جامعة محمد بوضياف – المسيلة

كلية الرياضيات والإعلام الآلي

قسم الإعلام الآلي

من أجل الاستيفاء الجزئي لمتطلبات شهادة

ماستر في الإعلام الآلي

من طرف

بوضياف منار

نشنش حفيظة

عنوان المذكرة

Multi-objective fixed set search for lifetime and connectivity optimization in WSN

تحت إشراف الأستاذ

رؤوف ونيس لكحل عياط

أعضاء لجنة المناقشة

إسم ثم لقب	جامعة المسيلة	**رئيسا**
إسم ثم لقب	جامعة المسيلة	**مقررا**
إسم ثم لقب	جامعة المسيلة	**ممتحنا**

الشهر 2026

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) have witnessed massive development but still face significant challenges, primarily energy limitations and network lifetime. To address these issues, clustering and optimal Cluster Head selection are highly effective solutions. This thesis proposes the use of an advanced metaheuristic algorithm, the Fixed Set Search (FSS), as an alternative to probabilistic (LEACH) or purely geometric (K-Means) methods. The proposed algorithm relies on a multi-objective fitness function that balances throughput, compactness, connectivity, and residual energy. Simulation results conducted in Python over 30 random network topologies demonstrated the clear superiority of FSS. It significantly prolonged the network stability period and maximized data throughput compared to benchmark algorithms, proving its efficiency in optimizing WSN performance.

Key words: Wireless Sensor Networks; Clustering; Cluster Head; Fixed Set Search; Energy Consumption

---

الملخص :

شهدت شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) تطوراً واسعاً، إلا أنها لا تزال تواجه تحديات كبيرة أبرزها محدودية الطاقة وعمر الشبكة. لمعالجة هذه التحديات، تُعد تقنية التجميع وتحديد رؤوس العناقيد حلاً فعالاً. تقترح هذه المذكرة استخدام خوارزمية ميتاهيوريستية متقدمة وهي "البحث في المجموعات الثابتة (FSS) "كبديل للطرق العشوائية (LEACH) أو الهندسية البحتة .(K-Means) تعتمد الخوارزمية المقترحة على دالة تقييم متعددة الأهداف توازن بين الإنتاجية، المسافة، جودة الاتصال، والطاقة المتبقية. أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام بيئة(Python) ، وعلى مدار 30 تجربة عشوائية، تفوقاً واضحاً لخوارزمية FSS في إطالة فترة استقرار الشبكة وتعظيم إنتاجية البيانات مقارنة بالخوارزميات المرجعية، مما يثبت كفاءتها في تحسين أداء الشبكة .

الكلمات المفتاحية :شبكات الاستشعار اللاسلكية؛ التجميع؛ رؤوس العناقيد؛ خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة؛ استهلاك الطاقة.

إهداء

﴿يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾ سورة المجادلة، الآية 11

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي أنار دربي بالعلم والمعرفة، ووفقني وأعانني على إتمام هذا العمل المتواضع، فله الحمد أولاً وآخراً، وظاهراً وباطناً، على ما أنعم به عليّ من توفيق وصبر وقوة حتى بلغت هذه المرحلة من حياتي العلمية.

إلى نفسي التي صبرت واجتهدت ولم تستسلم رغم الصعوبات والتحديات، إلى نفسي التي واصلت السعي بخطوات ثابتة وإيمان كبير حتى وصلت إلى هذه اللحظة، أهدي هذا الإنجاز تقديراً لكل تعبٍ وسهرٍ ودمعةٍ وجهدٍ بذلته في سبيل تحقيق هذا الحلم.

أهدي ثمرة جهدي وتخرجي إلى أبي العزيز، سندي الأول وقدوتي في الحياة، الذي كان دعمه وتشجيعه مصدر قوة لي في كل خطوة، والذي علّمني أن النجاح لا يأتي إلا بالإرادة والعمل، فجزاه الله عني خير الجزاء وأدامه تاجاً فوق رأسي.

وإلى أمي الغالية، نبع الحنان والعطاء، صاحبة القلب الكبير والدعوات الصادقة التي كانت ترافقني في كل لحظة، والتي سهرت وتعبت وضحّت من أجل أن أرى هذا اليوم، فأسأل الله أن يحفظها ويبارك في عمرها ويجزيها عني خير الجزاء.

وإلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، الذين كانوا خير سند ورفيق، وشاركوا معي لحظات التعب والأمل والنجاح، وكانوا دائماً مصدر تشجيع ودعم لا ينضب.

وإلى ابنة أختي العزيزة، التي كانت بابتسامتها البريئة تنشر الفرح في أيامي وتمنحني الأمل والطاقة لمواصلة السعي.

وإلى صديقتي ورفيقة دربي في هذا العمل، شريكتي في هذه المذكرة وفي لحظات التعب والقلق والأمل، التي كانت خير عون وسند طوال هذه الرحلة، والتي تقاسمت معي تفاصيل هذا الإنجاز خطوة بخطوة، أهديك هذا النجاح الذي كان ثمرة جهدنا المشترك، وأشكرك على كل لحظة دعم وتشجيع ومساندة، سائلةً الله أن يحقق لكِ كل ما تتمنينه من نجاح وتألق.

وإلى صديقاتي العزيزات، رفيقات الدرب وأجمل الذكريات، شكراً لكن على الدعم والمساندة والكلمات المشجعة التي خففت عني مشقة الطريق وجعلت رحلة الدراسة أكثر جمالاً.

وإلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد، بكلمة طيبة أو نصيحة صادقة أو دعوة خالصة، وكان له أثر في مسيرتي العلمية، أهدي هذا العمل المتواضع عربون امتنان وتقدير.

وفي الختام، أهدي هذا العمل إلى كل من آمن بقدراتي، ورافقني بدعائه ومحبته، وإلى كل من ترك أثراً طيباً في حياتي. وأسأل الله أن يجعل هذا الإنجاز بدايةً لنجاحات أكبر، وأن يوفقني لخدمة العلم والمعرفة، وأن يرزق كل مجتهد ثمرة سعيه وتعبه.

نشنش حفيظة

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، الحمد لله الذي أنار لنا طريق العلم والمعرفة، ووفقنا لإتمام هذا العمل بعد جهدٍ وصبرٍ ومثابرة، فله الحمد والشكر على نعمه التي لا تُعد ولا تُحصى.

أهدي ثمرة جهدي هذه إلى نفسي، التي واجهت الصعوبات ولم تستسلم، وتحملت التعب والضغط والسهر حتى وصلت إلى هذه اللحظة. أهدي هذا الإنجاز تقديراً لكل جهد بُذل ولكل تحدٍ تم تجاوزه، راجيةً من الله أن يكون هذا النجاح بدايةً لمستقبل مليء بالتوفيق والإنجازات.

إلى أمي الغالية، التي كانت ولا تزال مصدر قوتي وأملي، التي سهرت من أجلي، ودعت لي في كل وقت، وغمرتني بحبها وحنانها وتضحياتها التي لا يمكن أن أوفيها حقها مهما فعلت. أسأل الله أن يحفظها ويبارك في عمرها ويجزيها عني خير الجزاء.

وإلى جدتي العزيزة، صاحبة القلب الطيب والدعوات الصادقة، التي كانت دائماً مثالاً للحنان والعطف، حفظها الله وأدام عليها الصحة والعافية.

وإلى خالتي الكريمة، التي لم تبخل عليّ يوماً بالنصيحة والتشجيع والدعم، فكانت كلماتها دافعاً للاستمرار وتحقيق النجاح.

وإلى أختي الحبيبة جنى، صغيرتي الغالية التي تضفي على حياتي الفرح والسرور، أهديها هذا العمل عربون محبة، وأسأل الله أن يحفظها ويرعاها ويجعل أيامها مليئة بالسعادة والنجاح.

وإلى صديقتي وزميلتي حفيظة، شريكة هذا العمل، التي تقاسمت معي مشوار إنجاز هذه المذكرة بكل ما حمله من تحديات وصعوبات ولحظات نجاح لقد كانت أكثر من مجرد زميلة في الدراسة، بل رفيقة درب تقاسمنا وتبادلنا الدعم والتشجيع حتى وصلنا إلى هذه اللحظة التي نقطف فيها ثمار جهودنا. أسأل الله أن يوفقها في حياتها العلمية والعملية، وأن يديم بيننا أواصر المحبة والاحترام.

كما أهدي هذا العمل إلى كل من وقف إلى جانبي وساعدني بكلمة طيبة أو نصيحة صادقة أو دعاءٍ خالص

وفي الختام، أسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به من يطلع عليه، وأن يوفقنا جميعاً إلى ما فيه الخير والنجاح.

بوضياف منار

شكروعرفان

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله رب العالمين، الذي وفقنا وأعاننا على إنجاز هذا العمل، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى أستاذي المشرف رؤوف ونيس لكحل عياط ، الذي تفضل بالإشراف على هذه المذكرة، ولم يبخل عليّ بتوجيهاته العلمية ونصائحه القيمة وملاحظاته البناءة، فكان خير مرشد ومعين طوال فترة إنجاز هذا العمل. فله مني أسمى عبارات الشكر والتقدير والاحترام.

كما أتقدم بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرة على قبولهم مناقشة هذا العمل وتخصيص جزء من وقتهم لقراءته وتقييمه وإثرائه بملاحظاتهم القيمة.

ولا يفوتني أن أتوجه بالشكر والامتنان إلى جميع أساتذتي الكرام الذين أشرفوا على تكويني العلمي طوال سنوات الدراسة، وساهموا بعلمهم وجهودهم في بناء مسيرتي الأكاديمية.

كما أتقدم بالشكر إلى كافة الطاقم البيداغوجي والإداري بالجامعة على ما قدموه من تسهيلات وخدمات ساعدت على إنجاز هذا العمل في أحسن الظروف.

وأخص بالشكر كل من ساعدني من قريب أو بعيد، وقدم لي يد العون أو المشورة أو الدعم المعنوي خلال مسيرتي الدراسية.

وفي الأخير، أسأل الله تعالى أن يجزي كل من ساهم في إنجاز هذا العمل خير الجزاء، وأن يجعل هذا الجهد خالصاً لوجهه الكريم ونافعاً للعلم وطلابه.

قائمة الاختصارات

BS : Base Station المحطة الأساسية / القاعدية

CH : Cluster Head رأس العنقود / رأس المجموعة

CPU : Central Processing Unit وحدة المعالجة المركزية (العبء الحسابي)

WSN : Wireless Sensor Network شبكات الاستشعار اللاسلكية

FND : First Node Dead موت أول عقدة (فترة استقرار الشبكة)

HNA : Half Nodes Alive وفاة نصف العقد (بقاء نصف العقد حية)

LND : Last Node Dead موت آخر عقدة (النهاية الكلية للشبكة)

NP-Hard : Non-deterministic Polynomial-time hard مسائل التعقيد الحسابي الصعبة جداً

FSS : Fixed Set Search خوارزمية البحث في المجموعات الثابتة

K-Means : K-Means Clustering خوارزمية التجميع الهندسية K-Means

LEACH : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy بروتوكول التجميع التكيفي منخفض الطاقة

IoT : Internet of Things إنترنت الأشياء

الفهرس

الإهداء I
شكر وعرفان III
قائمة الاختصارات IV
الفهرس V
قائمة الصور VIII
قائمة الجداول IX
المقدمة: 1
الفصل الأول : الإطار العام للدراسة 4
1. المقدمة 4
2. الإشكالية و الفجوة البحثية 5
3. فرضيات الدراسة 7
4. أهداف الدراسة 7
5. أهمية الدراسة 8
6. وسائل العمل 9
7. الدراسات السابقة 11
1.7. بروتوكول LEACH — (2000) Heinzelman et al 11
2.7. خوارزمية K-Means — (1967) MacQueen 11
8. خلاصة الدراسة 12
الفصل الثاني : شبكات المستشعرات عمر الشبكة الاتصال 14
1.2 مقدمة الفصل 14
2.2. تعريف شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) 14
3.2 تعريف المستشعر(Sensor) 14
4.2 مكونات شبكة الاستشعار اللاسلكية 15
5.2 بنية شبكة الاستشعار اللاسلكية WSN 16
6.2 نماذج الاتصال في شبكات الاستشعار اللاسلكية 16

