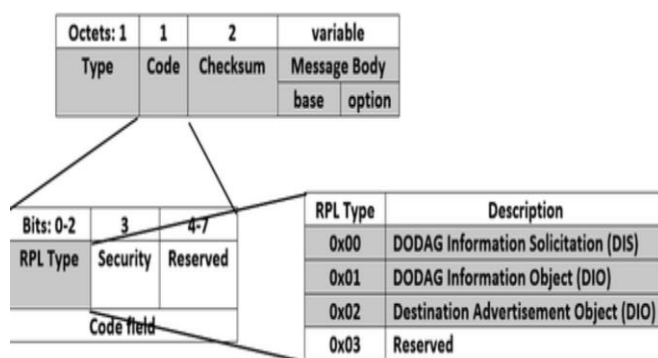
❖ رسائل التحكم في ال (RPL):

تم اقتراح أنواع جديدة من رسائل التحكم داخل البروتوكول (RPL) [3] لبناء طوبولوجيا شبكة (DODAG Destination Oriented Directed Acyclic Graph) وتتكون رسالة التحكم في (RPL) من [14]:

✓ ترويسة (ICMPV6 Internet Control Message Protocol) والتي تتألف من ثلاثة حقول (type، code، CRC checksum).

✓ متن الرسالة التي تحتوي على نص الرسالة وبعض الخيارات.

يتم تمييز نوع طرود التحكم بواسطة حقل الشيفرة (code) كما في الشكل رقم (1)، تتألف هذه الطرود من أربعة أنواع وهي:



الشكل رقم (1) بنية رسائل التحكم في بروتوكول (RPL)

• رسالة المعلومات (DIO) DODAG Information Object:

بداية يقوم جذر (DODAG) ببث رسالة (DIO) باتجاه هابط إلى عقد الجوار من أجل تمكين حركة المرور من نقطة إلى عدة نقاط في اتجاه تنازلي. تحتوي رسائل (DIO) على معرف جذر شجرة (DODAG_ID)، معرف مثيل (RPL_Instance_ID) ومجموعة من المقاييس منها

(مقاييس التوجيه، رتبة العقدة، الوظيفة الغرضية (OF)) تُرسل هذه الرسائل بشكل دوري مع رقم تسلسلي تراكمي من أجل بدء عملية اختيار الأب الأفضل للعقد [14].

• رسالة التماس المعلومات (DIS) DODAG Information Solicitation:

يتم استخدام رسالة التحكم (DIS) بواسطة أي عقدة لجلب رسائل تحكم من نوع (DIO) بشكل صريح من العقد المجاورة، وتُستخدم أيضا من أجل انضمام العقد إلى شجرة (DODAG) وفي حال لم تتمكن من تلقي رسائل من نوع (DIO) بعد فاصل زمني محدد مسبقا يتم إعادة بث هذه الرسالة من جديد [14].

• رسالة إعلان الوجهة (DAO) Destination Advertisement Object:

تخدم هذه الرسائل أساساً غرض نشر معلومات الوجهة في الاتجاه الصاعد نحو جذر الشبكة، تُستخدم هذه المعلومات لبناء المسارات الصاعدة بين العقد المرتبطة وجذر (DODAG) [14].

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

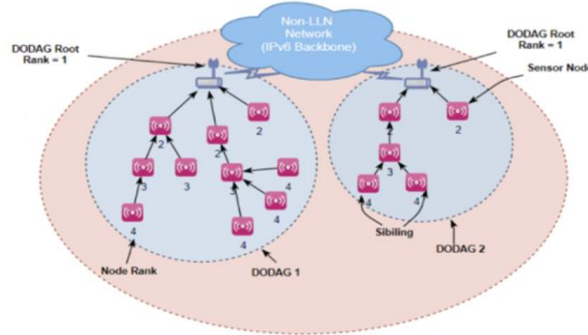
عند استلام رسائل تحكم من نوع (DAO)، يمكن للعقدة إرسال رسالة (DAO-ACK) إلى مرسل رسالة (DAO) للاعتراف باستلام الرسالة بشكل صحيح ولإقرار باستعداد العقدة للعمل كقفزة تالية باتجاه جذر [14].

❖ طريقة تشكيل الطوبولوجيا داخل البروتوكول (RPL):

يقوم RPL بإنشاء طوبولوجيا الشبكة من خلال مخطط يسمى رسم بياني موجه (Directed Acyclic Graph DAG) والذي يتكون من واحد أو أكثر من الرسم البياني والذي يدعى رسم بياني لا حلقي موجه إلى الوجهة [6] (DODAG)، يمثل كل (DODAG) شجرة توجيه تم إنشاؤها بواسطة عقدة الجذر (Root Node) والمعروفة أيضا باسم عقدة مستقبل معلومات الشبكة. عند البدء بتهيئة المسارات وتشكيل البنية، تبدأ عقدة الجذر بتكوين الشبكة وبناء (DODAG) عن طريق بث رسالة تحكم من نوع (DIO) كما يوضح الشكل رقم (2)، تحتوي هذه الرسالة على العديد من المعلومات مثل معلومات رتبة العقدة (للسماح للعقد بأخذ مواقعها في DODAG ولمنع حلقات التوجيه) [3]، نمط التشغيل والوظائف الغرضية (OF) والمقاييس التي تحوي معلومات حول البنية المطلوب تشكيلها، تقوم العقد المجاورة لهذه العقدة بالاستماع إلى هذه الرسالة وإعادة إرسالها إلى العقد المجاورة لها وتحديد فيما إذا كانت تريد الانضمام إلى هذه البنية

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

أم لا، وتقرر ذلك بناءً على قيود محددة، في الوقت الذي تصبح به هذه العقدة جزءاً من البنية، فسيكون لها مسار للأعلى نحو الجذر وعندها تحسب العقدة رتبته وتقوم بتحديث جدول الجيران الخاص بها، وتختار الأب الأفضل الذي سيتم استخدامه لإعادة توجيه الرسائل إلى جذر (DODAG) وعادة يكون الأب الأفضل هو الجار الذي يملك الرتبة الأدنى المحسوبة وفقاً للوظيفة الغرضية الصفرية (OF_0)، وبعدها تقوم هذه العقدة بإعادة إرسال رسائل التحكم إلى العقد المجاورة وبهذه الطريقة تستمر العملية حتى بناء كامل الشبكة [14]. يدعم بروتوكول (RPL) وجود عدة بنى ضمن الشبكة الواحدة والتي من الممكن أن تكون تابعة لعقدة جذر أو أكثر وتدعى هذه البنية (DAG Instance) ويمكن لعقدة الواحدة أن تنتمي إلى بنية واحدة أو أكثر بنفس الوقت حيث يكون لكل عقدة (ID Instance) واحد لكل بنية تنتمي إليها، تكمن فائدة هذه الخاصية في بناء مسارات حسب الهدف المطلوب من التطبيق مثلاً: مسارات للبيانات العادية يتجنب العقد التي تعمل على البطارية، ومسار لبيانات ذات الأهمية القصوى والذي يكون فيه التأخير بحدوده الدنيا وتسلق مسارات ذات ووثوقية عالية وطاقة عقدة كبيرة [21].



الشكل رقم (2) شجرة DODAG.

7. الوظائف الغرضية في بروتوكول الانترنت (RPL):

تعتمد عملية إنشاء شجرة (DODAG) على الوظائف الغرضية (OF) بشكل أساسي والتي تأخذها الشبكة بعين الاعتبار [6] ، يعتمد استخدام الوظيفة الغرضية بواسطة بروتوكول التوجيه (RPL) على ثلاث مكونات:

- المقياس المحدد، والذي يمثل المقياس الذي تستخدمه العقدة من أجل إنشاء المسار بين العقد.

- تكلفة المسار والذي يمثل جودة مسار الاتصال من بين مجموعة من المسارات بين العقد ويعتمد على المقياس المحدد.
- أفضل أب والذي يمثل أفضل مسار بين عقدة ابن وعقدة أب من حيث جودة وصلة الاتصال أو الطاقة المتبقية بالعقدة الاب أو العقدة الأقل من حيث كمية استقبال وأرسال البيانات. وضع الباحثون [7] [3] الوظائف الغرضية المعيارية في (RPL) كما يلي:

✓ الوظيفة الغرضية الصفرية (OF_0) :

تعتمد على عدد القفزات كمقياس لتكلفة المسار. يتم اختيار الأب المرشح الذي لديه أقل عدد من القفزات، مما يعني أن العقدة الأقرب إلى الجذر ستختار كأب مفضل. تلائم هذه الوظيفة الغرضية (OF0) الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع لكن مقياس العقدة هذا قد يوفّر جودة روابط سيئة لأن العقد تختار المسار مع الحد الأدنى لعدد القفزات حتى لو كان غير موثوق [14]، وبالتالي تزداد عمليات إعادة الإرسال وضياع المزيد من الطرود [21].

✓ الوظيفة الغرضية (MORHF Based On ETX) :

تستخدم الوظيفة الغرضية (ETX_OF) مقياس جودة وصلة الاتصال والذي يسمى عدد الإرسال المتوقع (ETX) كمقياس توجيه لتحديد أفضل مسار من بين مجموعة مسارات، ويعرف بالحد الأقصى لعدد عمليات إعادة الإرسال اللازم حتى يتم إقرار لاستلام الطرود بنجاح [21]. يمثل هذا المقياس بمعنى آخر كمية الضياعات في المسار بحيث كلما كانت كمية الضياعات كبيرة ازدادت قيمة المقياس ويكون المسار سيئ وكلما انخفضت قيمة (ETX) يكون هناك ضياعات قليلة ويكون المسار أفضل، تحسب قيمة (ETX) بالعلاقة الأساسية التالية [14] [16]:

$$ETX = \frac{1}{dF * dR} \quad (1)$$

حيث:

df: تمثل نسبة التسليم وتعرف احتمال الطرود الواردة الناجحة من المصدر إلى الوجهة.

dr: تمثل نسبة التسليم العكسي وهو احتمال الإقرار الوارد الناجح من الوجهة إلى المصدر.

تُقاس جودة الرابط من حيث الموثوقية من خلال قيمة (ETX)، تشير كلفة (ETX) المنخفضة إلى أن الروابط في الشبكة أكثر موثوقية.

