

## دراسة تأثير العوامل المستخدمة في دالة الهدف لبروتوكول RPL على عمر شبكة إنترنت الأشياء وتربطها

د. اناس ليلي\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/١٤ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١١/٢٤)

□ ملخّص □

يُعدّ بروتوكول RPL بروتوكولاً معيارياً لتوجيه البيانات في شبكات إنترنت الأشياء، إذ أنه ينظّم الشبكة على شكل شجرة DODAG، وتعتمد عملية اختيار العقدة الأب على دالة الهدف (OF). ورغم مزاياه، يعاني البروتوكول من مشكلة النقاط الساخنة (Hotspot) التي تؤدي إلى استنزاف طاقة بعض العقد وموتها، مما يسبب انقسام الشبكة وفقدان تربطها.

قمنا في هذا البحث بمحاكاة بروتوكول RPL لدراسة أدائه عند استخدام ثلاث دوال هدف مختلفة وهي: أقل عدد من القفزات (MinHop)، و أكبر طاقة متبقية (MaxEnergy)، و مزيج متساوٍ بينهما (WeightedEqual) وقد أجريت التجارب باستخدام سيناريوهات متعددة تختلف في نمط نشر العقد، وموقع الجذر، والطاقة الابتدائية للعقد.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام GNU Octave أن الاعتماد المتزامن على معياري الطاقة المتبقية الأكبر وعدد القفزات الأقل في دالة الهدف كان الأكثر كفاءة، إذ أنه حافظ على توازن جيد في استهلاك الطاقة، وحقق أطول عمر للشبكة، وقلل عدد العقد المعزولة فيها.

كما بينت النتائج أن وضع الجذر في مركز شبكة إنترنت الأشياء ونشر العقد بشكل منتظم له تأثير إيجابي كبير في تعزيز تربط الشبكة وزيادة عمرها.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات إنترنت الأشياء، بروتوكول RPL، دالة الهدف، مشكلة النقاط الساخنة، GNU OCTAVE

\* مدرس - قسم النظم والشبكات الحاسوبية - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة اللاذقية - اللاذقية - سورية

البريد الإلكتروني: [inas.laila@latakia-univ.edu.sy](mailto:inas.laila@latakia-univ.edu.sy)

## Studying the impact of the factors used in the objective function of the RPL protocol on the lifetime and connectivity of the Internet of Things network

Dr.Inas Laila\*

(Received 14/10/2025 . Accepted 24/11/2025)

□ ABSTRACT □

The RPL protocol is a standard routing protocol for Internet of Things (IoT) networks, organizing the network in the form of a DODAG tree. The selection of the parent node is based on the Objective Function (OF). Despite its advantages, the protocol suffers from the Hotspot problem, which depletes the energy of certain nodes, causing them to die and leading to network partition and loss of connectivity.

In this study, we simulated the RPL protocol to evaluate its performance when using three different objective functions: Minimum Hop Count (MinHop), Maximum Remaining Energy (MaxEnergy), and an equal-weight combination of both (WeightedEqual). The experiments were conducted using multiple scenarios that varied in node deployment patterns, root location, and the initial energy of the nodes.

The simulation results obtained using GNU Octave showed that simultaneously considering both maximum remaining energy and minimum hop count in the objective function achieved the highest efficiency. This approach maintained good energy balance, resulted in the longest network lifetime, and reduced the number of isolated nodes.

The results also demonstrated that placing the root at the center of the IoT network and deploying the nodes uniformly had a significant positive impact on enhancing network connectivity and extending its lifetime.

**Keywords:** Internet of Things networks, RPL protocol, objective function, hotspot problem, GNU OCTAVE.

---

\* Teacher - Department of Computer Systems and Networks - College of Informatics Engineering - University of Latakia - Latakia - Syria  
inas.laila@latakia-univ.edu.sy

## ١ - مقدمة

يُعدّ إنترنت الأشياء (IoT) أحد أهم الابتكارات التقنية في العصر الحديث، إذ يمثل مفهومًا يقوم على ربط الأشياء المادية - مثل الأجهزة، والمستشعرات، والآلات، والمركبات، والمباني - بالإنترنت، بحيث تصبح قادرة على جمع البيانات وتبادلها وتحليلها واتخاذ قرارات ذكية دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر.

يتيح هذا الترابط الذكي بين الأشياء إمكانية تحويل البيانات التقليدية إلى بيانات ذكية، مثل المنازل الذكية، والمدن الذكية، والمصانع المؤتمتة، وأنظمة الرعاية الصحية المتصلة، مما يسهم في رفع كفاءة الأداء، وتقليل استهلاك الطاقة، وتحسين جودة الحياة.

وتتميز هذه الشبكات بأجهزة ذات موارد محدودة من حيث الطاقة، الذاكرة، وقدرات المعالجة، تتواصل مع بعضها عبر وصلات لاسلكية معرضة للفقد لذلك يشار لهذه الشبكات بـ (Low Power and Lossy Networks) LLNs. ويعد بروتوكول RPL بروتوكول التوجيه القياسي المعتمد من قبل IETF في شبكات (LLNs) [1]. وعلى الرغم من فعالية هذا البروتوكول، إلا أنه يؤدي إلى ظهور نقاط عالية الحمل تدعى Hotspot والتي يطلق عليها أيضاً (Energy Hole) تُستنزف طاقتها سريعاً وتموت مبكراً مما قد يؤدي إلى وظهور العقد المعزولة وتقسيم الشبكة Network Partition وتقليل في كفاءة الشبكة [2][3].

تكمن المشكلة البحثية للبروتوكول RPL في عدم كفاءة دالة الهدف الافتراضية في موازنة استهلاك الطاقة وتحقيق ترابط مستقر للشبكة، مما يتطلب تصميم أو استخدام دوال هدف بديلة أكثر توازناً في الأداء بين كفاءة الطاقة وجودة الاتصال [4][5]. توجهت العديد من الأبحاث إلى معالجة هذه المشكلة عن طريق تطوير دوال الوظيفية للبروتوكول RPL تأخذ الطاقة بالاعتبار عند اختيار الأبناء بدلاً من استخدام دوال الهدف الافتراضية [6][7].

سنقوم في هذا البحث بدراسة تأثير استخدام بعض العوامل في دالة الهدف للبروتوكول RPL على عمر الشبكة والترابط فيها وذلك وفقاً لسيناريوهات متعددة، كما سندرس مدى فاعلية الاعتماد على العقد المتباينة من حيث الطاقة كحل بسيط وضروري للتخفيف من مشكلة النقاط الساخنة وتقليل العقد المعزولة عند استخدام دوال هدف مختلفة للبروتوكول RPL.

## ٢ - الدراسة المرجعية:

يعد بروتوكول RPL البروتوكول القياسي لتوجيه البيانات في شبكات إنترنت الأشياء (IoT)، حيث يعتمد في عمله على دالة الهدف (Objective Function - OF) لتحديد أفضل المسارات ولاختيار العقد الأب استناداً إلى مجموعة من العوامل مثل عدد القفزات، والطاقة، وجودة الروابط. وقد تركزت العديد من الدراسات الحديثة على تطوير دوال هدف جديدة لتحسين أداء RPL وإطالة عمر الشبكة.

تشير الدراسة [٤] إلى أن الدوال التقليدية في بروتوكول RPL مثل OF0 وMRHOF لم تعد كافية في البيئات الديناميكية، مما دفع إلى اقتراح دوال هدف متعددة العوامل توازن بين استهلاك الطاقة والموثوقية والتأخير، وقد أسهم ذلك في تحسين الأداء الكلي للشبكة. وفي هذا السياق، قدّم الباحثون في [٥] بروتوكولاً مطوراً يُدعى LEA-RPL يعتمد على خوارزمية PSO ودالة هدف تراعي الطاقة المتبقية، وقيمة ETX، والعمر المتوقع للعقدة، مما أدى إلى تحسين ملحوظ في عمر الشبكة وتوازن استهلاك الطاقة.

كما اقترح الباحثون في [٦] دالة هدف جديدة تُعرف باسم T-OF تجمع بين الطاقة المتبقية وعدد الأبناء و ETX بهدف تحقيق توزيع أفضل للحمل وتقليل ظاهرة النقاط الساخنة؛ وقد أظهرت النتائج تحسناً في معدل تسليم الرزم وزيادة واضحة في عمر الشبكة. وفي اتجاه آخر، ركز الباحثون في [٧] و[٨] على تصميم دوال هدف تعزز موازنة الحمل لتجنب استنزاف طاقة العقد القريبة من الجذر وتحسين استدامة الشبكة.

من جانب آخر، دمج الباحثون في [٩] معايير إضافية مثل الازدحام، والتأخير، ومعدل فقدان الرزم ضمن دالة الهدف، مما أسهم في تحسين الأداء بشكل كبير، ولا سيما في الشبكات الكثيفة أو ذات الحركة العالية.

وفي السياق نفسه، طوّر الباحثون في [٢] بروتوكول CT-RPL (Cluster Tree RPL) الذي يقسم الشبكة إلى عناقيد بهدف توزيع الحمل بشكل أكثر توازناً، الأمر الذي انعكس إيجاباً على عمر الشبكة.