7.2 أنواع شبكات الاستشعار اللاسلكية(WSN) 17
8.2. نموذج الطاقة في شبكات الاستشعار 17
9.2 تقنية التجميع (Clustering) 18
10.2 تصنيف طرق اختيار رؤوس العناقيد 19
11.2 المقاييس الأساسية للأداء في شبكات WSN 19
12.2. تحديات التحسين في شبكات الاستشعار اللاسلكية 20
13.2 خاتمة الفصل 21
الفصل الثالث: التحسين والخوارزميات المستخدمة 23
1.3مقدمة الفصل 23
2.3مفهوم التحسينOptimization 23
3.3مشكلة اختيار رؤوس العناقيد كمشكلة تحسين 24
4.3. التحسين متعدد الأهداف Multi-objective Optimization 25
5.3. الخوارزميات الميتاهوريستية Metaheuristics 25
6.3. الخوارزميات المستخدمة للمقارنة 26
1.6.3. خوارزميةLEACH 26
2.6.3 خوارزمية K-Means 28
7.3 خوارزمية Fixed Set Search (FSS) 31
1.7.3 التعريف العام لخوارزميةFSS 31
2.7.3 لماذا FSS مناسبة لمشكلة اختيار رؤوس العناقيد؟ 32
3.7.3 تمثيل الحل فيFSS 33
4.7.3 توليد المجتمع الأوليPopulation Generation 34
5.7.3 دالة التقييم Fitness Function 35
6.7.3. الهيكل البرمجي لخوارزمية FSS 38
7.7.3 اختيار الحلول النخبويةElite Solutions 39
9.7.3 التنويع Diversification داخلFSS 40
10.7.3 إكمال الحل Solution Completion 41

11.7.3 البحث المحليLocal Search 42
12.7.3 التعامل مع الركود Stagnation 43
13.7.3 المراحل العامة لخوارزميةFSS 44
3. 8 . تحليل سلوك خوارزميةFSS 44
9.3 الفرق بين FSS و LEACH و K-Means 45
10.3 علاقة FSS بأهداف هذا العمل 46
11.3 خاتمة الفصل 46
الفصل الرابع: المحاكاة والتقييم التجريبي 48
1.4 مقدمة الفصل 48
2.4 بيئة المحاكاة 48
1.2.4 أدوات المحاكاة 48
2.2.4 إعدادات ومعلمات الشبكة 49
3.4 سيناريوهات المحاكاة 49
4.4النتائج الإجمالية 50
5.4التحليل التفصيلي للسيناريوهات 50
1.5.4تحليل السيناريو الأول(S1-Center) 50
2.5.4تحليل السيناريو الثاني(S1-Corner) 53
3.5.4 تحليل السيناريو الثالث(S2-Center) 55
4.5.4تحليل السيناريو الرابع(S2-Corner) 57
5.5.4التكلفة الحسابية لجميع السيناريوهات(Computational Cost) 59
7.4. الآفاق المستقبلية(Future Works) 60
8.4خاتمة الفصل 61
الخاتمة العامة 62
قائمة المراجع 64

قائمة الصور:

الشكل رقم 1: رسم تخطيطي لعمل المستشعر 15
الشكل رقم 2: الهيكل العام لشبكة الاستشعار اللاسلكية 16
الشكل رقم 3: مراحل عمل خوارزمية FSS 44
الشكل رقم 4: تطور الإنتاجية المتراكمة للسيناريو .S1-Center 51
الشكل رقم 5: مخطط الصندوق (Boxplot) للإنتاجية لسيناريو .S1-Center 51
الشكل رقم 4: متوسط عمر الشبكة FND لسيناريو .S1-Center 52
الشكل رقم 7: التوزيع الإحصائي لجولة موت أول عقدة.(S1-Center) 52
الشكل رقم 8: تطور الإنتاجية عبر الجولات للسيناريوS1-Corner 53
الشكل رقم 9: التوزيع الإحصائي (Boxplot) لإنتاجية S1-Corner 53
الشكل رقم 10: مقارنة متوسط جولة موت أول عقدة(S1-Corner) ، 54
الشكل رقم 11: استقرار نتائج جولة FND في سيناريو الزاوية.S1-Corner 54
الشكل رقم 12: منحنى الإنتاجية المستمرة لسيناريو.S2-Center 55
الشكل رقم 13: التوزيع الإحصائي لمخرجات الإنتاجية لسيناريوS2-Center 55
الشكل رقم 14: متوسط جولة موت أول عقدة في توزيع S2-Center 56
الشكل رقم 15: مخطط الصندوق لعمر الشبكة FND لسيناريوS2-Center 56
الشكل رقم 16: منحنى الإنتاجية لسيناريو S2-Corner 57
الشكل رقم 17: التوزيع الإحصائي للإنتاجية لسيناريوS2-Corner 57
الشكل رقم 18: متوسط جولة موت أول عقدة S2-Corner 66
الشكل رقم 19: التوزيع الإحصائي الثابت لنتائج FND لسيناريو S2-Corner عبر التجارب. 58
الشكل رقم 20: متوسط الزمن اللازم لحساب العناقيد في كل جولة بوحدة الثانية. 59

قائمة الجداول

الجدول رقم 1: مقارنة بين الخوارزميات 12
الجدول رقم 2: النتائج الإجمالية لمقارنة K-Means و FSS عبر 4 سيناريوهات 50

المقدمة:

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا كبيرًا في تقنيات الاتصالات اللاسلكية والأنظمة الذكية، مما أدى إلى ظهور العديد من التقنيات الحديثة القادرة على مراقبة البيئات المختلفة وجمع البيانات بشكل مستمر. ومن بين أهم هذه التقنيات ظهرت شبكات الاستشعار اللاسلكية(Wireless Sensor Networks – WSNs) ، والتي أصبحت عنصرًا أساسيًا في العديد من التطبيقات الحديثة.

تتكون شبكات الاستشعار اللاسلكية من عدد كبير من العقد الاستشعارية الصغيرة التي يتم توزيعها في منطقة معينة من أجل جمع البيانات المتعلقة بالظواهر الفيزيائية أو البيئية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط، الحركة، أو غيرها من المتغيرات. تقوم هذه العقد بمعالجة البيانات الأولية ثم إرسالها عبر الاتصال اللاسلكي إلى محطة أساسية Base Station أو Sink حيث يتم تجميع البيانات وتحليلها.

بفضل مرونتها وانخفاض تكلفتها وسهولة نشرها، أصبحت شبكات الاستشعار اللاسلكية تُستخدم في العديد من المجالات مثل مراقبة البيئة، الزراعة الذكية، الأنظمة الصناعية، الرعاية الصحية، والمراقبة العسكرية. ومع ذلك، فإن تصميم وإدارة هذه الشبكات يواجه العديد من التحديات التقنية، خاصة بسبب القيود المفروضة على الموارد المتاحة في العقد الاستشعارية مثل الطاقة، القدرة الحاسوبية، وسعة الاتصال.

من بين أهم هذه التحديات مشكلة استهلاك الطاقة، حيث تعتمد معظم عقد الاستشعار على بطاريات محدودة السعة يصعب استبدالها بعد نشر الشبكة، خصوصًا في البيئات الخطرة أو البعيدة. لذلك فإن تحسين استهلاك الطاقة يعتبر عاملًا أساسيًا في إطالة عمر الشبكة(Network Lifetime) ، والذي يُعد أحد أهم مؤشرات الأداء في شبكات الاستشعار اللاسلكية .

إضافة إلى ذلك، يلعب الاتصال بين العقد (Connectivity) دورًا أساسيًا في ضمان نقل البيانات بشكل موثوق إلى المحطة الأساسية. إذ إن فقدان الاتصال بين العقد قد يؤدي إلى انقطاع مسارات نقل البيانات أو ظهور أجزاء معزولة داخل الشبكة، مما يؤثر بشكل مباشر على أداء النظام وكفاءته.

في العديد من الحالات، يكون تحسين عمر الشبكة والحفاظ على الاتصال بين العقد هدفين متعارضين إلى حد ما، حيث أن الحفاظ على مستوى عالٍ من الاتصال يتطلب زيادة في عمليات الإرسال والتوجيه، مما يؤدي إلى

استهلاك أكبر للطاقة. لذلك فإن تحقيق توازن فعال بين هذين الهدفين يمثل مشكلة معقدة في تصميم شبكات الاستشعار اللاسلكية.

لمواجهة هذه التحديات، اتجه الباحثون إلى استخدام تقنيات التحسين المختلفة، خاصة خوارزميات التحسين الميتاهوريستية (Metaheuristic Algorithms) التي أثبتت فعاليتها في حل المشكلات المعقدة ذات فضاء البحث الكبير. ومن بين هذه الأساليب خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة(Fixed Set Search – FSS) ، والتي تعتمد على استخراج العناصر الجيدة من الحلول عالية الجودة واستخدامها لتوجيه عملية البحث نحو حلول أكثر كفاءة.

في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى دراسة مشكلة تحسين عمر الشبكة والحفاظ على الاتصال في شبكات الاستشعار اللاسلكية من خلال استخدام نهج تحسين متعدد الأهدافMulti-Objective يعتمد على خوارزميةFixed Set Search .

الفصل الأول (الإطار العام للدراسة): يُخصص هذا الفصل لتقديم الإطار المنهجي للبحث، حيث نستعرض فيه إشكالية الدراسة، الفجوة البحثية، الفرضيات والأهداف المرجوة، إضافة إلى تلخيص لأهم الدراسات السابقة المتعلقة بالموضوع.

الفصل الثاني (شبكات المستشعرات اللاسلكية): يركز هذا الفصل على الجانب النظري لشبكاتWSN ، حيث نُفصل فيه بنية هذه الشبكات، تحدياتها الأساسية (وعلى رأسها محدودية الطاقة)، نماذج الاتصال، وأهمية تقنية التجميع (Clustering) كحل لإطالة عمر الشبكة.

الفصل الثالث (التحسين والخوارزميات المستخدمة): يتناول هذا الفصل مفهوم التحسين متعدد الأهداف في فضاءات البحث المنفصلة. ونقوم فيه بشرح الخوارزميات المرجعية(LEACHوK-Means)، ثم نُفصل آلية عمل الخوارزمية المقترحة (Fixed Set Search - FSS) وكيفية تكييف دالة التقييم الخاصة بها لحل مشكلة اختيار رؤوس العناقيد.

الفصل الرابع (المحاكاة وتحليل النتائج) : يُمثل هذا الفصل الجانب التطبيقي للبحث، حيث نعرض فيه بيئة المحاكاة المبرمجة بلغة(Python) ، ونقوم بمقارنة أداء خوارزمية (FSS) مع الخوارزميات المرجعية من حيث الإنتاجية، جودة الاتصال، واستهلاك الطاقة، لنختم الفصل بمناقشة النتائج واستخلاص الاستنتاجات النهائية.

الفصل الأول : الإطار العام للدراسة

1. المقدمة :

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في مجال الاتصالات اللاسلكية والأنظمة الذكية، مما أدى إلى ظهور تقنيات حديثة قادرة على مراقبة البيئات المختلفة وجمع البيانات بشكل مستمر وفعّال. ومن بين أهم هذه التقنيات، برزت شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks - WSNs) كأحد الحلول الأساسية في العديد من التطبيقات الحيوية مثل : المراقبة البيئية، الزراعة الذكية، الأنظمة الصناعية، والرعاية الصحية.[1] ، [4]

تتكون شبكات الاستشعار اللاسلكية من عدد كبير من العقد الحسية صغيرة الحجم، والتي يتم نشرها غالبًا بشكل عشوائي داخل منطقة معينة بهدف جمع البيانات المتعلقة بالظواهر الفيزيائية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط، أو الحركة. تقوم هذه العقد بمعالجة البيانات الأولية ثم إرسالها عبر الاتصال اللاسلكي إلى محطة أساسية (Base Station) حيث يتم تجميع البيانات وتحليلها.

رغم المزايا الكبيرة لهذه الشبكات، إلا أنها تواجه عدة تحديات تقنية، من أبرزها محدودية الطاقة، حيث تعتمد العقد الحسية على بطاريات ذات سعة محدودة يصعب استبدالها أو إعادة شحنها بعد نشر الشبكة، خاصة في البيئات الخطرة أو النائية. لذلك، يُعتبر تحسين استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة (Network Lifetime) من أهم أهداف تصميم هذه الأنظمة.[5] ، [6]

من جهة أخرى، يُعد الاتصال (Connectivity) عاملاً أساسياً لضمان نقل البيانات بشكل موثوق داخل الشبكة، حيث أن فقدان الاتصال بين العقد قد يؤدي إلى انقطاع مسارات نقل البيانات أو ظهور أجزاء معزولة داخل الشبكة، مما يؤثر سلبًا على أداء النظام.