كل من الوظيفتين الغرضيتين (OF0,MORHF) لهما القصور نفسه وذلك بسبب اعتمادهم على مقياس واحد فقط من أجل اختيار المسار [5]. تقتصر هذه الوظائف إلى النهج الشمولي الضروري لاختيار المسار الأفضل من حيث التأخير الزمني أو تجاوز العقد ذات الازدحام العالي. للتغلب على ذلك وتوفير حلول تؤمن جودة الخدمة (QoS)، قدمت مواصفات (RPL) المرونة للمصمم لإدراج المزيد من المقاييس في عملية اتخاذ القرار وسنرى في الأجزاء اللاحقة كيف يمكن تحقيق ذلك.

8. الدراسة المرجعية:

نوضح في هذا الجزء من البحث دراسة استقصائية عن أبحاث تحسين أداء جودة وصلة الاتصال والتوابع الوظيفية المتوفرة في (RPL)، تهدف معظم الحلول إلى تحسين أداء التوجيه وفعالية الطاقة وإدارة موارد العقدة.

اقترح الباحثون في الورقة البحثية [7] وظيفة غرضية (COM_OF) جديدة تأخذ بعين الاعتبار مزيجاً من مقاييس (العمر المتوقع للعقدة، عدد الأبناء للعقدة، الطاقة المتبقية ومقياس جودة المسار EXT وذلك من أجل توزيع الحمل بين العقد المختلفة وتم مقارنة الحل المقترح مع كل من وظائف الهدف القياسية (OF0 و MRHOF) وباستخدام المحاكى (Cooja) أعطت النتائج انخفاض في استهلاك الطاقة وتحسين من معدل تسليم الرزم، تم استخدام مقياس عدد الأبناء حيث هذا المقياس لا يعكس كمية انشغال العقدة بجميع الحالات ولا يؤدي إلى موازنة دقيقة للحمل كما تم استخدام مقاييس أداء قليلة من أجل تقييم كامل الحل المقترح.

اقترح الباحثون [8] مقياس توجيه مركب للبروتوكول (RPL) يعتمد على مؤشر تفريغ البطارية وعدد الأبناء للعقدة من أجل اختيارها كأفضل أب للتوجيه البيانات وتم تجربة الحل باستخدام المحاكى (COOJA) وتم تقييم الحل عن طريق مقاييس فقط (عمر الشبكة، معدل تسليم الرزم) وعدد قليل من العقد ويقتصر الحل على عدم استخدام أي مقاييس جودة وصلات المسار بين العقد واستخدام مقياس عدد الأبناء الذي لا يعكس الصورة الحقيقية لكمية الحمل داخل العقدة.

في حين الورقة البحثية [9] أشارت إلى اقتراح وظيفية غرضية جديدة (RPL-FZ) تعتمد على المقاييس (الطاقة المتبقية بالعقدة، مقدار تأخير استلام الرزم (Delay)، عدد الإرسال

المتوقع (ETX))، تم الجمع بين المقاييس باستخدام تقنية المنطق الضبابي للحصول مقدار درجة جودة لكل عقدة أب وبعدها يتم اختيار أفضل أب يحقق أعلى درجة جودة، تم محاكاة الشبكة باستخدام محاكي الشبكات (COOJA) ونظام التشغيل (Contiki) وأظهرت النتائج تحسين الأداء من ناحية تسليم الرزم وتوفير قليل بالطاقة بالمقارنة مع الوظيفة الغرضية (OF0 وMRHOF)، جميع الحلول التي تعتمد على المنطق الضبابي تحتاج إلى كمية استهلاك طاقة عالية مما يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة.

في حين اقترح المؤلفون [11] وظيفة غرضية جديد للبروتوكول (RPL) تعتمد على اختيار العقد الأقل في استهلاك للطاقة كأفضل عقدة أب، وتم تقييم الأداء عن طريق عمر الشبكة ومعدل تسليم الرزم PDR (Packet Delivery Ratio) فقط.

الباحثون في الورقة البحثية [12] قدموا وظيفة غرضية تعتمد على (عدد القفزات والطاقة المتبقية داخل العقدة) وتم تقييم الأداء باستخدام المحاكى (COOJA) بالنسبة لاستهلاك الطاقة ومعدل تسليم الرزم PDR فقط.

اقترح الباحثون [13] وظيفة غرضية تسمى (WSM - OF) تعتمد على أربعة معايير في اختيار الأب الأفضل من بين مجموعة الآباء المرشحين بالاعتماد على (عدد الإرسال المتوقع ETX، الطاقة المتبقية، عدد الأولاد، مقياس جودة وصلة الاتصال LQL)، باستخدام المحاكى (Cooja) أظهرت النتائج تحسن عمر الشبكة مع تقليل من استهلاك الطاقة بشكل طفيف.

المؤلفون في [14] أشاروا إلى إنشاء وظيفة غرضية تستخدم عملية كفاءة الطاقة وتعتمد على مقياس مركب (الطاقة المتبقية بالعقدة ومؤشر تفريغ البطارية وعدد الإرسال المتوقع ETX) أدت هذه الأعمال إلى تحسين عمر الشبكة وتقليل من استهلاك الطاقة.

في حين تناولت الورقة البحثية [16] عملية تصميم تابع وظيفي مركب يعتمد على ثلاثة مقاييس في عملية اختيار العقد الأب الأفضل وذلك عن طريق اختيار مجموعة من العقد المرشحة لتصبح عقدة أب بالاعتماد على مقياس قوة الإشارة المستقبلية (RSSI) والتي تكون ضمن عتبة معينة ثم يتم اختيار العقدة الأفضل بالاعتماد على مقياس عدد الإرسال المتوقع (ETX) وكمية الطاقة المتبقية أظهرت النتائج تحسن في عملية تسليم الرزم (PDR) والتقليل من زمن تأخر زمن الوصول البيانات (Latency) .

9. المقياس المقترح الجديد (HU_DLQ) لتحسين التوجيه وموازنة الحمل:

من أجل تحسين أداء التوجيه وحل مشكلة توزيع الحمل داخل عقد الشبكة تم اقتراح مقياس جديد يأخذ بعين الاعتبار كل من المقاييس التالية (حالة الطاقة المتبقية للعقد، مقياس جديد يسمى معدل تمرير الرزم، المقياس (ETX) ، وعدد القفزات ومتوسط طول المسار ويمكن حساب المقاييس المستخدمة في المقياس المقترح بالشكل التالي:

✓ **الطاقة المتبقية (Residual Energy):** يتم حساب الطاقة المتبقية للعقدة المرشحة حتى تكون عقدة أب بالعلاقة رقم (2) [7] [1]:

$$E_{res}(n) = E_{ini}(n) - E_{cons}(n) \quad (2)$$

حيث:

E_{res} : يشير إلى الطاقة المتبقية للعقدة (n).

E_{ini} : يشير إلى الطاقة الابتدائية للعقدة (n).

E_{cons} : يشير إلى كمية الطاقة المستهلكة للعقدة (n).

✓ **معدل تمرير الرزم (packet forwarding ratio):**

لضمان توازن الحمل بين عقد الشبكة وعدم اختيار عقد ذات حمل عالي تشكل نقاط ساخنة داخل الشبكة وتؤدي إلى تدمير البيانات وزيادة كمية إعادة الإرسال واستنزاف طاقة العقدة بشكل كبير، تم اقتراح مقياس جديد يسمى معدل تمرير الرزم داخل العقدة ويقصد به كمية الرسائل التي تقوم باستقبالها عقدة ما وتقوم بإعادة تمرير هذه الرزم إلى عقدة أخرى ذات مستوى أعلى داخل الشبكة حيث تكون هذه العقدة مشغولة دائماً بعملية استقبال وتمرير رزم البيانات طوال الوقت ويمكن حساب معدل تمرير الرزم للعقدة المرشحة كعقدة أب خلال فترة زمنية معينة بالعلاقة المقترحة رقم (3).

$$packet\ forwarding = (\sum packet_{recv} - \sum packet_{send}) / 100 \quad (3)$$

$packet_{send}$: يشير كمية البيانات المرسله من قبل العقدة نفسها والتي تم تحسبها.

$packet_{recv}$: يشير إلى كمية البيانات المستقبلية من قبل العقدة التي تشكل أبناء لهذه العقدة.

✓ **عدد الإرسال المتوقع (ETX):** من أجل جودة عالية للروابط وتجنب فقدان الطرود، يتم حساب عدد الإرسال المتوقع بالعلاقة [16] (4).

$$ETX = \frac{1}{dF * dR} \quad (4)$$

حيث:

df: تمثل نسبة التسليم وتعرف احتمال الطرود الواردة الناجحة من المصدر إلى الوجهة.

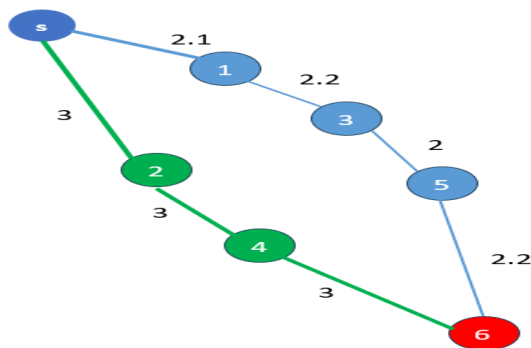
dr: تمثل نسبة التسليم العكسي وهو احتمال الإقرار الوارد الناجح من الوجهة إلى المصدر.

✓ **عدد القفزات (Hop):** يتم حساب عدد القفزات التي تسلكها رسالة ال (DIO) حتى الوصول للعقدة التي يتم حساب تكلفة مسارها، حيث يتم زيادة عدد القفزات بمقدار (1) عند كل عقدة تسلكها رسالة ال (DIO).

✓ **متوسط تكلفة المسار (Average Path Cost):** نقوم بحساب متوسط تكلفة المسار وذلك عند تساوي مسارين لهما نفس التكلفة ولكن أحد المسارات يحوي على مسارات جزئية تحوي على ضياعات عالية ويمكن حساب متوسط طول المسار وذلك بتقسيم تكلفة المسار على عدد القفزات التي تشكل هذا المسار كما بالعلاقة رقم (5)[18].

$$Average_{path_{cost}} = \frac{path_{cost}}{hop_{count}} \quad (5)$$

بفرض لدينا المساريين في الطوبولوجيا كما يوضح الشكل (3) وتحتاج العقدة (6) حساب تكلفة مسارها فيكون تكلفة المسارات:



الشكل رقم (3) طوبولوجيا شبكة ذات مسارات متساوية.

