مذكرة تخرج مقدمة في

جامعة محمد بوضياف – المسيلة

جامعة محمد بوضياف - المسيلة
University of Mohamed Boudiaf-Msila

كلية الرياضيات والإعلام الآلي

قسم الإعلام الآلي

من أجل الاستيفاء الجزئي لمتطلبات شهادة

ماستر في الإعلام الآلي

من طرف

زروتي وصال أم الخير

سحنون سندس

عنوان المذكرة

تحسين استهلاك الطاقة باختيار العقد الرئيسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية عبر نسخة مبسطة من خوارزمية PSO

تحت إشراف الأستاذ

رؤوف لكحل عياط

أعضاء لجنة المناقشة

عز الدين عطير	جامعة المسيلة	رئيسا
رؤوف لكحل عياط	جامعة المسيلة	مقررا
نجيب ولد محمدي	جامعة المسيلة	ممتحنا

جوان، 2026

"من قالَ أنا لها نالَها، وأنا لها وإن أبَتْ، رُغماً عنها أتيتُ بها".

لم تكن الرحلةُ هيّنة، ولا الطريقُ معبّداً بالورود، ولم يكن الحلمُ قريباً أبداً. لكنني بعون الله وتوفيقه، جابهتُ الصعاب، خضتُ الغِمار، وفعلتُها.. ونِلتُ مُرادي.

إلى سندي الشامخ ..أبي:

إلى مَن زيّن اسمي بأرق الألقاب، ومَن منحني دعماً بلا حدود وعطاءً بلا مقابل. مَن علّمني أن الحياة كفاح وسلاحها العلم، ومَن كان داعمي الأوّل، قوّتي، وملاذي الآمن بعد الله.. إليك فخري واعتزازي.

إلى نبع الحنان ..أمي:

إلى مَن جعل الله الجنة تحت أقدامها، واحتضنني قلبُها قبل يديها. مَن استمددتُ من دعائها القوة في الملمّات، وكانت شمعتي المُضيئة في أحلك الليالي.. سرّ قوّتي ونجاحي، إليكِ روحي.

إلى عُزوتي ومأمني ..إخوتي وأختي:

إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي، مَن شددتُ بهم عضدي فكانوا لي ينابيعَ أرتوي منها، وإلى خيرةِ الأيام وصفوتها.. قُرّة عيني.

أهديكُم جميعاً هذا الإنجاز وثمرة النجاح الذي لطالما تمنّيته وسعيت لأجله. ها أنا اليوم أطوي هذه الصفحة مكللاً بالتمام، فالحمد لله حمدًا كثيرًا على فضلهِ وما وهبني.

زروتي وصال ام الخير

"مَا سَلَكْنَا البِدَايَاتِ إِلَّا بِتَيْسِيرِهِ، وَمَا بَلَغْنَا النِّهَايَاتِ إِلَّا بِتَوْفِيقِهِ، وَمَا حَقَّقْنَا الغَايَاتِ إِلَّا بِفَضْلِهِ."

عَظُمَ المُراد فَهَانَ لأجلهِ الطّريق، وجاءت لذّة الوصول لتمحو كل مَشقّة وتَعَب عَبرناه. تُخبرنا الأيام اليوم بأنّ كل مُنتظَرٍ سَوف يأتي؛ وهذا هو يومي الموعود منذ سنوات.

الحمد لله الذي جادَ بفضلهِ كرماً، وبلّغَ الروحَ سَعداً من أمانيها. الحمد لله على التّمام، والحمد لله على حُسن الختام. الحمد لله الذي أنعمَ وأكرم، وبفضلهِ وحدهُ تَمّت النِّعم.

سحنون سندس

الملخص

تُعد مشكلة استهلاك الطاقة وإدارة عمر الشبكة من أبرز التحديات التي تواجه شبكات الاستشعار اللاسلكية(WSNs) ، نظراً للموارد المحدودة والبطاريات غير القابلة للاستبدال التي تمتلكها عقد الاستشعار. يهدف هذا العمل إلى تقديم آلية فعالة وذات كفاءة عالية لاختيار العقد الرئيسية (Cluster Heads) والنشطة، وتقليل استهلاك الطاقة داخل الشبكة من خلال تكييف وتطبيق خوارزميات التحسين المستوحاة من الطبيعة. في هذه المذكرة، نقترح صيغة مبسطة ومطورة من خوارزمية تحسين سرب الجسيمات الثنائية (Binary Simplified Particle Swarm Optimization - BSPSO) لحل مشكلة اختيار العقد الرئيسية .ترتكز الفكرة الأساسية على تقليل التعقيد الحسابي للخوارزمية القياسية عبر إلغاء بعض المعاملات غير الضرورية (مثل معامل القصور الذاتي والأرقام العشوائية)، وتوظيف دالة السيغمويد (Sigmoid Function) للانتقال بسلاسة إلى الفضاء الثنائي لتمثيل حالة العقد. أظهرت نتائج المحاكاة وتقييم الأداء أن الخوارزمية المقترحة تساهم بشكل ملحوظ في تحسين عملية اختيار العقد الرئيسية، وتخفيض التعقيد الحسابي، مما يضمن تمديد العمر الافتراضي لشبكة الاستشعار مقارنة بالحلول التقليدية.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية(WSNs) ، استهلاك الطاقة، اختيار العقد الرئيسية، خوارزمية تحسين سرب الجسيمات(PSO) ،

Abstract

Energy consumption and network lifetime optimization represent critical challenges in Wireless Sensor Networks (WSNs), primarily due to the constrained resources and non-replaceable batteries of sensor nodes. This work aims to propose an efficient and high-performance mechanism for Cluster Head (CH) and active node selection to reduce energy consumption within the network by adapting nature-inspired metaheuristic optimization algorithms. In this thesis, we propose a tailored and developed variant of the Binary Simplified Particle Swarm Optimization (BSPSO) algorithm to address the Cluster Head selection problem. The core idea relies on minimizing the computational complexity of the standard PSO by eliminating redundant parameters (such as the inertia weight and random coefficients) and integrating the Sigmoid function to seamlessly transition into a binary search space representing node states. Simulation and performance evaluation results demonstrate that the proposed simplified approach significantly optimizes Cluster Head selection, decreases computational overhead, and effectively extends the wireless sensor network's operational lifetime compared to conventional methods.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSNs), Energy Consumption, Cluster Head Selection, Particle Swarm Optimization (PSO).

التشكرات

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين.

أما بعد، فإنه من دواعي سروري واعتزازي أن أتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى أستاذي الفاضل والمشرف القدير الأستاذ رؤوف ونيس لكحل عياط، الذي تفضل بالإشراف على هذه المذكرة.

أود أن أعبر عن خالص تقديري له على نصائحه القيمة، وتوجيهاته السديدة، وصبره الطويل طيلة فترة إعداد هذا العمل. لقد كان لدَعمه العلمي والمعنوي الأثر البالغ في إتمام هذا البحث وإخراجه في أبهى حُلّة.

نتمنى لكم المزيد من التألق والنجاح في مسيرتكم المهنية والأكاديمية.

فهرس المحتويات

قائمة الصور vii

قائمة الجداول viii

الفصل الأول (المقدمة العامة) 1

1.1المقدمة العامة 1

2.1 إشكالية البحث 1

3.1 اهداف البحث 2

1.4فرضيات البحث 2

5.1الاعمال السابقة 2

6.1تحليل ونقد الأعمال السابقة 3

الفصل الثاني (شبكات الاستشعار اللاسلكية) 4

1.2مقدمة الفصل 4

2.2شبكات الاستشعار اللاسلكية 4

1.2.2تعريف شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) 4

2.2.2 مكونات شبكات الاستشعار اللاسلكية 4

3.2.2 بنية العقدة اللاسلكية : 5

4.2.2 خصائص شبكات الاستشعار اللاسلكية 6

5.2.2 تطبيقات شبكات الاستشعار اللاسلكية 7

3.2تحديات البناء في شبكات الحساسات اللاسلكية 7

4.2 استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية 8

1.4.2 مصادر استهلاك الطاقة 8

2.4.2مشاكل استهلاك الطاقة 8

3.4.2 تأثير الطاقة على عمر الشبكة 8

5.2 الخاتمة 9

الفصل الثالث (اختيار العقد في الشبكات اللاسلكية والخوارزميات فوق الحدسية) 10

1.3 المقدمة 10

2.3 اختيار العقد في الشبكات اللاسلكية 10

1.2.3مفهوم اختيار العقد 10

2.2.3 اهداف اختيار العقد 11

3.2.3العلاقة بين اختيار العقد واستهلاك الطاقة 11

4.2.3معايير اختيار العقد 11

5.2.3طرق اختيار العقد 12

3.3التجميع والعقدة الرئيسية (**Clustering & Head Node**) 14

1.3.3 مفهوم التجميع (**Clustering**) 14

2.3.3 العقدة الرئيسية(**Head Node**) 14

3.3.3 دور التجميع (**Clustering**) في تقليل استهلاك الطاقة 15

4.3 الخوارزميات فوق الحدسية (**Metaheuristic Algorithms**) 16

1.4.3تعريف الخوارزميات فوق الحدسية (**Metaheuristic Algorithms**) 16

2.4.3خصائص الخوارزميات فوق الحدسية 16

3.4.3 أمثلة على الخوارزميات فوق الحدسية 16

4.4.3تبسيط الخوارزميات الفوق الحدسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية 17

5.3الخاتمة 18

الفصل الرابع (نمذجة المشكلة وتصميم خوارزمية PSO المبسطة) 19

1.4 المقدمة 19

2.4نمذجة المشكلة كمسألة تحسين 19

1.2.4التعريف العام بالمشكلة 19

2.2.4مدخلات المشكلة 19

3.2.4متغيرات القرار 20

4.2.4دالة الهدف (Objective Function) 20

5.2.4القيود (Constraints) 20

3.4الصياغة الرياضية للمشكلة 20

1.3.4دالة الهدف 20

2.3.4القيود الرياضية 22

3.3.4حجم فضاء البحث والتعقيد الحسابي 22

4.4خوارزمية تحسين السرب (**PSO**) نظرة عامة 23

1.4.4التعريف والمبادئ الأساسية 23

2.4.4معادلات التحديث القياسية 24

3.4.4حدود **PSO** القياسية في بيئة شبكات الاستشعار اللاسلكية 25

5.4استراتيجية التبسيط المقترحة 25

1.5.4ما الذي تم تبسيطه ولماذا؟ 25

2.5.4معادلة السرعة المبسطة 26

3.5.4التكييف الثنائي لاختيار العقد الرئيسية 27

6.4تطبيق الخوارزمية على مشكلة اختيار العقد الرئيسية 27

1.6.4تمثيل الحل**(Solution Encoding)** 27

2.6.4الإعدادات الأولية والمعاملات 27

3.6.4توليد الحل الأولي 28

4.6.4تقييم اللياقة**(Fitness Evaluation)** 29

5.6.4تحديث الموقع واختيار العقد الرئيسية ال**CH** 32

6.6.4الخوارزمية العامة الكاملة 34

7.4 الخاتمة 36

الفصل الخامس (نتائج المحاكاة واختبار السيناريو) 37

1.5 المقدمة 37

2.5 بيئة العمل 37

1.2.5 الموارد المادية**(Hardware)** 37

2.2.5الموارد البرمجية**(Software)** 37

3.5 خوارزمية المقارنة المرجعية**(FSS-WSN)** 38

4.5 بروتوكول التجارب 38

2.4.5 الإعدادات التجريبية 38

5.5 النتائج والتحليل 39

1.5.5 جدول المقارنة الرئيسي 39

2 .5.5 تحليل معنوية النتائج**(Wilcoxon Test)** 41

3.5.5 التحليل التفصيلي لكل سيناريو 42

4.5.5 ملخص النتائج والملاحظات 44

6.5 التحديات والقيود 44

7.5 الخاتمة 44

خاتمة عامة 46

المراجع 47

قائمة الصور

الشكل 1 :الشبكات الاستشعار اللاسلكية . [18] 4
الشكل2 :انواع المواصلات هوائيات مختلفة تستخدم في وحدة الارسال و الاستقبال. [6] 5
الشكل 3 :مكونات نظام التغذية بالطاقة الشمسية لوح شمسي(ثابت , مرن) وبطارية ليثيوم ايون. [6] 5
الشكل4 : بناء عقدة الحساسات اللاسلكية . [7] 6
الشكل 5 : نموذج لبنية شبكية صناعية تدمج بين شبكة الحساسات اللاسلكية و الشبكة القيادية السلكية للمصنع عبر بوابات الاتصال. [19] 7
الشكل6 :عملية اختيار العقد النشطة و ادارة الطاقة في شبكة الاستشعار اللاسلكية . [6] 10
الشكل :7 نموذج توضيحي لبروتوكول LEACH المعتمد على التجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية. [1] 13
الشكل 8 :آلية اختيار Cluster Head المعتمدة على الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية. [20] 13
الشكل9 :بنية شبكات المستشعرات اللاسلكية القائمة على التجميع واختيار المسار . [21] 14
الشكل10 :آلية نقل البيانات من العقد الأعضاء إلى محطة القاعدة والبرج الرئيسي. [22] 15
الشكل11 :مخطط سير العمليات لخوارزمية PSOالقياسة. 24
الشكل 12 : العنوان: مقارنة Throughput بين FSS-WSN و PSO_simplified عبر السيناريوهات الأربعة. 39
الشكل 13 : العنوان: مقارنة مقياس First Node Death (FND) بين FSS-WSN و PSO_simplified 40
الشكل 14: مقارنة زمن تشغيل وحدةالمعالجة المركزية (CPU Time) بالجزء من الثانية لحساب جولة واحدة. 40
الشكل:15 مخطط المقارنة الإحصائية لأعمدة مؤشرات عمر الشبكة (FNDو LND)عبر السيناريوهات الأربعة 42
الشكل 16 : المنحنى الخطي لتتبع الإنتاجية الإجمالية التراكمية والتقارب الشديد في الحالات الطوبولوجية الصعبة**(S2 -corner)** .43

قائمة الجداول

جدول 1 : مقارنة لابرز الدراسات و المقاربات السابقة لتحسين استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية 3
جدول 2 :مقارنة بروتوكولات التجميع الكلاسيكية في شبكات الاستشعار اللاسلكية. 16
جدول 3 : مبادئ، مزايا، وعيوب بعض الخوارزميات فوق الحدسية وتطبيقاتها في WSN. 17
جدول 4 :مقارنة بين PSO القياسية والمبسطة. 26
جدول 5 : الموارد البرمجية المستخدمة في البحث وتطوير الخوارزمية. 37
جدول 6 : الخصائص الهندسية للسيناريوهات الأربعة المختبرة لتقييم أداء الخوارزميات. 38
جدول 7 : مقارنة أداء خوارزمية PSO_simplified وخوارزمية FSS-WSN من حيث Throughput وFND و CPU عبر السيناريوهات الأربعة.
..... 39
جدول 8 :نتائج اختبار Wilcoxon لمعنوية الفوارق بين PSO_simplified و FSS-WSNفي مقياسَي Throughput و.FND. 41
جدول 9 :نتائج اختبار Wilcoxon لمعنوية الفوارق بين PSO_simplified وFSS-WSN في مقاييس HND وLND و. R_last 41

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1.1المقدمة العامة

شهدت شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks) تطوراً كبيراً خلال السنوات الأخيرة، حيث أصبحت تمثل إحدى الركائز الأساسية في العديد من التطبيقات الحديثة، مثل المراقبة البيئية، الزراعة الذكية، المدن الذكية، والتطبيقات العسكرية. وتعتمد هذه الشبكات على عدد كبير من العقد المستشعرة الصغيرة التي يتم نشرها داخل منطقة معينة بهدف جمع البيانات المتعلقة بالبيئة المحيطة، مثل درجة الحرارة، الرطوبة، أو الحركة، ثم إرسالها إلى محطة القاعدة لمعالجتها.

تتميز هذه العقد بكونها محدودة من حيث الموارد، سواء من ناحية القدرة الحسابية أو سعة الذاكرة، والأهم من ذلك الطاقة، حيث تعتمد غالباً على بطاريات يصعب استبدالها أو إعادة شحنها، خاصة في البيئات الصعبة أو النائية. لذلك، فإن استهلاك الطاقة يمثل أحد أهم التحديات التي تواجه شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث يؤثر بشكل مباشر على عمر الشبكة وكفاءتها.

ومن بين المشاكل المرتبطة باستهلاك الطاقة، نجد التوزيع غير المتوازن للطاقة بين العقد، حيث قد تستهلك بعض العقد طاقتها بسرعة أكبر بسبب دورها في نقل البيانات أو تغطية مناطق معينة، مما يؤدي إلى توقفها المبكر عن العمل. وينتج عن ذلك ظهور مناطق غير مغطاة داخل الشبكة، مما يؤثر سلباً على جودة الخدمة.

في هذا الإطار، تم اقتراح العديد من الحلول لتحسين استهلاك الطاقة، من بينها تقنيات اختيار العقد النشطة (Node Selection)، وتقنيات التجميع (Clustering)، بالإضافة إلى استخدام الخوارزميات الذكية مثل الخوارزميات الميتاهيورستية، والتي أثبتت فعاليتها في حل مشاكل التحسين المعقدة.

غير أن هذه الخوارزميات، رغم كفاءتها، غالباً ما تكون معقدة من حيث الحسابات، مما يجعل تطبيقها في شبكات الاستشعار محدوداً. لذلك، ظهرت الحاجة إلى تطوير نسخ مبسطة من هذه الخوارزميات، تهدف إلى تقليل التعقيد الحسابي مع الحفاظ على أداء مقبول.

وانطلاقاً من هذا التوجه، يهدف هذا العمل إلى اقتراح خوارزمية مبسطة تعتمد على PSO، بهدف تحسين استهلاك الطاقة وتحقيق توازن بين العقد، مع الحفاظ على تغطية الشبكة وعمرها.

2.1 إشكالية البحث

تواجه شبكات الاستشعار اللاسلكية تحدياً رئيسياً يتمثل في الاستهلاك غير المتوازن للطاقة بين العقد، حيث يؤدي ذلك إلى نفاد طاقة بعض العقد بشكل أسرع من غيرها، مما يسبب ظهور مناطق غير مغطاة داخل الشبكة، وبالتالي انخفاض جودة الخدمة. وقد تم استخدام الخوارزميات الميتاهيورستية، مثل PSO وGA وACO، من أجل تحسين اختيار العقد وتقليل استهلاك الطاقة. غير أن هذه الخوارزميات غالباً ما تكون معقدة من حيث الحسابات، مما يجعل تطبيقها في بيئات محدودة الموارد أمراً صعباً.

وفي المقابل، تم اقتراح نسخ مبسطة من هذه الخوارزميات بهدف تقليل التعقيد الحسابي، إلا أن هذا التبسيط قد يؤثر على جودة الحلول، خاصة فيما يتعلق بتحقيق توازن استهلاك الطاقة بين العقد.

وعليه، تتمثل الإشكالية في:

رغم استخدام خوارزميات Metaheuristics في اختيار العقد النشطة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، إلا أن مسألة تحقيق توازن استهلاك الطاقة بين العقد عند تبسيط هذه الخوارزميات لا تزال غير مدروسة بشكل كافٍ، مما قد يؤدي إلى موت مبكر لبعض العقد وانخفاض جودة التغطية.