في هذا السياق، تم اقتراح تقنية التجميع (Clustering) كأحد الحلول الفعالة لتحسين كفاءة الشبكة، حيث يتم تقسيم العقد إلى مجموعات (Clusters)، ويتم اختيار عقد مميزة تُعرف بإسم رؤوس العناقيد (Cluster Heads - CH)، تتولى مهمة جمع البيانات من العقد التابعة وإرسالها إلى المحطة الأساسية. غير أن فعالية هذا الأسلوب تعتمد بشكل كبير على آلية اختيار هذه الرؤوس.[10] ، [12]

تُعتبر عملية اختيار رؤوس العناقيد مسألة معقدة، خاصة عند محاولة تحقيق توازن بين عدة أهداف متعارضة مثل: تقليل استهلاك الطاقة، تحسين الاتصال، و زيادة كمية البيانات المرسلة. ولهذا السبب أصبح من الضروري استخدام تقنيات التحسين متعددة الأهداف (Multi-objective Optimization)، وخاصة الخوارزميات فوق التقريبية (Metaheuristics)، التي تمتاز بقدرتها على التعامل مع فضاءات البحث الكبيرة والمعقدة.

في هذا الإطار، تقترح هذه الدراسة استخدام خوارزمية (Fixed Set Search (FSS كحل فعال لإختيار رؤوس العناقيد، من خلال استغلال المعلومات المستخلصة من الحلول الجيدة وتوجيه عملية البحث نحو حلول أكثر كفاءة. كما تهدف الدراسة إلى مقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع خوارزميات مرجعية معروفة مثل LEACH و K-Means، من أجل تقييم مدى فعاليتها في تحسين أداء الشبكة.

2. الإشكالية و الفجوة البحثية :

على الرغم من التقدم الكبير في مجال شبكات الاستشعار اللاسلكية، إلا أن تصميم آليات فعالة لإدارة هذه الشبكات ما يزال يمثل تحديًا كبيرًا، خاصة فيما يتعلق بإختيار رؤوس العناقيد (Cluster Heads). إذ أن هذا الإختيار يؤثر بشكل مباشر على أداء الشبكة من حيث استهلاك الطاقة، جودة الاتصال، وكمية البيانات المرسلة إلى المحطة الأساسية.

في الشبكات متعددة القفزات (Multi-hop WSNs)، تزداد هذه المشكلة تعقيدًا، حيث تتحمل بعض العقد عبئًا إضافيًا في تمرير البيانات، مما يؤدي إلى استنزاف طاقتها بسرعة، وظهور ما يُعرف بمشكلة الثقب الطاقوي (Energy Hole Problem)، خاصة في المناطق القريبة من المحطة الأساسية. **[7]، [8]**

بناءً على ذلك، يمكن صياغة الإشكالية الرئيسية للدراسة كما يلي:

كيف يمكن تصميم آلية ذكية وفعالة لإختيار رؤوس العناقيد في شبكة استشعار لاسلكية، بحيث تحقق توازنًا بين تعظيم عمر الشبكة، الحفاظ على الاتصال، وتحسين معدل نقل البيانات (Throughput)؟

الفجوة البحثية (Research Gap) :

على الرغم من تعدد الخوارزميات المقترحة لإختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية، إلا أن معظم هذه الخوارزميات لا تزال تعاني من قيود تؤثر على جودة الأداء العام للشبكة.

تعتمد بعض الخوارزميات التقليدية مثل **LEACH** على اختيار احتمالي عشوائي، مما يؤدي إلى توزيع غير متوازن لرؤوس العناقيد، وقد ينتج عنه اختيار عقد ذات طاقة منخفضة لأداء مهام مكلفة، وهو ما يؤدي إلى استنزاف سريع للطاقة وتقليل عمر الشبكة. في المقابل تعتمد خوارزميات أخرى مثل : **K-Means** على معايير هندسية بحتة، خاصة المسافة دون أخذ عوامل مهمة مثل : الطاقة المتبقية أو جودة الاتصال بعين الاعتبار، مما يؤدي إلى حلول غير متوازنة من حيث الأداء.

إضافة إلى ذلك، فإن هذه الخوارزميات تعتمد في الغالب على معايير محدودة أو أحادية، ولا تحقق توازنًا حقيقيًا بين الأهداف المختلفة

مثل : تقليل استهلاك الطاقة، تحسين الاتصال، و زيادة كمية البيانات المرسلة. كما أنها لا تستغل المعلومات المستخلصة من الحلول الجيدة السابقة، بل تعمل بطريقة آنية دون وجود آلية تعلم أو تحسين تدريجي.

من جهة أخرى، ورغم أن خوارزميات التحسين (Metaheuristics) قادرة على التعامل مع مثل هذه المشاكل، إلا أن أغلبها يعمل في فضاء مستمر، مما يتطلب تحويل الحلول إلى قرارات ثنائية (اختيار العقدة كرأس عنقود أو لا)، وهو ما قد يؤدي إلى فقدان الدقة وعدم التوافق مع طبيعة المشكلة، التي تُعتبر في الأصل مسألة اختيار ضمن فضاء منفصل.

بناءً على ذلك، يمكن تحديد الفجوة البحثية في غياب منهجية فعالة تجمع بين العمل المباشر في فضاء الحلول المنفصل، والإستفادة من الحلول الجيدة السابقة، وتحقيق توازن حقيقي بين عدة معايير متعارضة في نفس الوقت.

في هذا الإطار، يقترح هذا العمل استخدام خوارزمية Fixed Set Search (FSS) والتي تعتمد على استخراج العناصر المشتركة في الحلول الجيدة وتثبيتها، ثم توجيه عملية البحث نحو حلول محسّنة بشكل تدريجي. كما يتم اعتماد دالة تقييم متعددة الأهداف تجمع بين عدة معايير مثل : Throughput و Connectivity و Energy و Distance، مما يسمح بالحصول على حلول أكثر توازنًا وكفاءة مقارنة بالخوارزميات التقليدية.

3. فرضيات الدراسة :

ينطلق هذا العمل من مجموعة من الفرضيات الأساسية التي تهدف إلى اختبار فعالية الخوارزمية المقترحة في تحسين أداء شبكة الاستشعار اللاسلكية، ويمكن تلخيصها كما يلي:

الفرضية الأولى: إن استخدام خوارزمية تعمل مباشرة في فضاء الحلول المنفصل (اختيار العقد كرؤوس عناقيد) دون الحاجة إلى تحويل من فضاء مستمر $[0,1]^N$ يؤدي إلى الحصول على حلول أكثر دقة وملائمة لطبيعة المشكلة.

الفرضية الثانية: إن اعتماد آلية التعلم من الحلول الجيدة السابقة، من خلال تثبيت العناصر المشتركة بينها (Fixed Set)، يساهم في تحسين جودة الحلول النهائية مقارنة بالطرق التقليدية التي تعتمد على الإختيار العشوائي أو الهندسي فقط.

الفرضية الثالثة: إن استخدام دالة تقييم متعددة الأهداف تجمع بين عدة معايير مثل : كمية البيانات المرسلة (Throughput)، جودة الاتصال (Connectivity)، الطاقة المتبقية (Energy)، والتقارب بين العقد (Distance)، يسمح بتحقيق توازن أفضل في أداء الشبكة.

الفرضية الرابعة: إن الخوارزمية المقترحة (FSS) قادرة على تحقيق أداء أفضل مقارنة بالخوارزميات المرجعية مثل LEACH و K-Means، من حيث زيادة Throughput، تحسين الاتصال، وإطالة عمر الشبكة.

4. أهداف الدراسة :

يهدف هذا العمل إلى تحقيق مجموعة من الأهداف العلمية والتطبيقية، والتي يمكن تلخيصها فيما يلي:

1. فهم مبدأ عمل خوارزمية Fixed Set Search (FSS) وكيفية تكييفها لتناسب مشكلة اختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية.
2. تصميم وتنفيذ نموذج محاكاة لشبكة استشعار لاسلكية بإستخدام لغة Python، مع اعتماد نموذج طاقة واقعي يحاكي استهلاك العقد للطاقة أثناء الإرسال والاستقبال.

3. تطبيق الخوارزمية المقترحة (FSS) لإختيار رؤوس العناقيد، ومقارنتها مع خوارزميات معروفة مثل LEACH و K-Means.

4. تطوير دالة تقييم متعددة الأهداف تأخذ بعين الإعتبار عدة معايير أساسية، مثل Throughput، Connectivity، Energy، و Distance، من أجل تحسين جودة الحلول.

5. تحليل نتائج المحاكاة من خلال دراسة أداء كل خوارزمية من حيث:

- كمية البيانات المرسلة إلى المحطة الأساسية (Throughput) .
- جودة الاتصال داخل الشبكة (Connectivity) .
- استهلاك الطاقة وعمر الشبكة (Network Lifetime) .

6. تقييم فعالية الخوارزمية المقترحة وإبراز مدى قدرتها على تحقيق توازن بين المعايير المختلفة مقارنة بالخوارزميات التقليدية.

5. أهمية الدراسة :

تكتسي هذه الدراسة أهمية بالغة من الناحيتين العلمية والتطبيقية، ويمكن توضيح ذلك من خلال النقاط التالية:

- **الأهمية العلمية:** تساهم هذه الدراسة في إبراز إمكانية استخدام خوارزميات التحسين فوق التقريبية، وخاصة خوارزمية Fixed Set Search (FSS) ، في معالجة مسائل معقدة في شبكات الاستشعار اللاسلكية. كما توضح كيف يمكن تكييف خوارزمية أصلها موجه لمسائل اختيار عامة لتلائم مشكلة اختيار رؤوس العناقيد، مع الحفاظ على طبيعة الحلول المنفصلة دون الحاجة إلى تحويلها.
- **الأهمية المنهجية:** تقدم هذه الدراسة مقاربة تعتمد على التقييم متعدد الأهداف، من خلال دمج عدة معايير أساسية في دالة واحدة، مثل Throughput و Connectivity و Energy و Distance، مما يسمح بالحصول على حلول أكثر توازنًا مقارنة بالمقاربات التي تعتمد على معيار واحد فقط.

- **الأهمية التطبيقية:** يمكن أن تساهم النتائج المتحصل عليها في تحسين أداء الأنظمة الحقيقية المعتمدة على شبكات الاستشعار اللاسلكية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب نقل كمية كبيرة من البيانات مع الحفاظ على استهلاك منخفض للطاقة، مثل المراقبة البيئية، الأنظمة الصناعية، والإستجابة للطوارئ.
- **أهمية المقارنة:** توفر هذه الدراسة تحليلاً مقارنًا بين الخوارزمية المقترحة (FSS) وخوارزميات معروفة مثل LEACH و K-Means، مما يسمح بتقييم فعاليتها بشكل موضوعي وإبراز نقاط القوة والضعف لكل منها.

6. وسائل العمل :

- ✓ **لغة البرمجة:** تم استخدام لغة Python 3، نظرًا لمرونتها وسهولة استخدامها في بناء نماذج المحاكاة، مع الإستعانة بمكتبات علمية مثل NumPy و Matplotlib لتحليل البيانات وتمثيل النتائج.
- ✓ **نموذج الطاقة:** تم اعتماد نموذج الطاقة من الدرجة الأولى (First-order Radio Model) المستخدم في بروتوكول LEACH، حيث يتم حساب استهلاك الطاقة أثناء الإرسال والاستقبال وفق العلاقات التالية:

- $E_{tx} = E_{elec} * L + \varepsilon_{fs} * L * d^2$
- $E_{rx} = E_{elec} * L$

مع القيم:

$E_{elec} = 50*10^{-9}$ جول/بت

ε_{fs} $10*10^{-12}$ جول/بت/متر^2

Lبت = 4000 حجم الحزمة

- ✓ **إعدادات الشبكة (Topology):**
  - عدد العقد : N=100 عقدة حسية
  - مساحة الشبكة : 100*100 متر

- موقع المحطة الأساسية (Base Station): في مركز الشبكة
- الطاقة الابتدائية لكل عقدة: 0,5 جول
- مدى الإرسال: 50 متر

✓ **نموذج الاتصال:**

تم اعتماد نموذج اتصال يسمح للعقد بإرسال البيانات إلى أقرب رأس عنقود، حيث تقوم رؤوس العناقيد بجمع البيانات وإرسالها إلى المحطة الأساسية، مع إمكانية وجود اتصال متعدد القفزات بين رؤوس العناقيد عند الحاجة.