- $P1_{pathCost} = 2.1 + 2.2 + 2 + 2.2 = 9$
- $P2_{pathCost} = 3 + 3 + 3 = 9$

نلاحظ تساوي قيم المسارات للعقدة رقم (6) مع العلم أن المسار الأول (p1) أفضل من المسار الثاني (p2) حيث المسار الثاني يحوي على وصلات جزئية تحوي ضياعات أكثر فعند هذه الحالة نقوم بحساب متوسط طول المسار فيكون:

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

- $P1_cost=9/4=2.3$
- $P2_cost=9/3=3$

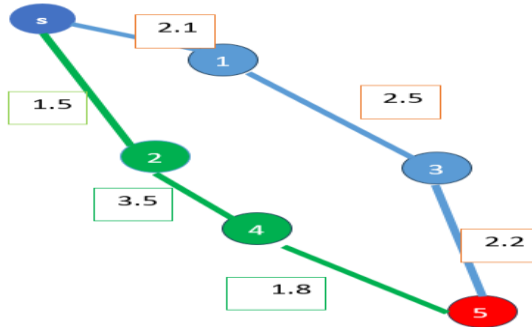
فنقوم باختيار المسار ذو المتوسط الأقل وهو (p1).

✓ **معامل تخفيف للمسارات (Setamol):** يقوم هذا المعامل بعملية مراقبة وكشف التغيرات العالية التي تطرأ على المسارات الجزئية والتي تشكل عنق زجاجة داخل المسار، حيث نقوم بالرجوع إلى هذا المعامل في حالة عند تساوي متوسط تكلفة المسارات حيث نختار المسار الذي يحوي قيمة أعلى من المسار الآخر وعند تساوي قيم هذا المعامل مع المسار الآخر نختار أحد المسارات، ونقوم بحساب قيم المتحول بالعلاقة المقترحة رقم (6).

معامل التخفيف (Setamol) = (تكلفة المسار الجزئي للعقدة) - (تكلفة المسار الجزئي القادم إلى هذه

العقدة) (6)

بفرض لدينا الطوبولوجيا كما يوضح الشكل (4) وتحتاج العقدة (5) حساب تكلفة مسارها



الشكل (4) يبين طوبولوجيا شبكة ذات معدل مسارات متساوي

- ✓ $P1_cost=2.1+2.5+2.2=6.8$
- ✓ $P2_cost=1.5+3.5+1.8=6.8$

نلاحظ تساوي تكلفة المسارات نقوم عندها بحساب متوسط طول المسار فيكون:

- ✓ $P1_cost=6.8/3=2.2$
- ✓ $P2_cost=6.8/3=2.2$

عند هذه الحالة نلاحظ تساوي متوسط تكلفة المسارات فنقوم بالرجوع إلى معامل تخفيف المسار من أجل اختيار المسار الأفضل حيث نلاحظ أن المسار الثاني يحوي على مسار جزئي بين العقدة (3 و 4) يشكل عنق زجاجة، فنقوم بحساب معامل تخفيف المسار:

- ✓ $P1_setamol=(2.2-(2.5-(2.1-0)))=1.9$
 - ✓ $P2_setamol=(1.8-(3.5-(1.5-0)))=-1.2$
- Best_path=max(p1_setamol,p2_setamol)=p1

نلاحظ أن قيمة المسار (p1) أعلى من قيمة المسار (p2) عندها نختار المسار الأفضل وهو P1

10. توصيف خطوات المقياس (HU_DLQ):

يمكن توصيف خطوات الأساسية للمقياس الجديد كما يلي:

1. يبدأ جذر الشبكة (node sink) ببث رسائل (DIO) بشكل دوري إلى جميع العقد المجاورة وذلك من أجل تشكيل المسارات الهابطة وتحتوي هذه الرسالة على المقاييس التي تم اقتراحها من حيث طاقة العقدة ومعدل تمرير الرزم والمقياس ETX وعدد الففقات.
2. تتعرف كل عقدة على العقد المجاورة لها وعلى جذر الشبكة من خلال رسائل DIO التي تم استقبالها دورياً ويتم قراءة وتحديث معلومات هذه الرسالة مثل (مقدار الطاقة المتبقية للعقدة، المقياس ETX، معدل تمرير الرزم للعقدة وعدد الففقات) وبعدها يتم حساب رتبة العقدة، وإعادة بث هذه الرسالة من جديد للعقد المجاورة.
3. تقوم العقدة بحساب رتيبها بالاعتماد على العلاقة (7،8،9) وذلك من أجل أخذ موقعها وعدم تشكيل حلقات داخل طوبولوجيا الشبكة وبعدها تقوم بإنشاء مجموعة من الآباء المرشحين من العقد المجاورة وذلك من أجل تشكيل مسارات صاعدة إلى عقدة الجذر [8].

$$RANK(N) = RANK(PN) + RankIncrease \quad (7)$$

$$RankIncrease = MinHopRankIncrease * step \quad (8)$$

$$Step = \alpha_1 * ETX(N, PN) + \alpha_2 * fw_ratio \quad (9)$$

$$\alpha_i \in R^+, i \in \{1,2\} \text{ and } \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$$

حيث:

$RANK(N)$: يشير إلى رتبة عقدة المرسل.

$RANK(PN)$: يشير إلى رتبة العقدة الأب.

$Min_Hop_Rank_Increase$: يشير إلى مقدار الحد الأدنى للزيادة في الرتبة والقيمة الافتراضية هي (256).

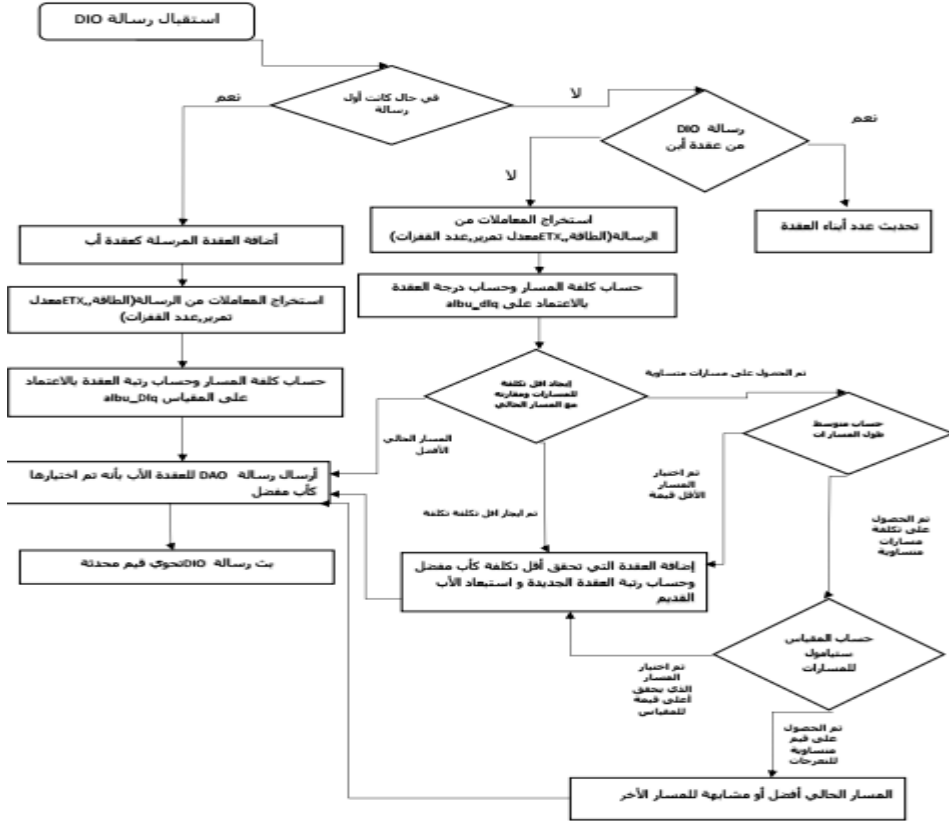
$Step$: يشير إلى مقدار الخطوة في زيادة الرتبة.

α_i : يشير إلى مقدار التتبع في الزيادة بقيم مجموعها يساوي (1).

4. تقوم كل عقدة بعملية حساب تكلفة المسارات الصاعدة وذلك من أجل اختيار عقدة أب من بين مجموعة من الآباء المرشحين واختيار المسار الذي يحقق أقل تكلفة اعتماداً على المقاييس التي تم ذكرها سابقاً وذلك بالاعتماد على أقل قيمة للمقياس ETX وأقل قيمة لمعدل تمرير الرزم وكمية طاقة متبقية ضمن عتبة معينة.

5. في حال تساوي تكلفة المسارات لعقدتين أب يتم أخذ متوسط تكلفة المسار الأدنى وذلك عن طريق تقسيم تكلفة المسار على العدد القفزات القادم منها هذا المسار وذلك من أجل اختيار المسار الذي لا يحوي أي وصلات جزئية تحتوي على ضياعات عالية.
6. في حال تساوي متوسط طول المسار لعقدتين مرشحتين يتم اختيار المسار الذي يحوي القيمة الأعلى لمعامل تخفيف التعرجات للمسار (Setamol).
7. بعد عملية اختيار عقدة الأب، ستتم إعادة توجيه البيانات إلى العقدة الأب الأفضل ويتم إرسال رسالة من نوع (DAO) للعقدة التي تم اختيارها وانتظار رسالة (ACK).
8. تلقي طرد إقرار بالاستلام (Ack) من طبقة MAC، تعني أن الطرد تم استلامه بنجاح بواسطة العقدة الأب.
9. إذا لم يتم تلق أي إقرار بالاستلام من طبقة MAC، هذا يعني أن الطرد قد ضاعت ويجب إعادة تكرار العملية بالانتقال مرة أخرى إلى الخطوة 2.

