مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية
مجلد 41-عدد 3 (2025): 113- 131

Damascus University Journal for the Basic Sciences
Vol 41 No.3 (2025): 113 - 131

نمذجة شبكات الاستشعار اللاسلكية باستخدام البيان العشوائي

آلاء حسن سلامة[1]، سمير نزيه جعفر[2]

[1] طالبة دكتوراه، كلية العلوم، قسم الرياضيات، جامعة دمشق

Alaa2.salameh@damascusuniversity.edu.sy

[2] استاذ مساعد، كلية العلوم، قسم الرياضيات، جامعة دمشق.

Samir.jafar@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

تعتبر شبكات الاستشعار اللاسلكية من أهم التطبيقات في مجال الحوسبة المتنقلة، وتلعب دوراً مهماً في حياتنا اليومية. تتصف شبكات الاستشعار اللاسلكية بأنها أجهزة صغيرة تعمل بالبطارية. تعد الطاقة من الموارد المحدودة في شبكات الاستشعار اللاسلكية والتي لها أثر كبير على أداء هذه الشبكات، وفترة حياة الشبكة من الخصائص الأساسية الواجب تحسينها من خلال ضمان استهلاك الطاقة في الحساسات، كما هو معلوم تعد الشبكة مثالاً واضحاً على البيان وتعتبر عملية دمج نظرية البيان مع الشبكات قضية مهمة في مجال البحث العلمي. لكن ليست جميع الشبكات تنشأ بشكل منظم فبعض الشبكات يمكن أن تنشأ بشكل عفوي وغير منظم وتتطور بشكل تدريجي عبر الوقت، ما أدى إلى تعريف البيان العشوائي. لذلك توجهنا في هذا البحث نحو التعرف على البيان العشوائي ونماذجه، والتطرق إلى البيان العشوائي الهندسي. كما قمنا باقتراح نموذج جديد لبناء شبكات الاستشعار اللاسلكية التي تنشر عشوائياً. يعد النموذج المقترح فعال من ناحية التعقيد الزمني لعملية بناء الشبكة **($O(n^2)$)**، كما يعمل على تقليل استهلاك الطاقة بالاعتماد على البيان العشوائي الهندسي. للتأكد من صحة النتائج النظرية، أجرينا محاكاة للنموذج في بيئة عمل الماتلاب.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، البيان العشوائي، الطاقة، البيان العشوائي الهندسي، النمذجة الرياضية، المحاكاة.

تاريخ الإيداع: 2023/11/07
تاريخ الموافقة: 2024/01/29

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

Modeling wireless sensor networks using random graph

Alaa Hassan Salameh[1], Samir nazih jafar[2]

[1].PhD student ,faculty of science, mathematics department ,Damascus university
Alaa2.salameh@damascusuniversity.edu.sy

[2].assistant professor ,faculty of science, mathematics department ,Damascus univerty
Samir.jafar@damascusuniversity.edu.sy

Received :2023/11/07
Accepted:2024/01/29

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA

Abstract

Wireless sensor networks are considered one of the most important applications in mobile computing and networking. These networks play an important role in our daily life. Wireless sensors network are tiny battery-powered devices. The energy is one of bounded materials in wireless sensor networks which plays effective role in prformance of these networks. In Mathematics, a network is an example of a graph the integrating process of graph theory with wireless networks is considered a significant issue in the scientific research filed. But not all the network emerge organizely wheresome ones emerge spontaneously or unorganizely and they devlope gradually throug time. Which led to the definition of the random graph. So in our work we aim to get knowledge about random graph and then broaching to random geometric graph. Also we suggest new model for building randomly deployed wireless sensor networks. The suggested model is effective with respect to time complexiction for contructing network (O(n2)) . on the other hand it works on decreasing of energy consumptiun by using geometric random graph. For ensuring of validity of results we ran a simulation of the model in work environment Matlab.

Keywords: Wireless sensor network, Random graph, Energy, Random geometric graph, Modeling Simulation,

1. مقدمة:

تعد عمليات المراقبة عن بعد لأحداث حسية مختلفة ومتعددة كمراقبة البيئة والأمن ورصد اقتحام المناطق المحظورة ورصد الأحوال الجوية مجالات مهمة في العالم نتيجة التطور السريع الذي نشهده في يومنا هذا، كما أنها من أوسع تطبيقات شبكات الاستشعار اللاسلكية . تعتبر شبكات الاستشعار اللاسلكية ذات أهمية كبيرة في مجال الاتصال اللاسلكي والنظم الموزعة، وتتم عملية الرصد والمراقبة في هذه الشبكات من خلال أجهزة لاسلكية تدعى بعقد الاستشعار (Sensor Nodes) والمحطة الأساسية (Base Station). تقوم عقد الاستشعار في البيئة المراقبة بجمع البيانات وإرسالها لاسلكياً إلى المحطة الأساسية التي بدورها تعالج البيانات وتحللها. تتميز عقد الأستشعار بالقدرة على التواصل والحساب والاستشعار في بيئة قاسية.

تعتبر عملية دمج نظرية البيان مع الشبكات أحد مجالات البحث العلمي النشطة، يزداد الضوء على هذا المجال بعد النمو السريع في ثورة تكنولوجيا المعلومات الحديثة. لكن من المعلوم بأن بعض الشبكات تتصف بعدم الانتظام والديناميكية، ومثال على ذلك هو الإنترنيت الذي بدأ كشبكة صغيرة محدودة النطاق، ثم تطور بشكل تدريجي حتى أصبح شبكة عالمية تتكون من ملايين العقد والأجهزة. ذلك دفع إلى استخدام البيان العشوائي كأداة لدراسة الأنظمة العشوائية في الرياضيات والفيزياء. تم تطوير هذه النظرية فيما بعد لتشمل التطبيقات في مجالات الحوسبة والشبكات وعلم الاجتماع والاقتصاد وغيرها (Alheeti et al.,2020). لنظرية البيان العشوائي تطبيقات عديدة في حل المشكلات (Avin.,2006)على سبيل المثال تعاني شبكات الاستشعار اللاسلكية من مشكلات حرجة كالتغطية والأمن والطاقة يوضح (Huang.,2003) مشكلة الاتصال والتغطية في شبكات الاستشعار اللاسلكية (Huang.,2003)، وفي (Norman., 2011) تمت دراسة الاتصال والتغطية في WSN بناءً على بيان هندسي عشوائي. تتصف أجهزة الاستشعار بأنها أجهزة صغيرة منخفضة الطاقة وتتمع بالقدرة على التواصل والاستشعار في بيئة قاسية. لكن يحتاج كل جهاز إلى إرسال المعلومات التي توصل إليها إلى المحطة الأساسية وأي استجابة عشوائية لأجهزة المستشعر سيكون لها تأثير سلبي ومباشر على عمر الأجهزة من خلال استنزاف طاقته الأوليه. إضافة إلى وجود شبكات استشعار لاسلكية منشورة في اماكن يصعب الوصول إليها فلا يمكن تغير بطارية العقدة التي نفذت طاقتها. لذلك تعد الطاقة من الموارد المحدودة في شبكات الحساسات اللاسلكية التي لها أثر كبير على أداء هذه الشبكات، فلا بد من أن يتم استخدامها ضمن الشبكات بشكل أمثلي. ذلك دفعنا إلى التوجه نحو بناء مخطط يجعل العقدة قادرة على تحديد مسارها الأفضل لنقل المعلومات للمحطة الأساسية. توجه البحث نحو تقليل استهلاك الطاقة في الشبكات المنشورة عشوائيا والتي يصعب الوصول إلى عقدها وتغير بطارية العقدة التي نفذت