انطلاقا م الإشكالية المطروحة، يمكن صياغة السؤال الرئيسي كما يلي:

هل يمكن لخوارزمية PSO مبسطة ان تحقق توازنا أفضل في استهلاك الطاقة بين العقد مع الحفاظ على تغطية الشبكة وعمرها؟

3.1 اهداف البحث

يهدف هذا العمل الى:

- اقتراح نسخة مبسطة من خوارزمية PSO.
- تقليل استهلاك الطاقة في الشبكة.
- تحقيق توازن في استهلاك الطاقة بين العقد.
- الحفاظ على تغطية الشبكة.
- تحسين عمر الشبكة.

1.4فرضيات البحث

للإجابة على سؤال البحث الرئيسي، تم صياغة الفرضيات التالية:

- **الفرضية الأولى H_1:**إن حذف معامل القصور الذاتي والأعداد العشوائية من خوارزمية سرب الجسيمات (PSO) سيؤدي إلى تقليل التعقيد الحسابي وخفض زمن المعالجة(CPU>Time) .
- **الفرضية الثانية H_2:**إضافة معيار توازن أحجام المجموعات (Clusters) إلى دالة الهدف، سيمنع تركز استهلاك الطاقة في عقد معينة ويحقق توزيعاً عادلاً للأحمال.

- **الفرضية الثالثة H_3:**فرض حد أدنى من الطاقة (E_threshold) كشرط لاختيار العقد الرئيسية، سيحمي العقد الضعيفة من الموت المبكر ويمنع ظهور مناطق التغطية الميتة.
- **الفرضية H_4:**الخوارزمية المقترحة (PSO_simplified) قادرة على تمديد عمر الشبكة الأقصى (إطالة ذيل الحياة) وتأخير موت آخر عقدة (LND) في السيناريوهات الجغرافية الصعبة.

5.1الاعمال السابقة

شهد مجال تحسين استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية اهتماماً كبيراً من طرف الباحثين، حيث تم اقتراح العديد من المقاربات التي تعتمد على تقنيات مختلفة، من بينها التجميع، التوجيه، والخوارزميات الميتاهيورستية.

في هذا السياق، قدم Heinzelman et al. (2000) بروتوكول LEACH، الذي يعد من أولى المقاربات التي اعتمدت على مبدأ التجميع (Clustering)، حيث يتم تقسيم الشبكة إلى مجموعات، ويتم اختيار عقدة رئيسية (Cluster Head) في كل مجموعة لتكون مسؤولة عن جمع البيانات من باقي العقد وإرسالها إلى محطة القاعدة. وقد ساهم هذا البروتوكول في تقليل استهلاك الطاقة بشكل ملحوظ، إلا أنه لا يضمن دائماً توازناً في استهلاك الطاقة بين العقد[1] .

من جهة أخرى، تم استخدام الخوارزميات الميتاهيورستية بشكل واسع في هذا المجال، حيث قدم Kennedy & Eberhart (1995) خوارزمية PSO، التي تعتمد على سلوك الجماعات في البحث عن الحلول المثلى. وقد تم تطبيق هذه الخوارزمية في شبكات الاستشعار لتحسين اختيار العقد وتقليل استهلاك الطاقة، نظراً لبساطتها النسبية وسرعة تقاربها[2] .

كما اقترح Dorigo et al. (1996) خوارزمية ACO، التي تعتمد على سلوك النمل في إيجاد المسارات المثلى، وقد استُخدمت بشكل فعال في تحسين عمليات التوجيه داخل الشبكة، مما ساهم في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الأداء العام [3].

بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms) في العديد من الدراسات، حيث تعتمد على مبدأ الانتقاء الطبيعي لتوليد حلول محسنة، وقد أثبتت فعاليتها في اختيار العقد وتحسين التغطية[4] .

ورغم النتائج الإيجابية التي حققتها هذه الخوارزميات، إلا أنها تعاني من بعض القيود، حيث أن معظمها يتطلب موارد حسابية كبيرة، مما يجعل تطبيقها في شبكات الاستشعار ذات الموارد المحدودة أمراً صعباً. كما أن بعض الدراسات ركزت على تحسين استهلاك الطاقة بشكل عام، دون الاهتمام بتوزيع هذا الاستهلاك بشكل متوازن بين العقد.

ومن هذا المنطلق، ظهرت الحاجة إلى تطوير مقاربات جديدة تجمع بين بساطة التنفيذ وكفاءة الأداء، وهو ما يسعى هذا العمل إلى تحقيقه من خلال اقتراح نسخة مبسطة من خوارزمية PSO.

جدول 1 : مقارنة لابرز الدراسات و المقاربات السابقة لتحسين استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية .

الدراسة	التقنية المستعملة	الهدف	المزايا	النقائص
Heinzelman et al.	LEACH	تقليل الطاقة	تنظيم الشبكة	عدم توازن الطاقة
Kennedy & Eberhart	PSO	اختيار العقد	سرعة التقارب	يحتاج موارد
Dorigo et al.	ACO	تحسين التوجيه	إيجاد مسارات فعالة	تعقيد حسابي
دراساتGA	Genetic Algorithm	تحسين التغطية	حلول محسنة	استهلاك حسابي كبير

6.1تحليل ونقد الأعمال السابقة

على الرغم من التطور الكبير الذي شهدته الدراسات المتعلقة بتحسين استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، إلا أن معظم الحلول المقترحة لا تزال تعاني من بعض القيود التي تحد من فعاليتها في البيئات الواقعية.

ففيما يتعلق ببروتوكولات التجميع مثل LEACH، فقد ساهمت هذه المقاربة في تقليل استهلاك الطاقة من خلال توزيع الأدوار بين العقد، خاصة عبر استخدام العقد الرئيسية (Cluster Heads) لجمع البيانات. غير أن اختيار هذه العقد غالباً ما يتم بطريقة عشوائية أو دورية، مما لا يضمن دائماً تحقيق توازن فعلي في استهلاك الطاقة بين مختلف العقد، وقد يؤدي ذلك إلى استنزاف طاقة بعض العقد بشكل أسرع من غيرها.

أما بالنسبة للخوارزميات الميتاهيورستية مثل الخوارزميات الجينية (GA) وخوارزمية مستعمرة النمل (ACO)، فقد أظهرت قدرة كبيرة على إيجاد حلول ذات جودة عالية لمشاكل التحسين المعقدة، من خلال استكشاف فضاء الحلول بطريقة فعالة. ومع ذلك، فإن هذه الخوارزميات تتطلب عدداً كبيراً من العمليات الحسابية، بالإضافة إلى الحاجة لضبط عدة معاملات، مما يزيد من تعقيدها ويجعل تطبيقها في شبكات الاستشعار اللاسلكية محدوداً بسبب القيود المرتبطة بالطاقة والقدرة الحسابية.

من جهة أخرى، تعتبر خوارزمية سرب الجسيمات (PSO) من الخوارزميات التي تتميز ببساطتها النسبية مقارنة بالخوارزميات الأخرى، حيث تعتمد على عدد أقل من المعاملات وسرعة في التقارب نحو الحلول الجيدة. وقد تم استخدامها في العديد من الدراسات لتحسين اختيار العقد وتقليل استهلاك الطاقة. ومع ذلك، فإن النسخة الكلاسيكية من هذه الخوارزمية لا تزال تعتمد على عمليات حسابية متكررة لتحديث السرعة والموقع، مما قد يؤدي إلى استهلاك إضافي للطاقة، خاصة في الشبكات الكبيرة.

وفي محاولة للتغلب على هذه القيود، تم اقتراح بعض النسخ المبسطة من الخوارزميات الميتاهيورستية، والتي تهدف إلى تقليل التعقيد الحسابي وتحسين سرعة التنفيذ. غير أن هذا التبسيط غالباً ما يتم على حساب جودة الحلول، حيث قد يؤدي إلى ضعف في استكشاف فضاء الحلول، وبالتالي عدم تحقيق توازن كافٍ في استهلاك الطاقة بين العقد.

إضافة إلى ذلك، تركز العديد من الدراسات على تقليل استهلاك الطاقة بشكل إجمالي، دون الأخذ بعين الاعتبار توزيع هذا الاستهلاك بين العقد، وهو ما يؤدي في كثير من الأحيان إلى ظهور مشكلة "الموت المبكر" لبعض العقد، مما يؤثر سلباً على تغطية الشبكة واستمراريتها.

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن هناك حاجة إلى تطوير خوارزميات تجمع بين بساطة التنفيذ من جهة، والقدرة على تحقيق توازن في استهلاك الطاقة من جهة أخرى، وهو ما يشكل الدافع الأساسي لهذا العمل.

الفصل الثاني: شبكات الاستشعار اللاسلكية

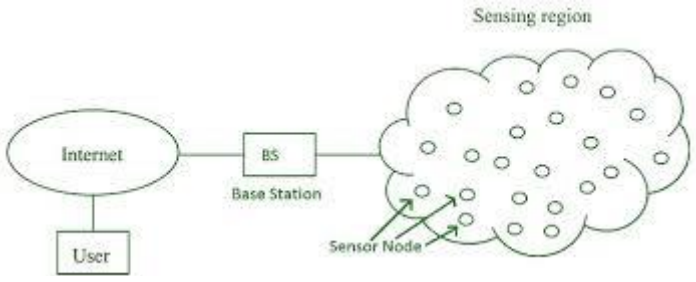
1.2مقدمة الفصل

يتمحور هذا الفصل إلى تقديم المرتكزات الرئيسية المتعلقة بموضوع الدراسة، والتي تعتبر ضرورية لاستيعاب الاشكالية البحثية المطروحة، حيث يتضمن هذا الفصل ماهي شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) مع تسليط الضوء بشكل خاص عل مشكلة استهلاك الطاقة، كما يستعرض الآليات المتبعة في اختيار العقد والعقدة الرئيسية اخيراً وصولًا إلى دور الخوارزميات الميتاهيورستية في حل مشاكل التحسن المعقدة

2.2شبكات الاستشعار اللاسلكية

1.2.2تعريف شبكات الاستشعاراللاسلكية (WSNs)

تُمثل شبكات الاستشعار اللاسلكية منظومة من العقد الدقيقة دون بنية تحتية وتنتشر في عدد كبير من اجهزة الاستشعار اللاسلكية وتكون موزعة جغرافيا في بيئة محددة لرصد الأنظمة والظواهر البيئية والفيزيائية، تتواصل او بالأحرى ترابط فيما بينها تقنيا عبر قنوات اتصال لاسلكية، مما يؤدي إلى تبادل البيانات المجمعة وتمريرها تعاونيا حتى تصل إلى محطة القاعدة (base station) ليتم معالجتها واتخاذ القرارات اللازمة بناءً عليها [5].



الشكل 1 :الشبكات الاستشعار اللاسلكية . [18]

2.2.2 مكونات شبكات الاستشعار اللاسلكية

تمكن كفاءة شبكات الاستشعار اللاسلكية على التكامل الوظيفي بين العناصر الرئيسية التي تشكل البنية التحتية للنظام أي تعمل بتناغم تام وهي كالتالي :[6]

- **العقد المستشعرة:** تعد الوحدة الأساسية في الشبكة تقوم بقياس الظواهر الفيزيائية والكيميائية وتعمل على جمع البيانات من البيئة المحيطة بها حيث تقوم بمعالجتها وإرسالها، قد تتضمن بعض العقد مكونات إضافية مثل: نظام تحديد المواقع GPS لتحديد موقع العقدة، ذاكرة لتخزين البيانات مؤقتا.
- **وحدة المعالجة (Processing Unit) :**تتكون وحدة المعالجة في عقدة الاستشعار من وحدة معالجة مركزية(CPU) ، ووحدة ذاكرة.

وتؤدي وحدة المعالجة المركزية الدور الرئيسي في العقدة؛ إذ تستقبل البيانات من المحول التماثلي الرقمي (ADC) ثم تقوم بمعالجتها، كما يمكنها استخدام وحدة الذاكرة لحفظ وتخزين هذه البيانات مؤقتاً. بالإضافة إلى ذلك، تعد هذه الوحدة مسؤولة عن إعطاء الأوامر لتنفيذ عمليات إرسال المعلومات، وتحديد حالة العُقدة

(سواء في وضع التشغيل، الخمول، أو التوقف). وهي تعتمد في عملها على معالجة البيانات المُجمّعة من وحدة الاستشعار، حيث تتضمن وظائفها الأساسية ما يلي:

التصفية (Filtering) لتنقية البيانات من الضجيج والتشويش.
الضغط (Compression) لتقليص حجم البيانات وتقليل استهلاك الطاقة أثناء الإرسال.
التحليل (Analysis) لاستخلاص النتائج والأنماط من البيانات المجمعة.
التحكم (Control) لإدارة وتوجيه بقية مكونات العقدة.

- **وحدة الاتصال:** تعد وحدة الإرسال والاستقبال هي المسؤولة عن اتصال عقد الحساسات اللاسلكية بالمحطة الرئيسية، كما أنّها المسؤولة عن عمليات الاتصال بين العقد ببعضها البعض، وتعد وسيلة الاتصال اللاسلكية التي تسمح بإرسال المعلومات واستقبالها من العُقد وإليها أنواع الاتصال:
  - الاتصال الضوئي (Communication Optical) باستخدام أشعة الليزر
  - الاتصال عبر الأشعة تحت الحمراء (Infrared)
  - الاتصال عبر ترددات الراديو (Frequency Radio)

الشكل2 :انواع المواصلات هوائيات مختلفة تستخدم في وحدة الارسال و الاستقبال. [6]

- **وحدة الطاقة:** تزود العقد بالطاقة عادة ما تكون بطارية ذات سعة محدودة او مصدر طاقة متجدد مثل طاقة الرياح او الشمسية وبالتالي يكون استهلاك الطاقة مهم في اداء الشبكة

الشكل 3 :مكونات نظام التغذية بالطاقة الشمسية لوح شمسي(ثابت , مرن) وبطارية ليثيوم ايون. [6]

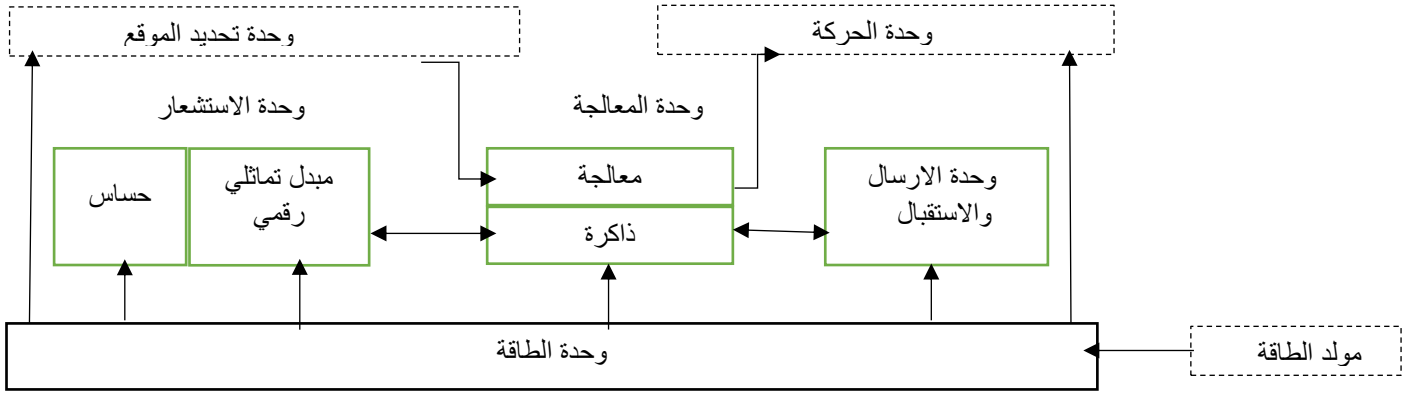
- **محطة القاعدة:** تعد هذه المحطة مركز التحكم في الشبكة، حيث تقوم باستقبال أو استقطاب البيانات من العقد وتحللها

3.2.2 بنية العقدة اللاسلكية :

هي عبارة عن جهاز صغير مستقل يتكون من عدة وحدات رئيسية:[7]

- وحدة الاستشعار
- وحدة المعالجة
- وحدة الاتصالات اللاسلكية

- وحدة الطاقة
- مكونات إضافية



الشكل4 : بناء عقدة الحساسات اللاسلكية . [7]

4.2.2 خصائص شبكات الاستشعار اللاسلكية

تتميز شبكات الاستشعار اللاسلكية بعدة خصائص التي تجعلها مختلفة عن الشبكات التقليدية ومن أهمها [8]:

- **محدودية الطاقة:**

يعد استهلاك الطاقة هو العامل الحاسم في تصميم الشبكة لان على الاغلب العقد المستشعر تعتمد على البطاريات.

- **العدد الكبير للعقد:**

قد تتكون الشبكة من مئات أو الالاف العقد المستشعرة المنتشرة في منطقة معينة وهذا العدد الكبير من العقد يغطي المنطقة بدقة عالية.

- **التنظيم الذاتي: (Self-Organization)**

المميز في هذه الشبكة امتلاكها قدرة على تنظيم نفسها بدون ادارة مركزية مباشرة او تدخ بشري كل عقدة قادرة على اكتشاف العقد المجاورة وأيضا القدرة على الانضمام إلى الشبكة تلقائيا، وتستطيع إعادة تكوين نفسها في حالة فشل عقد أخرى.

- **الاتصال متعدد القفزات: (Multi-hop Communication)**

يتم نقل البيانات عبر عدة عقد وسيطة لأنه لا يمكن للعقد إرسال البيانات مباشرة إلى محطة القاعدة ومن مزاياه هو التقليل من استهلاك الطاقة من كل عقد بمعنى زيادة عمر الشبكة.

- **محدودية الموارد:**

تتميز العقد بقدرات معالجة وذاكرة محدودة

- المعالج: ضعيف مقارنة بالحواسيب
- الذاكرة: صغيرة جدا
- الطاقة: محدودة

نتيجة ذلك عدم تنفيذ الخوارزميات المعقدة لذلك يجب استخدام برامج خفيفة وبسيطة وأيضا تصميم البروتوكولات يجب أن يكون اقتصادي في الموارد.

- **قابلية التوسع:**

بمعنى اخر هو امكانيه إضافة عقدة جديدة بسهولة إلى الشبكة دون الحاجة لإعادة تصميمها او اختلال في تأثير أداء الشبكة اي الشبكة تتكيف تلقائيا مع زيادة عدد العقد وتغير حجم المنطقة المغطاة.