✓ **الخوارزميات المستخدمة:**

- الخوارزمية المقترحة: Fixed Set Search (FSS) لاختيار رؤوس العناقيد .
- خوارزميات المقارنة:

LEACH : (اختيار احتمالي عشوائي)

K-Means : (تجميع قائم على المسافة)

✓ **معايير التقييم:** تم تقييم أداء الشبكة باستخدام مجموعة من المؤشرات، وهي:

- Throughput: عدد الحزم المرسلة إلى المحطة الأساسية .
- Connectivity: نسبة العقد أو رؤوس العناقيد المتصلة بالشبكة .
- Network Lifetime: مدة بقاء العقد نشطة .
- Energy Consumption: متوسط الطاقة المتبقية في الشبكة .

✓ **بيئة التنفيذ:**

تم تنفيذ المحاكاة على حاسوب شخصي بموارد عادية، حيث تم إجراء عدة تشغيلات (Runs) لكل خوارزمية من أجل الحصول على نتائج أكثر دقة وتقليل تأثير العشوائية.

- ✓ **موثوقية النتائج:**

تم تكرار التجارب لعدة مرات (مثلاً 30 مرة) لكل خوارزمية، ثم حساب المتوسطات لضمان تقليل تأثير العشوائية والحصول على نتائج أكثر دقة ومصداقية.

7. الدراسات السابقة :

1.7. بروتوكول LEACH — (2000) Heinzelman et al :

اقترح Heinzelman وزملاؤه بروتوكول LEACH كأحد أول بروتوكولات التجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث يعتمد على اختيار رؤوس العناقيد بشكل احتمالي ودوري، بهدف توزيع استهلاك الطاقة بين العقد المختلفة.

يقوم البروتوكول بتقسيم الشبكة إلى عناقيد، حيث تقوم كل عقدة بإرسال بياناتها إلى رأس العنقود، الذي يتولى تجميعها وإرسالها مباشرة إلى محطة القاعدة. ويساهم هذا الأسلوب في تقليل عدد الإرسالات بعيدة المدى، مما يؤدي إلى تحسين كفاءة الطاقة.

ورغم فعاليته، إلا أن LEACH لا يأخذ بعين الاعتبار الطاقة المتبقية أو موقع العقد بشكل دقيق، كما أنه يعتمد على إرسال مباشر إلى محطة القاعدة، مما يجعله أقل كفاءة في الشبكات متعددة القفزات.**[13]**

2.7. خوارزمية K-Means — (1967) MacQueen :

اقترح MacQueen خوارزمية K-Means كإحدى خوارزميات التجميع غير المراقب، حيث تعتمد على تقسيم البيانات إلى مجموعات بناءً على المسافة بينها، بهدف تقليل التباين داخل كل مجموعة.

وقد تم توظيف هذه الخوارزمية في شبكات الاستشعار اللاسلكية لتحسين توزيع العقد داخل العناقيد وتقليل المسافة بين العقد ورؤوس العناقيد. حيث تساهم في تقليل استهلاك الطاقة أثناء الإرسال داخل العنقود وتحسين كفاءة الاتصال المحلي.

إلا أن هذه الخوارزمية تعتمد بشكل أساسي على المعايير الهندسية (المسافة)، دون مراعاة الطاقة المتبقية للعقد أو ظروف الشبكة، مما قد يؤدي إلى اختيار رؤوس عناقيد غير مناسبة من حيث الطاقة.**[16]**

3. Voss and Jovanovic (2019/ 2024) -- البحث بالمجموعة الثابتة (FSS) :

اقترح يوفانوفيتش وفوس خوارزمية FSS كإطار عام يُضيف مرحلة تعلّم إلى GRASP بعد توليد مجموعة من الحلول النخبوية في مرحلة أولى، يُستخرج تواتر ظهور كل مكوّن ويُحدّد " مجموعة ثابتة" من المكونات الأكثر تكرارا، ثم تستخدم هذه المجموعة لتوجيه البناء في مرحلة ثانية. طبقت FSS بنجاح على مسألة البائع المتجول ومسألة الحقيبة متعددة الأبعاد. لم تطبق سابقًا على شبكات الاستشعار اللاسلكية، وهذا ما يفعله مشروعنا.**[22]**

مقارنة بين الخوارزميات :

الخوارزمية	الفكرة	المزايا	العيوب
LEACH	اختيار عشوائي واحتمالي الرؤوس العناقيد.	بسيط وسهل التطبيق، يقلل عدد الإرسال المباشر، يوزع الأدوار بين العقد .	اختيار غير متوازن، لا يأخذ الطاقة الحالية بعين الاعتبار ضعف في الشبكات الكبيرة.
K-Means	تجميع العقد حسب المسافة واختيار أقرب عقدة للمركز .	تنظيم مكاني جيد، تقليل المسافات تحسين توزيع العقد.	يهمل الطاقة، لا يراعي الاتصال حساس للقيم الابتدائية.
FSS	اختيار رؤوس العناقيد بإستخدام التعلم من الحلول الجيدة .	توازن بين عدة معايير، تحسين تدريجي للحلول، دقة أعلى.	تعقيد حسابي أعلى، يحتاج وقت حساب أكثر، يعتمد على جودة التقييم.

الجدول رقم 1: مقارنة بين الخوارزميات

8. خلاصة الدراسة :

في هذا الفصل، تم تقديم الإطار العام للدراسة، حيث تم التطرق إلى مفهوم شبكات الاستشعار اللاسلكية وأهم التحديات المرتبطة بها، خاصة مشكلة اختيار رؤوس العناقيد. كما تم عرض الإشكالية والفجوة البحثية، وصياغة فرضيات وأهداف الدراسة، بالإضافة إلى إبراز أهميتها العلمية والتطبيقية. وفي الأخير، تم استعراض أهم الدراسات السابقة المرتبطة بالموضوع.

يمهد هذا الفصل للانتقال إلى الفصل الموالي، والذي سيتم فيه عرض المفاهيم الأساسية لشبكات الاستشعار اللاسلكية والنماذج المعتمدة في هذه الدراسة.

الفصل الثاني : شبكات المستشعرات عمر الشبكة الاتصال

1.2 مقدمة الفصل :

تُعد شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks - WSNs) من أهم التقنيات الحديثة التي تعتمد على نشر عدد كبير من العقد الحسية داخل بيئة معينة بهدف جمع البيانات ومراقبة الظواهر المختلفة. تتميز هذه الشبكات بقدرتها على العمل في بيئات صعبة أو نائية، مع الإعتماد على الاتصال اللاسلكي لتبادل المعلومات بين العقد.

في هذا الفصل، سيتم تقديم المفاهيم الأساسية المتعلقة بشبكات الاستشعار اللاسلكية، مع التركيز على العناصر التي تؤثر بشكل مباشر على أداء الشبكة، خاصة استهلاك الطاقة، الاتصال، وتقنيات التجميع (Clustering)، وذلك تمهيدًا لاستخدامها في الجزء التطبيقي من هذا العمل.

2.2. تعريف شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) :

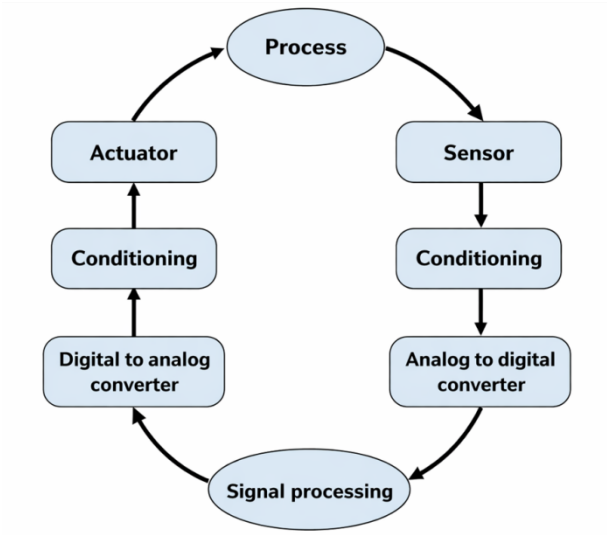
تُعرف شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks - WSNs) بأنها أنظمة تتكون من عدد كبير من العقد الحسية الصغيرة، يتم نشرها داخل بيئة معينة بهدف جمع البيانات المتعلقة بظواهر مختلفة مثل درجة الحرارة، الرطوبة، أو الحركة.

تتميز هذه العقد بقدرتها على الاستشعار والمعالجة والتواصل اللاسلكي، حيث تقوم بإرسال البيانات إلى محطة أساسية (Base Station) عبر قنوات اتصال متعددة، قد تكون مباشرة أو عبر عقد وسيطة.

غير أن هذه العقد تعاني من قيود أساسية، أهمها محدودية الطاقة، مما يجعل تصميم آليات فعالة لإدارة الشبكة أمرًا ضروريًا. [2]

3.2 تعريف المستشعر (Sensor) :

المستشعر (Sensor) هو جهاز صغير يُستخدم لقياس أو استشعار ظاهرة فيزيائية معينة مثل درجة الحرارة أو الرطوبة، وتحويلها إلى إشارة قابلة للمعالجة. في شبكات الاستشعار اللاسلكية، تُعد المستشعرات جزءًا أساسيًا من العقد الحسية التي تقوم بجمع البيانات وإرسالها عبر الشبكة. **[3]**



الشكل رقم 1: رسم تخطيطي لعمل المستشعر[3]

4.2 مكونات شبكة الاستشعار اللاسلكية :

تتكون شبكة الاستشعار اللاسلكية من مجموعة من العناصر الأساسية التي تعمل معًا لضمان جمع البيانات ونقلها بكفاءة، ومن أهم هذه المكونات:

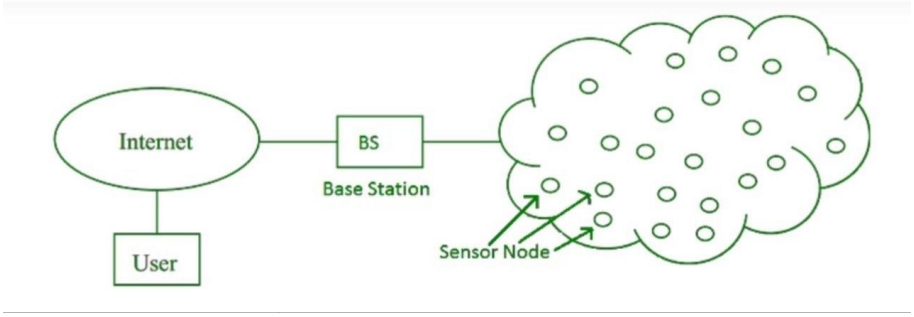
- **العقد الحسية (Sensor Nodes):** تقوم بجمع البيانات من البيئة المحيطة ومعالجتها بشكل أولي، ثم إرسالها عبر الشبكة.
- **رؤوس العناقيد (Cluster Heads - CH):** تستقبل البيانات من العقد التابعة، وتقوم بتجميعها وإرسالها إلى المحطة الأساسية.
- **المحطة الأساسية (Base Station):** تمثل نقطة الاستقبال النهائية للبيانات، حيث يتم تخزينها أو معالجتها.
- **قنوات الاتصال (Communication Links):** تمثل الوسيلة التي يتم من خلالها تبادل البيانات بين العقد داخل الشبكة.

تساهم هذه المكونات في تنظيم عمل الشبكة وضمان نقل البيانات بشكل فعال.

5.2 بنية شبكة الاستشعار اللاسلكية WSN :

تعتمد بنية شبكة الاستشعار اللاسلكية في هذا العمل على نموذج هرمي قائم على تقنية التجميع (Clustering)، حيث يتم تنظيم العقد الحسية ضمن مجموعات تُعرف بالعناقيد (Clusters). داخل كل عنقود، يتم تعيين عقدة خاصة تُسمى رأس العنقود (Cluster Head)، تتولى إدارة الاتصال داخل المجموعة.