طاقتها. قام البحث أولا باقتراح نموذج أولي لبناء شبكات الاستشعار اللاسلكية التي تنشر فيها العقد عشوائياً، بعد ذلك يعمل النموذج على تقليل استهلاك الطاقة بحذف بعض المسارات للعقدة التي تفوق طاقة استهلاكها طاقتها الأوليه بالاعتماد على البيان العشوائي الهندسي وبعض المعادلات الرياضية والوصول إلى بيان الشبكة الأقل استهلاكاً للطاقة. سنتعرف بدايةً على أهم المفاهيم الأساسية في نظرية البيان ثم سنتطرق إلى نظرية البيان العشوائي ونماذجه، والتركيز على البيان العشوائي الهندسي حيث تعد البيانات العشوائية الهندسية نموذجاً مؤثراً ومدروساً للشبكات الكبيرة. إظهار دور النموذج في تقليل استهلاك الطاقة في الشبكة.

2. الدراسات المرجعية:

نظراً لأهمية نظرية البيان في نمذجة العلاقات بين الكائنات وقدرتها على تمثيل العديد من مشاكل العالم الحقيقي أصبحت مجالاً مهماً في أحد أهم التطبيقات في الحوسبة المستقلة والعمل الشبكي. ونظراً لأهمية شبكات الاستشعار اللاسلكي وتطبيقاتها في الكثير من مجالات الحياة توجه العديد من الباحثين لدراسة استخدام البيان في شبكات الاستشعار اللاسلكية في (Mamatha et al.,2010) تطرق البحث إلى مشكلة موازنة الحمل في شبكات الاستشعار اللاسلكية. هي عبارة عن طريقة لنقل الحمل من العقدة المحملة بشكل كبير إلى عقدة محملة بشكل أقل. تم تقديم نهج باستخدام نظرية البيان لموازنة الحمل من أجل تعظيم الأداء ذلك بالاعتماد على مصفوفة لابلاس للبيان. أما في (Ameen et al.,2020) تم اقتراح مخطط جديد لإدارة معدل استهلاك الطاقة لأجهزة الاستشعار اللاسلكية. يعتمد بشكل كبير على نظرية البيان في أدراة معدل استهلاك الطاقة المناسب. تمكن هذه التقنية عقد الاستشعار من الانتظار في وضع السكون حتى الحصول على معلومات تحكم جديدة والانتقال من موقع إلى آخر تحت منطقة التغطية الراديويه. في النتائج التجريبية تم توضيح أن النظام المقترح في نظرية البيان يمتلك نتائج رائعة في خفض كمية الطاقة المستهلكة لأجهزة الاستشعار حيث يعتمد على تحديد أفضل مسار بين المصدر والواجهة. لكن ما يواجه تلك الأبحاث من ثغرات هي أنه لا يمكن تطبيقها على الشبكات المنشورة عشوائياً، حيث يفترض الباحث معرفة توزيع العقد في الشبكة والتوصيلات التي تتم بين العقد وعدم وجود العشوائية في التوزيع. لذلك توجه بعض الباحثين إلى دراسة البيان العشوائي وعلاقته مع الشبكات. أظهر الباحثين في (Ferrero et al .,2017) أن البيانات الهندسية العشوائية تستخدم للحصول على تمثيل بسيط للشبكات اللاسلكية. حيث حللت الكثير من الأبحاث الحديثة خصائص البيانات. كان الهدف من هذه الورقة هو إنشاء علاقة رياضية بين الخصائص المتوقعة لشبكة لاسلكية، من حيث الروابط وسطح النشر وعدد العقد. تمثل المنهجية المقترحة حلاً سريعاً لاختيار كمية العقد التي يجب نشرها على

السطح. يمكن تطبيقه مع الشبكات الحقيقية واختيار معلمات المحاكاة. لكن ما قام به الباحثون هنا هو فقط اقتراح آلية لاختيار عدد العقد التي سيتم نشرها ضمن الشبكة دون التطرق إلى مشكلات الشبكات. أما في (Norman., 2011) تمت مناقشة خصائص الاتصال والتغطية لشبكات الاستشعار اللاسلكية الغير متجانسة بناء على نموذج البيان العشوائي الهندسي الذي يعتمد أن العقد قادرة على الحركة والتنقل ويستخدم مفهوم السيطرة على المجموعة في نظرية البيان للاتصال. لكن ما يواجه هذا البحث هو أنه تطرق إلى مشكلة التغطية والاتصال دون النظر في طاقة الشبكة ضمن هذا النموذج. لم تقتصر الدراسات على هذه الأبحاث لكن ما سنطرق له في بحثنا بشكل مختلف ويعالج الثغرات في الأبحاث المذكورة سابقاً هو ضمان كفاءة استهلاك الطاقة ضمن الشبكة من خلال نمذجة شبكات الاستشعار اللاسلكية المنشورة عشوائياً وغير المتجانسة بالنسبة لنطاق الإرسال والطاقة، باستخدام البيان الهندسي العشوائي وضمان إرسال العقدة لبياناتها للمحطة الأساسية من خلال أفضل المسارات .

3. مواد البحث وطرائقه:

سنتطرق بدايةً إلى أهم المفاهيم الاساسية في نظرية البيان ونظرية البيان العشوائي بعد ذلك نتعرف على شبكات الاستشعار اللاسلكية وبعض تطبيقاتها.

3.1 نظرية البيان (Graph Theory)

نظرية البيان هي هياكل رياضية تستخدم لنمذجة العديد من مشاكل الحياة الحقيقية حيث توفر طريقة ملاءمة لتمثيل الكائنات الرياضية (Bondy.,1982)، وتتميز البيانات بتوفير رؤية مجردة والقدرة على التعديل والتغير السهل في النظام الحالي.

3.1.1 البيان (Graph)

يتألف البيان G من مجموعة V غير خالية من العناصر تدعى مجموعة العقد، مع مجموعة E كل عنصر منها مؤلف من عنصرين من V، وتدعى هذه العناصر بالأضلاع. لنعرف التطبيق f كالآتي:

$$f: E \to \{(x, y): x, y \in V\}$$

أي إذا كان $e \in E$ ضلعاً، وكانت $x, y \in V$ عقدتين بحيث $f(e) = (x, y)$، عندها فإن الضلع e يربط العقدتين x, y، وندعو العقدتين x, y بطرفي الضلع e. نسمي الثلاثية المرتبة $G = (V, E, f)$ بياناً. نقول إن الثلاثية (V, E, f) هي بيان منته إذا كانت كل من المجموعتين V و E مجموعة منتهية.

استخدمنا هذا التعريف بالتحديد من البيان لتوضيح أن البيان يمكن أن يحوي أضلاع مضاعفة وعرى ولكي لا نتطرق لذلك بالتفصيل عرفناه وفق التطبيق f دون وضع شروط على العقدتين x, y.