وعلى الرغم من كثرة الأبحاث التي تناولت البروتوكول RPL وصممت دوال هدف جديدة له إلا أن هناك نقصاً في تقييم أدائه وأداء دالة الهدف المستخدمة فيه وذلك عند استخدام أنماط نشر عقد مختلفة ومواقع مختلفة للجذر وكذلك عند استخدام طاقة ابتدائية مختلفة للعقد.

### ٣- أهمية البحث وأهدافه

يستكشف هذا العمل تأثير استخدام مجموعة من المعايير المختلفة في دالة هدف البروتوكول RPL على أداء الشبكة وعمرها ودرجة الاتصال فيها وذلك عند استخدام أنماط نشر مختلفة للعقد، ومواقع مختلفة للجذر وقيم مختلفة للطاقة ابتدائية للعقد، كما سنعمل على قياس الأداء عند استخدام مزيج متوازن من العاملين السابقين في دالة الهدف.

تبرز أهمية هذا البحث في أنه:

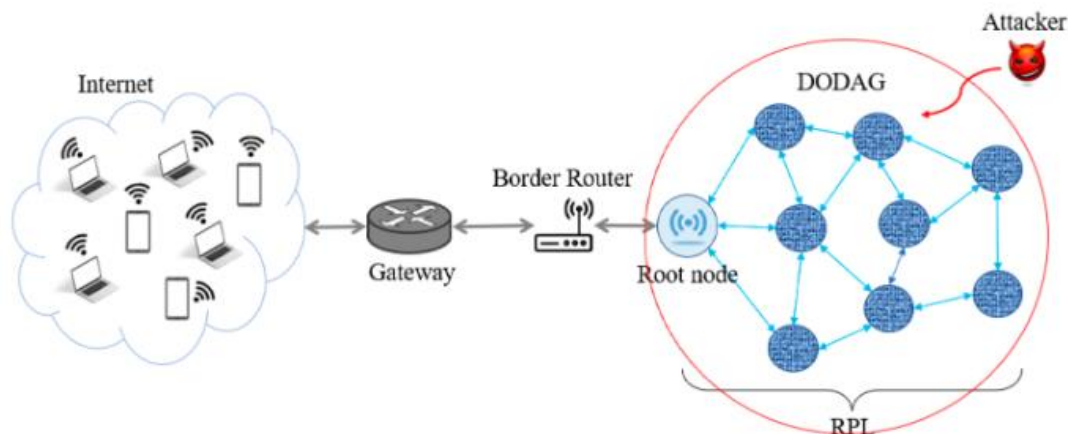
- يقدم تحليلاً مقارناً معمقاً لبعض العوامل المستخدمة في دالة الهدف المستخدمة في بروتوكول RPL، مما يساعد على فهم أفضل لآلية اتخاذ القرار في اختيار المسارات.
  - يساهم في معالجة مشكلة النقاط الساخنة التي تُعد من أهم التحديات في شبكات إنترنت الأشياء، وبالتالي إطالة عمر الشبكة وتحسين موثوقيتها وذلك من خلال الاعتماد على مزيج متساوي من الطاقة المتبقية الأكبر وعدد القفزات الأقل في دالة هدف البروتوكول RPL.
  - يُظهر البحث نمط نشر العقد الذي يعطي نتائج أفضل بما يتعلق بعمر الشبكة وعدد النقاط المعزولة وكذلك دالة الهدف الأفضل وموقع الجذر الأفضل.
- حيث ستتم عملية التقييم وتحليل الأداء باستخدام بناء نماذج للشبكة وفق سيناريوهات متعددة وإجراء المحاكاة وجمع الاحصائيات للوصول الى مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات.

### ٤- طرائق البحث ومواده:

قمنا في هذا البحث باعتماد منهجية تجريبية لدراسة تأثير العوامل المستخدمة في دالة الهدف على عمر الشبكة ودرجة الاتصال فيها، حيث قمنا ببناء نموذج للشبكة وفق سيناريوهات متعددة وإجراء المحاكاة وجمع الاحصائيات المطلوبة باستخدام GNU OCTAVE. حيث استخدمنا عمر الشبكة، واستهلاك الطاقة كمعايير لتقييم الأداء، ووضعنا مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات مما يعزز عمر الشبكة ودرجة الاتصال فيها.

## ٥- المفاهيم الأساسية لبروتوكول RPL:

بروتوكول التوجيه للشبكات منخفضة الطاقة والمعرضة للفقد (RPL) هو بروتوكول توجيه مصمم خصيصاً للشبكات منخفضة الطاقة والمعرضة للفقد (LLNs)، تم وضعه بواسطة فريق عمل هندسة الإنترنت (IETF) عام 2012 لمعالجة التحديات التي تفرضها أجهزة إنترنت الأشياء ذات الموارد المحدودة، وتم وصفه بالوثيقة RFC 6550 [8]. يوضح الشكل (١) شبكة إنترنت الأشياء المعتمدة على البروتوكول RPL.



الشكل (١) شبكة إنترنت الأشياء المعتمدة على البروتوكول RPL [10]

يقوم RPL بتنظيم الشبكة على شكل شجرة DODAG، وتُعد دالة الهدف (OF) قلب عمل RPL حيث يتم الاعتماد عليها عند حساب الرتبة [11] [RFC 6551]، والرتبة هي قيمة لكل عقدة تحدد موقعها بالنسبة للجذر وهي تساعد العقد باختيار والدها من بين العقد المرشحة، كما أنها تضمن توجيهاً خالياً من الحلقات. وتعتبر OF0 دالة الهدف الصفرية أحد أبسط دوال الهدف في بروتوكول RPL وتعتمد هذه الدالة على مبدأ اختيار العقدة التي تؤمن مساراً بعدد قفزات أقل إلى الجذر كأب، ولا تأخذ هذه الدالة بالاعتبار جودة الرابط أو الطاقة المتبقية أو أي معايير أخرى متقدمة عند حساب الرتبة [12].

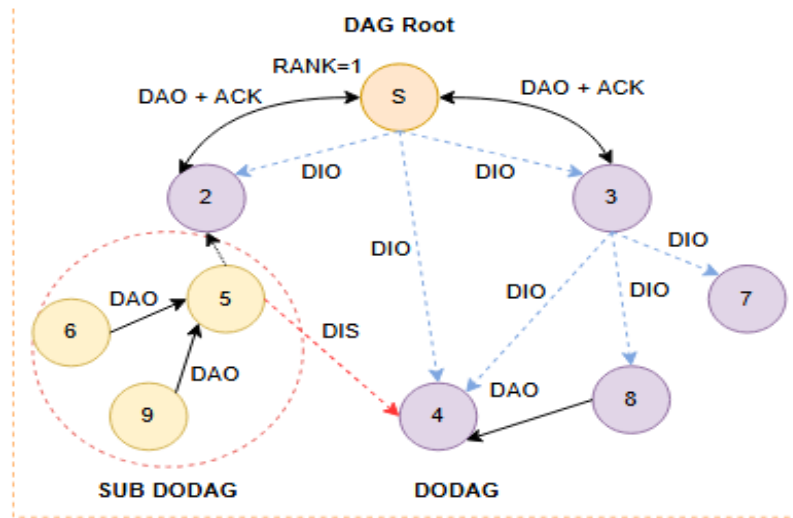
يعتمد RPL في بناء شجرة DODAG وصيانتها على أربع أنواع من رسائل التحكم وهي [8]:

- رسالة معلومات DIO: تستخدم لنشر معلومات DODAG من الجذر إلى العقد الأخرى، مما يسمح للعقد بالانضمام إلى DODAG واختيار آبائها. تحتوي هذه الرسالة على العديد من المعلومات مثل معلومات رتبة العقدة، ويجب على كل عقدة تتلقى رسالة DIO أن تقوم بمعالجتها وتحديد والدها وفقاً لـ OF المستخدمة.
- رسالة طلب معلومات DIS: تستخدم لطلب رسائل DIO من العقد المجاورة.
- رسالة اعلان وجهة DAO: تستخدم لتسجيل المسارات الصاعدة (Upward Routes) من العقد إلى الجذر.

- رسالة تأكيد (DAC): تستخدم لتأكيد استلام رسائل DIO.

فعندما تستقبل عقدة ما لرسائل DIO من عدة عقد مجاورة فإنها تقوم بحساب رتيبها بناءً على رتيبهم وتختار العقدة التي حصلت من خلالها على الرتبة الأقل كعقدة أب لها. يسمح RPL بكل من التوجيه نحو الأعلى من العقدة إلى الجذر، والتوجيه نحو الأسفل من الجذر إلى الأبناء، وكذلك توجيه البيانات بين العقد. ويتم المحافظة على DODAG من خلال ارسال رسائل DIO الدورية والتي ترسل وفق خوارزمية Trickle حيث تضمن هذه

الآلية مرونة الشبكة وقدرتها على التكيف مع التغيرات في البيئة. يوضح الشكل (٢) DODAG ورسائل التحكم المتبادلة بين العقد [13].



الشكل (٢): DODAG ورسائل التحكم المتبادلة بين العقد [13].