يساهم هذا النوع من البنية في تحسين تنظيم الشبكة وتقليل استهلاك الطاقة، من خلال تقليل عدد الإرساليات المباشرة إلى المحطة الأساسية. كما يسمح بتوزيع المهام بين العقد بشكل أكثر كفاءة. **[10]** ، **[11]**



الشكل رقم 2: الهيكل العام لشبكة الاستشعار اللاسلكية[11]

6.2 نماذج الاتصال في شبكات الاستشعار اللاسلكية :

تعتمد شبكات الاستشعار اللاسلكية على عدة نماذج للاتصال بين العقد، والتي تختلف حسب طريقة نقل البيانات داخل الشبكة. من بين أهم هذه النماذج:

- **الاتصال المباشر (Single-hop):** حيث تقوم العقد بإرسال بياناتها مباشرة إلى المحطة الأساسية، ويُستخدم هذا النموذج في الشبكات الصغيرة أو عندما تكون المسافات قصيرة.
- **الاتصال متعدد القفزات (Multi-hop):** حيث يتم نقل البيانات عبر عدة عقد وسيطة قبل الوصول إلى المحطة الأساسية، مما يساعد على تقليل استهلاك الطاقة خاصة في الشبكات الكبيرة.
- **الاتصال القائم على التجميع (Cluster-based Communication):** حيث يتم تقسيم الشبكة إلى عناقيد، وتقوم العقد بإرسال بياناتها إلى رأس العنقود، الذي يتولى بدوره إرسالها إلى المحطة الأساسية.

في هذا العمل، تم اعتماد نموذج **اتصال قائم على التجميع**، مع إمكانية استخدام الاتصال متعدد القفزات بين رؤوس العناقيد، وذلك من أجل تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة نقل البيانات داخل الشبكة.

7.2 أنواع شبكات الاستشعار اللاسلكية(WSN) :

يمكن تصنيف شبكات الاستشعار اللاسلكية إلى عدة أنواع حسب بيئة الإستخدام، من بينها:

- **الشبكات الأرضية (Terrestrial WSN):** يتم نشر العقد فيها على سطح الأرض، وهي الأكثر شيوعًا في التطبيقات العملية.
- **الشبكات تحت الأرض (Underground WSN):** تُستخدم في مراقبة التربة أو الموارد الجوفية.
- **الشبكات تحت الماء (Underwater WSN):** تُستخدم في التطبيقات البحرية، وتعتمد على تقنيات اتصال خاصة.
- **الشبكات متعددة الوسائط (Multimedia WSN):** تُستخدم لنقل بيانات مثل الصوت والصورة.

في هذا العمل، يتم التركيز على **الشبكات الأرضية**، نظرًا لملاءمتها لنموذج المحاكاة المستخدم.**[2]**

8.2. نموذج الطاقة في شبكات الاستشعار:

يُعتبر استهلاك الطاقة من أهم التحديات في شبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث تعتمد العقد على بطاريات محدودة السعة، مما يجعل تحسين استهلاك الطاقة أمرًا ضروريًا لإطالة عمر الشبكة.

في هذا العمل، تم اعتماد نموذج الطاقة من الدرجة الأولى (**First-order Radio Model**)، والذي يُستخدم على نطاق واسع في بروتوكولات مثل **LEACH**. يعتمد هذا النموذج على حساب الطاقة المستهلكة أثناء الإرسال والاستقبال كما يلي:

- $E_{tx} = E_{elec} * L + \varepsilon_{fs} * L * d^2$
- $E_{rx} = E_{elec} * L$

حيث:

- E_{elec} : الطاقة المستهلكة في الإلكترونيات .

- ε_{fs} : معامل القناة .
- L : حجم البيانات .
- d: المسافة بين العقد .

بما أن مساحة المحاكاة المعتمدة في دراستنا هي مساحة محدودة (100×100 متر)، فإن المسافات بين العقد (d)تعتبر قصيرة نسبياً ودون مسافة العتبة .لذلك، تم الاكتفاء بنموذج الفضاء الحر (Free Space Model) الذي يعتمد على مربع المسافة (d^2)، دون الحاجة للجوء إلى نموذج المسارات المتعددة (Multipath Fading Model)الذي يعتمد على (d^4) والذي يُستخدم في المسافات الطويلة جداً". **[14]**

يتضح من هذه المعادلات أن الطاقة المستهلكة في الإرسال تزداد بشكل كبير مع زيادة المسافة، وهو ما يبرر أهمية تقليل المسافات بين العقد وتحسين اختيار رؤوس العناقيد.

9.2 تقنية التجميع (Clustering) :

تُعتبر تقنية التجميع (Clustering) من أهم الآليات المستخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، نظرًا لدورها الفعّال في تحسين كفاءة الشبكة وتقليل استهلاك الطاقة. تعتمد هذه التقنية على تقسيم العقد الحسية إلى مجموعات تُعرف بالعناقيد (Clusters)، بحيث تتواصل كل عقدة مع رأس العنقود الخاص بها بدل الإرسال المباشر إلى المحطة الأساسية.

يقوم رأس العنقود (Cluster Head - CH) باستقبال البيانات من العقد التابعة، ثم تنفيذ عملية تجميع البيانات (Data Aggregation) بهدف تقليل التكرار وتقليص حجم البيانات المرسلة. بعد ذلك، يتم إرسال البيانات المُعالجة إلى المحطة الأساسية، إما بشكل مباشر أو عبر رؤوس عناقيد أخرى في حالة استخدام الاتصال متعدد القفزات (Multi-hop).

تُساهم هذه الآلية في تقليل عدد الإرساليات بعيدة المدى، والتي تُعد الأكثر استهلاكًا للطاقة، مما يؤدي إلى إطالة عمر الشبكة (Network Lifetime). كما تساعد على تحسين تنظيم الشبكة وتقليل التداخل بين العقد.

غير أن كفاءة هذه التقنية تعتمد بشكل كبير على طريقة اختيار رؤوس العناقيد، حيث أن اختيار عقد ذات طاقة منخفضة أو موقع غير مناسب قد يؤدي إلى تدهور أداء الشبكة. لذلك، تُعد عملية اختيار رؤوس العناقيد من أهم محاور البحث في هذا المجال.

في هذا العمل، يتم التركيز على تحسين عملية اختيار رؤوس العناقيد باستخدام خوارزميات متقدمة، من أجل تحقيق توازن بين استهلاك الطاقة، جودة الاتصال، وكفاءة نقل البيانات .**[12]**

10.2 تصنيف طرق اختيار رؤوس العناقيد :

يمكن تصنيف طرق اختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية إلى عدة فئات رئيسية:

- **طرق عشوائية:** تعتمد على اختيار رؤوس العناقيد بشكل احتمالي، مثل بروتوكول **LEACH**، حيث يتم اختيار العقد بشكل دوري دون الأخذ بعين الاعتبار حالتها الحالية.
- **طرق قائمة على التجميع:** تعتمد على تقسيم العقد إلى مجموعات بناءً على معايير هندسية مثل المسافة، كما هو الحال في خوارزمية **K-Means**.
- **طرق قائمة على التحسين:** تعتمد على استخدام خوارزميات تحسين لاختيار أفضل مجموعة من رؤوس العناقيد بناءً على عدة معايير، مثل خوارزمية **FSS** المقترحة في هذا العمل.

يساعد هذا التصنيف في فهم الاختلاف بين الطرق المختلفة، ويبرز أهمية استخدام خوارزميات التحسين لتحقيق أداء أفضل في الشبكة.

11.2 المقاييس الأساسية للأداء في شبكات WSN :

من أجل تقييم أداء شبكات الاستشعار اللاسلكية، يتم الإعتماد على مجموعة من المقاييس الأساسية التي تعكس كفاءة الشبكة من حيث نقل البيانات، استهلاك الطاقة، و جودة الاتصال. من أهم هذه المقاييس:

- **Throughput:** يمثل عدد الحزم التي تصل إلى المحطة الأساسية خلال فترة زمنية معينة، ويعكس كفاءة نقل البيانات داخل الشبكة. كلما زادت قيمة هذا المؤشر، دلّ ذلك على أداء أفضل للشبكة.

- **Connectivity:** يعبر عن مدى ترابط العقد داخل الشبكة وقدرتها على التواصل فيما بينها، خاصة قدرة رؤوس العناقيد على الوصول إلى المحطة الأساسية سواء بشكل مباشر أو عبر عقد وسيطة.
- **Network Lifetime:** يمثل مدة بقاء الشبكة قيد التشغيل قبل نفاد طاقة العقد، ويمكن قياسه من خلال مؤشرات مثل :
  - FND (First Node Dies): لحظة نفاد طاقة أول عقدة في الشبكة
  - HND (Half Nodes Die): لحظة نفاد طاقة نصف العقد
  - LND (Last Node Dies): لحظة نفاد طاقة آخر عقدة
- **Energy Consumption:** يعكس كمية الطاقة المستهلكة داخل الشبكة، ويُعتبر من أهم المعايير نظرًا لمحدودية طاقة العقد الحسية.

في هذا العمل، يتم الاعتماد على هذه المقاييس لتقييم أداء الخوارزميات المختلفة (LEACH، K-Means، وFSS)، ومقارنة فعاليتها في تحسين أداء الشبكة.**[9]**

12.2. تحديات التحسين في شبكات الاستشعار اللاسلكية :

تواجه عملية تحسين أداء شبكات الاستشعار اللاسلكية عدة تحديات رئيسية، ناتجة عن طبيعة هذه الشبكات وخصائصها المحدودة، مما يجعل تصميم حلول فعالة أمرًا معقدًا. من أبرز هذه التحديات :

- **محدودية الطاقة:** تعتمد العقد الحسية على بطاريات ذات سعة محدودة، مما يجعل تقليل استهلاك الطاقة هدفًا أساسيًا، خاصة أثناء عمليات الإرسال التي تُعد الأكثر استهلاكًا للطاقة.
- **تعارض الأهداف (Trade-off):** تسعى الشبكة إلى تحقيق عدة أهداف في نفس الوقت مثل : تقليل استهلاك الطاقة وزيادة كمية البيانات المرسلة (Throughput)، إلا أن تحسين أحد هذه الأهداف قد يؤثر سلبًا على الآخر.
- **صعوبة اختيار رؤوس العناقيد:** يُعتبر اختيار العقد المناسبة لتكون رؤوس عناقيد من أكثر المشاكل تعقيدًا، حيث يجب مراعاة عدة معايير مثل : الطاقة المتبقية، موقع العقد، وجودة الاتصال.

- **الحفاظ على الاتصال (Connectivity):** ضمان بقاء العقد متصلة بالشبكة، خاصة في حالة الاتصال متعدد القفزات، يمثل تحديًا مهمًا لتفادي فقدان البيانات.

- **التوزيع غير المتوازن للطاقة:** قد تتحمل بعض العقد عبئًا أكبر من غيرها، خاصة القريبة من المحطة الأساسية، مما يؤدي إلى استنزاف طاقتها بسرعة وظهور ما يُعرف بمشكلة الثقب الطاقوي. "في الشبكات متعددة القفزات(Multi-hop WSNs) ، تعاني العقد القريبة من المحطة الأساسية من استنزاف سريع للطاقة، لأنها تُجبر على تمرير بياناتها وبيانات العقد الأخرى، مما يؤدي إلى موت هذه العقد مبكراً وعزل المحطة الأساسية عن باقي الشبكة (وهو ما يُعرف بمشكلة الثقب الطاقوي). تفادي هذه المشكلة يتطلب خوارزمية تضمن جودة الاتصال (Connectivity) وتجديد مسارات البيانات بشكل مستمر، وهو ما سنعالجه من خلال خوارزميةFSS ".

- **الطبيعة الديناميكية للشبكة:** تتغير حالة الشبكة مع مرور الوقت نتيجة نفاد طاقة العقد، مما يجعل إيجاد حل ثابت غير كافٍ، ويستلزم حلولًا قادرة على التكيف مع هذه التغيرات.