❖ المخطط الصندوقي لطريقة عمل المقياس المقترح:



11.مقاييس الأداء:

في هذا البحث استخدمنا خمسة مقاييس أداء قياسية وذلك من أجل تقييم أداء جودة اختيار المسار داخل البروتوكول (RPL) في الخوارزمية المقترحة، وهذه المقاييس هي:

✓ وقت تقارب الشبكة (Network Convergence Time):

تحتاج العقد في شبكة انترنت الاشياء إلى تشكيل طوبولوجيا من أجل التواصل بين العقد. لذلك فإن وقت إعداد الشبكة هو مقياس حاسم يجب تقييمه لأي بروتوكول توجيه، يتم تعريف وقت التقارب في (RPL DAG) على أنه مقدار الوقت الذي تحتاجه جميع العقد التي يمكن الوصول إليها (من حيث الراديو) في الشبكة للانضمام إلى طوبولوجيا (DAG). يجب اعتبار هذا التقارب بمثابة وقت التقارب الأولي في شبكة RPL ذات العقد الثابتة من أجل الحصول على وقت التقارب في شبكة RPL، نحدد وقت إرسال DIO الأول من عقد العميل وانضمام DIO الأخير إلى DAG.

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

يتم الحصول على وقت التقارب عن طريق طرح وقت انضمام DIO الأخير من وقت إرسال DIO الأول إلى DAG كما بالعلاقة رقم (10) [10].

$$\text{Convergence}_{\text{Time}} = (\text{Last_DIO_Join_DAG}) - (\text{First}_{\text{DIO}}_{\text{Send}}) \quad (10)$$

✓ حمل رسائل التحكم (Control Traffic Overhead) للشبكة:

يشمل هذه المقياس على رسائل DIO و DIS و DAO التي يتم إنشاؤها بواسطة كل عقدة، ومن الضروري حصر مقياس الحمل مع مراعاة الموارد النادرة في شبكات (LLN)، يتحكم بروتوكول (RPL) في رسائل التحكم الزائدة عن الحاجة من خلال استخدام مؤقتات التدفق. الهدف من هذا المقياس هو تحليل حمل الخوارزمية المقترحة المذكورة في استخدام موارد العقدة ويمكن حساب حمل رسائل التحكم عن طريق العلاقة رقم (11) [10]:

$$\text{control_traffic_overhead} = \sum_{i=1}^n \text{DIO}(I) + \sum_{i=1}^m \text{DIS}(k) + \sum_{i=1}^z \text{DAO}(i) \quad (11)$$

✓ استهلاك الطاقة (Energy Consumption):

من أجل حساب استهلاك الطاقة سوف نستخدم آلية نظام Power trace المتاحة في نظام التشغيل (ContikiOS) وهو نظام لتحديد ملامح الطاقة على مستوى الشبكة للشبكات اللاسلكية منخفضة الطاقة التي تقدر استهلاك الطاقة لوحدة المعالجة المركزية ونقل الحزم والاستماع. تحتفظ هذه الآلية بجدول للمدة الزمنية التي كان فيها مكون مثل وحدة المعالجة المركزية وجهاز الإرسال اللاسلكي قيد التشغيل. بناءً على هذا الحساب، يتم حساب الطاقة المستهلكة بالميلي واط عن طريق العلاقة رقم (12,13) حيث فولت التغذية (3 فولت) كما يلي [1][13]:

$$\text{power(mW)} = \text{Current} * \text{voltage} \quad (12)$$

ومن أجل حساب التيار المستهلك نستخدم العلاقة رقم (13) [7][13].

$$\text{Current} = \frac{tx * \text{current}_{tx} + Rx * \text{current}_{rx} + \text{Cpu} * \text{Current}_{cpu} + \text{Cpu}_{idel} * \text{Current}_{cpuidel}}{\text{Rtimer_ARCH_Second}} \quad (13)$$

حيث قيم:

TX: زمن تشغيل المرسل الراديوي في العقدة بوحدة أجزاء الساعة (نبضة).

RX: زمن تشغيل المستقبل الراديوي في العقدة بوحدة أجزاء الساعة (نبضة).

CPU: زمن تشغيل وحدة المعالجة المركزية بوحدة أجزاء الساعة (نبضة).

cpu_{idel}: زمن تشغيل وحدة المعالجة المركزية في وضع الطاقة المنخفض بوحدة أجزاء الساعة (نبضة).

Rtimer_ARCH_Second: وهو عدد نبضات المعالج في الثانية الواحدة (32768 نبضة).

نُبين في الجدول رقم (1) قيم التيارات المأخوذة من النشرة التعريفية للعقدة (Sky Mote) [15] وهي كما يلي:

الجدول (1) قيم التيارات المأخوذة من النشرة التعريفية للعقدة.

نوع الوحدة	كمية الاستهلاك
$current_{cpu}$	1.8 Ma
$current_{rx}$	21.8 Ma
$current_{tx}$	19.5 mA
$current_{idel}$	54.5 μ A

✓ زمن تأخر وصول الحزمة (Packet Latency):

يتم تعريف زمن تأخر وصول الحزمة بأنه مقدار الوقت الذي تستغرقه حزمة البيانات المرسلّة من عقدة ما للوصول إلى العقدة الهدف أو عقدة مصب الشبكة (Sink Node) حيث نقوم بحساب متوسط زمن الوصول لجميع حزم البيانات في الشبكة من جميع العقد إلى عقدة الجذر [13] ويتم حساب قيمة المقياس عن طريق العلاقة رقم (14) وحساب معدل زمن وصول الحزمة بالعلاقة (15) [9] [10].

$$Total_Latency = \sum_{i=1}^n (recv_time(i) - send_time(i)) \quad (14)$$

$$Averagy_Latency = Total_Latency / Total_{packets_received} \quad (15)$$

حيث (n) هو العدد الإجمالي للحزم المستلمة بنجاح. يتم توفير معلومات التوقيت حساب متوسط زمن حيث الوصول نقسم إجمالي زمن الوصول من المعادلة (14) على إجمالي عدد الحزم المستلمة في عقدة الجذر كما تبين العلاقة رقم (15).

✓ متوسط معدل تسليم الحزمة (PDR Average):

ويتم تعريفه على أنه عدد الحزم المستلمة في عقدة مصب الشبكة (sink node) إلى عدد الحزم المرسلّة إلى مصب الشبكة من بقية العقد [9] حيث نقوم بأخذ متوسط قيمة (PDR) لجميع الحزم التي تم استلامها بنجاح في عقدة المصب (Sink) ولحساب متوسط نسبة تسليم الحزمة (PDR)، نقيس عدد الحزم المرسلّة من جميع العقد إلى عقدة المصب (Sink) ونقسمها على عدد الحزم المستلمة بنجاح في عقدة المصب (Sink) كما تبين بالعلاقة رقم (16) [7] [10].

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

$$\text{Average PDR} = \left(\frac{\text{Total}_{\text{packet}_{\text{received}}}}{\text{Total}_{\text{packet}_{\text{send}}}} \right) * 100 \quad (16)$$

12. القسم العملي:

تركز معظم الأبحاث على المحاكاة بدلاً من التجارب وذلك بسبب توفر العتاد البرمجي وسهولة الوصول إليه، على الرغم من أن التقييم المعتمد على عمليات المحاكاة لا يعكس الواقع لأنه لا يأخذ بعين الاعتبار مجموعة من القيود مثل تغير المناخ والعوائق الطبيعية والتفاعلات البشرية ولكنه الخيار الوحيد المتوفر في كثير من الأحيان للطلبة والباحثين.

✓ نظام التشغيل (ContikiOS):

يعتبر نظام التشغيل (ContikiOS) والذي تم تطويره من قبل المعهد السويدي لعلوم الكمبيوتر البرنامج المستخدم على نطاق واسع في شبكات IoT وWSN وذلك لأنه مفتوح المصدر وهو نظام التشغيل الأكثر استخداماً في مجال الأبحاث الخاصة بشبكات الحساسات اللاسلكية وشبكات انترنت الأشياء كما يستخدم (Contiki) في العديد من الأنظمة، مثل المراقبة الصناعية وأنظمة الإنذار ومراقبة المنزل عن بعد ومراقبة الإشعاعات. يؤمن نظام التشغيل (ContikiOS) والمكتوب بلغة البرمجة (C) التي تتميز بسرعة تنفيذها للأوامر حلاً للمتحكمات صغيرة الحجم والمنخفضة الكلفة والطاقة إمكانية الاتصال بالإنترنت، كما يُستخدم نظام التشغيل (Contiki) عدة أنواع من المعالجات مثل سلسلة (Atmel ، Atmega ، Texas Instruments) كما أنه يدعم كل من بروتوكول عنونة الشبكة IPv4 و IPv6 ، كما يدعم عدة مقاييس حديثة لاسلكية موفرة للطاقة مثل بروتوكول (RPL) وشبكات (LowPan6) ويدعم أيضاً تقنية (Rime Stack) وهي تقنية لتخفيف حمل طبقات الاتصالات على شبكات الحساسات، حيث تحوي طبقات أقل من طبقات الاتصالات التقليدية الموصّفة ببروتوكول TCP/IP وتكون الطبقات فيها أبسط وذات ترويسة أصغر ببضعة بايتات [19].