5.2.2 تطبيقات شبكات الاستشعار اللاسلكية

تتعدد مجالات استخدام هذه الشبكات لتشمل تطبيقات متنوعة في الحياة اليومية والصناعية، ومن أبرز هذه التطبيقات ما يلي [7]:

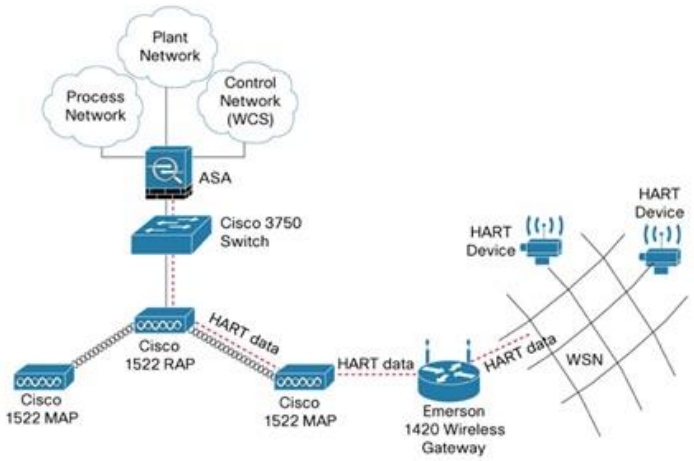
- **المر اقبة البيئية**: مراقبة جودة الهواء، رصد الكوارث الطبيعية، مراقبة الغابات
- **الصحة والرعاية الطبية**: مراقبة المرضى عن بعد، مراقبة الادوية، تتبع الأصول الطبية
- **الصناعة**: مراقبة خطوط الإنتاج التحكم في جودة المنتجات، مراقبة الأصول
- **الزراعة**: مراقبة ري المحاصيل، مراقبة صحة الحيوانات، تتبع الأصول الزراعية
- **الامن**: مراقبة المباني، تتبع الأصول، مراقبة الحدود
- **المنزل الذكي**: التحكم في الاضاءة، التحكم في درجة الحرارة مراقبة الأجهزة

3.2تحديات البناء في شبكات الحساسات اللاسلكية

تواجه شبكات الحساسات اللاسلكية العديد من التحديات التقنية في ثلاث مجالات، وهي: معاجلة البيانات والاتصالات، وإدارة عقد الحساسات اللاسلكية

ويرجع هذا لطبيعة ظروف البيئة المحيطة بعقد الحساسات اللاسلكية، مع طبيعة تلك العقد من محدودية الطاقة، ومحدودية قدراتها في معاجلة البيانات، كما أن ظروف بناء الشبكة دون بنية أساسية يزيد من تلك الصعوبات وفيما يلي نستعرض أهم التحديات التي تواجه عملية بناء [7]:

- اكتشاف الشبكة
- مراقبة شبكه التراسل وتحديد مساراتها
- التعاون في معاجلة المسارات ومعاجلة البيانات
- التكليف بالمهام والاستعلامات
- القدرة على التعامل مع فشل العقدة
- أمن الشبكة



الشكل 5 : نموذج لبنية شبكية صناعية تدمج بين شبكة الحساسات اللاسلكية و الشبكة القيادية السلكية للمصنع عبر بوابات الاتصال. [19]

4.2 استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية

1.4.2 مصادر استهلاك الطاقة

يُعد استهلاك الطاقة من أهم التحديات التي تواجه شبكات الاستشعار اللاسلكية، نظراً لاعتماد العقد المستشعرة على مصادر طاقة محدودة. تستهلك هذه العقد الطاقة في عدة عمليات أساسية، من بينها الإرسال، الاستقبال، المعالجة، وحتى أثناء فترات الانتظار [5] [8].

تُعتبر عملية الإرسال (Transmission) الأكثر استهلاكاً للطاقة، حيث تتطلب إرسال الإشارات عبر مسافات قد تكون كبيرة نسبياً، مما يستهلك كمية معتبرة من الطاقة. كما أن عملية الاستقبال (Reception) تستهلك أيضاً طاقة، خاصة عندما تكون العقد في حالة استعداد دائم لاستقبال البيانات [5] [8].

بالإضافة إلى ذلك، تستهلك العقد الطاقة أثناء عمليات المعالجة (Processing)، خاصة عند تنفيذ خوارزميات معقدة. كما أن حالة الانتظار (Idle Listening) تُعد من أهم مصادر استنزاف الطاقة، حيث تبقى العقد في حالة جاهزية دون القيام بأي عمل فعلي [5] [8].

لذلك، فإن تقليل عدد عمليات الإرسال، وتحسين طرق الاتصال، يُعد من أهم الاستراتيجيات المستخدمة لتحسين كفاءة الطاقة داخل الشبكة [5].

2.4.2مشاكل استهلاك الطاقة

يعد استهلاك الطاقة أهم معيار أداء في شبكات الاستشعار اللاسلكية والسبب راجع إلى اعتماد العقد على مصادر طاقة محدودة [5] [8]، لأن الاستهلاك الغير متوازن للطاقة داخل الشبكة يؤدي إلى الموت المبكر للعقد، حيث تنفذ طاقة بعض العقد أسرع من غيرها [5]، وينتج عن ذلك مناطق غير مغطاة داخل الشبكة (Coverage Holes)، مما يؤثر على إرسال واستقبال البيانات ومعالجة المعلومات لأن فقدانها العقد يقطّع الاتصال بين اجزاء الشبكة، وهذا يضعف من كفاءتها [5].

ويعتبر ايضاً، تشغيل جميع العقد بشكل مستمر يؤدي إلى استنزاف سريع للطاقة، بالأخص في الشبكات ذات الكثافة العالية

لهذا يهدف الباحثون إلى تطوير خوارزميات تقلل من استهلاك الطاقة بشكل غير متوازن بهدف إطالة عمر الشبكة وتحسين

من كفاءتها التشغيلية [5] [8].

3.4.2 تأثير الطاقة على عمر الشبكة

يشير عمر الشبكة بشكل مباشر إلى الفترة الزمنية التي تظلّ خلالها الشبكة قادرة على أداء وظائفها بشكل فعال قبل نفاذ طاقة العقد. وكلما كان استهلاك الطاقة متوازنا بين العقد كلما زاد عمر الشبكة [1].

ويقاس عمر الشبكة عادة بأحد المعايير التالية [1]:

- وقت موت اول عقدة (First Node Death)
- موت نصف عقدة
- توقف الشبكة بالكامل

التحسين من كفاءة استهلاك الطاقة (زيادة عمر الشبكة) يمثل هدف أساسيا لمعظم خوارزميات WSN، وهذا من خلال تقنيات مثل اختيار العقد، والتجميع (Clustering)، والخوارزميات الذكية [5].

5.2 الخاتمة

في هذا الفصل تم استعراض المرتكزات النظرية المتعلقة بشبكات الاستشعار اللاسلكية، بالإضافة الى تعريفها ومكوناتها وبنية العقدة اللاسلكية، ثم جرى التطرق الى خصائصها الذاتية وتطبيقاتها المتعددة في مختلف المجالات. وفي السياق ذاته تم تقييم العقبات الجوهرية التي تقيد هذه الشبكات، وفي مقدمتها إشكالية استهلاك الطاقة التي تعتبر التحدي الأكبر المهدد امام استمرارية عمل الشبكة وكفاءتها.

وقد تبين من خلال الفصل ان التوزيع غير المتوازن للطاقة بين العقد يشكل تهديدا حقيقيا لعمر الشبكة وجودة خدماتها مما يستوجب البحث عن حلول ذكية وفعالة في هذا الإطار، يأتي الفصل التالي ليتناول بالتفصيل مفهوم اختيار العقد والتجميع والخوارزميات فوق الحدسية بوصفها مقاربات واعدة للتعامل مع هذه الإشكالية.

الفصل الثالث: اختيار العقد في الشبكات اللاسلكية والخوارزميات فوق الحدسية (الميتاهورستية)

1.3 المقدمة

استنادا على ما ورد في الفصل السابق من تحديات تواجه شبكات الاستشعار اللاسلكية، ولا سيما اشكالية استهلاك الطاقة الغير متوازن بين العقد، فالهدف من هذا الفصل هو استعراض الحلول والمقاربات المقترحة للتعامل مع هذه الإشكالية. ويتمحور هذا الفصل حول ثلاثة محاور أساسية مترابطة: حيث يتناول المحور الأول مفهوم اختيار العقد بواسطة

(Node Selection)و أهدافه ومعاييره و طرقه المختلفة ، موضحا العلاقة الوطيدة بينه و بين استهلاك الطاقة. ما المحور الثاني يتناول مفهوم التجميع (Clustering) والعقدة الرئيسية (Cluster Head) ودورهما الأساسي في تقليل استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة، مع عرض أبرز بروتوكولات التجميع المعروفة. في حين يقدم المحور الثالث استعراض الخوارزميات الفوق الحدسية وخصائصها وتطبيقاتها في شبكات الاستشعار اللاسلكية، مع التركيز على خوارزميةPSO و إمكانية تبسيطها.

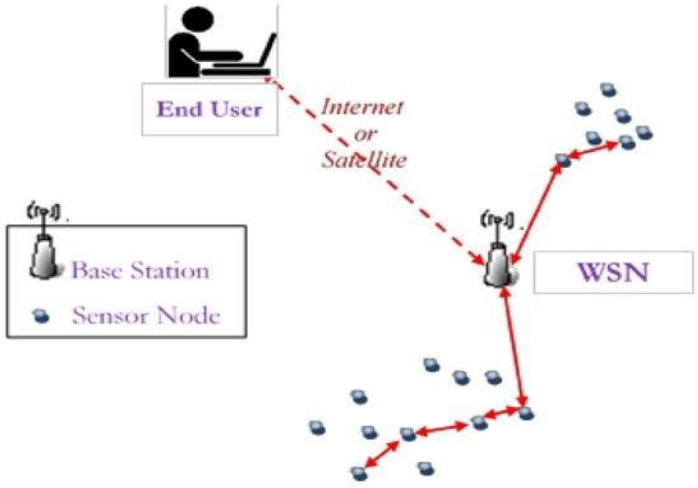
2.3 اختيار العقد في الشبكات اللاسلكية

1.2.3مفهوم اختيار العقد

تتمثل عملية اختيار العقد من اهم المفاهيم في شبكة الاستشعار اللاسلكية، حيث تتمحور الفكرة حول تحديد مجموعة فرعية من العقد لتكون نشطة في وقت معين، بينما يتم وضع البقية في حالة سكون (Sleep Mode) [9] [5]،

يسعى هذا النهج لتحقيق التوازن المثالي أي تقليص استهلاك الطاقة الى الحد الأدنى، وضمان بقاء جودة التغطية والخدمة في أفضل مستوياتها [9].

يتم اختيار العقد بناء على معايير استراتيجية مثل الموقع الجغرافي ومخزون الطاقة والمساحة التي تغطيها العقدة نعتبر هذا التحدي "مسالة تحسين" (Optimization Problem) وبهذا نجد التوازن الدقيق الذي يمنحنا تغطية شاملة دون استنزاف موارد الشبكة [5] [9].



الشكل6 :عملية اختيار العقد النشطة و ادارة الطاقة في شبكة الاستشعار اللاسلكية . [6]

2.2.3 اهداف اختيار العقد

تهدف عملية اختيار العقد الي تحقيق مجموعة من الأهداف الأساسية التي تسهم في تعزيز أداء الشبكة بشكل عام ومن أبرز هذه الأهداف[10] :

- تقليل التداخل بين العقد
- الحفاظ على التغطية الكاملة للمنطقة
- تحسين كفاءة الاتصال داخل الشبكة
- تقليل استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة
- تحقيق توازن في استهلاك الطاقة بين العقد

3.2.3العلاقة بين اختيار العقد واستهلاك الطاقة

ترتبط عملية اختيار العقد ارتباطاً مباشرا بإدارة الطاقة داخل شبكة الاستشعار اللاسلكية. حيث أن اختيار مجموعة مناسبة من العقد النشطة إلى تقليل عمليات الإرسال والاستقبال، وهي العمليات التي تؤثر بشكل كبير على استهلاك الطاقة[11] .

عند تشغيل أو استخدام عدد كبير من العقد، يزداد استهلاك الطاقة بشكل كبير نتيجة كثرة عمليات الاستقبال والإرسال، بالإضافة إلى التداخل بين الإشارات [11].

ومن خلال تفعيل العقد ذات الطاقة الأعلى وإدخال عقد أخرى في وضع السكون، يمكن تحقيق [11] [1]:

- تقليل الاستهلاك الكلي للطاقة.
- توزيع الحمل الطاقوي بشكل متوازن.
- إطالة عمر الشبكة.
- تحسين استقرار الأداء الشبكي.

ولهذا السبب تُستخدم الخوارزميات الذكية وفوق الحدسية بشكل واسع لحل مشكلة اختيار العقد، نظرًا لقدرتها على إيجاد حلول شبه مثالية في زمن حسابي مقبول.

4.2.3معايير اختيار العقد

تعد عملية اختيار العقد النشطة من أكثر العمليات تأثيرا على كفاءة شبكات الاستشعار اللاسلكية وعمرها الافتراضي. ولضمان اختيار العقد الأنسب في كل دورة، تم تحديد مجموعة من المعايير الأساسية التي توجه عملية الاختيار وتضمن. تحقيق التوازن بين مختلف متطلبات الشبكة، وهذه المعايير هي[12] :

- **الطاقة المتبقية (Residual Energy):** يعد هذا المعيار الأهم والأكثر تأثيرا في عملية اختيار العقد، اذ يقيس مقدار الطاقة المتبقية في بطارية العقدة في لحظة الاختيار. تفضل العقد التي تمتلك طاقة متبقية أكبر لتولي الأدوار الأكثر استهلاكا للطاقة كدور العقدة الرئيسية وذلك لضمان استمرارية عملها لفترة، (Cluster Head) أطول. في المقابل تستبعد العقد التي استنفذت معظم طاقتها. لحمايتها من الموت المبكر والحفاظ على اتصالية الشبكة وبحسب المعيار عادة على النحو التالي:

$$E_{ratio} = \frac{E_{res}(i)}{E_{init}}$$

حيث: $E_{res}(i)$ هي الطاقة المتبقية للعقدة ا، E_{init} هي طاقتها الأولية عند بداية تشغيل الشبكة.

- **الموقع الجغرافي (Location):** يؤثر موقع العقدة تأثيرا مباشرا على كمية الطاقة المستهلكة في الارسال، اذ تزداد الطاقة المطلوبة بزيادة المسافة بين العقدة والمحطة الأساسية او بين العقدة والعقد المجاورة. لذلك يفضل اختيار العقد الأقرب جغرافيا الى العقد التي تخدمها بوصفها عقدا رئيسية، مما يقلل من استهلاك الطاقة الإجمالي للشبكة. على النحو التالي zوi تحسب المسافة الاقليدية بين عقدتين:

$$d(i,j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

- **درجة الاتصال (Connectivity Degree):** تشير درجة الاتصال الى عدد العقد المجاورة التي يمكن للعقدة التواصل معها مباشرة ضمن نطاق ارسالها. العقد ذات درجة اتصال اعلى تكون أكثر ملاءمة لتكون عقدا رئيسية، لأنها قادرة على تغطية عدد أكبر من العقد العادية وجمع بياناتها بكفاءة اعلى. كما تسهم في الحفاظ على اتصالية الشبكة حتى في حالة فشل بعض العقد.
- **كثافة الجيران (Neighbor Density):** تعكس كثافة الجيران عدد العقد الموجودة في منطقة تغطية العقدة، وتستخدم لتحقيق توازن أفضل في توزيع الحمل بين العقد الرئيسية. إذا كانت منطقة ما تحتوي على عدد كبير من العقد فمن الأفضل اختيار عقدة رئيسية لها في تلك المنطقة لتقليل مسافات الارسال وتوزيع العبء بشكل متوازن.
- **تاريخ الاختيار السابق (Selection History):** يأخذ هذا المعيار بعين الاعتبار عدد المرات التي اختيرت فيها في الدورات السابقة. تستبعد العقد التي اختيرت مؤخرا بشكل متكرر لإتاحة الفرصة لعقد أخرى وتوزيع عبء الطاقة بشكل أكثر عدالة مما يطيل عمر الشبكة الإجمالي.

5.2.3طرق اختيار العقد

تُعتبر عملية اختيار العقد من أهم العمليات في شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث تهدف إلى تحديد العقد التي ستبقى نشطة داخل الشبكة من أجل ضمان التغطية الجيدة وتقليل استهلاك الطاقة. تختلف طرق اختيار العقد حسب طبيعة الشبكة والخوارزمية المستخدمة، إلا أن الهدف المشترك بينها هو تحسين أداء الشبكة وإطالة عمرها [12] [1] .

تعتمد أغلب الدراسات على ثلاث فئات رئيسية من طرق اختيار العقد، وهي: الاختيار العشوائي، الاختيار المعتمد على التجميع (Clustering)، والاختيار المعتمد على الخوارزميات الحدسية.

1.5.2.3 الاختيار العشوائي(Random Selection)

تُعد طريقة الاختيار العشوائي من أبسط الطرق المستخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث يتم اختيار العقد النشطة بشكل عشوائي دون الاعتماد على معايير محددة مثل الطاقة أو المسافة.

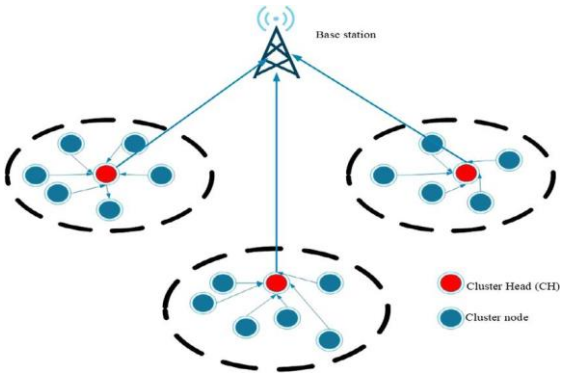
تتميز هذه الطريقة بسهولة التنفيذ وانخفاض التعقيد الحسابي، إلا أنها تعاني من عدة مشاكل، أهمها الاستهلاك غير المتوازن للطاقة، حيث يمكن أن يتم اختيار نفس العقد بشكل متكرر، مما يؤدي إلى نفاد طاقتها بسرعة وانخفاض عمر الشبكة [1] .

2.5.2.3الاختيار المعتمد على التجميع (Clustering-Based Selection)

تعتمد هذه الطريقة على تقسيم الشبكة إلى مجموعات تُسمىClusters ، حيث تحتوي كل مجموعة على عقدة رئيسية تُعرف باسم Head Nodeأو Cluster Head.

تقوم العقد العادية بإرسال البيانات إلى العقدة الرئيسية، والتي بدورها تقوم بتجميع البيانات وإرسالها إلى محطة القاعدة. يساعد هذا الأسلوب على تقليل عدد عمليات الإرسال المباشر، وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة داخل الشبكة.

تُعتبر خوارزمية LEACH من أشهر البروتوكولات المعتمدة على هذا النوع من الاختيار [1] .

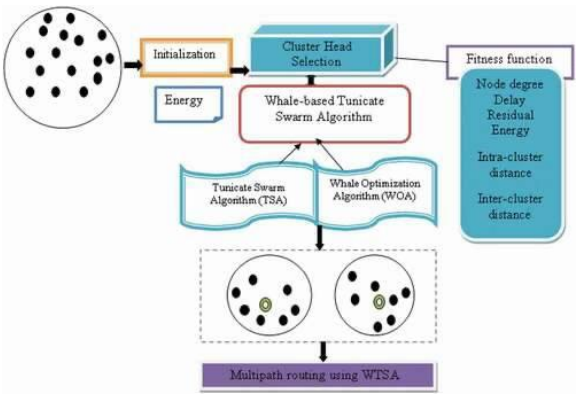


الشكل :7 نموذج توضيحي لبروتوكول LEACH المعتمد على التجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية. [1]

3.5.2.3/*الاختيار* المعتمد على الطاقة(Energy-Based Selection)

في هذه الطريقة يتم اختيار العقد التي تمتلك أكبر طاقة متبقية داخل الشبكة، وذلك من أجل تحقيق توازن في استهلاك الطاقة وتجنب موت بعض العقد مبكراً.

تُستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في الشبكات التي يكون فيها عمر البطارية عاملاً أساسياً، حيث تساعد على تحسين عمر الشبكة والحفاظ على استقرارها [12] .

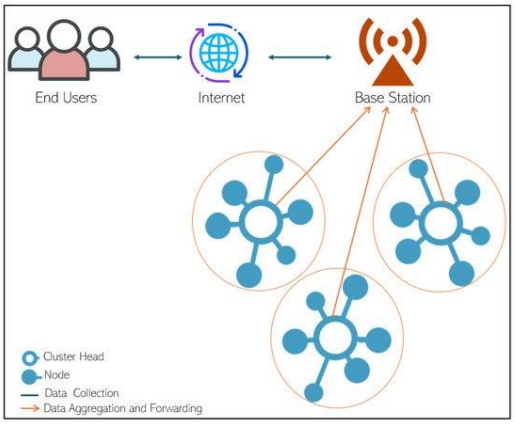


الشكل 8 :آلية اختيار Cluster Head المعتمدة على الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية. [20]

4.5.2.3الاختيار المعتمد على المسافة(Distance-Based Selection)

تعتمد هذه الطريقة على اختيار العقد القريبة من العقدة الرئيسية أو محطة القاعدة، لأن المسافة تؤثر بشكل مباشر على كمية الطاقة المستهلكة أثناء إرسال البيانات.