وعلى الرغم من الإيجابيات الكبيرة لبروتوكول RPL إلا أنه يعاني من مجموعة من التحديات. إن غياب آليات موازنة حمل صريحة في دوال الهدف القياسية OFs في البروتوكول RPL مثل MRHOF ودالة الهدف الصفيرية OF0 وكذلك جهة حركة البيانات في انترنت الأشياء والتي تتجه بمعظمها نحو الجذر تجعل بعض العقد الآباء تتحمل عبئاً أكبر من غيرها حيث ستكون هذه العقد مشغولة طوال الوقت بإرسال بياناتها الخاصة وإعادة توجيه بيانات العقد الأخرى المرتبطة بها في الشبكة، ويطلق على هذه العقد بالنقاط الساخنة. مما دفع الباحثين إلى اقتراح العديد من التحسينات بهدف معالجة هذه التحديات.

#### ٦- العوامل المستخدمة في دوال الهدف في البروتوكول RPL

يعاني البروتوكول RPL من بعض السلبيات مثل رسائل التحكم الكثيرة المستخدمة لبناء الشجرة وصيانتها. كما ان اختيار الآباء بالاعتماد على مقياس وحيد مثلاً (ETX) أو (hop count) يؤدي إلى تفضيل نفس العقد مرارا دون مراعاة طاقتها المتبقية. إن التركيز المفرط للعبء على عقد معينة في الشبكة يؤدي إلى نضوب طاقتها وخروجها عن الخدمة، وإن فشل هذه العقد في مواصلة التوجيه قد يقطع الاتصال بين عقد الشبكة ويؤدي إلى انقسامها وظهور العقد المعزولة فيها. تعاني هذه العقد من "مشكلة النقطة الساخنة" أو "مشكلة فجوة الطاقة". ويُعد التغلب على هذه المشكلة من أهم جوانب تصميم الشبكات.

يوجد العديد من العوامل المستخدمة في دالة الهدف مثل جودة الرابط وعدد القفزات، الطاقة المتبقية، الثقة وغيرها، وفيما يلي شرح لبعض هذه العوامل.

١- عدد القفزات hop count: وهنا يتم اختيار العقدة التي تؤمن مساراً بعدد قفزات أقل كأب عند إنشاء DODAG، لكن هذا المعيار قد يؤدي إلى اختيار أب ذي جودة رابط سيئة، وبالتالي قد تزداد عمليات إعادة الإرسال وضياع المزيد من الطرود، بالإضافة إلى أن اختيار المسار الذي يوفر عدد القفزات الأقل بشكل متكرر قد يؤدي إلى اختيار نفس العقد كآباء مما قد يؤدي لنضوب طاقتها وفشلها وهذا ما يؤثر على عمر الشبكة، توضح

العلاقة (١) اختيار الاب الذي يقدم المسار ذي عدد القفزات الأقل وكذلك توضح العلاقة (٢) حساب رتبة العقدة بناء على رتبة والدها [11].

$$\begin{aligned} \text{Parent} &= \arg \min(\text{HopCount}) & (1) \\ \text{Rank}(\text{node}) &= \text{Rank}(\text{parent}) + 1 & (2) \end{aligned}$$

٢- معدل الارسال المتوقع ETX: هو معيار يُستخدم في شبكات الاتصالات اللاسلكية لتقدير عدد مرات الإرسال المتوقع التي يحتاجها إرسال رزمة بيانات بنجاح من المصدر إلى الوجهة عبر رابط معين دون أخطاء ويمكن القول بأنه يصف جودة الرابط ويحسب بالعلاقة (٣) [13] وتوصف الوثيقة RFC 6719 هذا العامل [12]

$$\text{ETX} = 1 / (\text{df} * \text{dr}) \quad (3)$$

حيث أن df هي احتمال نجاح وصول الرزمة إلى الجهة المستقبلية (Forward Delivery Ratio). أما dr فهي احتمال نجاح وصول إشارة التأكيد (ACK) من الجهة المستقبلية إلى المرسل، فإذا كانت قيمة ETX منخفضة فهذا يعني أن الرابط عالي الجودة ويتطلب أقل عدد من الإرسال لتحقيق نقل ناجح للرزمة، بينما إذا كانت مرتفعة فهي تشير إلى رابط ضعيف أو كثير الأخطاء ويحتاج عدة محاولات أكبر لإرسال الرزم بنجاح.

توضح العلاقة (٤) حساب رتبة العقدة بناء على رتبة والدها وفق هذا المعيار [12]

$$\text{Rank}_i = \text{Rank}_{\text{parent}(i)} + \text{ETX}(i, \text{parent}(i)) \quad (4)$$

ويستخدم هذا المعيار في دالة الهدف القياسية MRHOF

### ٣- الطاقة المتبقية (RE): Residual Energy

بما ان العقد في شبكات انترنت الأشياء محدودة الطاقة غالباً فإنه ينبغي على أي عقدة اختيار العقدة التي تملك طاقة متبقية أكبر من بين الآباء المرشحين وتجنب اختيار عقدة ذات طاقة متبقية وذلك لتحقيق موازنة للحمل ولإطالة عمر الشبكة وللتقليل من احتمالية انقسام الشبكة وظهور العقد المعزولة لاحقاً [15]. لكن هذا التطبيق قد يؤدي الى فقدان طرود وتأخر أعلى بالمقارنة مع ETX لأنه يعتمد على معيار الطاقة بدون اخذ بالاعتبار جودة الرابط او التأخير. تحسب الطاقة المستهلكة في العقدة i بالعلاقة (٥) [16]

$$\text{Econ}(i) = P_{\text{les}} \times T_{\text{les}} + P_{\text{Tx}} \times T_{\text{Tx}} + P_{\text{CPU}} \times T_{\text{CPU}} + P_{\text{sleep}} \times T_{\text{sleep}} \quad (5)$$

حيث Econ هي الطاقة التي تستهلكها العقدة (i)، و Tmode هي المدة الزمنية التي تقضيها العقدة في كل نمط تشغيل (استماع، ارسال، معالجة، نوم) (أي T<sub>les</sub>، T<sub>Tx</sub>، T<sub>CPU</sub>، T<sub>sleep</sub>) و Pmode تمثل الطاقة المستهلكة في كل نمط. بعد ذلك، يُمكننا حساب الطاقة المتبقية (RE) على أنها الفرق بين أقصى طاقة للعقدة (EMax) والطاقة المستهلكة (Econ)، ويمكن حساب الطاقة المتبقية بالعلاقة (٦)

$$\text{RE}(i) = \text{EMax}(i) - \text{Econ}(i) \quad (6)$$

حيث يمثل EMax(i) للطاقة الابتدائية للعقدة.

وهنا يجب الانتباه الى ان العقدة الاب تستهلك طاقة لإرسال بياناتها الخاصة وكذلك في استقبال وإعادة ارسال البيانات الممررة اليها من جميع أبنائها المباشرين وغير المباشرين (Direct & indirect children).

## ٤- عدد الأبناء Child Count:

يمكن للعقدة اختيار العقد المرشحة التي تملك عدد الأبناء الأقل كأب لها مما يحقق موازنة للحمل ويقلل من حدوث مشكلة النقاط الساخنة ويجنب حدوث الازدحام واستهلاك الطاقة غير المتساوي بين العقد. كما ويمكن استخدام أكثر من عامل عند تصميم دالة الهدف وإعطاء كل معيار وزناً معيناً وذلك حسب متطلبات التطبيق، مثلاً توضح العلاقة (٧) أن دالة الهدف تستخدم ثلاث معايير عدد القفزات الأقل والطاقة المتبقية الأكبر وجودة الرابط عند حساب الرتبة وتعطي وزناً معيناً  $w$  لكل منهم.

$$OF_i = w1 * Hop_i + w2 * ETX_i + w3 * \left(\frac{1}{E_i}\right) , w1 + w2 + w3 = 1 \quad (7)$$

## ٧- الدراسة التجريبية

سنقيم في هذا القسم أداء البروتوكول RPL عند استخدام معايير مختلفة في دالة الهدف من أجل حالات مختلفة للشبكة. حيث سنأخذ بالاعتبار مجموعة من المتغيرات كمنط نشر العقد، مكان تموضع الجذر والطاقة الابتدائية للعقد وذلك بهدف الوصول الى مجموعة من الاستنتاجات والتوصيات. حيث سنقوم ببناء النماذج وإجراء المحاكاة باستخدام برنامج GNU Octave وهو برنامج مجاني ومفتوح المصدر مشابه لـ MATLAB يستخدم على نطاق واسع في الإحصاء وتطوير النماذج الرياضية وتحليل البيانات، كما أنه يتمتع بالقدرة على دمج الوظائف الرياضية المعقدة وإعطاء تصورات رسومية متقدمة.