3.1.2 البيان الموجه (Directed Graph)

البيان الموجه هو بيان زودت أضلاعه باتجاه ونرمز له بالرمز $\vec{G}=(V,\vec{E})$ حيث V هي مجموعة العقد، E هي مجموعة الأقواس.

3.1.3 التمثيلات المصفوفية (Matrix Representations)

لمصفوفات البيان أهمية كبيرة في تمثيل البيان. من المصفوفات المستخدمة في نظرية البيان.

3.1.4 مصفوفة التجاور (Adjacency Matrix)

ليكن $G(V,E)$ بياناً بسيطاً مجموعة عقده $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ ومجموعة أضلاعه $E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$. نعرف مصفوفة التجاور لـ G بأنها المصفوفة المربعة $A=[a_{ij}]$ من البعد $n\times n$ حيث:

$$a_{ij}=\begin{cases}1 & (v_i,v_j)\in E\\ 0 & (v_i,v_j)\notin E\end{cases} \quad \dots\dots\dots(1)$$

أما مصفوفة التجاور لبيان غير البسيط $G(V,E)$ تعطى كما يلي :

$$a_{ij}=\begin{cases}0 & (v_i,v_j)\notin E\\ 1 & (v_i,v_j)\in E\\ 2 & (v_i,v_i)\in E\end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

3.1.5 المسار (Walk)

ليكن $G=(V,E)$ بياناً، وليكن $a,b\in V$، وليكن $n\geq 1$ عدداً صحيحاً عندئذٍ نعرف ما يلي:

إذا كانت $v_1,e_1,v_2,\dots,e_{n-1},v_n$ متتالية متناوبة من الرؤوس والأضلاع، حيث $v_n=b$,$v_1=a$ و $e_i=(v_i,v_{i+1})$ من أجل كل $i=1,..,n-1$، عندها نسمي المتتالية السابقة مساراً من a إلى b.

كما نعرف طول المسار بأنه عدد الأضلاع في المتتالية. يكون المسار مساراً مغلقاً إذا كانت عقدة البداية هي عقدة النهاية نفسها.

بوضع شروط رياضية على المسار نحصل على التعريفات التالية:

3.1.6 الطريق (Path)

إذا شكلت المتتالية $v_1,e_1,v_2,\dots,e_{n-1},v_n$ مساراً من a إلى b، فإننا نسميه طريقاً إذا كان $v_i\neq v_j$ لكل $i\neq j$. أي أنه من غير الممكن تكرار العقد في الطريق.

3.1.7 الممر (Trail)

إذا كانت $v_1, e_1, v_2, \ldots, e_{n-1}, v_n$ مساراً من a إلى b، فإننا نسميه ممراً إذا كان $e_i \neq e_j$ لكل $i \neq j$. أي أنه من غير الممكن تكرار الاضلاع في الممر.

3.2 نظرية البيان العشوائي

نظرية البيان العشوائي تقنية تستخدم في علم الرياضيات والحاسوب لتصميم نماذج للشبكات غير المنتظمة، وتتميز بأنها مرنة وسهلة التعديل والتحليل. تعتمد هذه التقنية في تصميم النماذج على إنشاء شبكة عشوائية بين العقد الموجودة في الشبكة. كما أنها تتميز بالاعتماد على مجموعة من القواعد الرياضية والإحصائية لإنشاء شبكة غير منظمة حيث تعتبر نظرية البيان العشوائي نقطة تقاطع بين نظريتي الاحتمال والبيان(Bollobás.,1985).

تم تعريف البيان العشوائي لأول مرة من قبل Erdós و Rényi في مقالهما "on random graph" المنشور عام 1959 حيث اقتراح الباحثين ثلاثة نماذج بيانية عشوائية تحت مسمى البيانات العشوائية Erdos−Renyi (Vallier.,2007).

3.2.1 البيان العشوائي الموحد (Uniform Random Graph)

البيان العشوائي الموحد هو نموذج رياضي يستخدم لإنشاء شبكات عشوائية باستخدام احتمالات متساوية لربط العقد في الشبكة. ليكن $L_{n,m}$ عائلة كل البيانات المسماة حيث $V = [n] = \{1,2, \ldots, n\}$ هي مجموعة العقد و m مجموعة الأضلاع حيث $0 \leq m \leq \binom{n}{2}$ من أجل كل بيان $G \in L_{n,m}$ فإن:

$$P(G) = \binom{\binom{n}{2}}{m}^{-1} \quad \ldots\ldots\ldots(3)$$

نبدأ ببيان فارغ على المجموعة [n]، ونقوم بإدخال الأضلاع m بالطريقة $\binom{\binom{n}{2}}{m}$ والخيارات متساوية الاحتمالات. نرمز إلى مثل هذا البيان العشوائي بـ $G_{n,m} = ([n], E_{n,m})$ ونسميه بياناً عشوائياً موحداً.

3.2.2 البيان العشوائي ذو الحدين (Binomial Random Graph)

البيان العشوائي ذو الحدين هو نموذج يستخدم احتمالات مختلفة لربط العقد في الشبكة، حيث يتم اختيار احتمال الربط لكل زوج من العقد بشكل مستقل. ليكن $0 \leq P \leq 1$ و $0 \leq m \leq \binom{n}{2}$ نخصص لكل بيان G مجموعة عقده [n] و m عدد الأضلاع الاحتمال:

$$\mathrm{P(G)} = P^m(1-P)^{\binom{n}{2}-m} \quad \text{.....(4)}$$

نبدأ في بيان فارغ مع مجموعة عقد [n] ونقوم بـ $\binom{n}{2}$ تجربة برنولي لإدخال الأضلاع بشكل مستقل مع احتمال P. نسمي مثل هذا البيان العشوائي بالبيان ذي الحدين ونشير إليه بـ

$$G_{n,p} = ([n], E_{n,p})$$

3.2.3 البيان العشوائي المعالج (Random Graph Process)

هي عملية توليد البيان بشكل تدريجي، حيث تتم إضافة العقد والأضلاع إلى البيان تدريجيا. ليكن $\{G_n(m): m = 0, \ldots\ldots, \binom{n}{2}\}$ نبدأ هذه العملية بالبيان الفارغ $G_n(0)$ مع n عقدة معزولة أي ليس فيه أضلاع ومن أجل كل خطوه $0 \leq m \leq \binom{n}{2}$ نحصل على ضلع عشوائي جديد نضيفه للبيان $G_n(m-1)$ لنحصل على البيان $G_n(m)$. يمكن تطبيق عملية البيان العشوائي في مجالات عديدة مثل شبكات الحاسوب والعلوم الاجتماعية والفيزياء على سبيل المثال في العلوم الاجتماعية يستخدم البيان العشوائي لوصف المسارات المحتملة لانتشار الأمراض المعدية. حيث يتم استخدام نماذج البيانات لتحليل وتوضيح سير انتشار الأمراض المعدية وعلاقات الاتصال بين الأفراد والأماكن التي يزورونها. حيث يتم ربط العقد بخطوط تمثل مسارات انتقال العدوى بين الأفراد. عادة ما يكون من الصعب تحديد البيان بالتفصيل لأن سير انتشار الأمراض المعدية يختلف باستمرار ويمكن أن يتغير بسرعة. لذلك يتم استخدام نموذج البيان العشوائي لتمثيل الانتشار المحتمل للعدوى بشكل عام والتركيز على الخصائص المهمة مثل الكثافة. بالتالي استخدام نماذج البيان العشوائي يمكن أن يساعد في التحليل والتوضيح. أما في الفيزياء سنعرض أيضاً مثالا بسيطا على استخدامه وهو الترشيح (percolation) تتعامل نظرية الترشيح مع الأسئلة المتعلقة بمرور السائل أو الغاز عبر الوسائط المسامية. لنفترض تم سكب سائل فوق بعض المواد المسامية. هل سيتمكن السائل من شق طريقة من الأعلى إلى الأسفل يمكن نمذجة هذا السؤال رياضياً: كل ضلع بين كل عقدتين في الشبكة يمكن أن يكون مربع مفتوح يسمح للسائل بالمرور باحتمال p أو مغلقة باحتمال $1-p$ التمثيل يكون باستخدام بيان عشوائي ذو حدين G(n,p).