نظرًا لهذه التحديات، يصبح من الصعب الإعتماد على طرق تقليدية أو بسيطة لإختيار رؤوس العناقيد، مما يستدعي استخدام خوارزميات تحسين قادرة على التعامل مع هذه القيود وتحقيق توازن بين مختلف المعايير. **[5]**

13.2 خاتمة الفصل :

تم في هذا الفصل عرض المفاهيم الأساسية المتعلقة بشبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث تم التطرق إلى بنية الشبكة ومكوناتها، بالإضافة إلى نموذج الطاقة المعتمد وأهميته في تقليل استهلاك العقد. كما تم عرض مفهوم الاتصال داخل الشبكة، وتقنية التجميع (Clustering) باعتبارها أحد أهم الحلول لتحسين كفاءة الشبكة وتقليل استهلاك الطاقة.

تم أيضًا تقديم أهم المقاييس الأساسية لتقييم أداء الشبكة، مثل Throughput و Connectivity و Energy Consumption و Network Lifetime، والتي تُستخدم لاحقًا في تحليل ومقارنة أداء الخوارزميات المختلفة.

وبالنظر إلى التحديات المرتبطة بتحسين أداء هذه الشبكات، خاصة ما يتعلق باختيار رؤوس العناقيد وتحقيق توازن بين المعايير المختلفة، يصبح من الضروري اللجوء إلى تقنيات تحسين متقدمة.

وعليه، سيتم في الفصل الموالي تقديم مفاهيم التحسين وخوارزميات التحسين متعددة الأهداف، مع التركيز على الخوارزمية المقترحة في هذا العمل.

الفصل الثالث: التحسين والخوارزميات المستخدمة

1.3مقدمة الفصل :

بعد التطرق في الفصل السابق إلى شبكات الاستشعار اللاسلكية، ومشكلاتها الأساسية مثل محدودية الطاقة، ضعف الاتصال، وصعوبة اختيار رؤوس العناقيد، يتضح أن تحسين أداء هذه الشبكات لا يمكن أن يتم بالاعتماد على اختيار عشوائي فقط. فاختيار رأس العنقود يؤثر مباشرة على كمية الطاقة المستهلكة، عدد الحزم الواصلة إلى المحطة الأساسية، واستقرار الشبكة مع مرور الجولات.

في هذا الفصل، يتم تقديم مفهوم التحسين، ثم الخوارزميات الميتاهوريستية، وبعدها يتم شرح الخوارزميات المستعملة في هذا العمل: LEACH و K-Meansو .Fixed Set Search ويتم التركيز بشكل خاص على خوارزمية FSS لأنها الخوارزمية المقترحة لتحسين اختيار رؤوس العناقيد.

2.3مفهوم التحسينOptimization :

التحسين هو عملية البحث عن أفضل حل ممكن من بين مجموعة كبيرة من الحلول الممكنة، بحيث يحقق هذا الحل هدفًا معينًا أو مجموعة من الأهداف.

في شبكات الاستشعار اللاسلكية، لا نبحث فقط عن اختيار أي رؤوس عناقيد، بل نبحث عن اختيار مجموعة مناسبة من العقد لتكون Cluster Heads بحيث تحقق توازنًا بين عدة معايير:

- تقليل استهلاك الطاقة،
- تحسين الاتصال،
- تقليل المسافة بين العقد ورؤوس العناقيد،
- وزيادة عدد الحزم المرسلة إلى المحطة الأساسية.

- يمكن صياغة المشكلة كما يلي:

$$CH^* = \arg\max f(CH)$$

حيث :

* CH : تمثل أفضل مجموعة من رؤوس العناقيد .

f(CH) : تمثل دالة التقييم التي تقيس جودة الحل.

3.3مشكلة اختيار رؤوس العناقيد كمشكلة تحسين :

اختيار رؤوس العناقيد في WSN ليس قرارًا بسيطًا، لأن كل اختيار يؤثر على الشبكة كاملة. إذا تم اختيار عقد بعيدة عن بقية العقد، فإن العقد العادية تستهلك طاقة كبيرة أثناء الإرسال. وإذا تم اختيار رؤوس عناقيد غير متصلة جيدًا بالمحطة الأساسية، فإن البيانات قد لا تصل. وإذا تم اختيار عقد ذات طاقة منخفضة، فإنها قد تموت بسرعة وتؤدي إلى تدهور أداء الشبكة.

لذلك، فإن اختيار رؤوس العناقيد يعتبر مشكلة تحسين متعددة الأهداف .

في هذا العمل، الحل يمثل مجموعة من العقد المختارة كرؤوس عناقيد:

$$S=\{CH_1,CH_2,CH_3,...,CH_K\}$$

حيث k :هو عدد رؤوس العناقيد المختارة.

- **فضاء البحث (Search Space) :**

إذا كان لدينا Nعقدة، فإن عدد الحلول الممكنة لاختيار رؤوس العناقيد هو: $|\Omega|= 2^N$

وهذا عدد كبير جدًا، مما يجعل البحث الشامل غير ممكن عمليًا.

- **تعقيد المشكلة (Complexity):**

تُصنف مشكلة اختيار رؤوس العناقيد (CH Selection) رياضياً ضمن مشاكل**NP-Hard** . مما يعني أنه مع زيادة عدد العقد، يصبح من المستحيل إيجاد الحل الأمثل المطلق (Global Optimum) باستخدام الطرق الرياضية التحليلية التقليدية في وقت زمني معقول. وهذا التعقيد الحسابي هو ما يُحتم علينا اللجوء إلى الخوارزميات الميتاهوريستية (مثل: FSS)للوصول إلى حلول شبه مثالية (Near-optimal solutions) بكفاءة عالية. **[17]**، **[18]**

4.3. التحسين متعدد الأهداف Multi-objective Optimization :

في شبكاتWSN ، توجد عدة أهداف متعارضة، مثل : الطاقة و.Throughput

لذلك، يتم استعمال دالة تقييم تجمع هذه المعايير:

$$w1\times Throughput+w2\times Compactness+w3\times Connectivity+w4\times Energy = Score$$

حيث :

$$w1+w2+w3+w4=1$$

تعريف المقاييس رياضيًا :

- Throughput**:**

$$\text{Throughput Score} = \frac{\text{Delivered}}{\text{Alive Nodes}}$$

- Compactness**:**

$$\text{Compactness} = \frac{1}{1 + \text{AvgDist}}$$

- Connectivity:

$$\text{Connectivity} = \frac{\text{Reachable CH}}{\text{Total CH}}$$

- Energy: $$\text{Energy} = \frac{1}{\text{K}}\sum_{i\in \text{CH}} Ei$$

5.3. الخوارزميات الميتاهوريستية Metaheuristics :

الخوارزميات الميتاهوريستية هي خوارزميات تحسين تُستعمل عندما يكون فضاء البحث كبيرًا ومعقدًا، ولا يمكن تجربة جميع الحلول الممكنة.

في مشكلة اختيار رؤوس العناقيد، إذا كان لدينا 100 عقدة ونريد اختيار مجموعة منها كرؤوس عناقيد، فإن عدد الاحتمالات يكون كبيرًا جدًا. لذلك، تجربة كل المجموعات الممكنة غير عملية.

الميتاهوريستيك لا تضمن دائمًا إيجاد الحل الأمثل المطلق، لكنها تبحث عن حل جيد جدًا في وقت مقبول**[21]** .

تعتمد هذه الخوارزميات عادة على مبدأين أساسيين:

- **الاستكشاف Exploration :** البحث في مناطق مختلفة من فضاء الحلول لتجنب الوقوع في حل ضعيف.
- **الاستغلال Exploitation :** تحسين الحلول الجيدة الموجودة للوصول إلى حل أفضل.

نجاح أي خوارزمية ميتاهوريستية يعتمد على تحقيق توازن بين الاستكشاف والاستغلال. إذا زاد الاستكشاف، قد تضيع الخوارزمية وقتًا كبيرًا في حلول عشوائية. وإذا زاد الاستغلال فقط، قد تعلق الخوارزمية في حل محلي غير مثالي**[19] .، [20]**

6.3. الخوارزميات المستخدمة للمقارنة :

من أجل تقييم فعالية الخوارزمية المقترحة في هذا العمل، تم اعتماد خوارزميتين معروفتين للمقارنة، وهما **LEACH** و .**K-Means** اختيار هاتين الخوارزميتين لم يكن عشوائيًا، بل لأن كل واحدة منهما تمثل توجهًا مختلفًا في اختيار رؤوس العناقيد داخل شبكات الاستشعار اللاسلكية. فخوارزمية LEACH تمثل الطرق الاحتمالية البسيطة، بينما تمثل K-Means الطرق القائمة على التجميع المكاني والمسافة. وبمقارنة هاتين الطريقتين مع FSS يمكن إبراز مدى قدرة الخوارزمية المقترحة على تحسين الأداء العام للشبكة.

1.6.3. خوارزميةLEACH :

تُعد خوارزمية **LEACH**اختصارًا لـ **Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy**، وهي من أشهر البروتوكولات الهرمية المستخدمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية. تعتمد هذه الخوارزمية على تقسيم الشبكة إلى عناقيد، حيث يتم في كل عنقود اختيار عقدة خاصة تسمى **رأس العنقود** أو .**Cluster Head** تقوم هذه العقدة بجمع البيانات من العقد التابعة لها، ثم ترسلها إلى المحطة الأساسية.

الفكرة الأساسية في LEACH هي تدوير دور رأس العنقود بين العقد عبر الجولات المختلفة. أي أن العقدة التي تكون رأس عنقود في جولة معينة لا تبقى دائمًا كذلك، بل يتم اختيار عقد أخرى في الجولات اللاحقة. الهدف من هذا التدوير هو توزيع استهلاك الطاقة بين العقد، لأن رأس العنقود يستهلك طاقة أكبر من العقد العادية بسبب قيامه بمهام إضافية مثل استقبال البيانات، تجميعها، ثم إرسالها إلى المحطة الأساسية.

يعتمد اختيار رؤوس العناقيد في LEACH على احتمال معين. فإذا كان العدد المطلوب لرؤوس العناقيد هو KKK، وكان عدد العقد الحية في الشبكة هو NaliveN_{alive}Nalive، فإن احتمال اختيار عقدة كرأس عنقود يمكن تمثيله كما يلي:

$$P = \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{Nalive}}$$

حيث:

- P: احتمال اختيار العقدة كرأس عنقود .
- K: عدد رؤوس العناقيد المطلوب .
- Nalive: عدد العقد الحية في الشبكة .

تمر خوارزمية LEACH عادة بمرحلتين أساسيتين:

- **أولًا: مرحلة التهيئة Setup Phase :**

في هذه المرحلة يتم اختيار رؤوس العناقيد بشكل احتمالي. بعد ذلك تعلن العقد المختارة نفسها كرؤوس عناقيد، ثم تقوم العقد العادية بالانضمام إلى أقرب رأس عنقود أو إلى الرأس الذي يملك أفضل إشارة اتصال.

- **ثانيًا: مرحلة نقل البياناتSteady State Phase :**

بعد تشكيل العناقيد، تبدأ العقد العادية بإرسال بياناتها إلى رأس العنقود. يقوم رأس العنقود بتجميع البيانات وتقليل التكرار، ثم يرسلها إلى المحطة الأساسية.

رغم بساطة LEACH وسهولة تطبيقها، إلا أنها تعاني من عدة نقائص تؤثر على أدائها، خاصة في الشبكات الكبيرة أو الديناميكية. من أهم هذه النقائص أن اختيار رؤوس العناقيد يتم بطريقة احتمالية، دون الاعتماد بشكل دقيق على موقع العقدة أو طاقتها المتبقية أو قدرتها على الاتصال بالمحطة الأساسية. لذلك قد يتم اختيار عقدة بعيدة عن باقي العقد كرأس عنقود، مما يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة أثناء الإرسال. كما قد يتم اختيار عقدة ذات طاقة منخفضة، فتموت بسرعة وتؤثر على استقرار الشبكة.

إضافة إلى ذلك، لا تضمن LEACH أن تكون رؤوس العناقيد متصلة جيدًا بالمحطة الأساسية، خاصة إذا كانت الشبكة كبيرة أو إذا كانت المسافات بين العقد كبيرة. ولهذا السبب تم اعتماد LEACH في هذا العمل كخوارزمية مرجعية للمقارنة، من أجل إظهار الفرق بين الطرق الاحتمالية البسيطة والطرق القائمة على التحسين متعدد المعايير**[14]** .