## ٧-١- معايير تقييم الأداء (Performances Metrics)

سنقوم في هذا البحث بتقييم الأداء بناءً على المعايير التالية:

- متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة (Avg Residual Energy):** وهنا يجب حساب الطاقة المستهلكة في كل عقدة عبر الزمن والتي تشمل الطاقة المستهلكة في إرسال البيانات الخاصة بالعقدة وإرسال واستقبال بيانات جميع العقد التابعة لها، ثم حساب الطاقة المتبقية في كل عقدة وحساب المتوسط.
- عمر الشبكة Network lifetime:** يوجد عدة طرق لحسابها، منها حساب زمن موت اخر عقدة (Last Node Dead) LND وزمن موت اول عقدة (First Node Death) FND والتي سنعتمد عليها
- عدد العقد المعزولة الاعظمي Max Isolated nodes:** ويمكن تعريف العقد المعزولة بأنها العقد التي لم تعد متصلة بالجذر (أي التي لم تعد تملك مساراً صالحاً الى الجذر)، ويعد عدد العقد المعزولة مؤشراً مباشراً على قوة الترابط (Connectivity) داخل الشبكة.

## ٧-٢- تصميم سيناريوهات المحاكاة:

قمنا ببناء نموذج لشبكة انترنت الأشياء تتألف من مجموعة من العقدة الثابتة تلتقط البيانات من البيئة المحيطة وترسلها بشكل دوري إلى الجذر دون أن أي يكون هناك أي عمليات معالجة للبيانات في العقد الآباء، حيث سنقوم بتحليل أداء بروتوكول RPL في ١٢ حالة تختلف عن بعضها بالآتي:

١. نمط توزيع العقد (عشوائي Random أو منتظم Grid)
٢. موقع الجذر (في الوسط Center أو في الأعلى Top)
٣. المعايير المستخدمة في دالة الهدف

يوضح الجدول (١) المعايير المستخدمة في الدالة الوظيفية للبروتوكول والتي سوف نتناولها في هذا البحث.

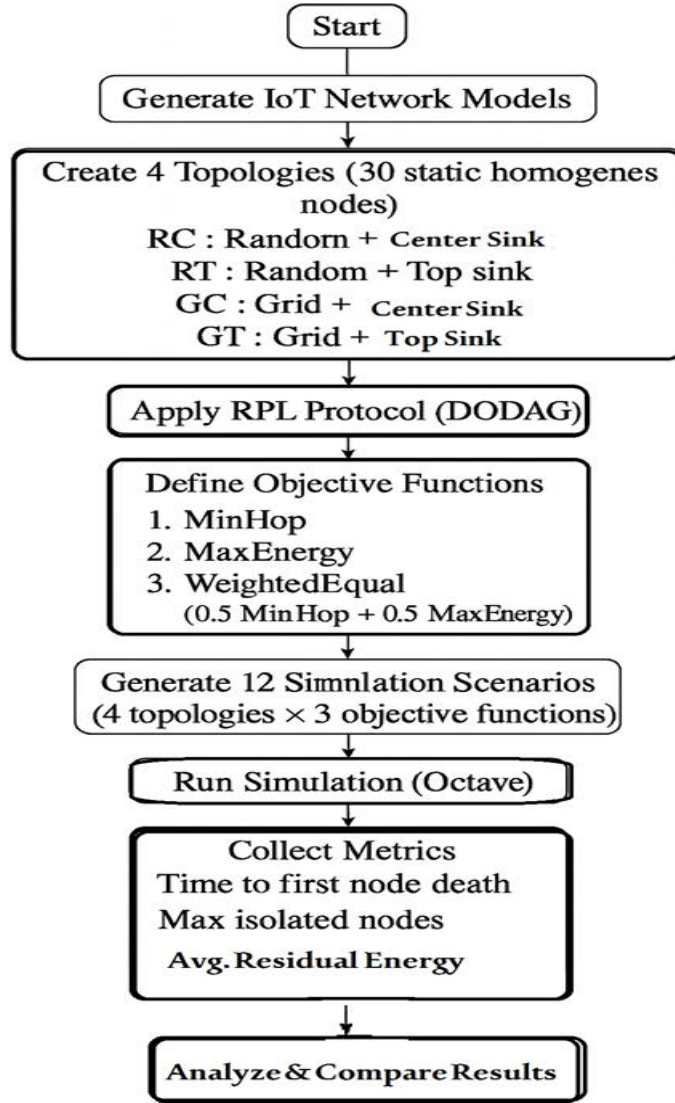
الجدول(١): المعايير المستخدمة في الدالة الوظيفية للبروتوكول	
الوصف	العامل
اختيار المسار الذي يحقق أقل عدد من القفزات إلى الجذر.	Min-Hop
اختيار المسار الذي يمر عبر العقد ذات الطاقة المتبقية الأعلى.	Max-Residual-Energy
استراتيجية هجينة تجمع بين عدد القفزات، الطاقة المتبقية بالأوزان: ٠,٥ لكل معيار.	Hybrid Weighted (Equal Weights)

كما ويوضح الجدول (٢) قيم البارامترات المستخدمة في المحاكاة.

الجدول (٢): بارامترات المحاكاة

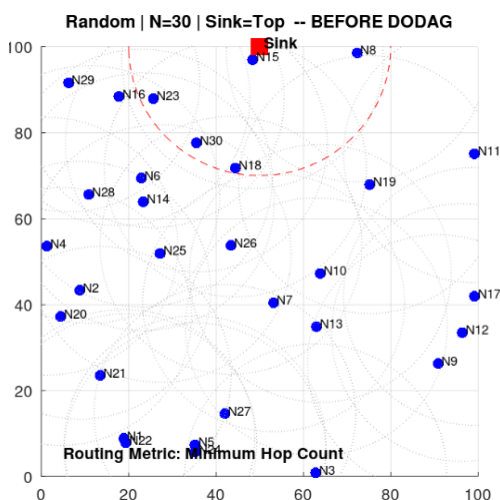
Simulation Parameters	Values
Simulation Tool	GNU OCTAVE
Simulation coverage area	100 m × 100 m
Root position	(50 , 100), center
number of nodes	30
Deployment of nodes	Random, Grid
Environment	Static
Data Transmission Interval	Packet every Round
Data Packet Size	4000 Bytes
initial energy (J)= 0.5	Eelec= 50e-9 j/bit   Eamp= 100e-12 (J/bit/m <sup>2</sup> )
coverage	30 m

بينما يوضح الشكل (٣) المخطط التدفقي للدراسة التجريبية

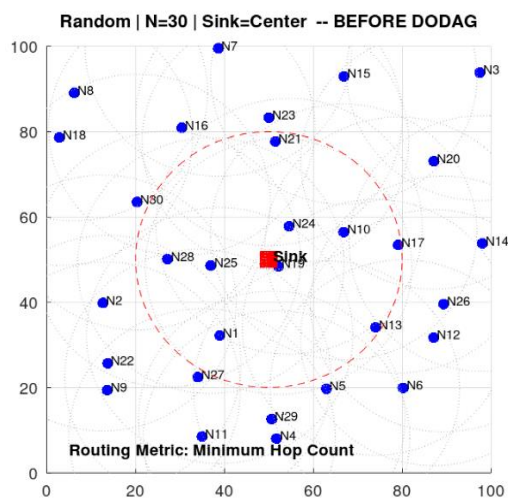


الشكل (٣): المخطط التدفقي للدراسة التجريبية

حيث قمنا بداية ببناء نموذج لشبكة انترنت الأشياء باستخدام OCTAVE يتألف من ٣٠ عقدة ثابتة ومتماثلة Homogeneous موزعة بشكل عشوائي Random بحيث يقع الجذر sink في منتصف الشبكة Center ورمزنا لهذه الطوبولوجيا بـ RC والتي يظهرها الشكل (٤). ثم قمنا ببناء نموذج آخر للشبكة يتألف أيضاً من ٣٠ عقدة ثابتة موزعة بشكل عشوائي إلا ان الجذر في أعلى الشبكة ورمزنا لهذا النموذج بـ RT. كما يظهر الشكل (٥). كما قمنا ببناء نموذجين آخرين بنمط توزيع منتظم Grid للعقد يقع الجذر في النموذج الأول في منتصف الشبكة center ورمز له GC بينما يقع الجذر في أعلى الشبكة top في النموذج الاخر ورمز لهذا النموذج بالرمز GT. وبالتالي أصبح لدينا اربعة نماذج مختلفة للشبكة وهي RT, RC, GT, GC. بعدها قمنا بتطبيق البروتوكول RPL على هذه النماذج الأربعة وبناء شجرة DODAG في كل منهم وذلك وفق الحالات الثلاث الاتية:



الشكل (٥): نموذج للشبكة في النموذج RT



الشكل (٤): نموذج للشبكة في النموذج RC

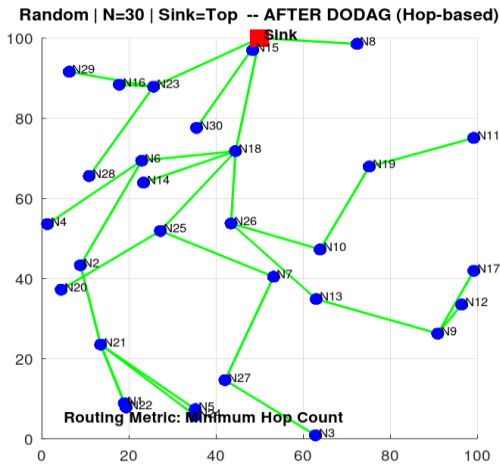
- الاعتماد على عدد القفزات الأقل MinHop كمعيار في دالة الهدف في البروتوكول RPL
- الاعتماد على الطاقة المتبقية الأكبر MaxEnergy كمعيار في دالة الهدف في البروتوكول RPL

▪ الاعتماد على استراتيجية هجينة تأخذ بالاعتبار عدد القفزات الأقل والطاقة المتبقية الأكبر معاً وبوزن

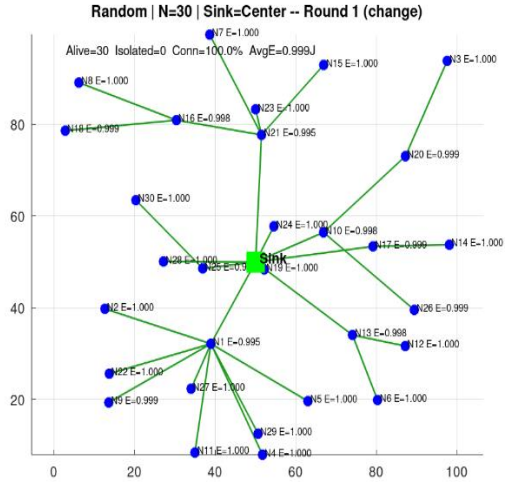
٠,٥ لكل منهما في دالة الهدف في البروتوكول RPL ولقد رمزنا لهذه الاستراتيجية بـ WeightedEqual.