3.3 البيان الهندسي العشوائي (Random Geometric Graph)

يمكن توصيف أي نظام معقد بواسطة شبكة. تعتبر العقدة في الشبكة كياناً مادياً في النظام المعقد، ويشير الضلع المتصل بين العقد المختلفة إلى العلاقة المتبادلة بين مكونات النظام. تستخدم نظرية البيان العشوائي كأداة قوية لدراسة الشبكة على نطاق واسع في مجالات شبكات الاستشعار اللاسلكية. في الشبكة العشوائية يمكن توصيل كل عقدتين بضلع باحتمال معين، سواء كان هناك ضلع

متصل بين العقدتين في النظام أم لا فإن ذلك مستقل إحصائياً(هذا يعني وجود حافة متصلة بين عقدتين ما هو إلا مسألة احتمالية ولا تعتمد على وجود حواف متصلة). من الواضح أن هذا لا يتماشى مع خصائص الهيكل لشبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث في شبكة الاستشعار يرتبط تكوين ضلع متصل لكل عقدة في الشبكة بالمسافة التي تنقلها بالإشارة. ستكون هناك حافة متصلة للعقد فقط إذا كانت ضمن نطاق إشارات الاتصال. من هذا المنظور لا يمكن استخدام نظرية البيان العشوائي لنمذجة WSN لذلك سنعرف فيما يلي البيان العشوائي الهندسي ونستخدمه لنمذجة شبكات الاستشعار اللاسلكية (Duchemin et al.,2023).

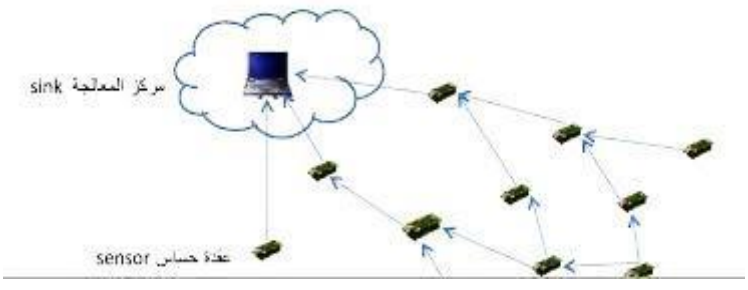
البيان العشوائي الهندسي: هو نموذج رياضي يستخدم في علم البيانات لتمثيل الشبكات العشوائية التي تتكون من نقاط عشوائية في الفضاء الهندسي. في هذا النموذج يتم توليد نقاط عشوائية في الفضاء، ثم يتم ربط النقاط المتقاربة بأضلاع بناء على معيار هندسي محدد. البيان العشوائي الهندسي G(n,r) حيث n هي نقاط من الفضاء $[0,1]^2$ يتم ربط أي نقطتين مع بعضهما البعض بواسطة ضلع إذا كانت المسافة بينهما على الأكثر r (Aguilar-Sanchez et al.,2020).

4. النتائج والمناقشة

قبل عرض النموذج المقترح سنقوم بتقديم شرح عن بيئة العمل المستهدفة.