كلما كانت العقدة أقرب، قل استهلاك الطاقة وتحسنت جودة الاتصال، لذلك يتم استخدام هذا المعيار في العديد من خوارزميات تحسين الطاقة[12] .



الشكل9 :بنية شبكات المستشعرات اللاسلكية

القائمة على التجميع واختيار المسار . [21]

5.5.2.3الاختيارباستخدام الخوارزميات فوق الحدسية(Metaheuristic-Based Selection)

تُعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق تطوراً وفعالية، حيث تعتمد على خوارزميات ذكية مستوحاة من الطبيعة مثل[13] :

- خوارزمية PSO
- خوارزمية ACO
- الخوارزمية الجينية GA

تعمل هذه الخوارزميات على البحث عن أفضل مجموعة من العقد النشطة من خلال تحسين مجموعة من المعايير مثل الطاقة، التغطية، والمسافة.

تتميز هذه الطرق بقدرتها على إعطاء حلول فعالة مقارنة بالطرق التقليدية، إلا أنها قد تتطلب وقتاً وحسابات أكبر.

3.3التجميع والعقدة الرئيسية (Clustering & Head Node)

1.3.3 مفهوم التجميع (Clustering)

تعد تقنية التجميع (Clustering) من أهم التقنيات المستخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية لأن التجميع أداة ذكية قادرة على ترتيب الفوضى وتقليل التعقيد واكتشاف الأنماط الخفية من دون إشراف مسبق، ويعتمد التجميع على تقسيم الشبكة إلى مجموعات بدلا من التعامل مع الشبكة ككل حيث تحتوي كل مجموعة على عقدة رئيسية (Head Node) وعدد من العقد.

تعمل العقد داخل كل مجموعة على إرسال بياناتها إلى العقدة الرئيسية، والتي تتولى بدورها تجميع هذه البيانات ومعالجتها قبل إرسالها إلى محطة القاعدة. وبإتباع هذا الأسلوب سوف يقل استهلاك الطاقة لأنه يقلل من عمليات الإرسال المباشر[14] .

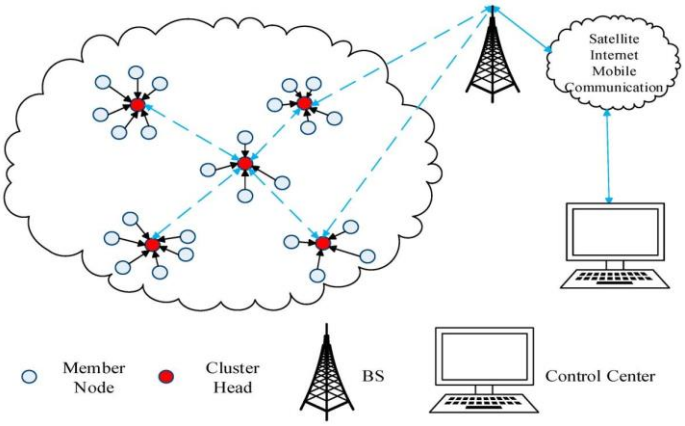
2.3.3 العقدة الرئيسية(Head Node)

العقدة الرئيسية هي منسق لكيفية عمل العقد المجاورة الأخرى، لأنها تلعب دور الوسيط داخل المجموعة ومحطة القاعدة بين العقد. وتعمل هذه العقدة على جمع البيانات من العقد المجاورة، ثم يتم دمجها للتقليل من حجمها.

بما أن العقدة تلعب دور وسيط هذا يجعلها تستهلك طاقة أكبر مقارنة بالعقد الأخرى نظرا للعمليات الكثيرة التي تقوم بها.

إن اختيار العقدة يتطلب دقة وعناية، ويجب ايضاً الحرص على مستوى الطاقة لديها وموقعها داخل الشبكة.

في بعض الخوارزميات، يتم تغيير العقدة الرئيسية بشكل دور من أجل ضمان توزيع استهلاك الطاقة على العقد بشكل متوازن [15].



الشكل10 :آلية نقل البيانات من العقد الأعضاء إلى محطة القاعدة والبرج الرئيسي. [22]

3.3.3 دور التجميع (Clustering) في تقليل استهلاك الطاقة

يلعب التجميع دورا محوريا في تحسين استهلاك الطاقة داخل الشبكة، حيث يهدف بشكل رئيسي الى تقليل كمية البيانات المرسلة او المهام المعالجة لتوفير "تكلفة" الطاقة المرتبطة بكل عملية.

كما ان عملية دمج البيانات داخل العقدة الرئيسية تؤدي الى تقليل حجم البيانات المرسلة الى باقي الشبكة او الى المحطة الأساسية.

بالإضافة الى ذلك فإن تنظيم الشبكة إلى مجموعات يساهم في تبسط إدارة الطاقة وتوزيعها بشكل متوازن بين العقد. ومع ذلك يجب اختيار العقدة الرئيسية بعناية لأن الاختيار الغير مناسب يؤدي إلى استنزاف سريع لطاقة هذه العقدة مما يؤثر سليا على أداء الشبكة ككل [12].

ورغم الدور المحوري الذي تلعبه بروتوكولات التجميع الكلاسيكية في تحسين استهلاك الطاقة وتوزيع العبء الشبكي، إلا أن كل بروتوكول يمتلك قيوداً بنيوية تؤثر على كفاءته التشغيلية تبعاً لطبيعة المعايير المستخدمة. ومن أجل توضيح الفروقات الجوهرية بين أبرز هذه البروتوكولات، يلخص الجدول (1.3) مقارنة شاملة بينها من حيث آلية اختيار العقدة القيادية، التعقيد الحسابي، وقابلية التوسع في الشبكة:

جدول 2 :مقارنة بروتوكولات التجميع الكلاسيكية في شبكات الاستشعار اللاسلكية.

معيار المقارنة	بروتوكولLEACH	بروتوكولHEED	بروتوكول PEGASIS
الية اختيار العقدة الرئيسة (CH)	عشوائية احتمالية تعتمد على دورات الشبكة	تعتمد على الطاقة المتبقية وكثافة العقد المجاورة	اختيار عقدة واحدة ضمن سلسلة مبنية
طبيعة بنية المجموعات	مجموعات موزعة ذات فواصل نصف قطرية محددة	لا توجد مجموعات تقليدية بل سلسلة خطية (Chain)	لا توجد مجموعات تقليدية بل سلسلة خطية (Chain)
التعقيد الحسابي والبرمجي	منخفض جدا وسهل التنفيذ	متوسط (يتطلب تبادل رسائل دوري للاختبار)	مرتفع (بسبب تعقيد إعادة بناء السلسلة عند موت العقدة)
كفاءة توزيع طاقة الشبكة	متوسطة (بسبب العشوائية قد تختار عقدة ضعيفة)	جيدة جدا (لان الطاقة عامل أساسي في الاختيار	سيئة للعقدة البعيدة او قائد السلسلة
القدرة على التوسع (Scalablity)	محدودة في الشبكات الكبيرة جدا	متوسطة الى عالية	منخفضة جدا بسبب تراكم تأخير البيانات

4.3 الخوارزميات فوق الحدسية (Metaheuristic Algorithms)

1.4.3تعريف الخوارزميات فوق الحدسية (Metaheuristic Algorithms)

تشير الاستراتيجيات فوق الحدسية (Metaheuristics) إلى مناهج رفيعة المستوى تُوظَّف لتوجيه وتحسين الخوارزميات الحدسية لغرض إيجاد حلول مرضية لمسائل التحسين الصعبة خصوصا تلك التي يصعب تناولها بالأساليب المعتادة كمسائل (NP-hard) أو عند وجود بيانات ناقصة. تعتمد هذه المناهج على تجميع بين التنقيب الموضعي والعشوائي لاستكشاف مجال الحلول بفعالية، رغم عدم تأكيدها الوصول إلى الحل الأفضل، فإنها تتوصل إلى حلول شبه مثالية بوقت مناسب. كذلك، تتسم بمرونتها وعدم تقيُّدها بمسألة مُعيّنة، مما يتيح استخدامها في مجموعة كبيرة من التحديات[16] . عادةً ما تكون هذه الوسائل تقديرية وغير قطعية، وتعمل كخطط شاملة تُنظِّم عملية البحث بدلًا من تزويد حل جاهز. وتضم تقنياتها نطاقًا واسعًا يمتد من التنقيب المحلي الأساسي إلى آليات تعلُّم أكثر تعقيدًا. وبالرغم من أن غالبية الأبحاث في هذا الميدان ذات طابع عملي وتستند الي نتائج المحاكاة، يوجد بعض القواعد النظرية المتعلقة بالتقارب وإمكانية بلوغ الحلول المثلى. مع ذلك، تعاني بعض المنشورات من قصور في التقدير العملي أو قلة في الشفافية المفاهيمية.

2.4.3خصائص الخوارزميات فوق الحدسية

تتميز الخوارزميات الميتاهيورستية بعدة خصائص تجعلها مناسبة لمشاكل شبكات الاستشعار اللاسلكية. من أهم هذه الخصائص قدرتها على التعامل مع المشاكل المعقدة، ومرونتها في التطبيق، إضافة إلى قدرتها على تحقيق توازن بين استكشاف فضاء الحلول (Exploration) واستغلال الحلول الجيدة (Exploitation).

كما أنها لا تتطلب معرفة دقيقة بطبيعة المشكلة، مما يجعلها مناسبة للأنظمة الواقعية التي يصعب نمذجتها بشكل دقيق [16].

3.4.3 أمثلة على الخوارزميات فوق الحدسية

توجد عدة خوارزميات ميتاهيورستية تم استخدامها في شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث أثبتت فعاليتها في حل مشاكل التحسين المعقدة مثل اختيار العقد وتقليل استهلاك الطاقة.

تعتمد خوارزمية سرب الجسيمات (PSO) على محاكاة سلوك الجماعات، حيث تتحرك مجموعة من الجسيمات داخل فضاء الحلول بحثاً عن أفضل موقع، معتمدة على خبرتها الفردية وخبرة الجماعة، مما يسمح بالوصول إلى حلول فعالة في زمن قصير (Kennedy & Eberhart, 1995) [2]. وقد تم استخدامها في شبكات الاستشعار لتحسين توزيع العقد واختيار العقد النشطة.

أما خوارزمية مستعمرة النمل (ACO) فتعتمد على سلوك النمل في البحث عن أقصر المسارات، حيث تقوم النملات بترك آثار فيرومونية تساعد في تعزيز المسارات الجيدة مع مرور الزمن، وقد استُخدمت بشكل واسع في تحسين مسارات التوجيه داخل ال

شبكة [3].

في حين تعتمد الخوارزمية الجينية (GA) على مبدأ الانتقاء الطبيعي، حيث يتم تمثيل الحلول كأفراد، ويتم تحسينها عبر عمليات التزاوج (Crossover) والطفرات (Mutation)، مما يسمح بتوليد حلول جديدة أكثر كفاءة. وتُستخدم هذه الخوارزمية في اختيار أفضل مجموعة من العقد التي تحقق التغطية بأقل استهلاك للطاقة [4].

من أجل توضيح الفروقات بين أهم الخوارزميات الميتاهيورستية المستخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، يبين الجدول التالي مقارنة بينها من حيث المبدأ وطريقة العمل والمزايا والعيوب.

جدول 3 : مبادئ، مزايا، وعيوب بعض الخوارزميات فوق الحدسية وتطبيقاتها في WSN.

الخوارزمية	المبدأ	طريقة العمل	المزايا	العيوب	الاستخدام في WSN
GA (Genetic Algorithm)	لانتقاء الطبيعي	توليد حلول جديدة عبر التزاوج والطفرات	تنوع كبير في الحلول، قدرة على الهروب من الحلول المحلية	بطيئة نسبياً، تحتاج ضبط معاملات	اختيار العقد وتحسين التغطية
PSO (Particle Swarm Optimization)	سلوك الجماعات (الطيور/الأسماك)	لجسيمات تتحرك حسب أفضل تجربة فردية وجماعية	سريعة، سهلة التنفيذ، قليلة المعاملات	قد تقع في الحل المحلي	تحسين توزيع العقد واختيار العقد النشطة
ACO (Ant Colony Optimization)	سلوك النمل (الفيرومونات)	تعزيز المسارات الجيدة تدريجياً	جيدة في إيجاد المسارات المثلى	بطيئة في البداية، تستهلك وقت	تحسين Routing داخل الشبكة

من خلال هذا الجدول، يمكن ملاحظة أن كل خوارزمية تمتلك خصائص معينة تجعلها مناسبة لنوع محدد من مشاكل التحسين، مما يفتح المجال لاستخدام نماذج مبسطة تجمع بين مزايا هذه الخوارزميات.

4.4.3تبسيط الخوارزميات الفوق الحدسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية

في السنوات الأخيرة، ظهرت اتجاهات بحثية تهدف إلى تبسيط الخوارزميات الميتاهيورستية من خلال تقليل عدد العمليات الحسابية وتعقيد الخوارزمية، وذلك بهدف جعلها أكثر ملاءمة للتطبيق في الأنظمة ذات الموارد المحدودة مثل شبكات الاستشعار اللاسلكية.

يهدف هذا التبسيط إلى تقليل زمن التنفيذ واستهلاك الطاقة، غير أنه قد يؤثر على جودة الحلول، خاصة فيما يتعلق بتحقيق توازن استهلاك الطاقة بين العقد [17].

وهنا تظهر الإشكالية الأساسية لهذا البحث، حيث يتم محاولة تطوير نموذج ميتاهيورستي مبسط قادر على تحقيق توازن بين استهلاك الطاقة مع الحفاظ على أداء الشبكة.

5.3الخاتمة

قدّم هذا الفصل إطاراً نظرياً شاملاً يغطي المفاهيم الأساسية المرتبطة باختيار العقد النشطة والتجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية، إذ تم استعراض مفهوم اختيار العقد وأهدافه ومعاييره المختلفة كالطاقة المتبقية والموقع الجغرافي ودرجة الاتصال، فضلاً عن طرق الاختيار المتعددة من عشوائية واحتمالية وقائمة على التحسين.

كما تم تناول مفهوم التجميع والعقدة الرئيسية ودورهما المحوري في توزيع عبء الطاقة بين العقد، مع استعراض بروتوكولات التجميع الشهيرة كLEACH ، HEED و PEGASISواختتم هذا الفصل بعرض الخوارزميات فوق الحدسية ولا سيما خوارزمية PSO التي أثبتت فعاليتها في حل مسائل التحسين المعقدة، غير أن تعقيدها الحسابي يُشكّل عائقاً أمام تطبيقها في البيئات محدودة الموارد.

وتأسيساً على هذه المعطيات النظرية، ينتقل البحث في الفصل الموالي إلى الجانب التطبيقي، حيث سيتم تصميم نسخة مبسطة من خوارزمية PSO وتكييفها مع مشكلة اختيار العقد الرئيسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية، بهدف تحقيق توازن أفضل في استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة.

الفصل الرابع: نمذجة المشكلة وتصميم خوارزمية PSO المبسطة

1.4 المقدمة

بعد ما تم تناوله في الفصول السابقة من أسس نظرية تتعلق بشبكات الاستشعار اللاسلكية وإشكالية استهلاك الطاقة، ومفهوم اختيار العقد والتجميع والخوارزميات فوق الحدسية، يأتي هذا الفصل ليُجسّد الجانب التصميمي والتطبيقي من البحث.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم نموذج متكامل لحل مشكلة اختيار العقد الرئيسية (Cluster Heads) في شبكات الاستشعار اللاسلكية، وذلك من خلال تصميم نسخة مبسطة من خوارزمية تحسين السرب (PSO) تتناسب مع خصائص هذه البيئة المحدودة الموارد.

يرتكز هذا التصميم على مبدأين أساسيين: الأول هو استخدام PSO المبسطة لاختيار أفضل مجموعة من العقد الرئيسية في كل دورة بناءً على دالة هدف تجمع بين معايير الطاقة المتبقية والمسافة وتوازن الClusters ، والثاني هو انضمام العقد العادية تلقائياً إلى أقرب عقدة رئيسية إليها دون الحاجة إلى حسابات إضافية.

يتضمن هذا الفصل أربعة محاور رئيسية متكاملة: يبدأ بنمذجة المشكلة رياضياً وتحديد مدخلاتها ومتغيرات قرارها وقيودها، ثم يتناول الصياغة الرياضية لدالة الهدف وحجم فضاء البحث وتعقيد المشكلة، بعد ذلك يستعرض مبادئ خوارزمية PSO القياسية وحدودها في بيئة شبكات الاستشعار، وصولاً إلى عرض استراتيجية التبسيط المقترحة وتفاصيل تطبيق الخوارزمية بمختلف مراحلها.

2.4 نمذجة المشكلة كمسألة تحسين

1.2.4 التعريف العام بالمشكلة

تتمثل المشكلة في اختيار مجموعة من العقد الرئيسية (Cluster Heads) داخل شبكة استشعار لاسلكية مقسمة إلى مجموعات (Clusters)، بحيث تتولى كل عقدة رئيسية جمع البيانات من العقد العادية المحيطة بها وإرسالها إلى المحطة الأساسية (Base Station)، مع ضمان توازن استهلاك الطاقة بين مختلف العقد وإطالة عمر الشبكة قدر الإمكان.

تجدر الإشارة إلى أن الاختيار العشوائي أو الثابت للعقد الرئيسية يُعدّ حلاً غير مثالي، إذ يؤدي إلى استهلاك مفرط لطاقة بعض العقد وتقليص عمر الشبكة. لذلك، يُعدّ الاختيار الذكي والديناميكي للعقد الرئيسية في كل دورة أمراً ضرورياً لضمان استمرارية عمل الشبكة وكفاءتها.