✓ محاكي الشبكات (COOJA):

سوف نستخدم محاكي الشبكات (COOJA) وذلك بسبب كونه المحاكى الأكثر استخداماً في الأبحاث وأجراء التجارب في شبكات منخفضة الطاقة بنسبة تصل إلى (61%) [20] وهو محاكي قائم على لغة (java) ويعتمد على نظام التشغيل (ContikiOS) بشكل أساسي ويمكن اعتباره أداة هجينة تُستخدم كأداة محاكاة للعقد الافتراضية (Simulator) وأداة محاكاة للأجهزة الحقيقية

(Emulator) بمعنى آخر أن أدائه أقرب للواقع لأنه يقوم بتشغيل حقيقي للأجهزة الموجودة في الشبكة مما يجعل النتائج التي نحصل عليها دقيقة أكثر وتحاكي الواقع [21].
✓ تهيئة الشبكة:

في هذه التجارب سوف نستخدم عقد من نوع (Sky mote) والتي تتميز بمعدل نقل عالي للبيانات (250kb/s) وذاكرة وصول عشوائي تقدر (10kb)، قمنا بأثناء مجموعة من الملفات كما قمنا بالتعديل على بعض هذه الملفات بالبروتوكول (RPL) وإضافة توابع جديدة على الملفات ومن هذه الملفات نذكر:

(rpl.h, rpl-icmp6.c, rpl-conf.h, HU_DLQ.C, energest.c, rpldag.c, uip6.c)

ولإجراء التجارب قمنا باستخدام طوبولوجيا عشوائية ومنتظمة مؤلفة من نموذج تطبيق UDP Contiki يتألف من ملفين الملف (udp-client.c) وهو الملف الذي تم تنزيله على جميع عقد الشبكة (client node) بحيث تقوم العقدة (client node) بإرسال رسالة نصية ضمن فاصل زمني محدد إلى موجه الشبكة أو جذر الشبكة (DODAG ROOT) والذي يحوي على الملف (udpsrvr.c) عند وصول المعلومات المرسل من عقدة الزبائن (client node) يقوم موجه الشبكة بإعلام العقدة التي تم استلام المعلومات منها بأن المعلومات تم استلامها بشكل صحيح ومن أجل اختبار الخوارزمية المقترحة تم إجراء التجارب على شبكات مختلفة الكثافة :

✓ منخفضة الكثافة (20 عقد).

✓ متوسطة الكثافة (40 عقدة).

✓ عالية الكثافة (60 عقدة).

ولإدخال الضياع في الوسط اللاسلكي استخدمنا النموذج (UDGM) والذي يعرف الضياع بناء على المسافات النسبية بين العقد في الوسط الراديوي [10] ، 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 تُعرف بأنها نسبة نجاح استقبال الطرود عند المستقبل على نسبة (RX 80%)، وتشير إلى الضياع في الوسط اللاسلكي، كما تم تحديد نطاق الإرسال على 30 متر ونطاق التداخل على 50 متر، تم استخدام كل من التطبيق الملحق مع المحاكي (Cooja) المسمى (Contiki Simulation Script Editor) لقياس وقت المحاكاة

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

وإيقاف المحاكاة بعد الوقت المحدد، ينشئ هذا البرنامج المساعد ملف سجل (COOJA_log file) لجميع مخرجات المحاكاة والتي سنقوم بتحليلها في نهاية المحاكاة باستخدام برنامج نصي مكتوب بلغة (Perl) وباستخدام برنامج (MS Excel) نقوم برسم المخططات البيانية. قمنا بتشغيل المحاكاة لمدة (40) دقيقة لكل سيناريو وتم إعادته لمدة أربع مرات وأخذ متوسط النتائج، يوضح الجدول رقم (2) المعاملات المستخدمة في التجارب المختلفة [10].

جدول رقم (2) ضبط بارامترات التجارب

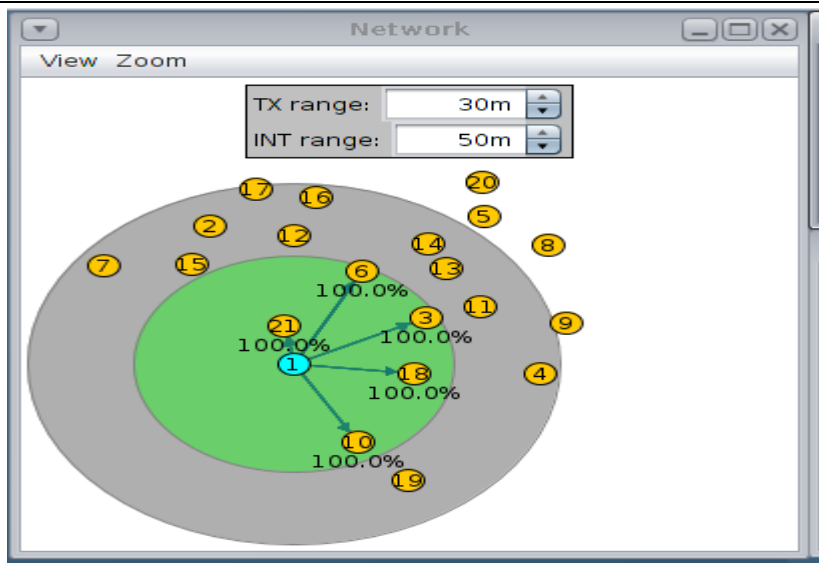
Parameters	Description
No of Nodes	20,40,60
Simulation Model	UDGM (Unit Disk Graph Model)
Simulation time	40 Mins.
Data Rate	250kps
Node Arrangement Random	Random, Grid
Operating System	Contiki2.7
Simulator	Cooja
OF	OF_0MORHF_ETX, HU_DLQ_OF
DIO Min	12
DIO Doublings	8
Radio Duty-Cycling Interval	16HZ
RX Ratio	80%
TX Ratio	100%
TX Range	30m
Interference Range	50m
Packet Analyzer	Perl code

13. النتائج ومناقشتها:

قمنا في هذه السيناريو بتقييم أداء المقياس المقترح الجديد مع الوظائف الغرضية الأساسية (OF_0,MORHF_ETX) وذلك من أجل عدد عقد مختلف (20,40,60) مع طوبولوجيا عشوائية النتائج:

✓ السيناريو الأول:

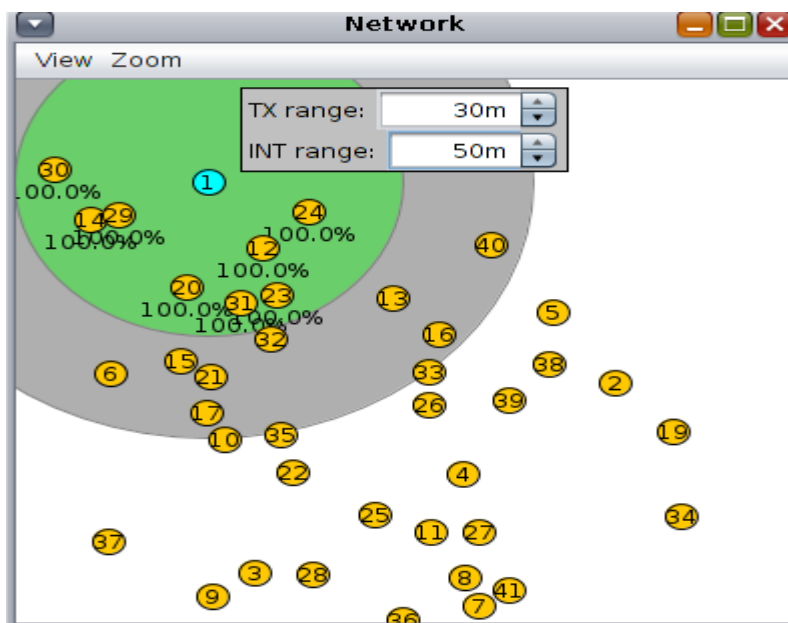
في هذا السيناريو قمنا بمقارنة الأداء من أجل عدد عقد منخفض (20عقد) مع توزيع عشوائي كما يوضح الشكل (5) بعدها قمنا بتسجيل النتائج من أجل تحليلها باستخدام مقياس الأداء.



الشكل رقم (5) يبين توزع العقد العشوائي (20 عقد)

✓ السيناريو الثاني:

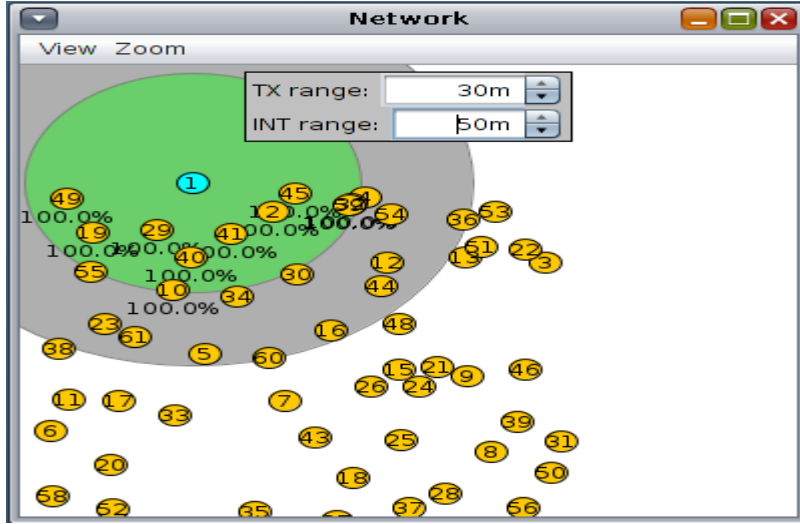
قمنا بهذه السيناريو بزيادة عدد العقد من أجل كثافة متوسطة (40 عقدة) وتوزع عشوائي كما يبين الشكل (6) وبعد الانتهاء قمنا بتسجيل النتائج من أجل تحليلها باستخدام مقاييس الأداء.



الشكل رقم (6) توزع العقد العشوائي (40 عقدة).

✓ السيناريو الثالث:

قمنا بإعادة السيناريو مع زيادة عدد العقد من أجل كثافة مرتفعة (60 عقدة) وتوزع عشوائي كما يبين الشكل (4) وذلك من أجل زيادة كثافة الرسائل المتناقلة بين العقد وبعد الانتهاء، قمنا بتسجيل النتائج من أجل تحليلها باستخدام مقاييس الأداء.



الشكل رقم(6) توزع العقد المنتظم والعشوائي (60عقدة).