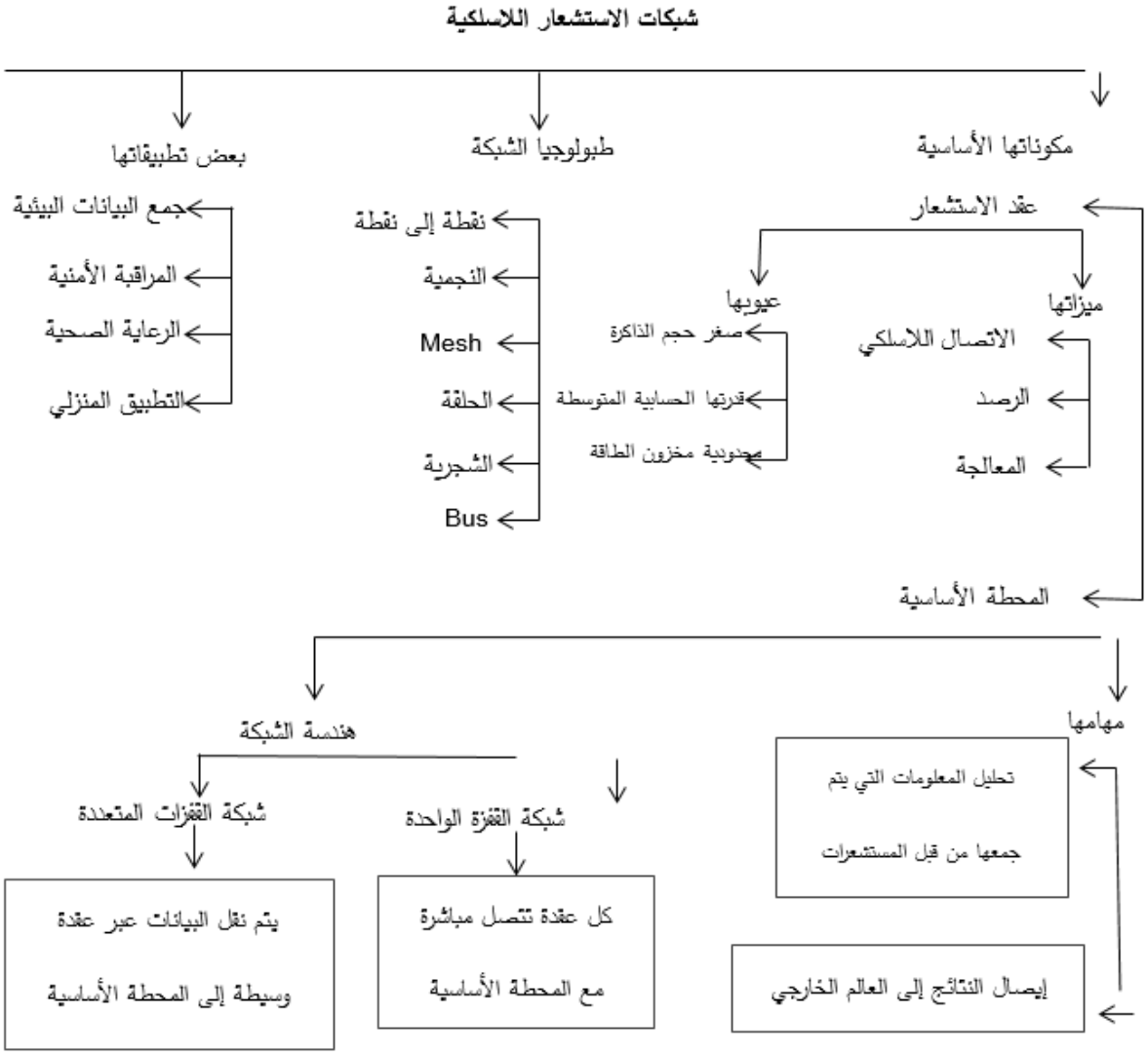
4.1 بيئة العمل المستهدفة

إن بيئة العمل التي يستهدفها البحث هي شبكات الاستشعار اللاسلكية وما دفعنا لاختيار هذه الشبكات هي ميزاتها العديدة كقابلية توسعها بشكل كبير واستقلاليتها بالطاقة وسهولة نشرها وإمكانية تزويدها بأجهزة لتحديد موقعها. بالإضافة لأهميتها وتطبيقها في العديد من مجالات الحياة سواء الأمنية كاكتشاف الحرائق أو التكنولوجية كالمنزل الذكي. إلا أن ما يعيب الشبكات هو أن الطاقة من المواد المحدودة فيها، وفي معظم الأحيان لا يمكن الوصول إليها وتغير بطارية العقدة التي نفذت طاقتها. حيث يشكل العنصر البشري عائقاً، إما لصعوبة تواجده في الأماكن التي توضع فيها هذه الشبكات أو إذا استلزم جمع المعلومات زمناً طويلاً (Agre et al.2005). يوضح الشكل (1) مثال على هذه الشبكات.



الشكل1

سنقدم فيما يلي مخطط يوضح شرح بسيط لأهم المفاهيم في شبكات الاستشعار اللاسلكية.



4.2 النموذج المقترح

سنقوم باقتراح نموذج رياضي لنمذجة شبكات الاستشعار اللاسلكية يعمل على تقليل استهلاك الطاقة وإيجاد أفضل المسارات لنقل البيانات (Data) بين العقد.

يتم نشر n عقدة استشعار بطريقة عشوائية مع تزويد كل عقدة برقم ووضع المحطة الأساسية في مكان معلوم مسبقاً. تتصف العقد بأنها منشورة عشوائياً وغير متجانسة بالنسبة لنطاق الإرسال والطاقة. يرتكز النموذج المقترح بشكل أساسي على البيان العشوائي الهندسي. بدايةً ليكن $G(V,r_i)$ بيان هندسي عشوائي حيث V هي مجموعة عقد الاستشعار أما r_i هو نطاق الإرسال للعقدة i. سنعرف

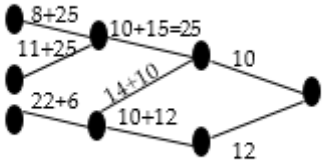
البيان العشوائي الهندسي في الفضاء ثنائي الابعاد بفرض أن $X_i=(x_i,y_i)$ تشير إلى احداثيات العقدة i في الفضاء ثنائي الابعاد وليكن $X_j=(x_j,y_j)$ تشير إلى إحداثيات العقدة j في الفضاء ثنائي الابعاد عندئذ وجود ضلع بين العقدتين i وj يكون وفق التالي:

$$f(X_{ij}) = \begin{cases} 1 & \|X_i - X_j\| \le r_i \\ 0 & \|X_i - X_j\| > r_i \end{cases} \quad \text{.....(5)}$$

لتكن k هي المحطة الأساسية نقوم بربط العقد التي تقع المحطة الأساسية ضمن نطاق إرسالها $f(X_{ik})$. نسمي المستوى الأول كل العقد التي ترتبط مع المحطة الأساسية، ثم نبدأ بعقدة i من المستوى الأول ونعتبر أن تلك العقدة هي العقدة المركزية ونربط فيها كل العقد j التي تقع ضمن نطاق إرسالها بشرط ألا لا تكون العقد j من نفس مستوى العقدة i. نتبع نفس هذه الخطوات من أجل كل عقد المستوى الأول وبالتالي كل العقد التي ترتبط مع المستوى الأول تسمى عقد المستوى الثاني وهكذا حتى نشكل جميع المستويات. ننشأ مصفوفة المستويات أسطرها رقم المستوى والأعمده هي أرقام العقد في المستوى. ترتب العقد في المصفوفة بدأً من العقد الأكثر طاقة أولية في المستوى. على سبيل المثال مصفوفة فيها ثلاثة مستويات وعدد العقد 6. يضم المستوى الأول العقدة 6 و3 لكن العقدة 6ذات طاقة أولية أكبر من 3 باتباع نفس الطريقة لكل العقدة نحصل على مصفوفة المستويات:

$$\begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 1 & 2 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$$

نرسم بعد ذلك البيان تحمل الأضلاع أوزان. نبدأ من العقد في المستوى الأول ويوزن كل ضلع بالمسافة بين العقدة والمحطة الأساسية. بعد ذلك ننتقل للمستوي الثاني ويحمل كل ضلع بالمسافة بين العقدتين اللتين ترتبطان فيه جمع له وزن الضلع الذي يربط عقدة المستوى الأول مع المحطة الأساسية. أما في المستوى الثالث نقوم أيضاً بوزن كل ضلع يربط عقدة في المستوى الثالث مع عقدة في المستوى الثاني بالمسافة بين العقدتين ونجمع له أقل وزن ضلع من الأضلاع التي تربط العقدة في المستوى الثاني مع المستوى الأول، كما في المثال الموضح في الشكل 2.



الشكل 2

نكمل بنفس الطريقة لكل المستويات. نسعى للحصول على البيان الأفضل من حيث استهلاك الطاقة. نفرض أن E_j هي طاقة العقدة الأولية وترمز المعادلة 7 إلى استهلاك العقدة مع جميع العقد التي ترتبط فيها:

$$T(j) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{jiq} * N_{jiq} + \varepsilon_{jir} * N_{jir} \quad \text{.....(6)}$$

ε_{jiq} :هو مقدار الطاقة المستهلكة إذا مرت رسالة رد واحده عبر المستشعر j.

ε_{jir} :هو مقدار الطاقة المستهلكة إذا مرت رسالة استعلام واحده عبر المستشعر j.

N_{jiq} :عدد رسائل الاستعلام التي تمر عبر المستشعر j إلى المستشعر i.

N_{jir} :عدد رسائل الرد التي تمر عبر المستشعر j إلى المستشعر i.

تحدد هذه المتغيرات تبعا لكل شبكة أي نزود فيه بدايةً. الآن لنرى إذا كانت العقدة وفق طاقتها الأولية قادرة على الاستمرار في الارتباط مع كل العقد التي ترتبط فيها من خلال العلاقة: $E(j) - T(j)$. نميز الحالات الآتية:

1. الناتج عدد سالب أي الاستهلاك أكبر من الطاقة الأولية للعقدة. هنا يجب تقليل عدد العقد التي ترتبط معهم العقدة.
2. الناتج موجب تحافظ العقدة على ارتباطاتها.
3. الناتج 0 هنا نعمل على حذف ارتباط واحد للعقدة ذلك لمنح العقدة طاقة إضافية.