2.2.4 مدخلات المشكلة

لتنفيذ النموذج الرياضي بشكل فعّال، نحتاج إلى مجموعة من البيانات المدخلة التي تحدد الإطار العام للمشكلة، وتشمل:

- $N = \{n_1, n_2, \ldots, n\}$: مجموعة العقد الكلية في الشبكة
- k: عدد الClusters ، أي عدد العقد الرئيسية المطلوب اختيارها في كل دورة
- BS: المحطة الأساسية التي تستقبل البيانات من العقد الرئيسية
- E_i : الطاقة المتبقية للعقدة i في الدورة الحالية
- E_{init} : الطاقة الأولية لكل عقدة عند بداية تشغيل الشبكة
- d_{ij} : المسافة الإقليدية بين العقدة i والعقدةj

- $E_{threshold}$: الحد الأدنى للطاقة المطلوبة لتفعيل عقدة كCluster Head

3.2.4متغيرات القرار

تُمثَّل متغيرات القرار في هذه المشكلة على النحو التالي:

- $x_i \in \{0, 1\}$: x_i متغير ثنائي، يأخذ القيمة 1 إذا كانت العقدة i عقدة رئيسية(Cluster Head) ، و0 إذا كانت عقدة عادية
- $H \subseteq N$: مجموعة العقد الرئيسية المختارة، حيث|H| = k
- $CH(j)$: العقدة الرئيسية المخصصة للعقدة العادية j ، وتُحدَّد تلقائياً بناءً على قاعدة أقربCH

4.2.4دالة الهدف (Objective Function)

تهدف دالة الهدف في هذا النموذج إلى اختيار أفضل مجموعة من العقد الرئيسية التي تحقق في آنٍ واحد:

- **تعظيم الطاقة المتبقية لـ CHs** :نفضل اختيار العقد التي تمتلك أكبر طاقة متبقية كعقد رئيسية، لأنها تتحمل عبء استقبال البيانات وإرسالها للمحطة الأساسية
- **تقليل المسافة بين العقد العادية والـ CH:** نسعى إلى أن تكون كل عقدة عادية قريبة من عقدتها الرئيسية، مما يُقلل من استهلاك الطاقة في عملية الإرسال
- **تحقيق توازن أحجام الـ Clusters** : نهدف إلى توزيع العقد العادية بشكل متوازن بين الClusters ، لتجنب تحميل عقدة رئيسية واحدة أكثر من غيرها

5.2.4القيود (Constraints)

لضمان صحة الحل وفعاليته، يجب احترام القيود التالية:

- **قيد عدد الـ CHs:** يجب أن يكون عدد العقد الرئيسية المختارة في كل دورة مساوياً لـ k بالضبط، لا أقل ولا أكثر
- **قيد الطاقة** :لا يمكن اختيار عقدة كـ Cluster Head إذا كانت طاقتها المتبقية أقل من الحد الأدنىE_threshold ، حمايةً لها من النفاد المبكر
- **قيد الثنائية** :كل عقدة في الشبكة إما أن تكون عقدة رئيسية (1) أو عقدة عادية (0)، ولا توجد حالة وسطى
- **قيد الانضمام التلقائي** :كل عقدة عادية تنضم تلقائياً إلى أقرب عقدة رئيسية إليها من حيث المسافة الإقليدية، دون الحاجة إلى أي حسابات إضافية

3.4الصياغة الرياضية للمشكلة

1.3.4دالة الهدف

تُصاغ المشكلة كمسألة تحسين، حيث تُجمع المعايير الثلاثة في دالة هدف واحدة باستخدام الأوزان على النحو التالي:

$$F(H) = w_1 \cdot C_E + w_2 \cdot C_D + w_3 \cdot C_L$$

مع الشرط :

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

حيث تُحسب كل مكوّن على النحو التالي:

أولاً: C_E — معيار الطاقة المتبقية لـ CH

يقيس هذا المعيار متوسط نسبة استنزاف طاقة العقد الرئيسية المختارة

$$C_E = \frac{1}{K}\sum_{h\in H}(1 - \frac{E_{res}(h)}{E_{init}})$$

حيث:

- $\boldsymbol{E_{res}(h)}$: الطاقة المتبقية للعقدة الرئيسيةh
- $\boldsymbol{E_{init}}$: الطاقة الأولية لكل عقدة
- $\boldsymbol{K}$: عدد العقد الرئيسية المختارة

كلما كانت C_E أصغر، دلّ ذلك على أن العقد الرئيسية المختارة تمتلك طاقة متبقية أكبر، وبالتالي تكون جودة الحل أفضل. لذلك نسعى إلى تصغير هذا المعيار.

ثانياً: C_D — معيار المسافة بين العقد العادية والـCH

يقيس هذا المعيار متوسط المسافة بين كل عقدة عادية وأقرب عقدة رئيسية إليها، مُعيَّراً بالنسبة لقطر المنطقة المراقبة:

$$C_D = \frac{1}{|N \setminus H|}\sum_{j\notin H}\min_{h\in H} d(j.h)$$

حيث:

- $d(j.h)$:المسافة الإقليدية بين العقدة العادية j والعقدة الرئيسيةh
- $N \setminus H$:مجموعة العقد العادية) كل العقد ماعدا الـ(CHs

كلما كانت قيمة C_D أصغر، دلّ ذلك على أن العقد العادية أقرب لعقدها الرئيسية، مما يُقلل من استهلاك طاقة الإرسال. لذلك نسعى إلى تصغير هذا المعيار.

ثالثاً: C_L — معيار توازن أحجام الـ Clusters

يقيس هذا المعيار مدى توازن توزيع العقد العادية بين الـClusters ، وذلك من خلال التباين المعياري لأحجامها:

$$C_L = \frac{\sigma(|C_h|)}{\mu(|C_h|)}$$

حيث:

- $|C_h|$:عدد العقد العادية المنتمية لـ Cluster الخاص بالعقدة الرئيسيةh
- $\sigma(|C_h|)$:الانحراف المعياري لأحجام الـClusters
- $\mu(|C_h|)$:متوسط أحجام الـClusters

كلما اقتربت قيمة C_L من الصفر، دلّ ذلك على توزيع متوازن للعقد بين الـ Clusters لذلك نسعى إلى تصغير هذا المعيار.

ملاحظة مهمة :بما أن دالة الهدف تتكون من معايير نريد تصغيرها جميعاً، فإن الخوارزمية تبحث على تصغير F(H) ، أي:

$$H^* = \arg \min_{H \subseteq N, |H|=K} F(H)$$

2.3.4 القيود الرياضية

القيد 1 — عدد الـ CHs ثابت:

$$\sum_{i=1}^{N} x_i = K$$

في كل دورة، يجب اختيار k عقدة رئيسية بالضبط، لضمان تغطية متوازنة لكامل الشبكة.

القيد 2 — طاقة الـ CH :

$$E_{res}(i) > E_{threshold} \,, \forall\, i \in H$$

أي أن كل عقدة رئيسية مختارة يجب أن تمتلك طاقة متبقية تفوق الحد الأدنى المطلوب للتشغيل. العقد التي استنفدت طاقتها تُستثنى تلقائياً من عملية الاختيار.

القيد 3 — الثنائية:

$$x_i \in \{0,1\} \,, \forall\, i \in N$$

القيد 4 — الانضمام التلقائي للعقد العادية:

$$CH(j) = \arg\min_{h \in H} d(j,h)$$

كل عقدة عادية j تنضم تلقائياً إلى العقدة الرئيسية الأقرب إليها من حيث المسافة الإقليدية.

3.3.4 حجم فضاء البحث والتعقيد الحسابي

عند النظر في مشكلة اختيار k عقدة رئيسية من أصل N عقدة، فإن العدد الكلي للحلول الممكنة يُحسب بالتوافيق على النحو التالي[16] :

$$|espace_recherche| = \frac{N!}{K!\,(N-k)!}$$

فمثلاً، إذا كانت الشبكة تحتوي على N=100 عقدة ونريد اختيار k=5 عقد رئيسية، فإن عدد الحلول الممكنة يبلغ:

$$\frac{100!}{5! \cdot 95!} = 75{,}287{,}520$$

وهو عدد ضخم يجعل البحث الشامل مستحيلاً من الناحية الحسابية، خاصةً مع تزايد N وk.

صعوبة المشكلة وارتباطها بـ $NP - Hard$:

تُصنَّف مشكلة اختيار العقد الرئيسية ضمن فئة المسائلNP-Hard ، وذلك للأسباب التالية [16] :

- **الطابع التو افقي للمشكلة :**عدد التركيبات الممكنة يتضاعف بشكل كبير مع زيادة عدد العقد

- **تعدد الأهداف المتعارضة :**تحقيق توازن الطاقة وتقليل المسافات وتوازن الـ Clusters في آنٍ واحد يُضيف تعقيداً إضافياً
- **الارتباط بمشكلة الـ k-Medoids:** وهي مشكلة NP-Hard معروفة تتشابه بنيوياً مع مشكلتنا، إذ تهدف إلى اختيار k نقطة مركزية بحيث تكون باقي النقاط أقرب ما يمكن إليها

وعليه، فإن استخدام خوارزمية PSO المبسطة يُعدّ خياراً مناسباً للحصول على حلول جيدة في وقت حسابي معقول، دون الحاجة إلى استعراض جميع الحلول الممكنة.

4.4خوارزمية تحسين السرب (PSO) نظرة عامة

1.4.4التعريف والمبادئ الأساسية

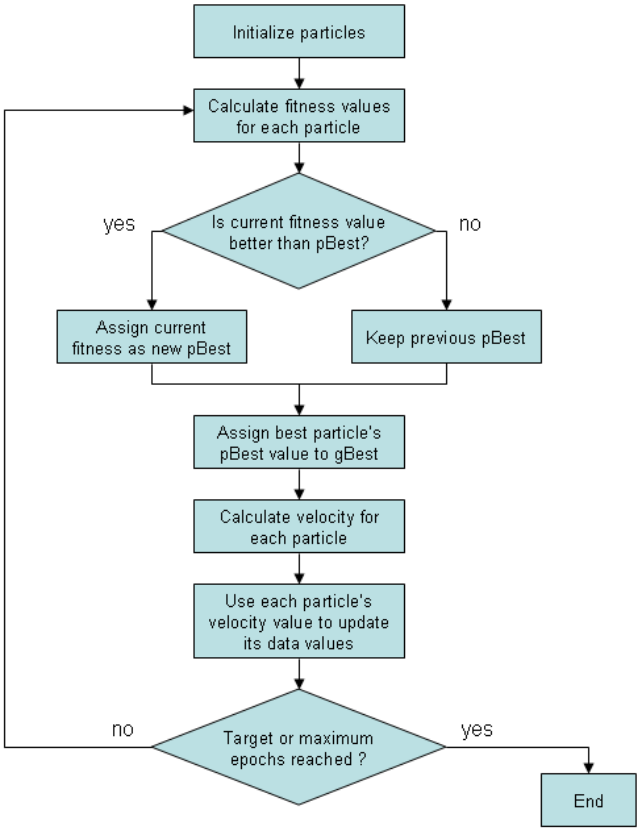
إن الخوارزميات الفوق الحدسية كثيرة منها خوارزمية تحسين السرب التي تعتبر خوارزمية ذات نهج عشوائي مستوحى من سلوك جماعي للكائنات الحية أثناء البحث عن الغذاء، كأسراب من الأسماك والطيور. التي تم اقتراحها من طرف العالمان Kennedy وEberhart عام 1995, وهي تحاكي السلوك الاجتماعي لأسراب الطيور والأسماك ومبدأها الأساسي هو التعاون بين الأفراد للوصول إلى الحل الأمثل [2].

وتتكون هذه الخوارزمية من مجموعة من الجسيمات (Particles)تمثل حلولا محتملة للمشكلة تتحرك هذه الجسيمات في فضاء البحث بحثاً عن الحل الأمثل تستفيد كل جسيمة من تجربتها الشخصية ومن تجربة السرب كله لتوجيه حركتها نحو مناطق أفضل في فضاء البحث. ويعتمد هذا التوجيه على مفهومين أساسيين [2]:

- **pBest (Personal Best)**: أفضل موقع وصلت إليه الجسيمة خلال تاريخها الشخصي
- **gBest (Global Best) :** أفضل موقع وصل إليه أي فرد في السرب كله عبر جميع التكرارات

وتمتاز هذه الخوارزمية بما يأتي:

- **التجانس (Homogeneity):** الطيور كلها لها أنموذج السلوك نفسه ويتحرك السرب بدون قائد. المحلية Locality: حركة كل طير ستتأثر فقط بحركة الطيور المجاورة والرؤية هي أهم حاسة لدى الطير لتنظيم السرب.
- **تجنب التصادم (Collision Avoidance):** يقوم الطير بتجنب زملائه في السرب.
- **التمركز في السرب (Flock Centering):** يحاول الطير البقاء على مقربة من زملائه في السرب.
- **مطابقة السرعة (Velocity Matching):** يقوم الطير بمحاولة مجاراة سرعة زملائه في السرب.



الشكل11 :مخطط سير العمليات لحوارزمية PSOالقياسة.

2.4.4معادلات التحديث القياسية

في كل تكرار(Iteration) ، تُحدَّث سرعة وموقع كل جسيمة وفق المعادلتين التاليتين [2] :

معادلة تحديث السرعة:

$$V_i(t+1) = w \cdot V_i(t) + c_1 \cdot r_1\big(pBest_i - X_i(t)\big) + c_2 \cdot r_2(gBest - X_i(t)$$

معادلة تحديث الموقع:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$$

حيث تتكون معادلة السرعة من ثلاث مكونات أساسية[2] :

- $\boldsymbol{w \cdot V_i(t)}$: مكوّن القصور الذاتي(Inertia Component) ، يُحافظ على اتجاه الجسيمة السابق ويتحكم في التوازن بين الاستكشاف والاستغلال
- $\boldsymbol{c_1 \cdot r_1\big(pBest_i - X_i(t)\big)}$:المكوّن المعرفي(Cognitive Component) ، يجذب الجسيمة نحو أفضل موقع شخصي وصلت إليه
- $\boldsymbol{c_2 \cdot r_2(gBest - X_i(t)}$:المكوّن الاجتماعي(Social Component) ، يجذب الجسيمة نحو أفضل موقع وصل إليه السرب كله

وتشمل المعاملات المستخدمة:

- w :معامل القصور الذاتي(Inertia Weight)
- c_1 :معامل التعلم الشخصي(Cognitive Coefficient)
- c_2 :معامل التعلم الاجتماعي(Social Coefficient)
- $r_2 r_1$:أعداد عشوائية موزعة بشكل منتظم في المجال[0,1]

3.4.4حدود PSO القياسية في بيئة شبكات الاستشعار اللاسلكية

رغم فعالية PSO القياسية في حل مسائل التحسين المتنوعة، إلا أنها تواجه عدة تحديات عند تطبيقها في سياق شبكات الاستشعار اللاسلكية [17] [16] :

أولاً — التعقيد الحسابي المرتفع :

تحتاج PSO القياسية إلى حساب ثلاث مكونات في كل تكرار ولكل جسيمة، وهو ما يتطلب موارد حسابية وذاكرة قد لا تتوفر في البيئات محدودة الموارد. علاوة على ذلك، فإن ضبط المعاملات w و c_1و c_2يستلزم تجارب مكثفة تزيد من التعقيد الكلي للخوارزمية.

ثانياً — عدم الملاءمة للفضاء الثنائي :

PSO القياسية مصممة في الأصل للتعامل مع قيم مستمرة (أعداد حقيقية) ، في حين أن مشكلة اختيار العقد الرئيسية ذات طبيعة ثنائية (CH أو لا). لذلك نحتاج إلى آلية تحويل إضافية تزيد من التعقيد الحسابي.

ثالثاً — خطر التقارب المبكر :

في بعض الحالات، تتقارع جميع الجسيمات بسرعة نحو gBest وتفقد تنوعها، مما يجعلها عالقة في حل محلي (Local Optimum) بدلاً من الحل الأمثل الكلي .(Global Optimum) هذا الخطر يزداد في المشاكل ذات فضاء البحث الكبير كمشكلتنا.

رابعاً — عدم مراعاة خصائص الشبكة :

لا تأخذ PSO القياسية بعين الاعتبار خصائص شبكات الاستشعار اللاسلكية كالطاقة المتبقية للعقد وتغير حالة الشبكة من دورة لأخرى، مما يجعلها غير مُكيَّفة بشكل كافٍ لهذه البيئة الديناميكية.

وعليه، تظهر الحاجة إلى **تبسيط PSO** بما يتناسب مع خصائص شبكات الاستشعار اللاسلكية ومتطلبات مشكلة اختيار العقد الرئيسية، وهو ما سنتناوله بالتفصيل في القسم التالي.

5.4استراتيجية التبسيط المقترحة

1.5.4ما الذي تم تبسيطه ولماذا؟

انطلاقاً من القيود التي تم تحديدها في القسم السابق، نقترح تبسيط خوارزمية PSO على ثلاثة مستويات، بهدف تقليل التعقيد الحسابي وجعلها أكثر ملاءمة لبيئة شبكات الاستشعار اللاسلكية محدودة الموارد:

المستوى الأول — حذف معامل القصور الذاتي:(w)

في PSO القياسية، يُستخدم معامل القصور الذاتي w للتحكم في التوازن بين الاستكشاف والاستغلال. غير أن ضبط هذا المعامل يتطلب تجارب مكثفة، كما أن حسابه يُضيف عبئاً حسابياً إضافياً على العقد ذات الموارد المحدودة. لذلك نقترح حذفه والاعتماد فقط على مكوّني التعلم الشخصي والاجتماعي، مما يُبسّط المعادلة دون التأثير الكبير على جودة الحل.

المستوى الثاني — تثبيت معاملات التعلم(c_1 c_2) :

في PSO القياسية، تكون c_1 و c_2معاملات قابلة للضبط وتأخذ قيماً مختلفة حسب المشكلة. في نسختنا المبسطة، نُثبّت قيمتهما بحيث:

$$c_1 = c_2 = 1$$

هذا يُلغي الحاجة إلى ضبط هذين المعاملين ويُقلل من التعقيد الحسابي، مع الحفاظ على التوازن بين التأثير الشخصي والاجتماعي على حركة الجسيمات.

المستوى الثالث — حذف الأعداد العشوائية (r_1وr_2):

بدلاً من ضرب r_1 و r_2في الفروق، نحذفهما كلياً من المعادلة، مما يجعل تحديث السرعة حتمياً وليس عشوائياً. هذا يُقلل من التعقيد الحسابي ويجعل الخوارزمية أكثر استقراراً في بيئة الشبكة الديناميكية.

2.5.4معادلة السرعة المبسطة

بعد تطبيق التبسيطات المذكورة، تُصبح معادلة تحديث السرعة على النحو التالي:

$$V_i(t+1) = (pBest_i - X_i(t) + (gBest - X_i(t))$$

تتكون هذه المعادلة من مكوّنين فقط:

- $(pBest_i - X_i(t)$:يمثل الفرق بين أفضل موقع شخصي للجسيمة وموقعها الحالي، ويدفعها نحو أفضل تجربة شخصية سابقة لها
- $(gBest - X_i(t)$:يمثل الفرق بين أفضل موقع وصل إليه السرب كله وموقع الجسيمة الحالي، ويدفعها نحو أفضل حل تم اكتشافه حتى الآن

مقارنة بين PSO القياسية والمبسطة:

جدول 4 :مقارنة بين PSO القياسية والمبسطة.

العنصر	PSOالقياسية	PSOالمبسطة
معاملw	موجود ويحتاج ضبط	محذوف
c_2وc_1	قيم متغيرة	ثابتة = 1
r_2وr_1	أعداد عشوائية	محذوف
عدد المعاملات	4معاملات	معامل واحد(k)
التعقيد الحسابي	مرتفع	منخفض
الملاءمة لWSN	متوسطة	عالية

3.5.4التكييف الثنائي لاختيار العقد الرئيسية

بما أن PSO تتعامل في الأصل مع قيم مستمرة، ومشكلة اختيار الـ CHs ذات طبيعة ثنائية، نستخدم **دالة السيغمويد (Sigmoid Function)** لتحويل قيمة السرعة إلى احتمال، ثم نُطبّق عتبة لاتخاذ القرار الثنائي. هذا النهج يُمكّن الخوارزمية من التعامل مع فضاء البحث الثنائي الخاص بمشكلتنا [17] :

الخطوة 1 — تحويل السرعة إلى احتمال:

$$S(V_i) = \frac{1}{1 + e^{-V_i}}$$

تُحوّل دالة السيغمويد أي قيمة حقيقية (سالبة أو موجبة) إلى قيمة محصورة في المجال [0,1]، مما يجعلها مثالية للتمثيل الاحتمالي للقرار الثنائي.

الخطوة 2 — اتخاذ القرار الثنائي مع مراعاة الطاقة:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} 1 (cluster\ head)\ S(v_i) \geq 0.5\ E_{res} > E_{threshold} \\ 0\ (\text{عقدة عادية}) \end{cases}$$

يضمن هذا الشرط المزدوج أن العقدة لا تُختار كـ CH إلا إذا أشارت الخوارزمية إلى ذلك وكانت طاقتها المتبقية كافية، مما يحمي العقد الضعيفة من الاستنزاف المبكر.