14. مناقشة النتائج:

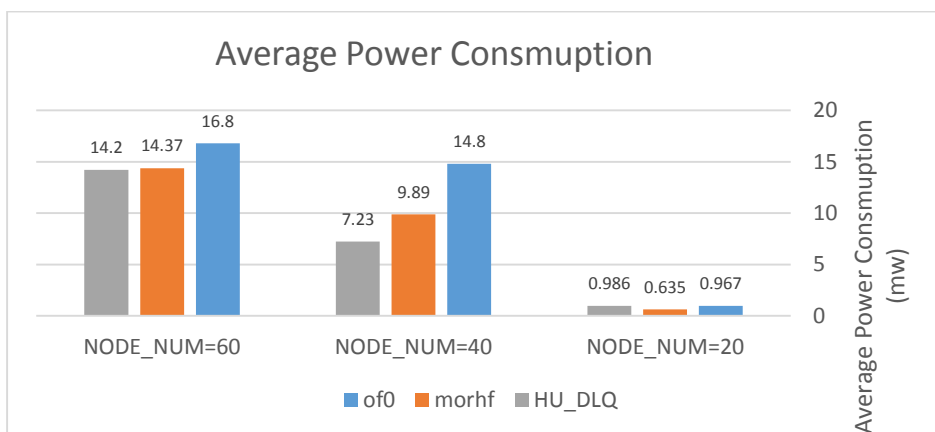
✓ معدل استهلاك الطاقة:

تم تحليل النتائج وتسجيل قيم معدل استهلاك الطاقة كما يبين الجدول (2) والشكل رقم (7). بالنسبة لمقياس معدل استهلاك الطاقة كانت كمية استهلاك الطاقة كما يوضح الشكل رقم(7) نلاحظ بالنسبة للمقياس الجديد كانت كمية استهلاك أكبر من المقياس (MORHF_ETX,OF_0) من أجل عدد عقد (20) عقدة وسبب هذه الزيادة هي اعتماد الخوارزمية المقترحة على أكثر من عملية مقارنة واستدعاء توابع وتعريف متحولات جديد مما يزيد في عملية استهلاك طاقة معالج العقدة بكمية ضئيلة، إما عند زيادة عدد العقد (40عقدة وأكثر) نلاحظ تفوق المقياس المقترح في عملية التقليل من استهلاك الطاقة وذلك بسبب اختيار مسارات ذات وثوقية عالية وتحوي معدل تمرير رزم اقل كما أن زيادة كثافة الشبكة يؤدي إلى عمل مقياس متوسط طول المسار بشكل أكبر من الشبكات متوسطة

الكثافة مما يخفض من عملية اختيار وصلات ذات معدل ضياع عالي ويخفف هذا النهج عملية إعادة ارسال البيانات وتأخيرها وتقليل من عملية استهلاك الطاقة .

الجدول رقم(2) معدل استهلاك الطاقة

HU_DLQ	morhf	of0	Average Power Consumption (mw)
0.986	0.635	0.967	NODE_NUM=20
7.23	9.89	14.8	NODE_NUM=40
12.2	14.37	16.8	NODE_NUM=60



الشكل رقم (7) يوضح معدل استهلاك الطاقة لجميع العقد.

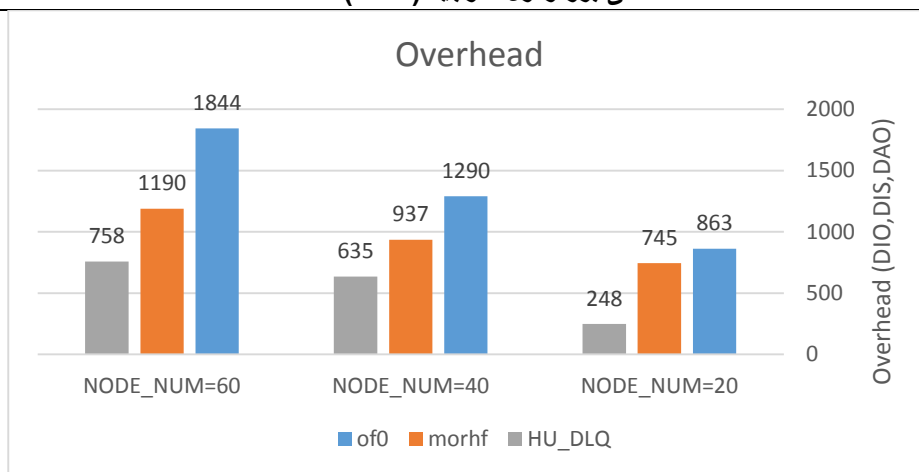
✓ مقياس حمل رسائل التحكم:

بالنسبة لمقياس حمل رسائل التحكم، كانت النتائج كما يبين الشكل (8) والجدول رقم(3) نلاحظ تفوق المقياس الجديد في تقليل من عدد رسائل التحكم (DIS,DIO,DAO) وذلك من أجل عدد عقد مختلف وتوزع عشوائي وذلك يعود بسبب اختيار المقياس مسارات أكثر وثوقيه واختيارها عقدة ذات طاقة كبيرة وتجاوز العقد ذات حركة البيانات الكثيفة والطاقة المنخفضة والتي تؤدي إلى خروج بعض العقد عن الخدمة بسبب نفاذ طاقتها وزيادة عدد رسائل التحكم بسبب تغير الطوبولوجيا الدائم.

الجدول رقم(3)

HU_DLQ	MORHF	OF0	OVERHEAD (DIO,DIS,DAO)
248	745	863	NODE_NUM=20
635	937	1290	NODE_NUM=40
758	1190	1844	NODE_NUM=60

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)



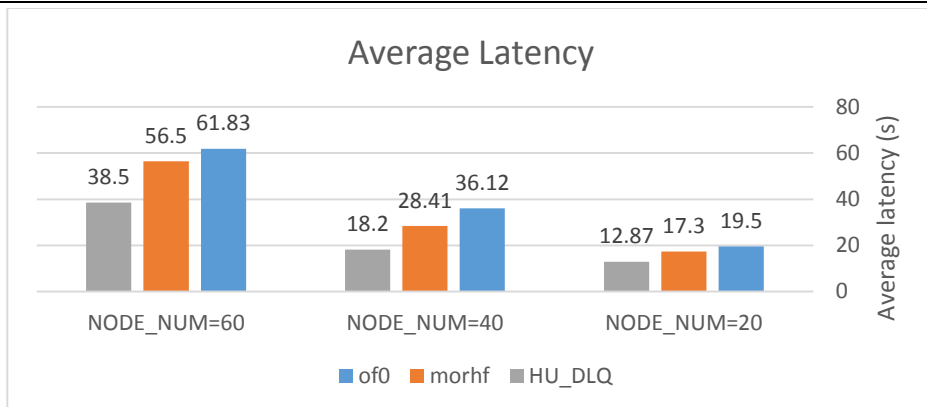
الشكل رقم (8) يبين حمل رسائل التحكم.

✓ متوسط تأخر الرزم:

بالنسبة لمقياس متوسط معدل تأخر الرزم كانت النتائج كما يبين الشكل (9) والجدول رقم (4)، نلاحظ تفوق المقياس المقترح في التقليل من معدل زمن التأخير في عملية تسليم البيانات وذلك من أجل عدد عقد كبير أكبر من (20 عقدة) ، وذلك يعود إلى تجاوز العقد ذات معدل تمرير الرسائل العالي والذي يزيد من زمن انتظار الرسائل في ذاكرة العقدة حتى وصولها إلى العقدة الجذر، كما أن عملية اختيار مسارات لا تحوي على ضياعات عالية وذلك عن طريق أخذ متوسط طول المسار تؤدي إلى تقليل من زمن الوصول الرسائل إلى العقد الجذر.

الجدول رقم (4) متوسط تأخر الرزم

<i>HU_DLQ</i>	<i>morhf</i>	<i>of0</i>	<i>Average latency (s)</i>
12.87	17.3	19.5	NODE_NUM=20
14.2	28.41	36.12	NODE_NUM=40
26.5	56.5	61.83	NODE_NUM=60



الشكل رقم (9) يبين متوسط معدل تأخر الرزم.

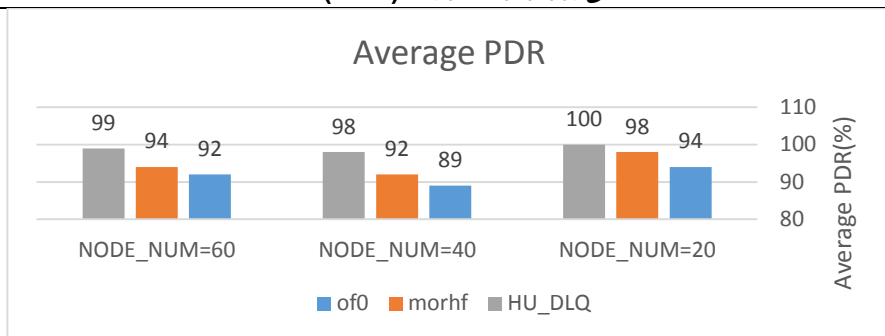
✓ مقياس متوسط تسليم الرزم:

بالنسبة لمقياس متوسط تسليم الرزم كانت النتائج كما يبين الشكل (10) والجدول رقم (5)، نلاحظ تفوق المقياس الجديد في عملية تسليم الرزم بالمقارنة مع كل الوظائف الغرضية (OF_0, MORHF_ETX) وذلك من أجل عدد عقد مختلفة وذلك بسبب وثوقيه اختيار المسارات وتجاوز المسارات التي تحوي نقاط ساخنة عن طريق مقياس معدل تمرير الرزم وتجاوز العقد التي تشكل عنق زجاجة عن طريق مقياس تخفيف المسارات (Setamol) مما يخفف من عملية ضياع الرزم

الجدول رقم (5) متوسط تسليم الرزم

HU_DLQ	MORHF	OF0	AVERAGE PDR(%100)
100	98	94	NODE_NUM=20
98	92	89	NODE_NUM=40
99	94	92	NODE_NUM=60

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)



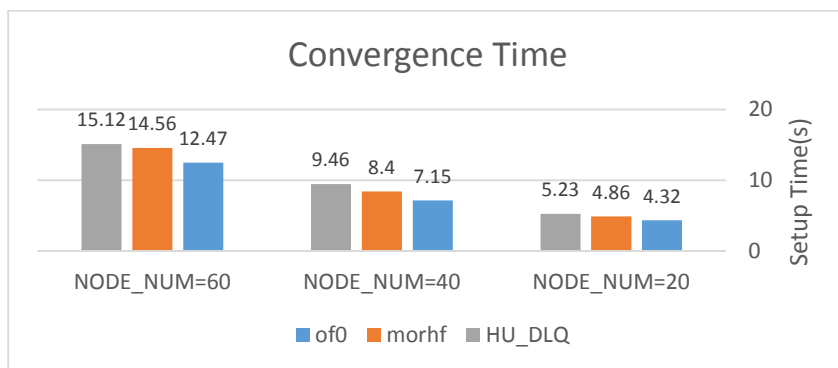
الشكل رقم (10) يوضح متوسط معدل تسليم الرزم.