لمعرفة كم عقدة يجب حذف الارتباط معها نقوم بما يلي:

$$l = \frac{T(j)}{s} \quad \text{.....(7)}$$

حيث l هي الطاقة التي تستهلكها العقدة j في كل مسار، وs هـ عدد العقد التي ترتبط مع العقدة j. بعد ذلك نحدد m عدد العقد التي يمكن لـ j تحملها $m = \frac{E(j)}{l}$. بعد ذلك نقوم بعملية حذف العقد الفائضة من العقدة j والتي عددها H_j=s−m. تتم عملية الحذف كما يلي: نبدأ من المستوى الأخير وليكن y. ناخذ أول عقدة من المستوى y من مصفوفة المستوى ولتكن e نحذف H_e من ارتباطاتها مع العقد من المستوى الأقل. حيث يتم أولاً حذف العقد التي ترتبط مع e وأضلاعها موزونة بأكبر مقدار من المسافة مع e. عند تساوي المسافة بين عقدتين والعقدة e نقوم بحذف العقدة ذات الطاقة الأقل ذلك بالاعتماد على مصفوفة المستوى نتبع نفس الطريقة لكل عقد المستوى. ننتقل للمستوى الذي يليه نبدأ بأول عقدة من المستوى نحافظ على ارتباطها مع العقد في المستوى الأعلى، ونتبع نفس الطريقة للحذف من المستوى الأقل. نكرر الخطوات السابقة لكل المستويات ماعدا المستوى الأول فلا نحذف ارتباط أي عقدة

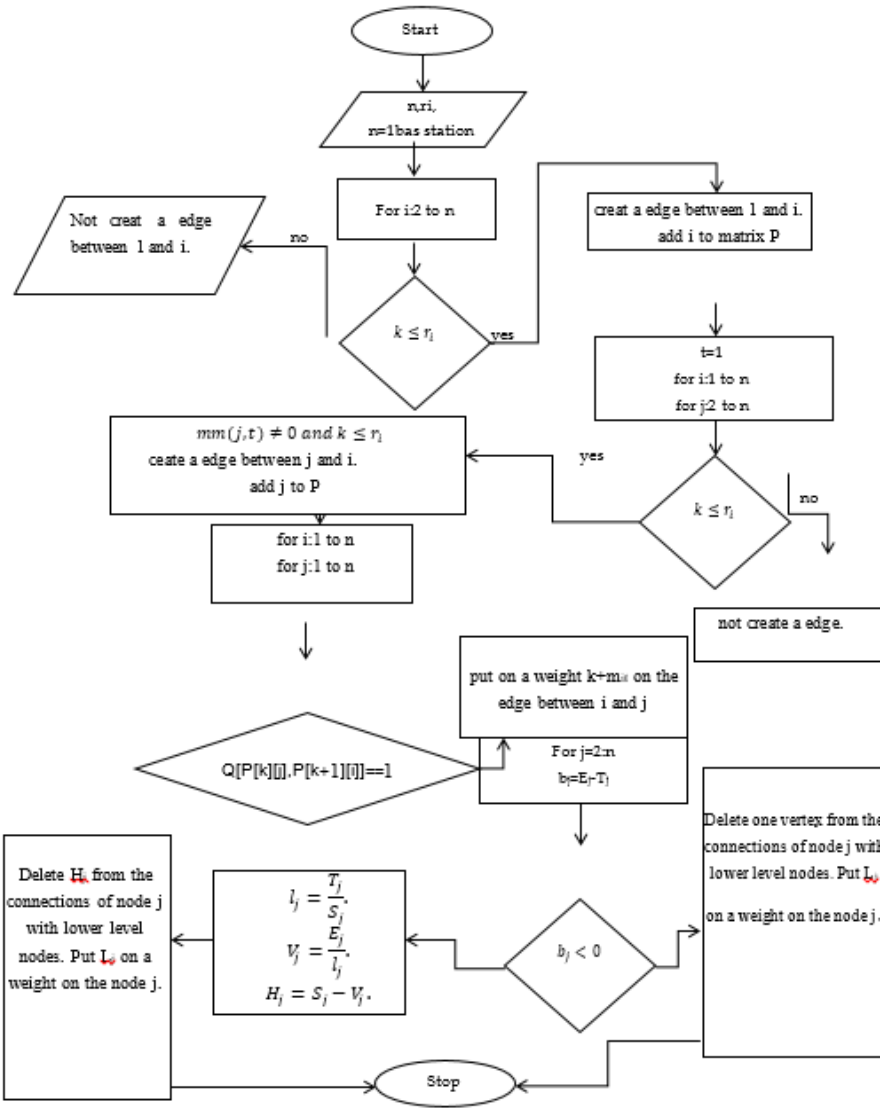
مع المحطة الأساسية، لذلك عند نشر العقد نحاول جاهداً أن يتم نشر العقد ذات الطاقة الاعلى عند المحطة الاساسية. بعد الانتهاء من عملية الحذف نشكل مصفوفة التجاور للبيان. بعد ذلك نقوم بوزن العقد بطاقة الاستهلاك لها وفق العلاقة 8:

$$L(j) = \frac{E(j) - \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_{jiq} * N_{jiq} + \varepsilon_{jir} * N_{jir}}{E(j)}$$

قمنا باختيار هذا الشكل بالتحديد لأن النموذج يتركز على معدل فقد العقدة من طاقتها الأولية لنقل الرسائل عندما ما نحسب إجمالي استهلاك الطاقة. ذلك نكون حصلنا على البيان الذي يمثل شبكة منشوره عشوائياً. مع برمجة العقد للارتباط بحيث نحصل على أفضل طاقة استهلاك وأقل المسارات للوصول للمحطة الأساسية.

بأخذ $k = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2}$ يعمل النموذج وفق المخطط التدفقي التالي:

.....(8)



4.3 التعقيد الزمني للنموذج المقترح

سندرس الآن التعقيد الزمني للنموذج المقترح: بفرض أن عدد عقد الاستشعار التي سيتم نشرها هي n. بعد نشر العقد يطلب من المستخدم تزويد النموذج المقترح بموقع العقدة ونطاق إرسالها بالتالي نحتاج إلى حلقة for لإدخال النطاق الترددي للعقد وتخزينه ضمن متجهة من البعد n ومنه نحتاج إلى n تكرار تكون كلفة الحلقة كحد أعلى هي n أما نطاق إرسال العقدة فنحتاج إلى حلقتي for الأولى تدخل فواصل النقاط والأخرى تدخل التراتيب ويتم تخزين المعلومات ضمن مصفوفة فتكون تكلفة الحلقين كحد أعلى هي n^2 بالتالي تحتاج للمرحلة تعقيد قدره $T_1=O(n^2)+O(n)=O(n^2)$ حيث O هو الحد الأعلى. ربط العقد وترتيبها ضمن مستويات الموضح في المخطط التدفقي للنموذج بالإضافة إلى ترتيب العقد ضمن مصفوفة المستويات يتطلب حلقة for وحلقة if ضمنها فتكون كلفة الحلقتين كحد أعلى n^2 ومن ثم نحتاج إلى ترتيب العقد حلقتي for فتكون الكلفة كحد أعلى هي n^2 ومنة التعقيد الزمني للمرحلة $T_2=O(n^2)+O(n^2)$. وزن الأضلاع يتطلب حلقتي for متداخلتين بالتالي التعقيد الزمني $T_3=O(n^2)$. أما التعقيد عندما ما نقوم بحساب استهلاك الطاقة في العقد ثم حذف العقد الواجب حذفها كما هو موضح في النموذج هو $T_4=O(n)$. التعقيد الزمني للنموذج المقترح حيث O الحد الأعلى هو:

$$T_1+T_2+T_3+T_4=O(n^2)+O(n^2)+O(n^2)+O(n)=O(n^2) \quad \ldots\ldots(9)$$

4.4 كفاءة النموذج المقترح

إن أهمية استخدام البيان العشوائي لنمذجة شبكات الاستشعار اللاسلكية تكمن في فهم أفضل لتصميم الشبكات وتحليل أدائها. واستخدامنا البيان العشوائي الهندسي خاصةلانه يعد نموذجاً مؤثراً ومدروساً للشبكات الكبيرة كما أنه جاء في ضوء الحصول على نتائج دقيقة وربط العقد ضمن نطاق إرسالها فتكون على الرغم من عشوائية النشر للعقد إلا أننا قمنا بجعل العقد ترسل بياناتها ضمن المسارات الأفضل. ولما كان لبرنامج الماتلاب قوة في تحليل البيانات وتصور النتائج بشكل بصري استخدمناه كأداة لمحاكاة النموذج المقترح حيث يوفر منهجية واضحة لتقديم وتحليل النتائج.

محاكاة النموذج

بفرض أننا نعلم قدرة كل عقدة في استقبال وإرسال الرسائل عبرها بالإضافة إلى طاقتها ونطاق إرسالها وذلك يأتي ضمن إمكانية تطبيق النموذج مهما كانت مواصفات العقد المنشورة. بعد النشر العشوائي للعقد نقوم بتزويد البرنامج بنطاق إرسال العقد وموقعها

وطاقتها وإمكانياتها على الاستقبال والإرسال. وفق النموذج المقترح يزودنا البرنامج بالبيان الذي يمثل الشبكة. بعد ذلك يقوم بعمليات تحسين للحصول على التمثيل الأفضل للشبكة من ناحية كفاءة استهلاك الطاقة فيها.

على سبيل المثال ننشر شبكة مؤلفة من 10 عقد استشعار عشوائياً حيث العقدة 1 هي المحطة الأساسية. مزودة هذه العقد بأجهزة اكتشاف الموقع زودت العقد البرنامج بإحداثياتها. وفق المصفوفة التالية:

$$\begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 5 & 1 \\ 2 & 2 \\ 1 & 1 \\ 6 & 8 \\ 15 & 11 \\ 13 & 13 \\ 12 & 12 \\ 24 & 24 \end{pmatrix}$$

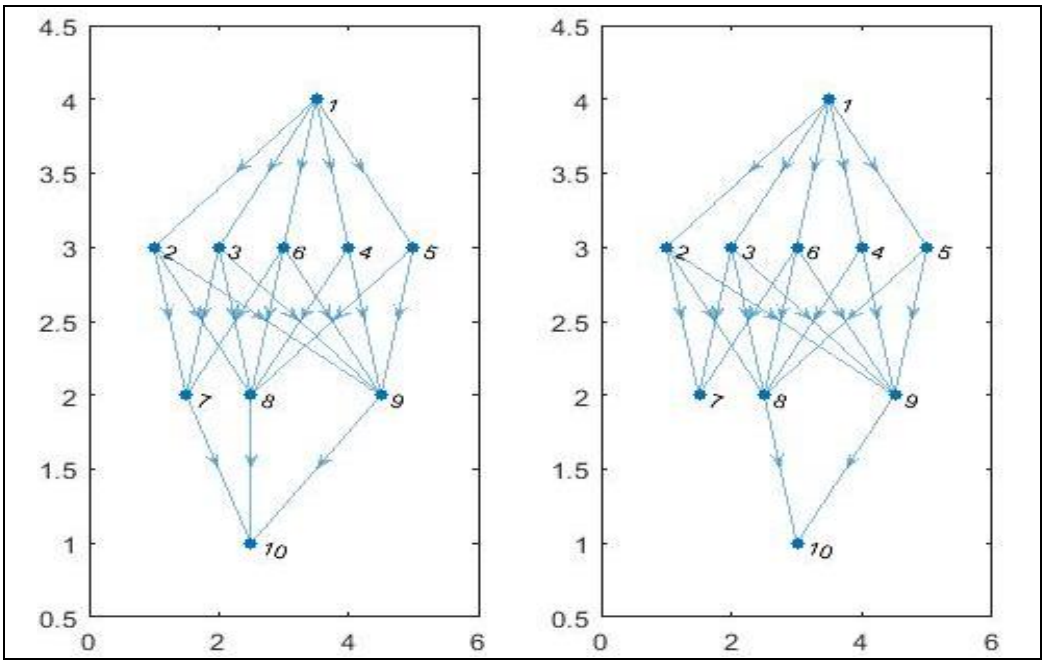
ونطاق إرسال العقد هو:

$$\begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 7 \\ 6 \\ 4 \\ 15 \\ 17 \\ 18 \\ 22 \end{pmatrix}$$

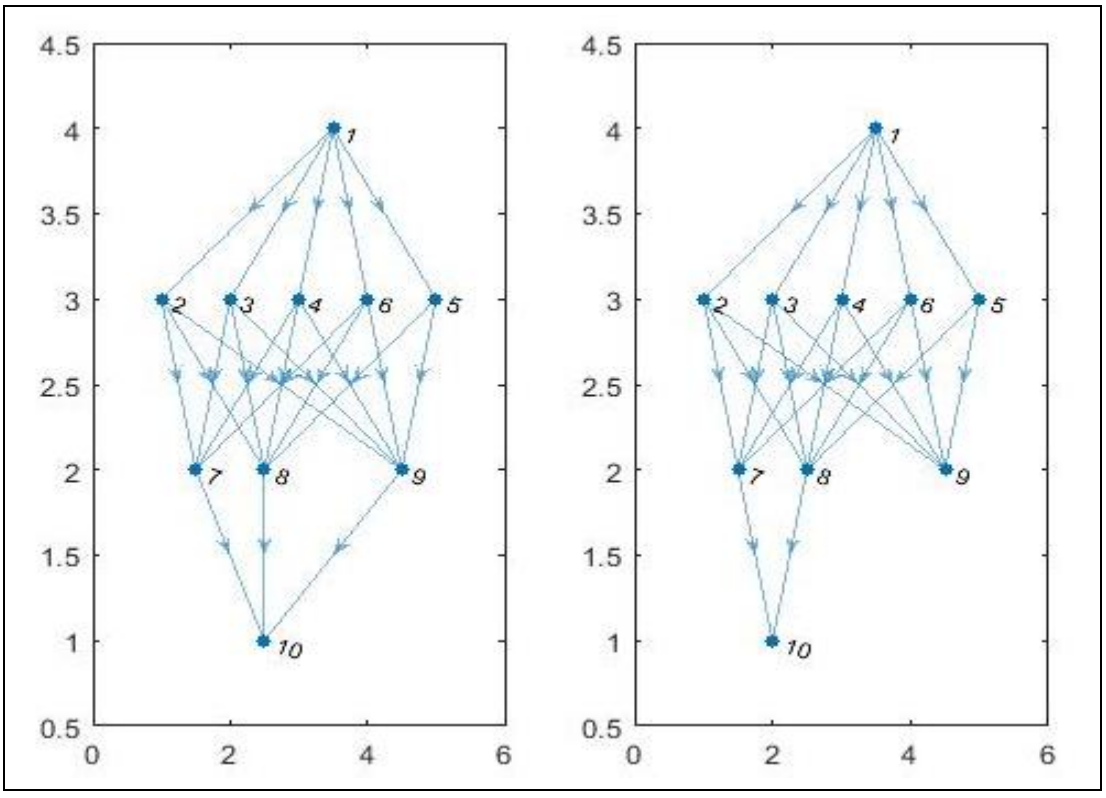
الطاقة الأولية للعقد:

$$\begin{pmatrix} 800 \\ 80 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 100 \\ 50 \\ 88 \\ 99 \\ 200 \end{pmatrix}$$