6.4تطبيق الخوارزمية على مشكلة اختيار العقد الرئيسية

1.6.4تمثيل الحل(Solution Encoding)

يُمثَّل كل حل (جسيمة) على شكل متجه ثنائي بطولN ، حيث N هو العدد الكلي للعقد في الشبكة:

$$X_i = [x_1, x_2, x_3, \ldots, x_N] \in \{0,1\}^N$$

حيث تأخذ كل خانة القيمة 1 إذا كانت العقدة المقابلة لها عقدة رئيسية(CH) ، و0 إذا كانت عقدة عادية. يتكون السرب كله من pop_sizeجسيمة، كل منها تمثل توزيعاً مختلفاً للعقد الرئيسية عبر الشبكة.

مثال توضيحي:

فرضاً عندنا شبكة فيها N=6 عقد ونريد اختيار k=2 عقد رئيسية:

$$X = [0,1,0,0,1,0]$$

يعني أن n_2 و n_5هما العقدتان الرئيسيتان المختارتان، وباقي العقد عادية تنضم تلقائياً لأقرب CH إليها.

2.6.4الإعدادات الأولية والمعاملات

قبل تشغيل الخوارزمية، يجب تحديد مجموعة من المعاملات التي تتحكم في سير العملية:

- $\boldsymbol{N}$: العدد الكلي للعقد في الشبكة
- $\boldsymbol{K}$:عدد العقد الرئيسية المطلوب اختيارها في كل دورة
- $\boldsymbol{pop_size}$:عدد الجسيمات في السرب
- $\boldsymbol{MaxIteration}$:الحد الأقصى لعدد التكرارات

- $c_1 = c_2 = 1$:معاملات التعلم الشخصي والاجتماعي (ثابتة في النسخة المبسطة).
- $E_{threshold}$:الحد الأدنى للطاقة المطلوبة لتفعيل عقدة كCH .
- w_1 , w_2 , w_3 :أوزان دالة الهدف، مع الشرط $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

هذه القيم إما تُختار تجريبياً بناءً على تجارب أولية، أو تُضبط لاحقاً خلال مرحلة ضبط المعاملات.

3.6.4تو ليد الحل الأولي

في بداية الخوارزمية، يُولَّد السرب الأولي عشوائياً مع مراعاة قيدَي الطاقة وعدد الCHs :

الخوارزمية 1 — توليد السرب الأولي:

في المرحلة الأولى من الخوارزمية يتم توليد السرب الأولي، حيث يولد السرب الاولي الذي يتكون من مجموعة من الجسيمات، وتمثل كل جسيمة توزيعا محتملا للعقد الرئيسية عبر الشبكة. وتمر هذه العملية بعدة مراحل منها:

المرحلة الأولى-تهيئة المتجه: السرب يتكون من جسيمات ولكل جسيمة في السرب، ينشأ متجه ثنائي بطول N مهيأ بالأصفار، بحيث يمثل كل عنصر فيه حالة العقدة المقابلة له، بمعنى عقدة نشطة او عقدة نائمة.

المرحلة الثانية- يتم استبعاد العقد التي تكون طاقتها منخفضة: قبل الاختيار العشوائي، تستبعد تلقائيا كل عقدة طاقتها المتبقية أقل من الحد الادنى e-threshold, وهذا من اجل ضمان ان CHs المختارة قادرة على أداء المهام المطلوبة بشكل صحيح.

المرحلة الثالثة -الاختيار العشوائي لل CHs : من بين مجموعة من العقد المرشحة، يتم اختيار k عقدة عشوائيا لتكون عقدا رئيسية، وتعين قيمتها في المتجه الثنائي إلى 1.

المرحلة الرابعة-تحديد انتساب العقد العادية: بعد تحديد العقد الرئيسيةCHs,تلتحق كل عقدة عادية تلقائيا إلى أقرب عقدة رئيسية إليها بناءً على المسافة الإقليدية، وتحفظ هذه المعلومة في مصفوفة الانتماء membership.

تعيد هذه العملية تكرار نفسها لكل جسيمة من السرب، مما تولد مجموعة متنوعة من الحلول الأولية التي تخدم كنقطة انطلاق لعملية التحسين.

Algorithm 1 Initial Swarm Generation

Input: N: Total number of nodes

k: Required number of Cluster Heads

E[N]: Remaining energy array for each node

E_threshold: Minimum energy to become a CH

pop_size: Number of particles

D[N][N]: Distance matrix between nodes

Output: Swarm: Initial swarm of particles

membership[N]: Cluster assignment for each node

```
for p ← 1 to pop_size do
 X ← [0, 0, ..., 0] {binary vector of length N}
 candidates ← {i | E[i] > E_threshold}
 H ← randomly select k nodes from candidates
 for each i ∈ H do
    X[i] ← 1
 for each j ∉ H do
     membership[j] ← argmin D[j][h], ∀h ∈ H
 Swarm.append(X)
return Swarm, membership
```

مثال توضيحي:

N=6 ،k=2 ،E_threshold=0.2
E = [0.8, 0.9, 0.7, 0.6, 0.85, 0.75]
n1 n2 n3 n4 n5 n6
candidates = {n1, n2, n3, n4, n5, n6} ← 0.2 كلهم فوق
H = {n2, n5} ← اختيار عشوائي
X = [0, 1, 0, 0, 1, 0]
n1 n2 n3 n4 n5 n6
membership:
n1 → n2 (أقرب CH)
n3 → n2 (أقرب CH)
n4 → n5 (أقرب CH)
n6 → n5 (أقرب CH)

4.6.4تقييم اللياقة(Fitness Evaluation)

بعد توليد السرب الأولي، تُحسب قيمة دالة اللياقة لكل جسيمة لتحديد جودتها. تهدف هذه العملية إلى قياس مدى ملاءمة كل توزيع لـ CHs من حيث الطاقة والمسافة والتوازن. تمر عملية التقييم بالمراحل التالية:

المرحلة الأولى — التحقق من صحة الحل: قبل أي حساب، يتم التحقق من أن عدد الـ CHs في الجسيمة يساوي k بالضبط. أي حل لا يحترم هذا الشرط يُرفض فوراً ويُعطى قيمة لياقة $+\infty$.

المرحلة الثانية — حساب معيار الطاقة C_E: يُحسب متوسط نسبة استنزاف طاقة العقد الرئيسية المختارة. كلما كانت العقد الرئيسية تمتلك طاقة أكبر، كانت قيمة C_E أصغر وبالتالي الحل أفضل.

المرحلة الثالثة — تحديد انتماء العقد العادية: كل عقدة عادية تنضم تلقائياً لأقرب CH إليها من حيث المسافة الإقليدية، وتُخزَّن هذه المعلومة لاستخدامها في الحسابات التالية.

المرحلة الرابعة — حساب معيار المسافة C_D: يُحسب متوسط المسافة بين كل عقدة عادية وأقرب CH إليها. كلما كانت العقد العادية أقرب لعقدها الرئيسية، كانت قيمة C_D أصغر.

المرحلة الخامسة — حساب معيار التوازن C_L : يُحسب التباين في أحجام الـ Clusters. كلما كان التوزيع أكثر توازناً بين الـ Clusters، كانت قيمة C_L أقرب إلى الصفر.

المرحلة السادسة — حساب اللياقة النهائية: تُجمع المعايير الثلاثة في دالة هدف واحدة باستخدام الأوزان w_1، w_2، w_3، وتُرجع القيمة النهائية التي تسعى الخوارزمية إلى تصغيرها.

Algorithm 2 Fitness Evaluation

Input : X[N] : Binary vector of the particle

E[N]: Remaining energy array

E_init: Initial energy of each node

D[N][N]: Distance matrix between nodes

w_1, w_2, w_3: Objective function weights

Output: F: Fitness value (to be minimized)

membership[N]: Cluster assignment for each node

```
H ← {i | X[i] = 1}
if |H| ≠ k then
    return F ← +∞ {invalid solution}
Step 1: Compute C_E
C_E ← 0
for each h ∈ H do
    C_E ← C_E + (1 − E[h] / E_init)
C_E ← C_E / k
Step 2: Assign normal nodes to nearest CH
for each j ∉ H do
    membership[j] ← argmin D[j][h]، ∀h ∈ H
Step 3: Compute C_D
```

13 C_D ← 0

14 for each j ∉ H do

15 C_D ← C_D + D[j][membership[j]]

16 C_D ← C_D / |N \ H|

17 Step 4: Compute cluster sizes

18 for each h ∈ H do

19 size[h] ← | {j | membership[j] = h} |

20 Step 5: Compute C_L

21 μ ← mean(size[h])، ∀h ∈ H

22 σ ← std(size[h])، ∀h ∈ H

23 C_L ← σ / μ

24 Step 6: Compute final fitness

25 F ← w_1 × C_E + w_2 × C_D + w_3 × C_L

26 return F, membership

مثال التوضيحي:

H = {n2, n5} ، k=2 ،E_init=1.0

E = [0.8, 0.9, 0.7, 0.6, 0.85, 0.75]

C_E = ((1-0.9) + (1-0.85)) / 2
= (0.1 + 0.15) / 2 = 0.125

membership:
n1→n2 ،n3→n2 ،n4→n5 ،n6→n5

C_D = (D[n1] [n2] + D[n3] [n2] + D[n4] [n5] + D[n6] [n5]) / 4

size = {n2:2 ،n5:2} ← توزيع متوازن

C_L = 0 / 2 = 0 ← توازن مثالي

F = w_1×0.125 + w_2×C_D + w_3×0

5.6.4تحديث الموقع واختيار العقد الرئيسية الCH

هي المرحلة الأساسية في كل تكرار من تكرارات الخوارزمية حيث تحدث مواقع هذه الجسيمات وفق معادلات PSO المبسطة بهدف تحسين جودة الحلول تدريجيا. وعملية التحديث تمر بمراحل مختلفة، كما يلي:

المرحلة الأولى-حساب السرعة المبسطة: اي نقوم بحساب السرعة المبسطة لكل عقدة j ضمن هذه الشبكة عملية الحساب مبنية على الفرق بين الموقع الحالي وأفضل موقع شخصي للعقدة(pBest)وأفضل موقع جماعي(gBest)

المرحلة الثانية-تحويل السرعة إلى احتمال: دالة السيغمويد (Sigmoid Function) التي تعتبر من أشهر دوال التنشيط في الشبكات تطبق على قيمة السرعة لتحويلها إلى احتمال محصور في المجال [0,1]، مما يمهد للقرار الثنائي.

المرحلة الثالثة- حساب درجة الترشح: في هذه المرحلة يعتمد الترشح على طاقة كل عقدة، إذا كانت طاقة العقدة فوق الحد الادنى، تعين درجة ترشحها بقيمة الاحتمال المحسوب. أما العقد ذات الطاقة المنخفضة فتستبعد تلقائيا بإعطائها درجة الترشح تساوي صفرا.

المرحلة الرابعة — اختيار أفضل k عقدة كـ CHs: تُرتَّب العقد تنازلياً حسب درجة الترشح، وتُختار أعلى k عقدة لتكون العقد الرئيسية في هذا التكرار، مما يضمن دائماً احترام قيد عدد الـ CHs.

المرحلة الخامسة — تحديث pBest وgBest: بعد تقييم الجسيمة المحدَّثة، يُقارَن أداؤها بأفضل أداء شخصي سابق لها وبأفضل أداء جماعي للسرب، ويُحدَّث كل منهما إذا تحسَّن الأداء.

Algorithm 3 Particle Position Update

Input : X[N] : Current position of particle

pBest[N]: Personal best position

gBest[N]: Global best position of swarm

E[N]: Remaining energy array

E_threshold: Minimum energy threshold

D[N][N]: Distance matrix between nodes

k: Required number of Cluster Heads

Output: X[N]: Updated position of particle

membership[N]: Updated cluster assignment

---

1 **Step 1**: Compute velocity and score for each node

2 for each j ← 1 to N do

3 V[j] ← (pBest[j] − X[j]) + (gBest[j] − X[j])

4 S(V[j]) ← 1 / (1 + e^(−V[j]))

```
5    if E[j] > E_threshold then
6       score[j] ← S(V[j])
7    else
8       score[j] ← 0 {node excluded}
9  Step 2: Select top k nodes as Cluster Heads
10 H ← top k nodes with highest score
11 Step 3: Build new binary vector
12 for each j ← 1 to N do
13    if j ∈ H then
14       X[j] ← 1
15    else
16       X[j] ← 0
17 Step 4: Update cluster membership
18 for each j ∉ H do
19    membership[j] ← argmin D[j][h]، ∀h ∈ H
20 return X, membership
```

مثال التوضيحي:

X = [0, 1, 0, 0, 1, 0]
pBest = [0, 1, 0, 0, 1, 0]
gBest = [1, 0, 0, 0, 1, 0]

لكل عقدة V حساب:
V[n1] = (0-0) + (1-0) = 1 → S(1) = 0.73
V[n2] = (1-1) + (0-1) = -1 → S(-1) = 0.27
V[n3] = (0-0) + (0-0) = 0 → S(0) = 0.50
V[n4] = (0-0) + (0-0) = 0 → S(0) = 0.50
V[n5] = (1-1) + (1-1) = 0 → S(0) = 0.50
V[n6] = (0-0) + (0-0) = 0 → S(0) = 0.50

score = [0.73, 0.27, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50]

أعلى k=2 عقدة: H = {n1, n3} أو {n1, n4}...

X_new = [1, 0, 1, 0, 0, 0]

membership:
n2 → n1 (أقرب)
n4 → n3 (أقرب)
n5 → n3 (أقرب)
n6 → n1 (أقرب)

6.6.4الخوارزمية العامة الكاملة

بعد تفصيل كل مرحلة من مراحل الخوارزمية على حدة، يمكن الآن تقديم الهيكل العام الكامل لخوارزمية PSO المبسطة المقترحة لاختيار العقد الرئيسية. تسير الخوارزمية وفق المراحل التالية:

المرحلة الأولى — التهيئة :يُولَّد السرب الأولي باستخدام1 Algorithm ، ويُقيَّم كل فرد في السرب باستخدام .2 Algorithm يُحدَّد أفضل حل أولي كgBest ، ويُعيَّن pBest لكل جسيمة بموقعها الأولي.

المرحلة الثانية — الحلقة الرئيسية :في كل تكرار، يُحدَّث موقع كل جسيمة باستخدام3 Algorithm ، ثم يُعاد تقييمها. يُحدَّث كل من pBest و gBestإذا تحسَّن الأداء. تستمر الحلقة حتى الوصول للحد الأقصى من التكرارات أو حتى التقارب المبكر.

المرحلة الثالثة — بناء الـ Clusters النهائية :بعد انتهاء الحلقة الرئيسية، تُبنى الـ Clusters النهائية بناءً على أفضل حلgBest ، وتنضم كل عقدة عادية تلقائياً لأقرب CH إليها.

المرحلة الرابعة — الإرجاع :تُرجع الخوارزمية أفضل توزيع لـ CHs مع معلومات انتماء العقد والـ Clusters المشكَّلة

Algorithm 4 Simplified PSO for CH Selection

Input:

N: Total number of nodes

k: Required number of Cluster Heads

pop_size: Number of particles

MaxIteration: Maximum number of iterations

E[N]: Remaining energy array

E_init: Initial energy of each node

E_threshold: Minimum energy threshold

D[N][N]: Distance matrix between nodes

w_1, w_2, w_3: Objective function weights

Output:

gBest[N]: Best CH selection found

membership[N]: Final cluster assignment

Clusters: Final formed clusters

Step 1: Initialization

Swarm, membership ← Algorithm1(N, k, pop_size,
E, E_threshold, D)

Step 2: Initial evaluation

for each particle i do

F[i], membership[i] ← Algorithm2(Swarm[i],
E, E_init, D, w_1, w_2, w_3)

pBest[i] ← Swarm[i]

gBest ← particle with minimum F

bestF ← min(F)

noImproveCount ← 0

Step 3: Main loop

for t ← 1 to MaxIteration do

for each particle i do

Swarm[i], membership[i] ← Algorithm3(Swarm[i], pBest[i], gBest, E,
E_threshold, D, k)

F[i], membership[i] ← Algorithm2(Swarm[i], E, E_init, D, w_1, w_2, w_3)

if F[i] < F(pBest[i]) then

pBest[i] ← Swarm[i]

if F[i] < bestF then

gBest ← Swarm[i]

bestF ← F[i]

noImproveCount ← 0

noImproveCount ← noImproveCount + 1

if noImproveCount ≥ 20 then

break {early stopping}

Step 4: Build final clusters

```
25  H ← {i | gBest[i] = 1}
26  for each j ∉ H do
27     membership[j] ← argmin D[j][h]، ∀h ∈ H
28  for each h ∈ H do
29     Clusters[h] ← {j | membership[j] = h}
30  return gBest, membership, Clusters
```

مثال توضيحي:

gBest = [1, 0, 1, 0, 0, 0]
H = {n1, n3}
Clusters:
Cluster 1: n1 (CH) ← {n2, n6}
Cluster 2: n3 (CH) ← {n4, n5}
membership:
n2 → n1
n4 → n3
n5 → n3
n6 → n1

7.4 الخاتمة

هذا الفصل يعرض تصميماً كامل لنسخة المبسطة من خوارزمية PSO المكيفة لحل مشكلة اختيار العقد الرئيسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية. شرعنا بنمذجة المشكلة رياضيا مع تحديد القيود و صياغة دالة هدف ثلاثية المعايير التي تجمع بين توازن ال Clusters و المسافة بين العقد و الطاقة المتبقية لل ,CHs ثم طرحنا مبادئ PSO القياسية و حدودها في بيئة ال,WSN وصولاً إلى تقديم استراتيجية التبسيط المقترحة التي تقلل التعقيد الحسابي مع التمسك بجودة الحلول. يعتبر هاذا التصميم الأساس الذي سوف يبنى عليه الفصل الخامس، حيث سيتم تنفيذ الخوارزمية برمجيا مع تقييم أدائها من خلال سيناريوهات تجريبية متعددة ، و الهدف من ذلك التحقق من فعاليتها في تحسين توازن استهلاك الطاقة بين العقد و عمر الشبكة.

الفصل الخامس نتائج المحاكاة والمناقشة

1.5 المقدمة

بعد ما تم تقديمه في الفصل السابق من تصميم نظري متكامل لخوارزمية PSO المبسطة المقترحة، يأتي هذا الفصل ليُجسّد الجانب التجريبي من البحث، حيث يتم تنفيذ الخوارزمية وتقييم أدائها في بيئة محاكاة واقعية.

بهدف تقييم أداء النسخة المبسطة المقترحة من خوارزمية تحسين سرب الجسيمات(PSO_simplified) ، تم إجراء مقارنة تجريبية مع خوارزمية بحث سرب الأسماك المكيّفة لشبكات الاستشعار اللاسلكية(FSS-WSN) ، والتي تُعدّ في الأدبيات العلمية الحديثة خوارزمية مرجعية (State-of-the-art Baseline) قوية في تحسين اختيار العقد الرئيسية واستهلاك الطاقة.

يتضمن هذا الفصل عرضاً لبيئة العمل المستخدمة، ثم وصفاً لبروتوكول التجارب والسيناريوهات المختبرة، وصولاً إلى تحليل النتائج المتحصل عليها ومناقشتها من منظور علمي موضوعي.