حيث ظهر لدينا ١٢ سيناريو في المحاكاة.

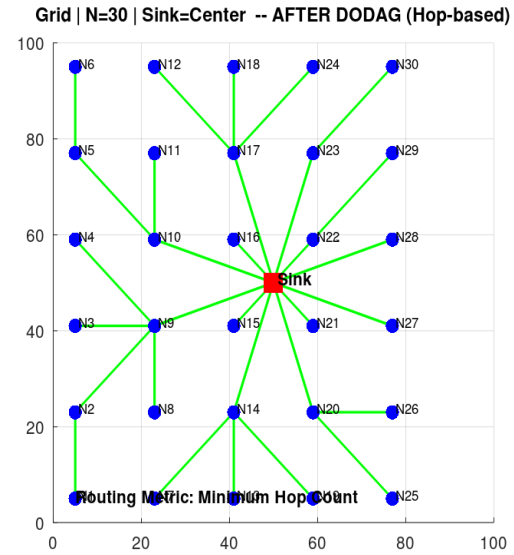
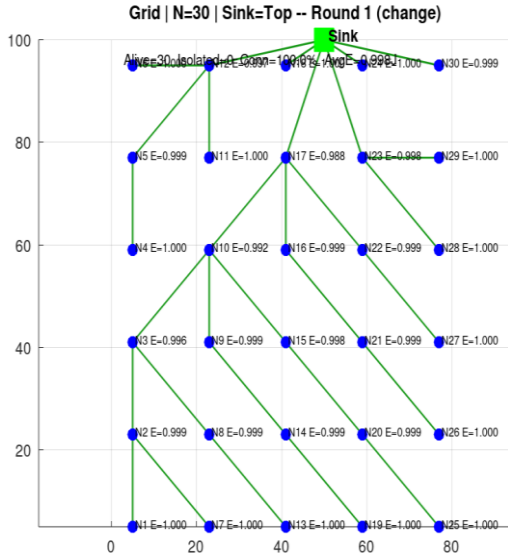
تظهر الأشكال (٦) و(٧) الأشجار الناتجة عن المحاكاة عند تطبيق البروتوكول RPL وذلك في الحالة الأولى (عند استخدام معيار عدد القفزات الأقل في دالة الهدف) وذلك في النموذجين RT,RC; كما ويظهر الشكل (٨) الأشجار الناتجة عن المحاكاة عند تطبيق البروتوكول RPL في الحالة الأولى وذلك في النموذجين GT,GC. بعد ذلك قمنا بتشغيل المحاكاة وتوليد البيانات بشكل دوري حيث تقوم كل عقدة في الشبكة بتوليد بيانات بحجم ٤٠٠٠ بايت كما هو موضح في الجدول (٢) وإرسالها إلى الجذر عبر شجرة DODAG التي تم تشكيلها وفق البروتوكول RPL. كما قمنا بجمع الإحصائيات أثناء المحاكاة وهي زمن موت أول عقدة FND ومتوسط الطاقة المتبقية في الشبكة Avg. Residual Energy وعدد العقد المعزولة Max Isolated Nodes في جميع السيناريوهات السابقة.



الشكل (٧): الشبكة بعد تشكيل DODAG



الشكل (٦): نموذج للشبكة RC بعد تشكيل DODAG



الشكل (٨): نماذج الشبكة GC,GT بعد تشكل شجرة DODAG فيها وفق معيار عدد القفزات

بعدها قمنا بتعديل النموذج الشبكي GC فقط حيث قمنا بزيادة الطاقة الابتدائية لـ ١٠ عقد من الشبكة مختارة عشوائياً الى الضعف بحيث أصبح لدينا شبكة متباينة (Heterogeneous) من حيث الطاقة. يهدف هذا التغيير الى دراسة مدى تأثر أداء الشبكة التي تستخدم RPL بزيادة الطاقة الابتدائية لبعض العقد فيها وذلك من اجل الحالات الثلاث المذكورة سابقاً، حيث نتج لدينا هنا ستة سيناريوهات قارنا بينها بالاعتماد على زمن موت اول عقدة ومتوسط الطاقة المتبقية في الشبكة وعدد العقد المعزولة.

## ٨- تحليل النتائج

سنقوم في هذه الفقرة بتحليل النتائج التي قمنا بجمعها عند اجراء المحاكاة للسيناريوهات الـ ١٢ وكذلك تحليل النتائج التي جمعناها من السيناريوهات الستة، حيث سننظم عملية التحليل وفق النقاط الآتية:

- دراسة مدى تأثير الاستراتيجية المستخدمة في دالة الهدف للبروتوكول RPL على عمر الشبكة

وترابطها

- دراسة مدى تأثير نمط نشر العقد وكذلك موقع الجذر على عمر الشبكة وترابطها وذلك عند استخدام كل من الاستراتيجيات المدروسة
- دراسة مدى تأثير استخدام عقد مختلفة بالطاقة الابتدائية على عمر الشبكة وترابطها وذلك عند استخدام كل من الاستراتيجيات المدروسة.

### ١-٨- تأثير الاستراتيجية المستخدمة في دالة الهدف (Objective Function)

أظهرت نتائج المحاكاة أن استراتيجية MinHop والتي تعتمد على عدد القفزات الأقل تؤدي إلى استهلاك سريع لطاقة بعض العقد ويعود هذا إلى أن بناء شجرة دوداج سيتم بناء على معيار عدد القفزات الأقل فقط وبالتالي سيتم تكرار استخدام نفس العقد التي تحقق هذا المعيار دائما كأداء في الشجرة مع مرور الزمن مما يؤدي إلى نضوب طاقتها وموتها مبكراً وهو ما نطلق عليه مشكلة النقاط الساخنة. نلاحظ من الجدول (٣) والذي يحوي نتائج المحاكاة بأنه في حالة Random-Top-MinHop (تدل هذه الحالة على أن الشبكة موزعة بشكل عشوائي وأن الجذر في الأعلى وأن المعيار المعتمد في دالة الهدف هو عدد القفزات الأقل) والتي تم تمييزها باللون الأحمر بالأحمر في الجدول حيث نلاحظ أن موت أول عقدة كان في هذه الحالة بالجولة ٣١ وهي أسوأ قيمة مقارنة بالحالات المدروسة كما نلاحظ أيضاً أن عدد العقد المعزولة كان كبيراً جداً مقارنة بالحالات الأخرى حيث وصل إلى ٢٥ عقدة، أما الميزة الوحيدة التي أظهرتها النتائج في هذه الحالة هي أن متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة كانت جيدة وهي (0.3643) وهي أكبر من القيم التي نتجت عن السيناريوهات الأخرى، إلا أن هذا الرقم لا يعتبر مؤشراً صحيحاً على جودة هذه الاستراتيجية حيث أن متوسط الطاقة المتبقية الكبيرة عند استخدام MinHop ليس ناتجاً عن توفير هذه الاستراتيجية للطاقة المستهلكة إنما هو ناتج عن كثرة العقد الحية المعزولة والتي توقفت عن إرسال بياناتها لأنها لا تملك أباً لترسل إليه البيانات وبالتالي لن يكون لدى هذه العقد طاقة مستهلكة في عملية الإرسال.