يقوم البرنامج بتزويد المستخدم بالتمثيل الأولي للشبكة وفق النموذج المقترح كما هو موضح في الشكل 3.



نلاحظ ترتيب العقد وفق النموذج المقترح حيث 5,4,6,3,2 تقع في المستوى الأول، والعقد 7,8,9 تقع في المستوى الثاني، وفي المستوى الثالث العقدة 10. يقوم البرنامج بتزويد المستخدم بمصفوفة الأوزان، بعد ذلك يحسب طاقة استهلاك العقد ويجد أن الطاقة الأولية للعقدة 10 أصغر من طاقة استهلاكها بالتالي يعمل على حذف الضلع الاكبروزناً وفق النموذج المقترح كما هو موضح في الشكل 4.



تحديات النموذج المقترح

على الرغم من أن النموذج المقترح قادر على إطالة عمر شبكات الاستشعار اللاسلكية المنشورة عشوائياً من خلال تقليل استهلاك الطاقة إلا أنه غير متسامح مع الأعطال التي ممكن أن تواجه الشبكة. كما أنه غير قادر على مواجه التحديات الأمنية. أما بالنسبة للمستقبل سنعمل على تطوير النموذج ليصبح متسامح مع بعض الأعطال وقادر على مواجه التحديات الأمنية التي من الممكن أن تتعرض لها الشبكة المنشورة وذلك في أبحاثنا القادمة.

الاستنتاجات والتوصيات:

قدمنا في هذا البحث نموذجاً رياضياً للحد من استهلاك الطاقة لشبكات الاستشعار اللاسلكية المنشورة بشكل عشوائي وغير المتجانسة بالنسبة لنطاق الإرسال والطاقة. استخدمنا في عملية النمذجة مفهوم البيان العشوائي الهندسي بالاضافه لبعض المعادلات الرياضية. يعد النموذج المقترح فعالاً من ناحية التعقيد الزمني لعملية بناء الشبكة ($O(n^2)$). كما أثبتنا فعاليته وكفاءته في الحد من استهلاك طاقة العقد من خلال محاكاة رياضية للنموذج المقترح باستخدام تطبيق الماتلاب. يمكن التوجه في العمل المستقبلي إلى تطوير النموذج ليصبح قادراً على التسامح مع الأعطال التي قد تحدث في الشبكة بعد نشرها.

المراجع العلمية المستخدمة

[1] Martincic, F., & Schwiebert, L. (2005). Introduction to wireless sensor networking. Handbook of sensor networks: Algorithms and architectures, 1-40.

[2] Ameen, A. S., Alheeti, K. M. A., & Aliesawi, S. A. (2020). Employing Graph Theory in Enhancing Power Energy of Wireless Sensor Networks. *J. Inf. Sci. Eng.*, *36*(2), 323-335.

[3] Norman, J. (2011). Connectivity and coverage in hybrid wireless sensor networks using dynamic random geometric graph model. International journal on applications of graph theory in wireless ad hoc networks and sensor networks, *3*(3), 39.

[4] Mamatha, G., Premasudha, B. G., & Hegde, R.(2010). A Graph Theory Approach to Load Balancing in Wireless Sensor Network.

[5] Ferrero, R., & Gandino, F. (2017, October). Analysis of random geometric graph for wireless network configuration. Tenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network *(ICMU)* (pp. 1-6). IEEE.

[6] Bondy, J. A. (1982). *Graph theory with applications*.

[7] Vallier, T. (2007). Random graph models and their applications. Centre for Mathematical Sciences, Lund University.

[8] Duchemin, Q., & De Castro, Y. (2023). Random Geometric Graph: Some recent developments and perspectives. High Dimensional Probability IX: The Ethereal Volume, 347-392.

[9] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. Computer networks, *38*(4), 393-422.

[10] Agre, J., & Clare, L. (2000). An integrated architecture for cooperative sensing networks. *Computer*, *33*(5), 106-108.

[11] ALHEETI, K. M. A., & AMEEN, A. S. (2018). A novel approach of mobile security robotics moved based on graph theory. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 96(14).

[12] Avin, C. (2006). Random geometric graphs: an algorithmic perspective (Vol. 67, No. 11).

[13] Huang, C. F., & Tseng, Y. C. (2003, September). The coverage problem in a wireless sensor network. In Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications (pp. 115-121).

[14] Aguilar-Sanchez, R., Mendez-Bermudez, J. A., Rodrigues, F. A., & Sigarreta, J. M. (2020). Topological versus spectral properties of random geometric graphs. *Physical Review E*, *102*(4), 042306.

[15] Bollobás B.(1985). Random Graphs. Academic Press, London.

[16] Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., ... & Scuderi, A. (2019). Autonomous energy-efficient wireless sensor network platform for home/office automation. IEEE Sensors Journal, 19(9), 3501-3512.

[17] Wang, Z., Ding, H., Li, B., Bao, L., & Yang, Z. (2020). An energy efficient routing protocol based on improved artificial bee colony algorithm for wireless sensor networks. ieee access, 8, 133577-133596.

[18] Luo, C., Hong, Y., Li, D., Wang, Y., Chen, W., & Hu, Q. (2020). Maximizing network lifetime using coverage sets scheduling in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 98, 102037.

[19] Zhu, B., Bedeer, E., Nguyen, H. H., Barton, R., & Henry, J. (2021). UAV trajectory planning in wireless sensor networks for energy consumption minimization by deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70(9), 9540-9554.

[20] Krishnaraj, N., Kumar, R. B., Rajeshwar, D., & Kumar, T. S. (2020, February). Implementation of energy aware modified distance vector routing protocol for energy efficiency in wireless sensor networks. In 2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) (pp. 201-204). IEEE.

[21] Katti, A. (2022). Target coverage in random wireless sensor networks using cover sets. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 34(3), 734-746.

[22] Narayan, V., Daniel, A. K., & Chaturvedi, P. (2023). E-FEERP: Enhanced Fuzzy based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network. Wireless Personal Communications, 1-28.

[23] Behera, T. M., Samal, U. C., Mohapatra, S. K., Khan, M. S., Appasani, B., Bizon, N., & Thounthong, P. (2022). Energy-efficient routing protocols for wireless sensor networks. Architectures, strategies, and performance. Electronics, 11(15), 2282.