2.6.3 خوارزمية K-Means :

تُعد خوارزمية **K-Means**من أشهر خوارزميات التجميع، وتُستخدم لتقسيم مجموعة من العناصر إلى عدد معين من المجموعات أو العناقيد. في سياق شبكات الاستشعار اللاسلكية، يتم اعتبار كل عقدة كنقطة في فضاء ثنائي الأبعاد، اعتمادًا على إحداثياتها

(x,y) ثم تقوم الخوارزمية بتقسيم العقد إلى K عناقيد حسب القرب المكاني.

تعتمد K-Means على مبدأ بسيط، وهو أن العقد التي تكون قريبة من بعضها يجب أن تنتمي إلى نفس العنقود. بعد تشكيل العناقيد، يتم اختيار العقدة الأقرب إلى مركز كل عنقود لتكون رأس العنقود.

تمر خوارزمية K-Means بالمراحل التالية:

- **أولًا: اختيار المراكز الأولية:**

في البداية يتم اختيار Kمراكز أولية للعناقيد. هذه المراكز قد تكون عشوائية أو مأخوذة من مواقع بعض العقد.

- **ثانيًا: إسناد العقد إلى أقرب مركز :**

يتم حساب المسافة بين كل عقدة وكل مركز، ثم تُسند العقدة إلى أقرب مركز. غالبًا تُستخدم المسافة الإقليدية:

$$d(i, c) = \sqrt{(\mathbf{xi} - \mathbf{xc})\mathbf{2} + (\mathbf{yi} - \mathbf{yc})\mathbf{2}}$$

حيث:

- d (i,c) : المسافة بين العقدة i والمركز c

- (xi,yi): إحداثيات العقدة .
- (xc,yc):إحداثيات مركز العنقود.

- **ثالثًا: تحديث مراكز العناقيد:**

بعد إسناد العقد إلى العناقيد، يتم حساب مركز جديد لكل عنقود اعتمادًا على متوسط إحداثيات العقد الموجودة فيه:

$$cx = \frac{1}{\mathrm{m}}\sum_{i=1}^{m} xi$$

$$cy = \frac{1}{\mathrm{m}}\sum_{i=1}^{m} yi$$

حيث m : هو عدد العقد داخل العنقود.

- **رابعًا: تكرار العملية :**

تُعاد عملية إسناد العقد وتحديث المراكز حتى تستقر المراكز أو يتم الوصول إلى عدد معين من التكرارات.

بعد انتهاء عملية التجميع، يتم اختيار العقدة الأقرب إلى مركز كل عنقود كرأس عنقود. هذه الطريقة تساعد على تقليل المسافة بين العقد ورؤوس العناقيد، مما يساهم في تقليل الطاقة المستهلكة أثناء إرسال البيانات داخل العنقود.

لكن رغم أن K-Means تعطي توزيعًا مكانيًا جيدًا للعناقيد، إلا أنها لا تأخذ بعين الاعتبار عدة عوامل مهمة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، مثل الطاقة المتبقية للعقد، جودة الاتصال مع المحطة الأساسية، أو قدرة رأس العنقود على إيصال البيانات. فقد تختار الخوارزمية عقدة قريبة من مركز العنقود لكنها ذات طاقة ضعيفة، مما يؤدي إلى موتها بسرعة. كما أنها قد تختار رؤوس عناقيد غير قادرة على الوصول إلى المحطة الأساسية، خاصة في حالة الاتصال متعدد القفزات.

لذلك، يمكن القول إن K-Means مناسبة لتحسين التوزيع المكاني وتقليل المسافات، لكنها غير كافية وحدها لتحقيق توازن شامل بين الطاقة، الاتصال، وكمية البيانات الواصلة. ولهذا تم استخدامها في هذا العمل

كخوارزمية مقارنة ثانية، لأنها تمثل طريقة تعتمد على المسافة، في حين أن FSS تعتمد على تقييم متعدد المعايير .

[15]

التنفيذ البرمجي لK-Means :

يوضح المقتطف البرمجي التالي دالة run_kmeans_wsn المكتوبة بلغةPython ، والتي تعتمد على مكتبة sklearn لتقسيم العقد الحية جغرافياً بناءً على المسافة، ثم اختيار العقدة ذات الطاقة الأكبر داخل كل عنقود لتكون رأس العنقود:

```
from sklearn.cluster import KMeans
import numpy as np


def run_kmeans_wsn(net, round_idx):


    alive = net.alive_mask
    alive_idx = np.where(alive)[0]


    k = int(round(0.05 * len(alive_idx)))


    kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=round_idx)
    labels = kmeans.fit_predict(net.positions[alive_idx])


    ch_set = set()


    for c in range(k):
```

```
        cluster_nodes = alive_idx[np.where(labels == c)[0]]


        best_in_cluster = int(cluster_nodes[np.argmax(net.residual_energy[cluster_nodes])])
        ch_set.add(best_in_cluster)


    return np.array(sorted(ch_set), dtype=int)
```

7.3 خوارزمية Fixed Set Search (FSS) :

1.7.3 التعريف العام لخوارزميةFSS :

تُعد خوارزمية **Fixed Set Search**، أو اختصارًا **FSS**، من خوارزميات التحسين التي تعتمد على فكرة استغلال المعلومات المستخرجة من الحلول الجيدة من أجل بناء حلول أفضل. تقوم هذه الخوارزمية على مبدأ أساسي مفاده أن الحلول ذات الجودة العالية غالبًا ما تشترك في بعض العناصر المهمة. وبما أن هذه العناصر تتكرر في أفضل الحلول، فهذا يعني أنها قد تساهم بشكل إيجابي في جودة الحل النهائي.

في سياق هذا العمل، يمثل كل حل مجموعة من العقد المختارة كرؤوس عناقيد. إذا ظهرت عقدة معينة عدة مرات ضمن أفضل الحلول، فهذا قد يدل على أنها عقدة مناسبة لتكون رأس عنقود، بسبب موقعها الجيد، أو طاقتها المتبقية، أو قدرتها على تحسين الاتصال داخل الشبكة.

بدل أن تبني الخوارزمية كل حل جديد بطريقة عشوائية من الصفر، تقوم FSS بتحليل أفضل الحلول السابقة، ثم تستخرج منها مجموعة من العناصر المهمة تسمى **Fixed Set**. بعد ذلك يتم استعمال هذه المجموعة كنقطة انطلاق لبناء حلول جديدة. هذا الأسلوب يسمح بالحفاظ على الأجزاء الجيدة من الحلول السابقة، وفي نفس الوقت يترك مجالًا للتنويع من خلال إضافة عناصر جديدة.

بمعنى آخر، تحاول FSS الجمع بين فكرتين أساسيتين:

- استغلال الحلول الجيدة السابقة من خلال Fixed Set.
- اكتشاف حلول جديدة من خلال إضافة عقد أخرى وتطبيق البحث المحلي.

وهذا ما يجعلها مناسبة للمشاكل التركيبية مثل مشكلة اختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية**[22]** .، **[24]**

2.7.3 لماذا FSS مناسبة لمشكلة اختيار رؤوس العناقيد؟ :

مشكلة اختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية ليست مشكلة بسيطة، لأنها تعتمد على عدة عوامل في نفس الوقت. فالعقدة المناسبة لتكون رأس عنقود ليست فقط العقدة الأقرب إلى باقي العقد، بل يجب أن تمتلك طاقة كافية، وأن تكون قادرة على التواصل مع المحطة الأساسية، وأن تساهم في زيادة كمية البيانات الواصلة.

لهذا السبب، تُعتبر هذه المشكلة مشكلة تركيبية **Combinatorial Problem**، لأن الحل عبارة عن مجموعة من العقد المختارة من بين عدد كبير من العقد الحية. فإذا كان لدينا NNNعقدة، فإن كل عقدة يمكن أن تكون إما رأس عنقود أو عقدة عادية. وبالتالي فإن عدد الحلول الممكنة قد يصل إلى:

$$|\Omega| = 2^N$$

وهذا العدد يصبح ضخمًا جدًا عند زيادة عدد العقد. على سبيل المثال، إذا كان لدينا 100 عقدة، فإن عدد التركيبات الممكنة يكون:

$$2^{100}$$

وهو عدد لا يمكن اختباره بطريقة شاملة. لذلك، يصبح من الضروري استعمال خوارزميات تحسين قادرة على البحث داخل هذا الفضاء الكبير دون تجربة كل الحلول.

تتميز FSS بأنها لا تبحث بطريقة عشوائية بالكامل، ولا تعتمد فقط على معيار واحد مثل المسافة، بل تستفيد من الحلول الجيدة وتعيد استخدامها بطريقة ذكية. فهي تحتفظ بالعقد التي تظهر بشكل متكرر داخل أفضل الحلول، ثم تكمل الحل بعقد أخرى يتم اختيارها حسب دالة تقييم متعددة المعايير.

لذلك، فهي مناسبة لموضوع هذا العمل للأسباب التالية:

- أولًا : لأنها تتعامل جيدًا مع المشاكل التركيبية التي يكون الحل فيها عبارة عن مجموعة من العناصر.

- ثانيًا : لأنها تقلل من حجم البحث من خلال تثبيت بعض العناصر المهمة.
- ثالثًا :لأنها تسمح بإدخال التنويع لتجنب الوقوع في نفس الحلول دائمًا.
- رابعًا : لأنها قابلة للتكييف مع عدة معايير مثل الطاقة، الاتصال، المسافة، و.Throughput
- خامسًا : لأنها تسمح بتحديث الحلول في كل جولة حسب حالة الشبكة، خاصة أن طاقة العقد تتغير مع مرور الوقت.

3.7.3 تمثيل الحل فيFSS :

في هذا العمل، يمثل الحل مجموعة من العقد الحية المختارة كرؤوس عناقيد. يمكن تمثيل الحل بالشكل التالي:

$$S=\{id1,id2,id3,...,idk\}$$

حيث:

- S : الحل الحالي .
- id :معرف العقدة المختارة كرأس عنقود .
- K : عدد رؤوس العناقيد المختارة .

مثال:

$$S=\{4,12,25,39,60\}$$

هذا يعني أن العقد ذات المعرفات 4 و12 و25 و39 و60 تم اختيارها كرؤوس عناقيد.

كما يمكن تمثيل الحل أيضًا باستعمال متجه ثنائي:

$$\mathbf{X = (x_1 , x_2 , ..., x_N)}$$

حيث :

$$xi = \begin{cases} 1 & \text{رأس عنقود} \\ 0 & \text{عقدة عادية} \end{cases}$$

مثال:

$$X=(0,1,0,0,1,0,1)$$

يعني أن العقد 2 و5 و7 تم اختيارها كرؤوس عناقيد.

يساعد هذا التمثيل على فهم طبيعة المشكلة، لأن اختيار رؤوس العناقيد هو في الحقيقة اختيار مجموعة جزئية من العقد. كما يسمح بتطبيق عمليات مثل الإضافة، الحذف، أو الاستبدال أثناء البحث المحلي.

4.7.3 توليد المجتمع الأولي Population Generation :

تبدأ FSS بتوليد مجموعة من الحلول الأولية تسمى **Population**. كل حل داخل هذا المجتمع يمثل اختيارًا ممكنًا لرؤوس العناقيد.

يتم توليد كل حل باختيار مجموعة من العقد الحية بشكل عشوائي. ولا يتم إدراج العقد الميتة ضمن الحل، لأنها لم تعد قادرة على إرسال أو استقبال البيانات.

في هذا العمل، لا يتم فرض عدد ثابت لرؤوس العناقيد دائمًا، بل يتم السماح للخوارزمية باختيار عدد ضمن مجال معين. هذا المجال يمكن تمثيله كما يلي:

$$CHmin=0.25\times N$$

$$CHmax=0.35\times N$$

حيث:

- CHmin: الحد الأدنى لعدد رؤوس العناقيد .
- CHmax: الحد الأعلى لعدد رؤوس العناقيد .
- N : عدد العقد.

السماح بتغير عدد رؤوس العناقيد يعطي الخوارزمية مرونة أكبر. فإذا كان عدد رؤوس العناقيد قليلًا جدًا، قد تزيد المسافات بين العقد ورؤوس العناقيد. وإذا كان العدد كبيرًا جدًا، قد يزداد استهلاك الطاقة بسبب كثرة العقد

التي تقوم بدور رأس العنقود. لذلك، فإن استعمال مجال معين يسمح بتجريب حلول مختلفة وتحقيق توازن أفضل.