✓ مقياس وقت تقارب الشبكة:

بالنسبة لمقياس وقت تقارب الشبكة كانت النتائج كما يبين الشكل (11)، نلاحظ أن المقياس الجديد يستهلك وقت أكبر بمقدار (2-3 ثانية) بالمقارنة مع الوظائف الغرضية الأساسية للبروتوكول (RPL) وذلك بالنسبة لعدد عقد مختلفة، ويرجع ذلك إلى اعتماد المقياس الجديد على عدة مقاييس داخل رسائل الانضمام إلى الطوبولوجيا الشبكة (DIO) مما يساهم ذلك في عملية زيادة في وقت التقارب داخل الشبكة بشكل كامل.

الجدول رقم (6) وقت تقارب الشبكة

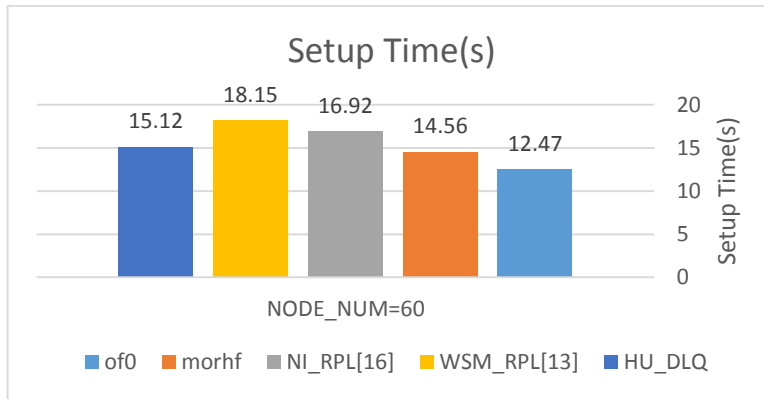
HU_DLQ	morhf	of0	Setup Time(s)
5.23	4.86	4.32	NODE_NUM=20
9.46	8.4	7.15	NODE_NUM=40
15.12	14.56	12.47	NODE_NUM=60



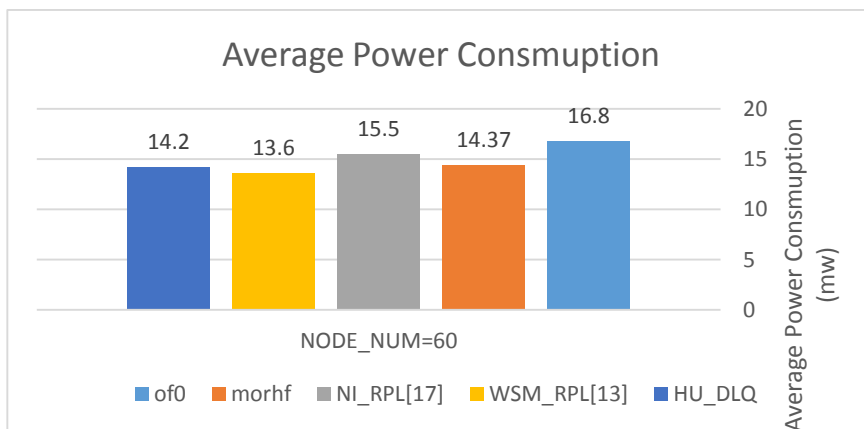
الشكل رقم (11) يبين وقت تقارب الشبكة

15. مقارنة المقياس الجديد (HU_DLQ) مع بعض الدراسات السابقة:

في هذه الفقرة قمنا بعمل مقارنة مع بعض الدراسات السابقة التي اقترحت تقنيات انشاء اتواع وظيفية ومقاييس جودة وصلة اتصال مركبة وتم قياس إدائها بنفس مقاييس الأداء المقترحة وذلك من أجل عدد عقد ثابت (60عقدة) وطوبولوجيا عشوائية، ومن هذه الاعمال الدراسة المرجعية رقم [13] التي اقترحت أنشاء تابع وظيفي مركب (WSM-OF) يعمل على موازنة الحمل داخل عقد الشبكة كما اقترحت الدراسة المرجعية رقم [16] انشاء تابع وظيفي يسمى (NI-RPL) مركب يعمل على تحسين جودة اختيار وصلات الاتصال داخل عقد الشبكة فكانت النتائج كما توضح الاشكال رقم (12,13,14,15,16)

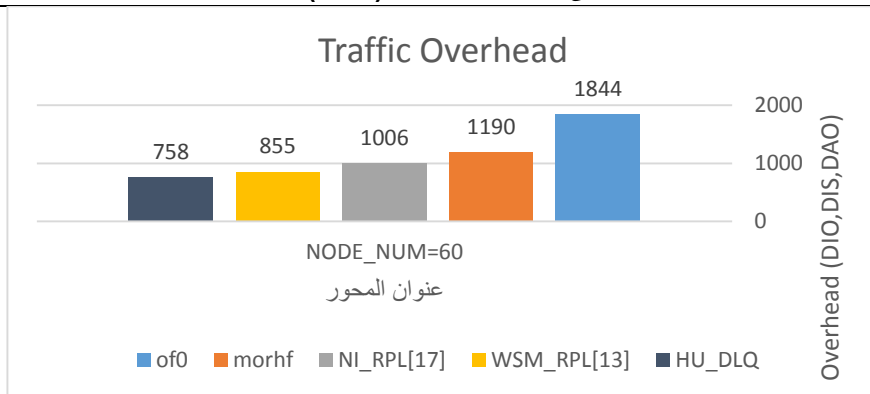


الشكل (12) يبين وقت تقارب الشبكة

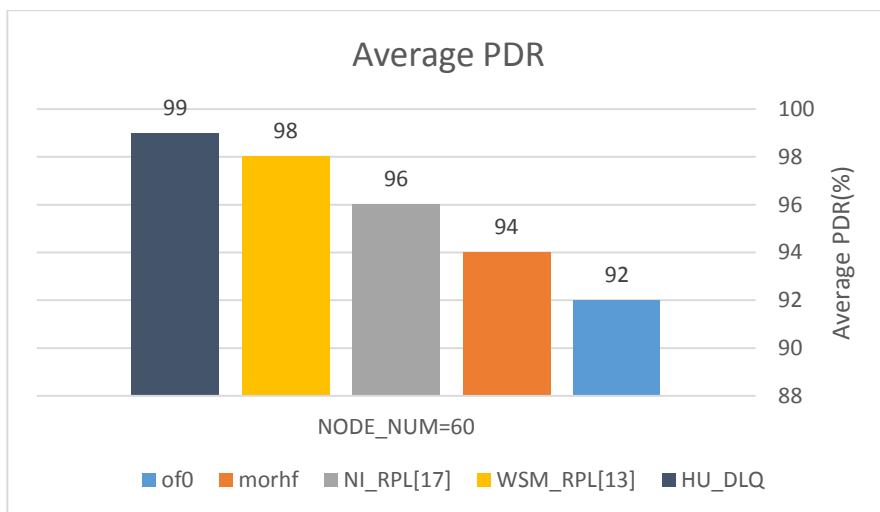


الشكل رقم (13) يوضح معدل استهلاك الطاقة (60) عقدة.

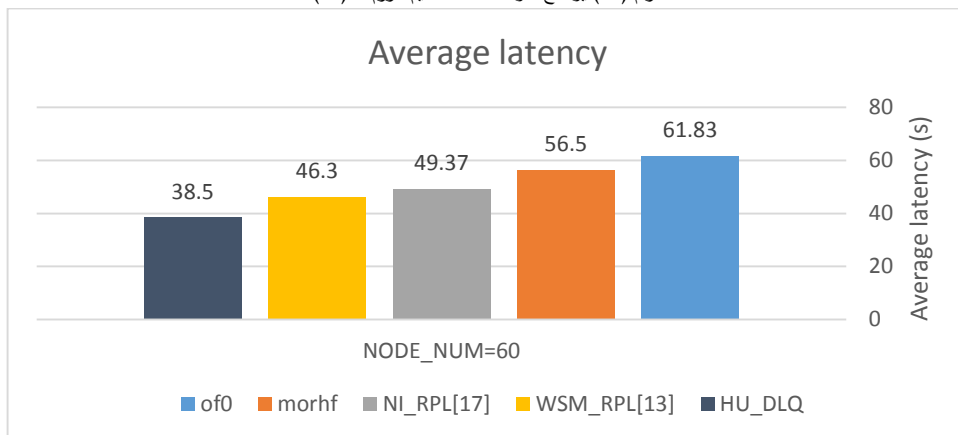
تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)



الشكل رقم (14) يبين حمل رسائل التحكم ل(60) عقدة



الشكل رقم (15) يوضح متوسط معدل تسليم الرزم ل (60) عقدة.