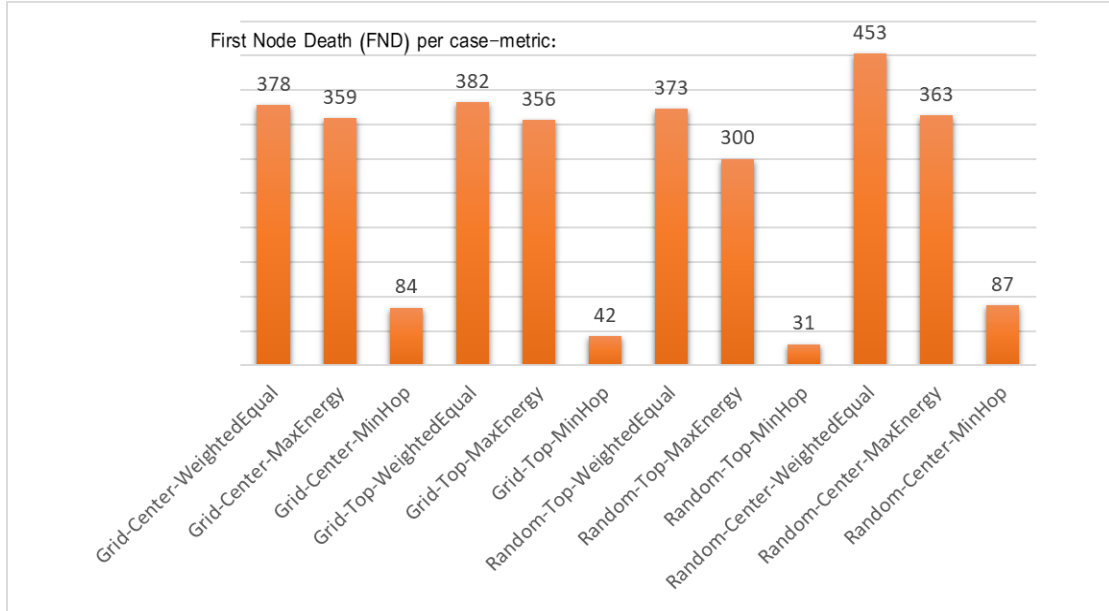
الجدول (٣): نتائج المحاكاة

Case	FND (First Node Dead)	LND (Last Node Dead)	Max Isolated Nodes	Avg. Residual Energy
Random-Center-MinHop	87	468	6	0.3167
Random-Center-MaxEnergy	363	368	6	0.1932
Random-Center-WeightedEqual	453	461	5	0.2447
Random-Top-MinHop	31	145	25	0.3643
Random-Top-MaxEnergy	300	380	14	0.1817
Random-Top-WeightedEqual	373	383	8	0.2260
Grid-Top-MinHop	42	161	21	0.2778
Grid-Top-MaxEnergy	356	361	5	0.1776
Grid-Top-WeightedEqual	382	386	10	0.1894
Grid-Center-MinHop	84	410	7	0.3591
Grid-Center-MaxEnergy	359	368	5	0.1823
Grid-Center-WeightedEqual	378	382	6	0.1928

نلاحظ أيضاً من الجدول سوء أداء جميع الحالات التي تستخدم MinHop مقارنة بالنتائج التي أعطتها دوال الهدف الأخرى في الحالات المماثلة. كما يتبين لنا من نتائج المحاكاة الموضحة في الجدول (٣) بأن استراتيجية MaxEnergy (التي يتم فيها بناء الشجرة بالاعتماد على العقد التي تملك الطاقة المتبقية الأكبر) تحاول تحقيق

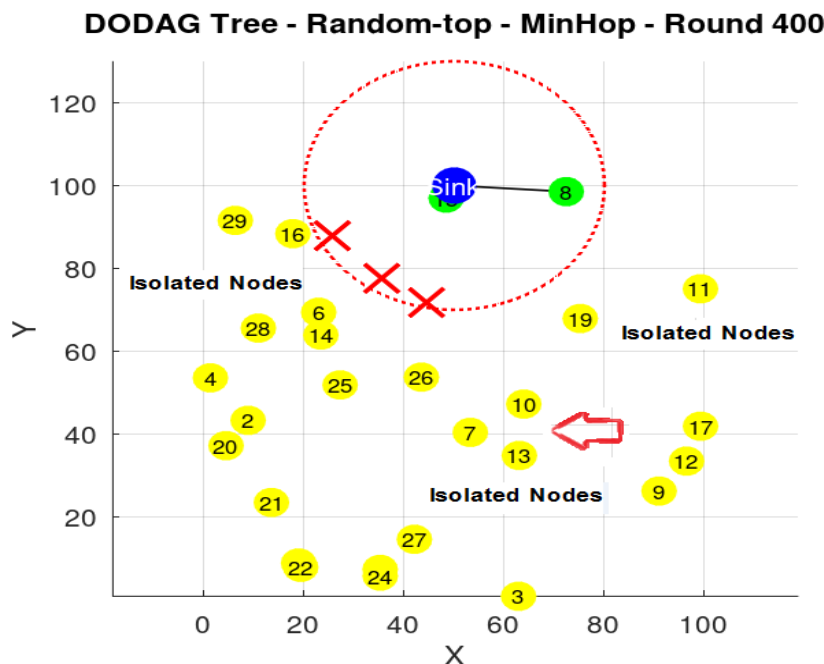
موازنة حمل طاقي بين العقد وتحاول تأخير زمن موت أول عقدة فنلاحظ أن موت أول عقدة في حالة Grid-Top-MaxEnergy (السطر الأخضر في الجدول) كان في الجولة 356 وهي قيمة جيدة جداً مقارنة بالقيم التي أعطتها MinHop، لكننا نلاحظ أن استخدام هذه الاستراتيجية أدى إلى انخفاض في متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة ويعود ذلك إلى اعتماد هذه الاستراتيجية على العقد ذات الطاقة المتبقية الأكبر عند اختيار الآباء في الشجرة بغض النظر عن عدد القفزات المسار مما يؤدي إلى زيادة طول المسارات واستهلاك طاقة أكبر في الإرسال، حيث نلاحظ أن متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة كانت ٠,١٧٧٦ في المقابل، أظهرت استراتيجية WeightedEqual التي توازن بين عدد القفزات والطاقة، أفضل أداءً شامل حيث حققت أعلى زمن لموت أول عقدة في الشبكة ٤٥٣، وطاقة متبقية معتدلة.

فمثلاً في حالة Random-Center-WeightedEqual (السطر الأزرق في الجدول) كان FND يساوي 453 ومتوسط الطاقة المتبقية ٠,٢٤، وعدد العقد المعزولة لا يتجاوز ٥ مما يؤكد فعالية هذه الدالة في تحقيق توازن بين كفاءة الطاقة وترابط الشبكة. يوضح الشكل (٩) زمن موت أول عقدة من أجل كل سيناريو حيث يظهر الشكل أن الاستراتيجية MinHop هي التي أعطت القيم الأسوأ.



الشكل (٩): زمن موت أول عقدة من أجل كل سيناريو.

يوضح الشكل (١٠) موت بعض العقد القريبة وظهور العقد المعزولة التي وعلى الرغم من أنها حية إلا أنها لا تستطيع إرسال البيانات إلى الجذر. (قمنا بأخذ لقطة للشبكة في الجولة ٤٠٠ كمثال لتوضيح هذه الحالة حيث يشار إلى العقد الميتة بإشارة x حمراء وللعقد المعزولة بدوائر صفراء والعقد الحية بدوائر خضراء).



الشكل (١٠): موت بعض العقد القريبة من الجذر وظهور العقد المعزولة في الجولة ٤٠٠

#### ٢-٨- تأثير توزيع العقد وموقع الجذر

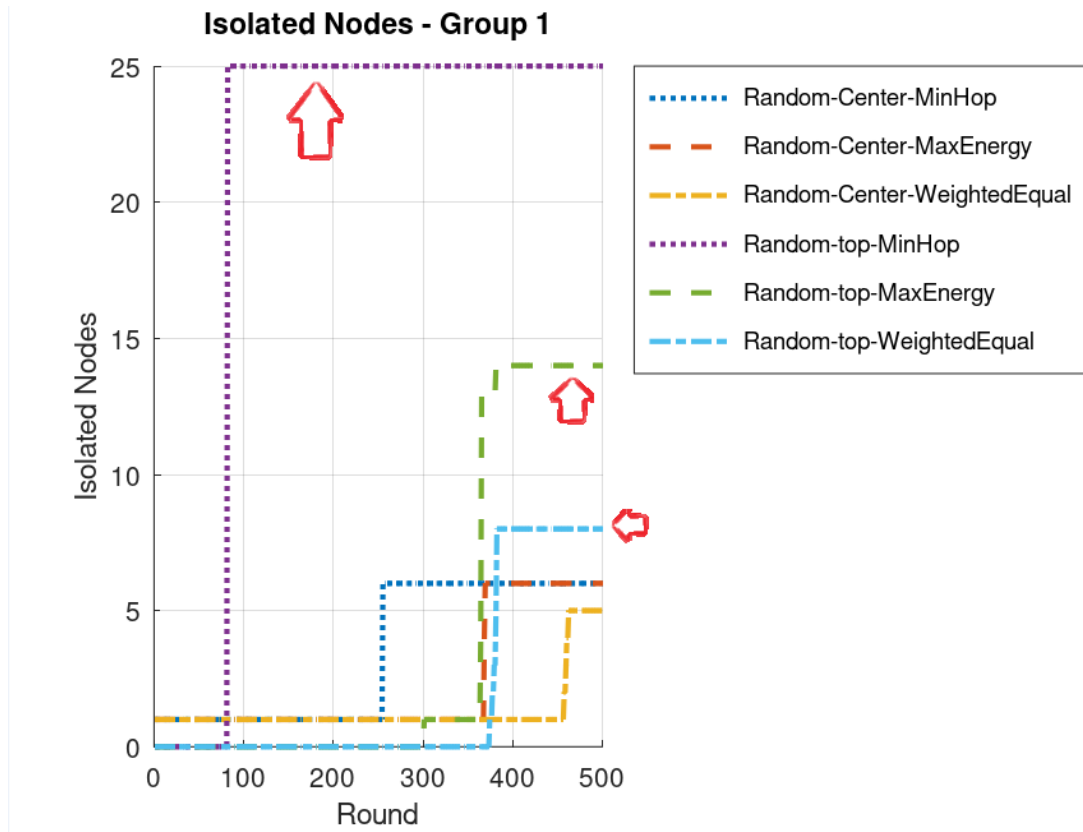
أظهرت النتائج أن موقع الجذر في مركز الشبكة يعطي الأداء الأفضل من حيث الترابط والعمر الكلي للشبكة، بينما يؤدي وضعه في الأعلى إلى ضعف الاتصال وزيادة العزل فنلاحظ مثلاً أنه في الحالة Random-Center-WeightedEqual كان FND يساوي 453 و LND يساوي 461 وعدد العقد المعزولة ٥ مقارنة بـ 373 و ٣٨٣ و ٨ في الحالة Random-Top-WeightedEqual حيث تختلف الحالتين فقط بموقع الجذر مما يؤكد التأثير الإيجابي لموقع الجذر على النتائج.