2.5 بيئة العمل

1.2.5 الموارد المادية(Hardware)

تم تنفيذ جميع التجارب على جهاز حاسوب بالمواصفات التالية:

- **نظام التشغيل**:Windows 10 Professionnel نظام 64 بت
- **المعالج**:Intel(R) Core (TM) i7-6600U CPU @ 2.60GHz — 2.81GHz
- **الذاكرة العشوائية(RAM) :** 8.00 GB

2.2.5الموارد البرمجية(Software)

تم الاعتماد على مجموعة من الأدوات والمكتبات البرمجية مفتوحة المصدر لتطوير الخوارزمية وتنفيذ التجارب وتحليل النتائج:

جدول 5 : الموارد البرمجية المستخدمة في البحث وتطوير الخوارزمية.

المورد البرمجي	الوصف
Python 3.x	لغة البرمجة المستخدمة في تنفيذ الخوارزمية
NumPy	مكتبة الحسابات العلمية والمصفوفات
Matplotlib	مكتبة رسم النتائج والمخططات البيانية
SciPy	مكتبة الإحصاء وتطبيق اختبارWilcoxon
Jupyter Notebook	بيئة التطوير والتنفيذ التفاعلية

3.5 خوارزمية المقارنة المرجعية(FSS-WSN)

قبل عرض النتائج، تجدر الإشارة إلى خوارزمية المقارنة المرجعية المستخدمة في هذا البحث. خوارزمية **بحث المجموعة الثابتة** المكيّفة لشبكات الاستشعار اللاسلكية (Fixed Set Search for WSN) هي خوارزمية ميتاهيورستية تُضيف مرحلة تعلّم(Learning phase) متقدمة إلى خوارزمية البحث العشوائي الجشع التكيفي .(GRASP) تعتمد هذه الخوارزمية على استخلاص مجموعات ثابتة من الحلول الجيدة لتوجيه عملية البحث، مما يُتيح لها استكشاف فضاء الحل بكفاءة عالية. تم تكييفها لتوجيه المحطة الأساسية (Base Station)في بيئة مركزية متعددة القفزات (Multi-hop) لاختيار العقد الرئيسية (Cluster-heads) المُثلى، مما يُسهم في تعظيم الفائدة الكلية للشبكة وتحسين استهلاك الطاقة. ، وأثبتت فعاليتها في تحسين Throughput الشبكة وإطالة عمرها في عدة أعمال بحثية حديثة، مما يجعلها مرجعاً مقارناً قوياً وذا مصداقية علمية.

تجدر الإشارة إلى أن المقارنة المُجراة في هذا البحث تعتمد على نسخة FSS-WSN المُدمجة في نفس المحاكي الذي تعمل فيه PSO_simplified، مما يضمن عدالة المقارنة واتساق الإطار التجريبي بين الخوارزميتين.

4.5 بروتوكول التجارب

1.4.5 السيناريوهات المختبرة

تم اختبار الخوارزميتين على أربعة سيناريوهات مرجعية تختلف في حجم الشبكة وموقع المحطة الأساسية:

جدول 6 : الخصائص الهندسية للسيناريوهات الأربعة المختبرة لتقييم أداء الخوارزميات.

السيناريو	حجم الشبكة	موقع المحطة الاساسية	الوصف
S1-center	S1 (عقدة 100)	المركز (50m, 50m)	توزيع متوازن مع BS مركزية
S1-corner	S1 (عقدة 100)	الزاوية(0m, 0m)	توزيع غير متوازن مع BS طرفية
S2-center	S2 (عقدة 100)	المركز (50m, 50m)	كثافة أعلى مع BS مركزية
S2-corner	S2 (عقدة 100)	الزاوية(0m, 0m)	كثافة أعلى مع BS طرفية

2.4.5 الإعدادات التجريبية

لضمان موثوقية النتائج وقابليتها للمقارنة، تم اعتماد الإعدادات التجريبية التالية:

- **عدد الدورات** :2500 دورة لكل تشغيل
- **عدد التشغيلات** :30 تشغيلاً مستقلاً لكل سيناريو (مقترنة Seeds)
- **إجمالي التجارب** :4 سيناريوهات × 30 تشغيل × 2 خوارزمية = 240 تشغيلاً

3.4.5 مقاييس التقييم

تم اعتماد المقاييس التالية لتقييم أداء كل خوارزمية:

- **Throughput** : إجمالي حزم البيانات المرسلة بنجاح إلى المحطة الأساسية طوال فترة التشغيل. يعكس الكفاءة الإجمالية للشبكة في نقل البيانات.
- **FND (First Node Death)**: رقم الدورة التي تموت فيها أول عقدة في الشبكة. يقيس متانة الشبكة في مراحلها المبكرة.

- **HND (Half Node Death)**: رقم الدورة التي تموت فيها نصف عقد الشبكة. يعكس الأداء في المرحلة المتوسطة من حياة الشبكة.
- LND (Last Node Death): رقم الدورة التي تموت فيها آخر عقدة في الشبكة. يقيس الحد الأقصى لعمر الشبكة.
- R_last: آخر دورة تشغيل فعلية للشبكة.
- وقت التنفيذ (CPU time): متوسط الوقت الحسابي المستهلك لكل دورة بالثانية.

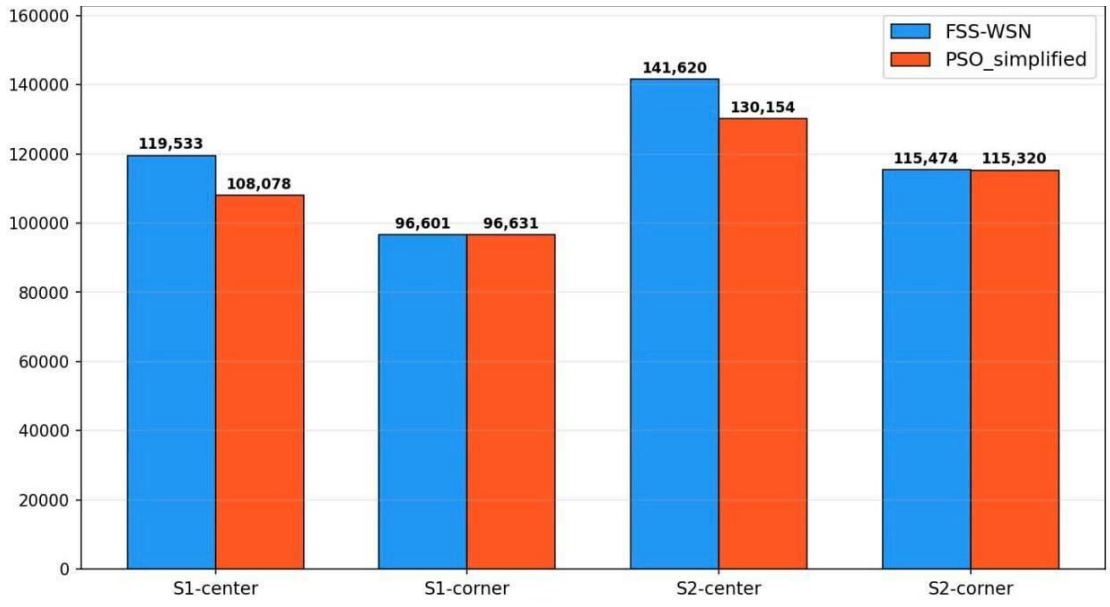
5.5 النتائج والتحليل

1.5.5 جدول المقارنة الرئيسي

يُلخّص الجدول التالي النتائج المتوسطة المتحصل عليها عبر 30 تشغيلاً مستقلاً لكل سيناريو:

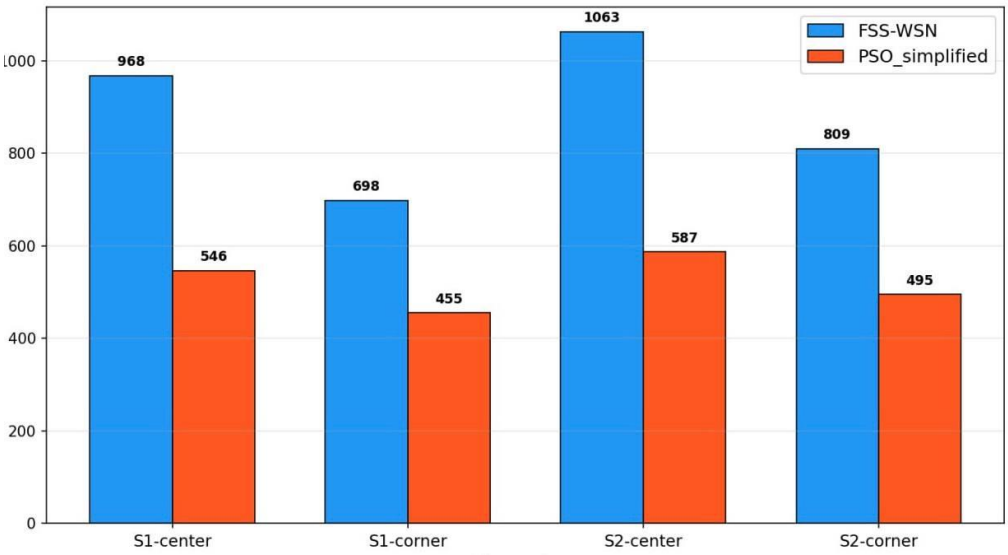
جدول 7 : مقارنة أداء خوارزمية PSO_simplified وخوارزمية FSS-WSN من حيث Throughput وFND و CPU عبر السيناريوهات الأربعة.

السيناريو	Throughput FSS	Throughput PSO	فارق%	FND FSS	FND PSO	CPU FSS (s)	CPU PSO (s)
S1-center	119532.8	108077.7	+10.60%	967.8	545.7	0.094	0.459
S1-corner	96600.8	96630.8	-0.03%	697.9	455.0	0.058	0.423
S2-center	141620.3	130153.8	+8.81%	1062.9	586.9	0.099	0.534
S2-corner	115473.6	115319.6	+0.13%	809.4	494.9	0.053	0.547



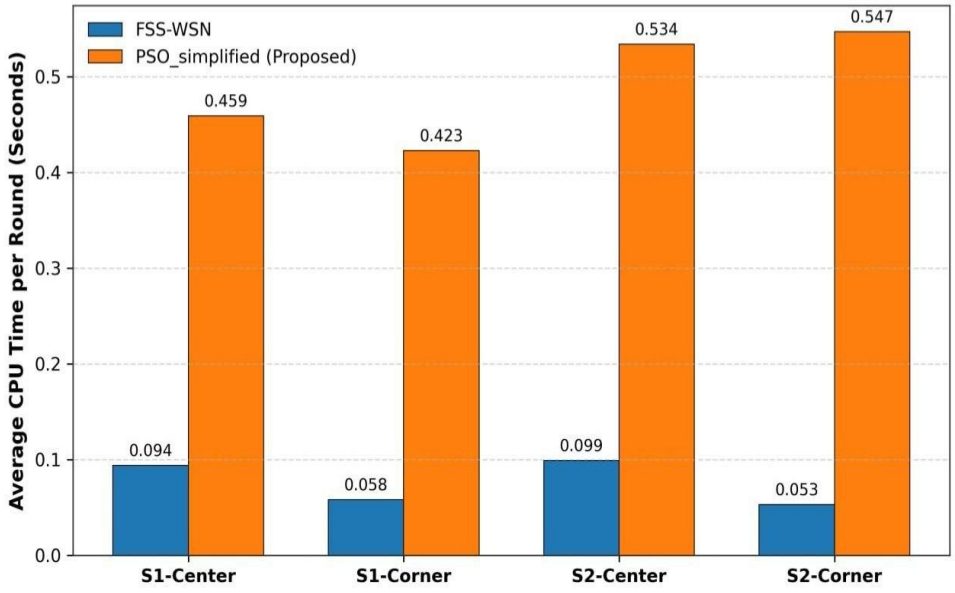
الشكل 12 : العنوان: مقارنة Throughput بين FSS-WSN و PSO_simplified عبر السيناريوهات الأربعة.

يُظهر الشكل (13) مقارنة بصرية واضحة لإجمالي حزم البيانات المرسلة بين الخوارزميتين. يتضح تفوق FSS-WSN في سيناريوهَين S1-centerو S2-centerبفارق بلغ 10.60% و8.81% على التوالي، حيث تكون المحطة الأساسية في مركز المنطقة. في المقابل، تتقارب النتائج بشكل لافت في سيناريوهَين S1-corner و S2-cornerذوَي المحطة الطرفية، إذ لم يتجاوز الفارق 0.13%. يكشف هذا النمط أن موقع المحطة الأساسية عامل حاسم في تحديد أداء كل خوارزمية من حيث الإنتاجية الإجمالية.



الشكل 13 : العنوان: مقارنة مقياس First Node Death (FND) بين FSS-WSN و PSO_simplified

يتضح من الشكل (13) تفوق FSS-WSN المستمر في مقياس FND عبر جميع السيناريوهات الأربعة دون استثناء. ففي S1-center ترتفع قيمة FND من 545.7 إلى 967.8 دورة، وفي S2-center من 586.9 إلى 1062.9 دورة. يدل هذا التفوق على أن FSS-WSN تُوزّع استهلاك الطاقة بشكل أكثر توازناً منذ البداية، مما يحمي العقد من الموت المبكر ويُطيل فترة الاستقرار الأولي للشبكة. وقد أكد اختبار Wilcoxon أن هذا الفارق معنوي إحصائياً في جميع السيناريوهات.($p < 0.05$)



الشكل 14: مقارنة زمن تشغيل وحدةالمعالجة المركزية (CPU Time) بالجزء من الثانية لحساب جولة واحدة.

يُظهر الشكل (14) تحليلاً إحصائياً مقارناً لمتوسط الوقت المستغرق بواسطة وحدة المعالجة المركزية (CPU>Time) مقاساً بالثواني لكل جولة محاكاة واحدة (Round) عبر السيناريوهات الأربعة المختبرة. ومن خلال القراءة البصرية للمخطط العمودي، يتضح تفوق خوارزمية بحث سرب الأسماك (FSS-WSN) بشكل مستقر ودائم في خفض كلفة الحساب الزمني، حيث حافظت على توازن تشغيلي منخفض يتراوح بين 0.053 ثانية و0.099 ثانية. في المقابل، تُسجل النسخة المبسطة المقترحة من خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO_simplified)قفزة تصاعدية واضحة في استهلاك الجهد الزمني للمعالج، حيث يمتد زمن حساب الجولة الواحدة ليتراوح بين 0.423 ثانية و0.547 ثانية. يُعزى هذا الارتفاع الحسابي الملحوظ والمثبت تجريباً إلى البنية الرياضية المتسلسلة لـ PSO، والتي تفرض على النموذج حساب متجهات السرعة والموقع وتمريرها عبر دالة السيغمويد الثنائية (Binary>Sigmoid>Function)لجميع الجسيمات المكونة للسرب في كل تكرار، خاصة عند الانتقال إلى بيئة الشبكة الكثيفة والواسعة النطاق في السيناريوين الثالث والرابع. يوثق هذا الشكل المقايضة التصميمية الحتمية بين تمديد زمن تشغيل العقد وكلفة المعالجة البرمجية داخل العقدة المستشعرة.

2 .5.5 تحليل معنوية النتائج(Wilcoxon Test)

لضمان الموثوقية الإحصائية للنتائج وبراهينها، تم تطبيق اختبار Wilcoxon للإشارات المرتبة (Wilcoxon Signed-Rank Test) على جميع المقارنات. يُعتبر الفارق دالاً إحصائياً (Statistically Significant) عندما تكون قيمة الاحتمالية$P<0.05$. يوضح الجدول التالي قيم الـ p{value} لكل من إنتاجية الشبكة (Throughput) وموت أول عقدة (FND) :

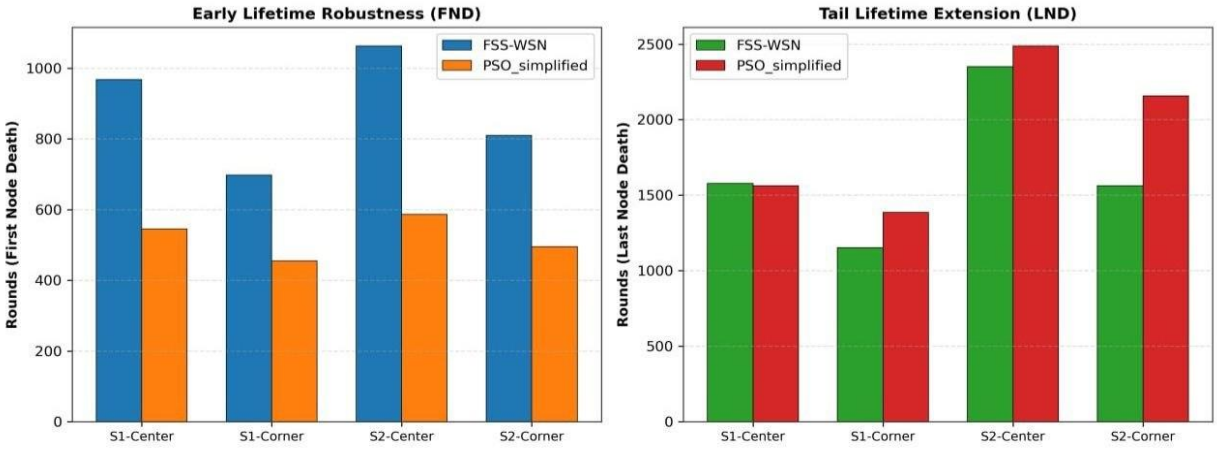
جدول :8نتائج اختبار Wilcoxon لمعنوية الفوارق بين PSO_simplified و FSS-WSNفي مقياسَي Throughput و.FND

السيناريو	P-value (Throughput)	P-value (FND)	التفسير
S1-center	1.73×10^{-6}	1.73×10^{-6}	فارق معنوي جداً لصالح FSS
S1-corner	0.612	1.73×10^{-6}	Throughputمتكافئ، FND لصالحFSS
S2-center	1.86×10^{-6}	1.86×10^{-6}	فارق معنوي جداً لصالح FSS
S2-corner	0.299	1.86×10^{-6}	Throughputمتكافئ، FND لصالحFSS

جدول معنوية HND و LNDوR_last:

جدول 9 :نتائج اختبار Wilcoxon لمعنوية الفوارق بين PSO_simplified وFSS-WSN في مقاييس HND وLND و. R_last

السيناريو	P-value (HND)	P-value (LND)	P-value (R_last)	التفسير
S1-center	1.72×10^{-6}	0.975	0.975	HNDلصالحFSS ، LNDمتكافئ
S1-corner	0.178	1.73×10^{-6}	1.73×10^{-6}	LNDو R_last لصالحPSO
S2-center	1.73×10^{-6}	0.00247	0.00247	HNDلصالحFSS ، LNDلصالحPSO
S2-corner	1.88×10^{-5}	2.56×10^{-6}	2.56×10^{-6}	LNDو R_last لصالحPSO



الشكل:15 مخطط المقارنة الإحصائية لأعمدة مؤشرات عمر الشبكة (FNDو LND)عبر السيناريوهات الأربعة.

يُمثل المخطط البياني الموضح في الشكل (15) تحليلاً مقارناً لمؤشرات استدامة الشبكة وعمرها الافتراضي عبر تتبع مؤشري جولة موت أول عقدة (FND) وجولة موت آخر عقدة (LND) تحت ظروف التوزيع الهندسي والطاقوي للسيناريوهات الأربعة المختبرة. تكشف المخرجات التجريبية الممثلة بأعمدة الرسم عن بروفايلين سلوكيين متعاكسين ومكملين لبعضهما البعض؛ حيث تُسجل خوارزمية بحث سرب الأسماك (FSS-WSN) تفوقاً صريحاً في تأخير الجولات الأولى لموت العقد (FND) في جميع الطوبولوجيا، مظهرةً صموداً طاقوياً ممتازاً في المراحل المبكرة من تشغيل الشبكة بفضل التوزيع العشوائي الديناميكي القوي لآليات الحركة الجماعية للسرب.