الشكل رقم (16) يبين متوسط معدل تأخر الرزم ل(60) عقدة

- ✓ بالنسبة لمقياس وقت تقارب الشبكة منا يبين الشكل (12) نلاحظ ان كل من التوابع الوظيفية (MORHF,OF0) اعطى قيم أفضل من التوابع الوظيفية المركبة بزمين يقدر ب (2) ثانية بشكل وسطي وذلك بسبب طبيعة تصميم هذه التوابع التي تختار مسارات الاتصال دون عملية فحص بعض المقاييس مثل (كمية الطاقة المتبقية، معدل تمرير الرزم، عدد القفزات، عدد أبناء هذه العقدة) وبالنسبة للتوابع الوظيفية المركبة (NI_RPL,WSM_RPL,HU_DLQ) فهناك تفاوت زمني بسيط وهذا بسبب اعتماد هذه التوابع الوظيفية على فحص واختيار المسارات والذي بدوره يأخذ زمن يقدر ب (ميلي ثانية)، كما نلاحظ أن المقياس المركب الجديد اعطى زمن تقارب أفضل بالمقارنة مع التوابع الوظيفية المركبة (NI-RPL,WSM_RPL) ويعود هذا الشيء الى دقة اختيار مقاييس وصلة الاتصال التي توفر في استخدام اكثر من مقياس والتي تأخذ نظرة شمولية لمسارات توجيه البيانات داخل الشبكة .
- ✓ بالنسبة لمعدل استهلاك الطاقة كما يبين الشكل (13) اعطى المقياس نتائج أفضل من حيث عملية توفير الطاقة بمقارنة مع كل من التوابع الوظيفية (MORHF,OF0,NI_RPL) ويعود ذلك التوفير في عملية اختيار مسارات ذات موثوقية عالية ولا تعاني من ازدحام مما يخفف من عملية إعادة ارسال البيانات الذي بدوره يخفف من كمية الطاقة داخل الشبكة ككل.
- ✓ بالنسبة لمقياس حمل رسائل التحكم كما يوضح الشكل (14) اعطى المقياس المقترح (HU_DLQ) أفضل النتائج في عملية التقليل من رسائل التحكم والتي تسبب زيادة استهلاك الطاقة وزيادة حركة البيانات داخل الشبكة مما يؤدي الى زيادة الضياعات وزيادة تأخر وصول رزم البيانات داخل الشبكة حيث ساعد المقياس المقترح في عملية اختيار مسارات ذات ثباتية عالية من حيث كمية الطاقة ومعدل إعادة تمرير الرزم مما يساعد في عملية التخفيف في عملية تبديلات المسارات والذي بدوره يقلل من رسائل التحكم.
- ✓ من الشكل (15) نلاحظ أن المقياس الجديد (HU_DLQ) أعطى أفضل النتائج من حيث عملية معدل تسليم الرزم داخل الشبكة وذلك بمقارنة مع بقية التوابع الوظيفية ويعود ذلك إلى سلوك المقياس في عملية تحسين تسليم البيانات والتقليل من ضياعها عن طريق اختيار المسارات الاقصر التي تحوي على أكبر كمية طاقة وأقل عدد من القفزات كما أن المقياس (متوسط تكلفة المسار) يساعد في عملية التقليل من اختيار المسارات الأطول

تصميم وتحقيق مقياس جودة وصلة اتصال جديد يحقق توازن الحمل داخل شبكات انترنت الاشياء التي تعتمد على بروتوكول التوجيه (RPL)

✓ نلاحظ من الشكل (16) أن المقياس الجديد (HU_DLQ) أعطى نتائج أفضل من حيث تأخر وصول الرزم وذلك بالمقارنة مع كل من التتابع الوظيفية (MORHF,OF0,NI_RPL,WSM_RPL) ويعود ذلك إلى تجنب المسار التي تعاني من حركة بيانات عالية مما يخفف ضياع وتأخر البيانات داخل العقد.

16. الاستنتاجات والتوصيات:

يعد التوجيه عاملاً مهماً في شبكة انترنت الأشياء لأنه ينفذ قرارات توجيه الطرود حيث أن اختيار المسارات السيئة في التوجيه يسبب المزيد من عمليات إعادة الإرسال وإهدار الموارد، بناءً على نتائج المحاكاة وتحليل الأداء نجد أن المقياس الجديد (HU_DLQ) يقدم أداءً متفوقاً بشكل عام بمقارنة مع الوظائف الغرضية الأساسية في عملية اختيار جودة وصلة الاتصال (MORHF_ETX,OF_0)، يأتي هذا التفوق من عملية اختيار المسار الأفضل بالنسبة لكمية الطاقة و معدل تمرير الرزم الأقل للعقدة الأب وبالتالي اختيار أفضل المسارات لتوجيه الطرود وتوزيع الحمل والطاقة بشكل أفضل داخل عقد الشبكة.

17. التوصيات المستقبلية:

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

1. طرح مقاييس جديدة تدخل في تصميم الخوارزمية من أجل تحسين الأداء
2. دراسة أداء الخوارزمية من أجل مقاييس مختلفة وفي سيناريوهات مختلفة مع زيادة عدد العقد.
3. دراسة وتقييم أداء الخوارزمية من أجل عقد متنقلة في الشبكة.
4. تغيير طريقة اختيار الأب المفضل عن طريق طرح خوارزمية جديدة تتبع طريقة التعلم الآلي (Machine Learning).

18. جدول الاختصارات:

Ipv6 Routing Protocol For Low-Power And Lossy Networks.	RPL	بروتوكول توجيه الشبكات المنخفضة الطاقة والتي تحتوي ضياعات
ALBAATH UNIVERSITY DYNAMIC LINK QUALITY	HU_DLQ	مقياس جودة الوصلة الديناميكي الجديد باسم جامعة حمص
Minimum Rank Hysteresis Objective Function	MORHF	الوظيفية الغرضية لاستعادة استقرار الرتبة
Expected Transmission Count	ETX	عدد الإرسال المتوقع
Internet Of Things	IOT	الإنترنت الأشياء
Low Power And Lossy Network	LNN	الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع
Objective Function	OF	تابع وظيفي
ZERO Objective Function	Of0	الوظيفة الغرضية الصفرية
Wireless Sensor Network	WSN	شبكات الحساسات اللاسلكية
Routing Over Low Power And Lossy Networks	ROLL	مجموعة عمل التوجيه عبر الشبكات منخفضة الطاقة والتي يكون فيها ضياع
Internet Engineering Task Force	IETF	فريق مهام هندسة الإنترنت
Destination Oriented Directed Acyclic Graph	DODAG	رسم بياني لا حلقي موجه إلى الوجهة
Internet Control Message Protocol	ICMPV6	بروتوكول رسائل التحكم الإصدار السادس
DODAG Information Object	DIO	رسالة المعلومات
DODAG Information Solicitation	DIS	رسالة التماس المعلومات
Destination Advertisement Object	DAO	رسالة إعلان الوجهة
Directed Acyclic Graph	DAG	رسم بياني موجه
Packet Delivery Ratio	PDR	معدل تسليم الرزم
Unit Disk Graph Model	UDGM	نموذج رسم بياني لاقتطاع القرص الوحدوي
Ipv6 Routing Protocol For Low-Power And Lossy Networks.	RPL	بروتوكول توجيه الشبكات المنخفضة الطاقة والتي تحتوي ضياعات

19.المراجع باللغة الإنكليزية:

- [1] N. Gupta, A. Pughat, and V. Sharma, 2021-A critical analysis of RPL objective functions in internet of things paradigm,” *Peer Peer Netw Appl*, vol. 14, no. 4, pp. 2187–2208, Jul. doi: 10.1007/s12083-021-01180-9.
- [2] MSP430,<https://www.ti.com/design-development/embedded-development/msp430-mcus.html>.
- [3] “rfc6550”, <http://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>.
- [4] S.-Iong. Ao, Oscar.Castillo, Craig. Douglas, D. Dagan. Feng, and Alexander. Korsunsky,2016-Routing Issues in Internet of Things,*International MultiConference of Engineers and Computer Scientists : IMECS 2016*, March.
- [5] I. Kechiche, I. Bousnina, and A. Samet, 2020-A review of RPL objective function based enhancement approaches,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, vol. 5, no. 5, pp. 201–211, doi: 10.25046/AJ050525.
- [6] M. Qasem, A. Al-Dubai, I. Romdhani, B. Ghaleb, and W. Gharibi, 2016- A new efficient objective function for routing in Internet of Things paradigm,” in *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking, CSCN 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec,doi: 10.1109/CSCN.2016.7785168.
- [7] K. Venugopal and T. G. Basavaraju,2022-ACombined Metric Objective Function for RPL Load Balancing in Internet of Things,” *International Journal of Internet of Things*, vol., no. 1, pp. 22–31, doi: 10.5923/j.ijit.20221001.02.
- [8] S. Sennan and S. Palanisamy,2017-Composite metric based energy efficient routing protocol for internet of things,” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 278–286, doi: 10.22266/ijies2017.1031.30.
- [9] S. Kuwelkar and H. G. Virani,2018-Design of an Efficient RPL Objective Function for Internet of Things Applications,[Online]. Available: www.ijacsa.thesai.org
- [10] Ali H. A performance evaluation of rpl in contiki: A cooja simulation based study. School of Computing, Blekinge Institute of Technology. 2012 Oct.
- [11] J. P. Yunis and D. Dujovne,2014-Energy efficient routing performance evaluation for LLNs using combined metrics,” in *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, IEEE, Jun. pp. 741–746. doi: 10.1109/ARGENCON.2014.6868581.
- [12] A. Hassan, S. Alshomrani, A. Altalhi, and S. Ahsan, 2016-Improved routing metrics for energy constrained interconnected devices in low-power and lossy networks, *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 3, pp. 327–332, Jun., doi: 10.1109/JCN.2016.000048.
- [13] P. S. Subramani and S. Bojan,2023-Weighted Sum Metrics – Based Load Balancing RPL Objective Function for IoT, *Annals of Emerging Technologies in Computing*, vol. 7, no. 2, pp. 35–55, Doi: 10.33166/AETiC.2023.02.004.
- [14] Mardini, K., & Abdulsamad,2023-Designing a Novel RPL Objective Function Testing RPL Objective Functions Performance (Dissertation). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-121754>
- [15] sky mote datasheet, <http://www.crew-project.eu>.
- [16] Dharmalinga,A, Latha P. Additive metric composition-based load aware reliable routing protocol for improving the quality of service in industrial internet of things. *Int. Arab J. Inf. Technol.*. 2023 Nov 1;20(6):954-64.
- [18] Sanmartin P, Rojas A, Fernandez L, Avila K, Jabba D, Valle S. Sigma routing metric for RPL protocol. *Sensors*. 2018 Apr 21;18(4):1277.

المراجع باللغة العربية:

- [19] العمر منال، 2022- تحسين أداء خوارزمية التقطير في إنترنت الأشياء، مجلة جامعة البعث سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية، المجلد 44، العدد 8، صفحة 65-92.
- [20] الكلزي طريف، 2023- تحسين زمن تبديل العقد في بروتوكول RPL ضمن نظام التشغيل Contiki، مجلة جامعة البعث سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية والكهربائية والمعلوماتية، المجلد 54، العدد 32، صفحة 73-92.
- [21] الشعار رهنف، 2020- تطوير خوارزمية لتحسين أداء التوجيه في إنترنت الأشياء، رسالة ماجستير، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية.