يوضح الشكل (١١) عدد العقد المعزولة في كل جولة من أجل جميع حالات النشر العشوائي حيث نلاحظ أن عدد العقد المعزولة كان أكبر عندما كان الجذر في الأعلى top مقارنة بمثيلاتها عندما كان الجذر في المركز (تم وضع أسهم على الشكل لإيضاح هذه الحالة).

كما أظهر التوزيع المنتظم للعقد استقراراً أعلى وانخفاضاً في عدد العقد المعزولة مقارنة بالتوزيع العشوائي، ويعود ذلك إلى تموضع العقد في أماكن مدروسة الأمر الذي يضمن توازناً في المسافات والروابط. يوضح الجدول (٣) أن الحالة Grid-Center-MaxEnergy تقدم أداء أفضل من Random-center-MaxEnergy من حيث زمن موت العقدة الأولى ٣٥٩ مقارنة بـ 363 وكذلك بعدد عقد معزولة أقل ٥ مقارنة بـ ٦ حيث تختلف الحالتين فقط بنمط نشر العقد مما يؤكد التأثير الإيجابي لنمط النشر المنتظم على النتائج.

#### ٣-٨- دراسة تأثير استخدام عقد مختلفة بالطاقة الابتدائية

تعد فكرة الاعتماد على البروتوكولات الشجرية فكرة جيدة، لكن وعلى الرغم من النتائج الإيجابية التي أعطتها الاستراتيجيات المطبقة إلا أنها لم تمنع ظهور مشكلة النقاط الساخنة والعقد المعزولة إنما أخرت ظهورها فقط. يعود ذلك إلى تحميل بعض العقد حملاً إضافياً مع أنها تملك نفس الطاقة الابتدائية التي تملكها بقية العقد.



الشكل (١١): عدد العقد المعزولة في كل جولة من أجل الحالات التي كان نمط النشر فيها عشوائياً.

قمنا هنا بزيادة طاقة ١٠ عقد مختارة عشوائياً إلى الضعف (فأصبح لدينا شبكة متباينة (Heterogeneous) وقيمتنا تأثير هذا التغيير على زمن موت أول عقدة ومتوسط الطاقة المتبقية في الشبكة وعدد العقد المعزولة وذلك عند تطبيق الاستراتيجيات المدروسة في دالة الهدف حيث أجرينا التجارب فقط على الشبكة المنشورة بشكل منتظم والتي يقع فيها الجذر في المركز كون هذه النموذج أعطى النتائج الأفضل في سيناريوهاتنا السابقة، ثم قارنا النتائج التي ظهرت معنا بعد تعديل الطاقة الابتدائية مع النتائج التي حصلنا عليها سابقاً في حالة GC المتجانسة والتي كانت فيها الطاقة الابتدائية لجميع العقد متماثلة Homogeneous يظهر الشكل (١٢) نتائج المحاكاة في الحالتين المتجانسة وقد أشرنا إليها في الرسم Hom والمتباينة والتي أشرنا إليها في الرسم بـ Het .

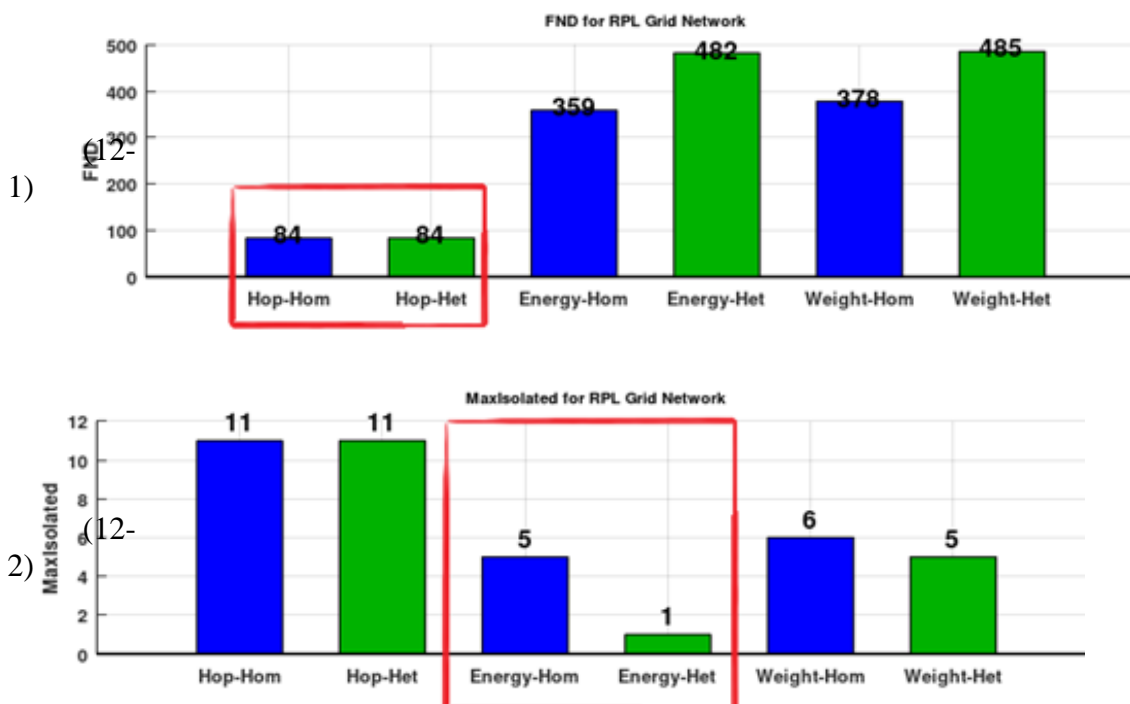
يتألف هذا الشكل من ثلاث أشكال فرعية (١-١٢) يعبر عن زمن موت أول عقدة من أجل جميع الاستراتيجيات عند استخدام النموذج GC وذلك في الحالتين المتجانسة والمتباينة.

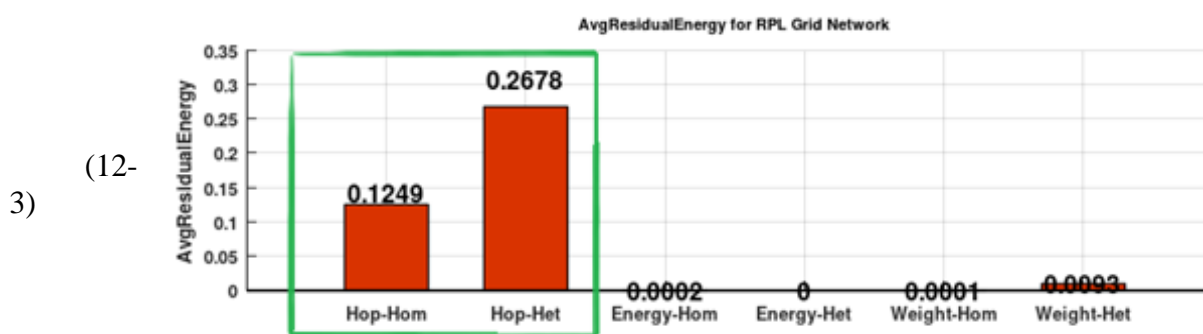
(١٢-٢) يعبر عن عدد العقد المعزولة الأعظمي من أجل جميع الاستراتيجيات عند استخدام النموذج GC وذلك في الحالتين المتجانسة والمتباينة. أما (١٢-٣) يعبر عن متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة من أجل جميع الاستراتيجيات المطبقة في النموذج GC وذلك في الحالتين المتجانسة والمتباينة.