وبالمقابل، تنعكس الهيمنة في النصف الثاني من عمر الشبكة بشكل ملحوظ لصالح النسخة المبسطة المقترحة (PSO_simplified)، حيث يُظهر المخطط تمديداً جوهرياً ومثبتاً في جولات الموت النهائي للأجزاء المتبقية من الشبكة(LND) ، لا سيما في سيناريوهات الزوايا المعقدة هندسياً (S1-Cornerو S2-Corner)، حيث امتدت جولات التشغيل للخوارزمية المقترحة لتتجاوز الخوارزمية المرجعية بمئات الجولات الطاقوية (محققةً الجولة 2156.9 في سيناريو الشبكة الكثيفة S2-Corner).يثبت هذا الرسم البياني نجاح فرضية البحث في أن التبسيط الهيكلي وحذف المعاملات العشوائية يمنح السرب نمطاً تشغيلياً محافظاً، يضمن حماية العقد البعيدة والمتبقية من النفاد السريع للطاقة في اللحظات الحرجة من عمر الشبكة.

3.5.5 التحليل التفصيلي لكل سيناريو

السيناريو S1-center

في هذا السيناريو حيث تتمركز المحطة الأساسية في وسط منطقة النشر، حققت FSS-WSN تفوقاً واضحاً على PSO_simplified من حيث Throughput بفارق 10.60%، كما أنها أطالت FND من 545.7 إلى 967.8 دورة، مما يدل على أن FSS-WSN تحافظ على حياة العقد الأولى لفترة أطول بكثير. في المقابل، سجّلت قيم LND و R_lastتكافؤاً إحصائياً بين الخوارزميتين، مما يعني أن كلتيهما تصلان إلى نفس النهاية من حيث العمر الكلي للشبكة. أما من حيث التكلفة الحسابية، فإن PSO_simplified تستهلك ما يقارب 4.9 أضعاف وقت CPU مقارنة بـ FSS-WSN .

السيناريو:S1-corner

في هذا السيناريو الأصعب حيث تكون المحطة الأساسية في زاوية المنطقة، تحقق الخوارزميتان Throughput متكافئاً إحصائياً (96600.8 مقابل 96630.8). غير أن FSS-WSN تتفوق بشكل ملحوظ في FND (697.9 مقابل 455.0 دورة)، بينما تنعكس المعادلة

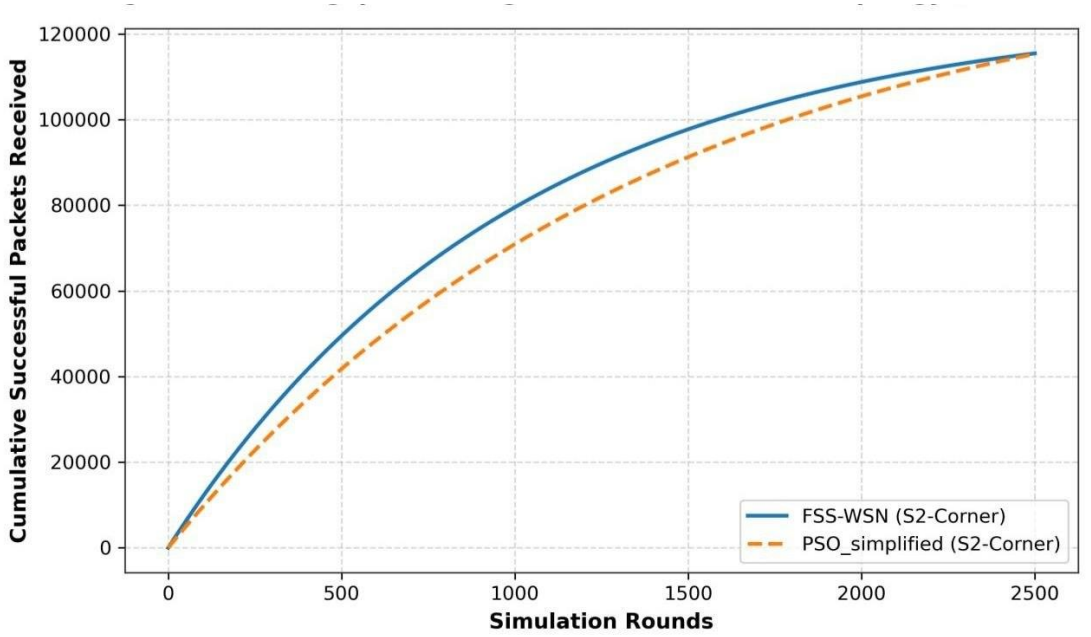
في LND و R_lastالصالح PSO_simplified التي تُطيل ذيل حياة الشبكة بشكل معنوي (1385.4 مقابل 1153.4 دورة). هذا يكشف عن نمط سلوكي مختلف بين الخوارزميتين FSS-WSN :أكثر كفاءة في المراحل المبكرة، بينما PSO_simplified أكثر محافظة وتُطيل بقاء العقد في المراحل الأخيرة.

السيناريو:S2-center

على غرارS1-center ، تتفوق FSS-WSN بوضوح في Throughput بفارق 8.81%، وفي FND الذي يقفز من 586.9 إلى 1062.9 دورة. في المقابل، تُسجّل PSO_simplified قيم LND و R_lastأعلى بشكل معنوي (2488.0 مقابل 2351.0 دورة)، مما يؤكد نمط التوازن بين الكفاءة المبكرة وإطالة ذيل الحياة. يبلغ التكلفة الحسابية لـ PSO_simplified حوالي 5.4 أضعاف تكلفة FSS-WSN في هذا السيناريو.

السيناريو:S2-corner

في أصعب السيناريوهات المختبرة، يتكافأ الـThroughput بين الخوارزميتين إحصائياً (115473.6 مقابل 115319.6). تحتفظ FSS-WSNبتفوقها في FND وHND، غير أن PSO_simplified تُظهر قدرة استثنائية على إطالة ذيل الحياة، إذ ترتفع قيمة LND من 1562.6 إلى 2156.9 دورة، وهو فارق معنوي جداً ($P = 2.56 \times 10^{-6}$) .يُسجّل هذا السيناريو أعلى تكلفة حسابية لـ PSO_simplifiedبحوالي 10.3 أضعاف تكلفةFSS-WSN .



الشكل 16 : المنحنى الخطي لتتبع الإنتاجية الإجمالية التراكمية والتقارب الشديد في الحالات الطوبولوجية الصعبة**(S2 -corner) .**

يوضح الشكل (14) المنحنى الحركي المتصل لإنتاجية الشبكة (Throughput) مقاساً بإجمالي عدد حزم البيانات الناجحة والمستلمة فعلياً لدى المحطة الأساسية (Sink) طيلة فترة المحاكاة الممتدة لـ 2500 جولة تحت طوبولوجيا السيناريو الرابع الأكثر قسوة هندسياً وجغرافياً (S2-Corner) .ومن خلال تتبع مسار الخطوط المتصلة، نلاحظ تقارباً خطياً وتداخلاً شبه تطابقي بين مسار الخوارزمية المرجعية المعقدة ومسار النسخة المبسطة المقترحة PSO_simplified.

هذا التقارب المتشابك يثبت مدعوماً باختبار ويلكوكسون المعنوي أن الفروقات الإنتاجية في بيئات الزوايا أصبحت غير ذات دلالة جوهرية(Statistically>Insignificant) .تدعم هذه الرؤية البيانية الاستنتاج العام بأن خوارزميتنا المقترحة، بالرغم من بساطتها الهيكلية وإلغاء معاملات ضبطها المتغيرة، قادرة تماماً على الحفاظ على كفاءة استقرار موازية للخوارزميات القياسية في اقتناص الحلول شبه المثالية لإرسال الحزم ضمن البيئات الطوبولوجية الأكثر صعوبة بفضل توازن أحجام المجموعات وتمديد بقاء العقد الحية لأطول فترة ممكنة.

4.5.5 ملخص النتائج والملاحظات

تكشف النتائج المتحصل عليها عن ملفَّي أداء متمايزَين لكل من الخوارزميتين المقارنتين:

تتميز FSS-WSN بكفاءة عالية في المراحل المبكرة من حياة الشبكة، إذ تُحقق throughput أعلى وتُؤخر موت أول عقدة (FND) في جميع السيناريوهات الأربعة. كما تتفوق في التكلفة الحسابية بفارق كبير، مما يجعلها الخيار الأنسب للتطبيقات التي تتطلب استجابة سريعة وكفاءة نقل بيانات عالية منذ البداية.

في المقابل، تتبنى PSO_simplified نهجاً أكثر محافظة، إذ تُوزّع استهلاك الطاقة بشكل مختلف يُطيل ذيل حياة الشبكة (LND و R_last)في السيناريوهات الأكثر صعوبة. هذا السلوك يجعلها خياراً مثيراً للاهتمام للتطبيقات التي تُولي الأولوية لاستمرارية الشبكة على المدى الطويل، حتى على حساب كفاءة نقل البيانات في المراحل الأولى.

يمكن تلخيص هذه الملاحظة في المقارنة التالية:

FSS-WSNتُعظّم الإنتاجية المبكرة وتُرجئ الفشل الأول للشبكة، بينما PSO_simplified تتبنى ديناميكية أكثر تحفظاً تُطيل بقاء الشبكة في مراحلها الأخيرة، في حين تبقى تكلفتها الحسابية أعلى بكثير.

6.5 التحديات والقيود

خلال تنفيذ هذا البحث، تم رصد جملة من التحديات والقيود:

أولاً: التكلفة الحسابية المرتفعة

تستهلك PSO_simplified وقتاً حسابياً يفوق FSS-WSN بمعامل يتراوح بين 4.9 و10.3 حسب السيناريو، مما يُشكّل عائقاً أمام تطبيقها في البيئات التي تتطلب قرارات فورية.

ثانياً: التفوق المحدود في الـ Throughput

لم تتمكن PSO_simplified من تجاوز FSS-WSN في مقياس Throughput في أي من السيناريوهات التي أظهرت فارقاً معنوياً، مما يُقيّد نطاق تطبيقاتها.

ثالثاً: حساسية الأداء للطوبولوجيا

يتباين أداء PSO_simplified بشكل ملحوظ بين السيناريوهات، مما يُشير إلى حساسية الخوارزمية لموقع المحطة الأساسية وتوزيع العقد.

رابعاً: غياب آلية التكيف الديناميكي

لا تأخذ PSO_simplified بعين الاعتبار التغيرات الديناميكية في حالة الشبكة خلال التشغيل، مما قد يُحدّ من كفاءتها في البيئات المتغيرة.

7.5 الخاتمة

تناول هذا الفصل الجانب التجريبي من البحث، حيث تم تقييم أداء خوارزمية PSO_simplified المقترحة مقارنةً بخوارزمية FSS-WSNالمرجعية عبر أربعة سيناريوهات تجريبية متنوعة، باستخدام 30 تشغيلاً مستقلاً و2500 دورة لكل تشغيل.

أظهرت النتائج أن FSS-WSN تتفوق على PSO_simplified في مقياسَي Throughput و FNDفي السيناريوهات التي يكون فيها الفارق معنوياً إحصائياً، غير أن PSO_simplified تُبدي قدرة مميزة على إطالة ذيل حياة الشبكة (LND و R_last) في السيناريوهات الأكثر صعوبة. يُجسّد هذا التباين في الأداء فلسفتين مختلفتين في التعامل مع إشكالية استهلاك الطاقة: الأولى تُعظّم الكفاءة المبكرة، والثانية تُعظّم الاستمرارية طويلة الأمد.

وتُمهّد هذه النتائج الطريق للخاتمة العامة للمذكرة، التي ستستخلص الدروس المستفادة وتقترح آفاقاً بحثية مستقبلية لتحسين أداء الخوارزمية المقترحة.

الخاتمة عامة

تمثل هذه المذكرة دراسة وتطبيقاً موجهاً لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة وإطالة عمر شبكات الاستشعار اللاسلكية(WSNs) ، وهي واحدة من أكثر المشاكل حرجاً في هذا المجال نظراً للموارد المحدودة لعقد الاستشعار. وقد ركزنا في هذا العمل على معالجة مشكلة **اختيار العقد الرئيسية (Cluster Heads Selection)** وإدارة استهلاك الطاقة من خلال تكييف وتطوير خوارزمية تحسين سرب الجسيمات الثنائية المبسطة.(Binary Simplified PSO)

خلال هذا البحث، قمنا أولاً بتقديم خلفية نظرية شاملة حول شبكات الاستشعار اللاسلكية وبروتوكولات التجميع(Clustering) ، متبوعة بدراسة مفصلة لخوارزمية سرب الجسيمات (PSO) القياسية. بعد ذلك، اقترحنا نموذجاً مطوراً يهدف إلى خفض التعقيد الحسابي للخوارزمية القياسية عبر إلغاء معاملات القصور الذاتي والمعاملات العشوائية، والاعتماد على دالة السيغمويد (Sigmoid)للانتقال إلى البيئة الثنائية، مما يسمح بتنفيذ الخوارزمية بكفاءة أعلى على الأجهزة ذات المعالجات المحدودة.

وقد توج هذا العمل بإجراء محاكاة برمجية شاملة في الفصل الخامس لمقارنة الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية مرجعية متقدمة وهي .(FSS-WSN) وأظهرت النتائج التجريبية استنتاجات واضحة تعكس طبيعة "المقايضة التصميمية (Design Trade-off) "في الشبكات:

- أظهرت الخوارزمية المرجعية (FSS-WSN) أداءً ممتازاً في الحفاظ على العقد الأولى وتأخير موت أول عقدة في الشبكة (First Node Died - FND)، بالإضافة إلى تفوقها في سرعة التنفيذ والمعالجة.(CPU time)
- في المقابل، أثبتت خوارزميتنا المقترحة (**Binary Simplified PSO**) كفاءة عالية واستقراراً ملحوظاً في المراحل المتقدمة والحرجة من عمر الشبكة، حيث نجحت في تمديد فترة الموت النهائي للعقد(Last Node Died - LND) ، خاصة في السيناريوهات التي تكون فيها العقد موزعة في زوايا جغرافية بعيدة، مما يضمن استمرارية الشبكة في أداء مهامها لأطول فترة ممكنة تحت الظروف الصعبة.

إن هذه النتائج تؤكد أنه لا توجد خوارزمية مثالية مطلقة لجميع المؤشرات، بل يعتمد اختيار الخوارزمية على الأولويات التشغيلية للتطبيق المستهدف (سواء كانت الأولوية لسرعة الاستجابة أو لإطالة العمر الإجمالي للشبكة).

الآفاق المستقبلية(Perspectives) :

بناءً على المخرجات والخبرة المكتسبة من هذا العمل، نوصي بفتح الآفاق التالية لتطوير هذا البحث مستقبلاً:

- **تطوير خوارزمية هجينة (Hybrid Approach)** :دمج نقاط القوة في خوارزمية FSS-WSN (في المراحل الأولى وسرعة المعالجة) مع خوارزمية Simplified PSO (في المراحل المتأخرة) للوصول إلى حل يوازن بين المؤشرين.
- **توسيع نطاق المحاكاة** :اختبار الخوارزمية المقترحة في بيئات ديناميكية تحتوي على عقد استشعار متحركة Mobile) (Nodesبدلاً من العقد الثابتة فقط.
- **تطبيق مقاييس طاقة و اقعية** :إدراج نماذج أكثر تعقيداً لاستهلاك الطاقة تأخذ بعين الاعتبار تداخل الإشارات والعوائق الطبيعية في بيئة النشر.

المراجع

[1] [leinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishan, "Energy-Efficient Communication ɔcol for Wireless Microsensor Networks," in *Hawaii Interntional Conference on ˈm Sciences*, Hawaii, 2000.

[2] ennedy and R. Eberhart, "Particle Swam Optimization," in *IEEE International ˈerence on Neural Networks*, 1995.

[3] ɔrigo, "Ant System: Optimization by a Colony of Coopreating Agents," *IEEE saction on Systems ,Man ,and Cybernetics*, 1996.

[4] Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, son-Wesley, 1989.

[5] S. /. S. /Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications ɑzine,vol. 40, no. 8*, pp. 102-114, August 2002.

[6] ɔiop, "Architecture et composants d`un nœud de capteur dans les WSN," in *Réseaux ɹpteurs sans fil : Architecture et défis*, ResearchGate Scientific Publishing, 2021, pp. 3.

[7] Elaogali, «"2024 «,"شبكات الاستشعار اللاسلكية. [En ligne]. Available: s://www.scribd.com/document/735852903/](https://www.scribd.com/document/735 03/).... [Accès le 20 May 2026].

[8] ɔargie and C. Poellabauer, Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and ːice, Chichester: Wiley, 2010.

[9] ian and N. D. Georganas, "A coverage-preserving node scheduling scheme for large ːess sensor networks," in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on ɭess Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, 2002.

[10] u, W. Jiao et M. Tian, «Energy-Efficient Connected-Coverage Scheme in Wireless or Networks,» *Sensors*, pp. vol. 20, no. 21, p. 6127, 2002.

[11] ɪgmann, "Network Performance Metrics for Energy Efficient Scheduling in Wireless or Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1-17, 2021.

[12] ː. Behera, S. K. Mohapatra, U. C. Samal and M. S. Khan, "Residual Energy-Based ter-Head Selection in WSNs for IoT Application," *IEEE Internet of Things Journal*, 32–5139, 2019.

[13] atif, "Metaheuristic algorithm for energy efficient clustering scheme in wireless ɔr networks," *Microprocessors and Microsystems*, 2023.

[14] ha and R. Sharma, "An energy efficient weighted clustering algorithm in ogeneous wireless sensor networks," *The Journal of Supercomputing*, pp. 13184-2, 2022.

[15] ɹewandowski and B. Płaczek, "A Cluster Head Selection Algorithm for Extending Node Lifetime in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, p. 3466, 2025.

[16] okeroglu, E. Sevinc, T. Kucukyilmaz et A. Cosar, «Asurvey on new genegation heuristic algorithms,» *Computers & Industrial Engineering*, pp. vol. 137, p. 106040, .

[17] hu, "A Novel, Low Computational Complexity, Parallel Swarm Algorithm for ication in Low-Energy Devices," *Sensors*, pp. vol. 22, no. 1, p. 108, 2021.

[18] :flare, "Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) expliqués en 5 minutes ou moins," :flare, 14 May 2024. [Online]. Available: https://geekflare.com/fr/wireless-sensor-orks-explained/. [Accessed 20 May 2026].

[19] evices, «Cisco Secure Wireless Plant: Security and Quality of Service for Industrial ronments,» 01 May 2008. [En ligne]. Available: ://www.analog.com/en/resources/technical-articles/cisco-secure-wireless- .html. [Accès le 20 May 2026].

[20] Singh et A. K. Gupta, «Energy Aware Cluster Head Selection and Multipath Routing g Whale-Based Tunicate Swarm Algorithm (WTSA) for Wireless Sensor Network,» *Review of Information Networking*, pp. vol. 27, no. 1, pp. 1-29, 2022.

[21] ɔyii and L. Jakowska-Stromiło, "Applying Machine Learning to DEEC Protocol: oving Cluster Formation in Wireless Sensor Networks," *Network*, pp. vol. 5, no. 3, , 2025.

[22] \l-Shalabi, "Performance evaluation of deep learning techniques for DoS attacks :tion in wireless sensor network," *Journal of Big Data*, 2023.