يظهر من الشكل (١-١٢) أن زمن موت أول عقدة FND عند استخدام MinHop لم يتأثر بتعديل الطاقة الابتدائية لبعض العقد وبقي محافظاً على الرقم ٨٤ (بوضوح المستطيل الأحمر في الشكل هذه الحالة) ويعود هذا إلى أن استراتيجية MinHop تعتمد على عدد الفترات الأقل عند اتخاذ قرار اختيار الإباء ولا تأخذ بالاعتبار أي عامل آخر لذلك لم تتأثر النتائج بالطاقة الإضافية التي تم منحها لبعض العقد، كما يظهر الشكل أيضاً أن

FND قد زاد بشكل ملحوظ عند استخدام MaxEnergy و WeightedEqual في الشبكة المتباينة مقارنة بالقيم التي ظهرت في الشبكة المتجانسة ويعود ذلك الى الاعتماد على طاقة العقد عند اختيار الأباء وتشكيل شجرة دوداج. كما نلاحظ من الشكل (١٢-٢) أن عدد العقد المعزولة الاعظمي maxisolated عند استخدام MinHop لم يتأثر ايضا بتعديل الطاقة الابتدائية لبعض العقد وبقي محافظاً على الرقم ١١ ويعود هذا الى أن نفس السبب السابق بينما نلاحظ في نفس الشكل ان عدد العقد المعزولة قد نقص من ٥ الى ١ عند استخدام MaxEnergy ويفسر ذلك بان البروتوكول RPL وفق هذه الاستراتيجية سيفضل العقد التي تملك طاقة اكبر كأباء عند تشكيل الشجرة مما يؤدي الى المحافظة على العقد حية أكبر زمن ممكن. ويظهر الشكل أيضاً انه عند استخدام WeightedEqual فان عدد العقد المعزولة انخفض أيضاً ولكن بشكل طفيف. يعود ذلك الى ان هذه الاستراتيجية تعتمد على عاملين عند اتخاذ قرار اختيار الإباء (عدد القفزات الاقل والطاقة المتبقية الأكبر) مما سيجعل تأثرها بعامل الطاقة اقل من MaxEnergy.

اما (٣-١٢) فيظهر متوسط طاقة متبقية كبير عند استخدام MinHop في حالة الشبكة المتجانسة وازيادة هذه القيمة في الشبكة المتباينة. ولكن وكما اشرنا سابقاً بأن هذه الطاقة المتبقية ناتجة عن كثرة العقد المعزولة وعدم قدرة هذه العقد على ارسال بياناتها الى الجذر، وبالتالي فإنها حية الا انها لا تقوم بوظيفتها عملياً. وعليه نلاحظ ان الاستراتيجية MaxEnergy هي المتأثر الأكبر بإضافة عقد ذي طاقة ابتدائية أكبر في الشبكة حيث زاد زمن موت اول عقد بشكل واضح، تليها WeightedEqual بينما لاتستفيد MinHop أبداً من فكرة الشبكات المتباينة.





الشكل (١٢): نتائج المحاكاة عند استخدام عقد متباينة بالطاقة

يلخص الجدول (٤) نتائج المحاكاة عند استخدام شبكة تملك عقد مختلفة بالطاقة الابتدائية

الجدول (٤): نتائج المحاكاة عند استخدام عقد متباينة بالطاقة

Objective	Scenario	FND	MaxIsolated	AvgResidualEnergy
MinHop	Homogeneous	84	11	0.1249
MinHop	Heterogeneous	84	11	0.2678
MaxEnergy	Homogeneous	359	5	0.0002
MaxEnergy	Heterogeneous	482	1	0.0000
WeightedEqual	Homogeneous	378	6	0.0001
WeightedEqual	Heterogeneous	485	5	0.0093

## ٩- الاستنتاجات

تبين لنا من نتائج المحاكاة ما يلي:

1. الاستراتيجية WeightedEqual هي الأكثر كفاءة في معظم السيناريوهات، إذ انها حسنت من زمن موت اول عقدة بمقدار ٢٤ % مقارنة بـ MaxEnergy كما انها خفضت من عدد العقد المعزولة بمقدار ٥٧ %
2. تعاني الشبكة عند استخدام MinHop كمعيار في دالة الهدف من مشكلة "النقطة الساخنة" وتسبب نضوباً مبكراً لطاقة العقد ولاسيما القريبة من الجذر.
3. تقدم دالة الهدف MaxEnergy أداءً جيد من حيث زمن موت العقدة الأولى.
4. وضع الجذر في المركز أفضل من وضعه في الأعلى من حيث الترابط وعدد العقد المعزولة.
5. يقلل النشر المنتظم للعقد من عدد العقد المعزولة ويزيد من استقرار الشبكة مقارنة بالنشر العشوائي.
6. متوسط الطاقة المتبقية وحده لا يعكس الأداء الحقيقي؛ بل يجب تحليله مع مؤشرات أخرى كعمر الشبكة والترابط.
7. خوارزمية MaxEnergy هي الأكثر استفادة من مفهوم الشبكة المتباينة، لأنها تختار العقد الأعلى طاقة كأباء، وبالتالي فان زيادة الطاقة الابتدائية لبعض العقد يحسن عمر الشبكة وأدائها وترابطها.

## ١٠- التوصيات والاعمال المستقبلية

يوصى باستخدام النشر المنتظم للعقد ووضع الجذر في مركز الشبكة ان سمح التطبيق بذلك، كما نوصي باستخدام معياري عدد القفزات والطاقة المتبقية الأكبر معاً WeightedEqual للحصول على توازن بين عمر الشبكة واستهلاك الطاقة في دالة الهدف للبروتوكول RPL كما ويفضل استخدام بعض العقد التي تملك طاقة أكبر من غيرها في الشبكة عند استخدام التوجيه الشجري لتحسين عمرها وأدائها.

نقترح العمل على تطوير خوارزميات هجينة تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لاختيار المسارات المثلى ديناميكياً، بحيث يؤخذ بالاعتبار كلاً من الطاقة المتبقية والمسافة وعدد الجيران والثقة وجودة الرابط كمعايير أخرى في دالة الهدف وذلك لاتخاذ القرار الأفضل عند اختيار الأبناء ولتحسين اختيار المسارات بما يحقق المتطلبات التي يفرضها التطبيق الذي تصمم شبكة انترنت الأشياء لأجله.

## المراجع

- [1] M. Singh and S. Sharma, "Internet of Things (IoT): Applications, trends, issues and challenges," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 210, p. 103514, 2022. doi: 10.1016/j.jnca.2022.103514.
- [2] S. Sankar, "CT-RPL: Cluster Tree Based Routing Protocol to Maximize Network Lifetime," *Sensors*, vol. 20, no. 20, p. 5858, 2020.
- [3] V. Arunachalam, "Load Balancing in RPL to Avoid Hotspot Problem for Improving Data Aggregation in IoT," *Int. J. Netw. Security & Its Applications*, vol. 13, no. 1, pp. 49–62, 2021.
- [4] M. Alnajjar, "A Comprehensive Survey on Objective Functions in RPL Routing with Various Networking and Application Scenarios," *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2025.

- [5] A. H. Hussein, et al., "*LEA-RPL: Lightweight Energy-Aware RPL Protocol Based on PSO*," Telecommunication Systems, Springer, 2024.
- [6] S. K. Das, et al., "*T-OF: A New Objective Function for RPL Routing Protocol in IoT to Increase Network Lifetime*," Int. J. Wireless and Mobile Computing, vol. 19, no. 1, 2020.
- [7] J. R. Arul, et al., "*Design of a Load Balancing Objective Function for RPL*," J. High Speed Networks, vol. 30, no. 4, 2024.
- [8] T. Winter, "*RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*," RFC 6550, IETF, Mar. 2012. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6550>
- [9] M. H. Iqbal, et al., "*Multipath Congestion and Energy Aware RPL (CEA-RPL)*," Int. J. Comput. Netw. Commun. (IJCNC), vol. 15, no. 3, pp. 59–74, 2023.
- [10] M. Singh and S. Sharma, "*Internet of Things (IoT): Applications, trends, issues and challenges*," J. Netw. Comput. Appl., vol. 210, p. 103514, 2022. doi: 10.1016/j.jnca.2022.103514.
- [11] J. P. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean, and D. Barthel, "*Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks*," RFC 6551, IETF, Mar. 2012. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6551>
- [12] J. Gnawali and P. Levis, "*The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function (MRHOF) for RPL*," RFC 6719, IETF, Sep. 2012. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6719>
- [13] E. Shakshuki, "*A comprehensive survey on RPL routing-based attacks, defences, and mitigation techniques*," Comput. Netw., vol. 235, p. 109845, 2025. doi: 10.1016/j.comnet.2023.109845.
- [14] A. N. Abbou and M. Jukka, "*ETXRE: Energy and delay efficient routing metric for RPL protocol and wireless sensor networks*," IET Wirel. Sensor Syst., vol. 13, no. 6, pp. 235–246, 2023. doi: 10.1049/wss2.12070.
- [15] C. Dogan, "*Analysis of RPL Objective Functions with Security Considerations*," Proc. Int. Conf. on Security and Privacy in Communication Networks, 2022.
- [16] Z. Wang, W. Li, and H. Dong, "*Analysis of energy consumption and topology of routing protocol for low-power and lossy networks*," J. Phys. Conf. Ser., vol. 1087, no. 5, p. 052004, Sep. 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1087/5/052004.