بعد توليد المجتمع الأولي، يتم حساب قيمة دالة التقييم لكل حل، ثم يتم ترتيب الحلول من الأفضل إلى الأسوأ.

5.7.3 دالة التقييم Fitness Function :

تُعتبر دالة التقييم أهم عنصر في خوارزميةFSS ، لأنها تحدد جودة كل حل. في مشكلة اختيار رؤوس العناقيد، لا يمكن تقييم الحل اعتمادًا على معيار واحد فقط، لأن أداء الشبكة يتأثر بعدة عوامل في نفس الوقت.

في هذا العمل، تعتمد دالة التقييم على أربعة معايير أساسية:

- Throughput
- Compactness
- Connectivity
- Energy

وتكتب دالة التقييم النهائية كما يلي:

$$Score(S)=0.60\times Throughput+0.20\times Compactness+0.15\times Connectivity+0.05\times Energy$$

"تم تحديد هذه الأوزان بناءً على طبيعة التطبيقات الحرجة لشبكات .WSN حيث أُعطيت الأولوية القصوى للإنتاجية (Throughput) بوزن 0.60 لأن الهدف الأسمى للشبكة هو وصول البيانات الموثوقة للمحطة. بينما أُعطي وزن 0.20 لتقليل المسافات (Compactness) و 0.15 لضمان الاتصال .(Connectivity) أما الطاقة فقد أعطيت وزناً أقل (0.05)، وذلك لأن تحسين المسافات وجودة الاتصال سيؤديان بطبيعة الحال إلى تقليل استهلاك الطاقة بشكل ضمني وفعال".

يعكس هذا التوزيع في الأوزان أهمية كل معيار في هذا العمل. فقد تم إعطاء أكبر وزن لـ Throughput لأنه يمثل قدرة الشبكة على إيصال البيانات إلى المحطة الأساسية. أما Compactness فقد تم إعطاؤه وزنًا مهمًا لأنه يرتبط بتقليل المسافات وبالتالي تقليل الطاقة المستهلكة. أما Connectivity فيضمن أن رؤوس العناقيد قادرة على الوصول إلى المحطة الأساسية. وأخيرًا، تم إدراج Energy لتفادي اختيار عقد ضعيفة جدًا كرؤوس عناقيد.

- **أولًا Throughput :**

يمثل Throughput قدرة الشبكة على إيصال البيانات بنجاح إلى المحطة الأساسية. في هذا العمل، يتم حسابه بشكل تقريبي من خلال نسبة العقد التي تستطيع إرسال بياناتها عبر رؤوس عناقيد قادرة على الوصول إلى المحطة الأساسية.

$$\text{Throughput Score} = \frac{\text{Delivered}}{\text{Alive Nodes}}$$

حيث:

- Delivered العقد التي تصل بياناتها بنجاح .
- AliveNodes عدد العقد الحية .

إذا كان Throughput مرتفعًا، فهذا يعني أن أغلب العقد تستطيع إيصال بياناتها، وهو مؤشر مهم على كفاءة الشبكة.

- **ثانيًا Compactness :**

يقيس Compactness مدى قرب العقد من رؤوس العناقيد. كلما كانت العقد أقرب إلى رؤوس العناقيد، قلّت الطاقة المستهلكة في الإرسال داخل العنقود.

يمكن تمثيله كما يلي:

$$\text{Compactness} = 1 - \frac{\text{AvgDist}}{\text{Dmax}}$$

حيث:

- AvgDist : متوسط المسافة بين العقد وأقرب رأس عنقود .
- Dmax: قيمة مرجعية للمسافة القصوى داخل الشبكة .

إذا كانت المسافات صغيرة، تكون قيمة Compactness كبيرة، وهذا يدل على حل جيد.

- **ثالثًا Connectivity :**

يمثل Connectivity قدرة رؤوس العناقيد على الوصول إلى المحطة الأساسية، إما مباشرة أو عبر رؤوس عناقيد أخرى في حالة الاتصال متعدد القفزات.

$$\text{Connectivity} = \frac{\text{Reachable CH}}{\text{Total CH}}$$

حيث:

- ReachableCH : رؤوس العناقيد القادرة على الوصول إلى المحطة الأساسية .
- TotalCH : العدد الكلي لرؤوس العناقيد .

هذا المعيار مهم جدًا، لأن اختيار رؤوس عناقيد جيدة من حيث الموقع الداخلي لا يكفي إذا لم تكن قادرة على إيصال البيانات إلى المحطة الأساسية.

- **رابعًا Energy :**

يقيس هذا المعيار متوسط الطاقة المتبقية في رؤوس العناقيد المختارة.

$$\text{Energy} = \frac{1}{\text{K}} \sum_{i \in \text{CH}} \frac{Ei}{\text{Einitial}}$$

حيث:

- Ei: الطاقة المتبقية للعقدة .
- $E_{initial}$ الطاقة الابتدائية .
- K : عدد رؤوس العناقيد .

اختيار رؤوس عناقيد ذات طاقة جيدة يساعد على إطالة عمر الشبكة ويقلل من احتمال موت رأس العنقود بسرعة.

6.7.3. الهيكل البرمجي لخوارزمية FSS :

تتطلب خوارزمية البحث الميتاهيورستي FSS بنية برمجية متطورة لضمان تنفيذها بكفاءة. فيما يلي الأجزاء البرمجية الثلاثة الأساسية التي تم تطويرها في بيئة المحاكاة:

أ) مرحلة البناء الموجه (GRASP Construction) : يوضح هذا المقتطف دالة البناء construct وكيف تعتمد الخوارزمية على الطاقة والمسافة لاختيار العقد بشكل موجه لضمان تغطية الشبكة:

```
def construct(self, start_set=None, kmax=0):
 H = []
 while np.any(uncovered) and len(H) < kmax:
      cand_idx = np.where(alive & ~is_ch)[0]
      h = self.p.alpha1 * energy[cand_idx] + self.p.alpha2 * distance[cand_idx]
      thr = np.max(h) - self.p.gamma * (np.max(h) - np.min(h))
      u = int(self.rng.choice(cand_idx[h >= thr]))
      H.append(u)
      uncovered[self.net.within_rc[u]] = False
 return np.array(H, dtype=int)
```

ب) مرحلة استخراج المجموعة الثابتة(Fixed Set) : يبين الكود التالي كيفية حساب تكرار العقد في الحلول النخبوية السابقة لتثبيتها في الجولات القادمة:

```
def build_fixed_set(self, elite):
  counts = np.zeros(self.net.n_nodes, dtype=float)
  for key in elite:
       counts[np.array(key, dtype=int)] += 1.0
  freq = counts / float(len(elite))

  energy_ratio = self.net.residual_energy / self.net.initial_energy
  fixed_mask = (freq >= self.p.tau) & (energy_ratio >= self.p.theta)
  return np.where(fixed_mask & self.net.alive_mask)[0].astype(int)
```

ج) دورة التنفيذ الرئيسية (Main Loop) : يلخص المقتطف التالي حلقة التنفيذ الرئيسية التي تدمج بين البناء العشوائي واستخدام المجموعة الثابتة لاستخراج أفضل حل:

```
def run(self):
 for _ in range(self.p.max_iter1):
      ch = self.local_search(self.construct(kmax=30))
      self.update_elite(elite, ch, self.eval_fitness(ch))

     if self.p.use_phase2 and elite:
      fixed = self.build_fixed_set(elite)
      for _ in range(self.p.max_iter2):
           ch = self.local_search(self.construct(start_set=fixed, kmax=30))
           best_ch = ch if self.eval_fitness(ch) < best_f else best_ch
 return best_ch
```

7.7.3 اختيار الحلول النخبويةElite Solutions :

بعد توليد المجتمع الأولي وحساب قيمة Score لكل حل، يتم ترتيب الحلول ترتيبًا تنازليًا. الحلول التي تحصل على أعلى قيم تعتبر حلولًا جيدة، وتسمى .**Elite Solutions**

الهدف من اختيار الحلول النخبوية هو التركيز على الحلول التي تحتوي على خصائص مفيدة. فبدل استعمال كل الحلول، بما فيها الضعيفة، تقوم FSS بتحليل أفضل الحلول فقط، لأن احتمال احتوائها على عقد مناسبة كرؤوس عناقيد يكون أكبر.

يمكن تمثيل مجموعة الحلول النخبوية كما يلي:

$$Elite=\{S1,S2,...,Sm\}$$

حيث : تمثل Siحلًا من أفضل الحلول.

هذه المرحلة مهمة لأنها تمثل مصدر المعرفة داخل الخوارزمية. فالعقد التي تظهر بشكل متكرر داخل هذه الحلول يتم اعتبارها عناصر قوية يمكن استغلالها في بناء حلول جديدة.

8.7.3 بناء Fixed Set :

بعد اختيار الحلول النخبوية، يتم حساب تكرار ظهور كل عقدة داخل هذه الحلول. إذا ظهرت عقدة معينة عدة مرات، فهذا يعني أنها غالبًا عنصر جيد في الحلول ذات الأداء المرتفع.

يعرف تكرار العقدة iiiكما يلي: إذا كانت العقدة i موجودة في الحلS غير ذلك

$$\mathbf{Freq(i)} \sum_{S \in Elite} \mathbf{presence(i, S)}$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{إذا كانت العقدة i موجودة في الحل S} \\ 0 & \text{غير ذلك} \end{cases}$$

بعد حساب التكرارات، يتم اختيار عدد من العقد الأكثر تكرارًا لتكوين:Fixed Set

$$\text{Fixed Set} = \{ i | Freq(i) \text{ مرتفع} \}$$

9.7.3 التنويع Diversification داخلFSS :

رغم أهميةFixed Set ، إلا أن الاعتماد عليه بشكل صارم قد يؤدي إلى مشكلة أخرى، وهي الوقوع في حل محلي. فإذا كانت الخوارزمية تختار دائمًا نفس العقد الأكثر تكرارًا، فإنها قد تعيد إنتاج حلول متشابهة جدًا، وبالتالي لا تستكشف مناطق جديدة من فضاء البحث.

لذلك يتم إدخال مبدأ **Diversification**أو التنويع. يعني ذلك أن الخوارزمية تحتفظ بجزء من المعرفة المستخرجة من الحلول الجيدة، لكنها لا تجعل عملية الاختيار جامدة تمامًا.

يتم التنويع من خلال:

- اختيار بعض الحلول النخبوية عشوائيًا بدل استعمالها كلها دائمًا .
- اختيار Fixed Set من بين أفضل المرشحين بطريقة جزئية عشوائية .

- تغيير حجم Fixed Set عند حدوث ركود .
- السماح بإضافة عقد جديدة ليست موجودة في الحلول السابقة .

هذا التنويع يسمح للخوارزمية بتحقيق توازن بين:

- **Exploitation**: استغلال الحلول الجيدة .
- **Exploration**: البحث في مناطق جديدة .

وبالتالي، فإن **FSS** لا تصبح مجرد خوارزمية تكرر نفس الحلول، بل تبقى قادرة على توليد بدائل جديدة.

10.7.3 إكمال الحل Solution Completion :

بعد تحديدFixed Set ، لا يكون الحل كاملًا بالضرورة، لأن Fixed Set يحتوي فقط على جزء من رؤوس العناقيد. لذلك، يجب إكمال الحل بإضافة عقد جديدة حتى يصل إلى عدد مناسب من رؤوس العناقيد.

لا تتم عملية الإكمال بطريقة عشوائية بالكامل، بل يتم تقييم العقد المرشحة قبل إضافتها. بمعنى أن الخوارزمية تجرب إضافة عقدة معينة إلىFixed Set ، ثم تحسب Score للحل الناتج. بعد ذلك يتم ترتيب العقد المرشحة حسب جودتها.

لتجنب الاختيار الحتمي دائمًا، يتم استعمال مفهوم قريب من **Restricted Candidate List (RCL)**. هذه القائمة تحتوي على أفضل المرشحين فقط، ثم يتم اختيار عقدة منها بشكل عشوائي.

الفائدة من RCL أنها تحقق توازنًا بين الذكاء والعشوائية:

- الذكاء: لأن الاختيار يتم من بين أفضل المرشحين .
- العشوائية: لأن الخوارزمية لا تختار دائمًا نفس العقدة الأولى .

وبهذا الشكل يتم بناء حل جديد يجمع بين العقد المثبتة في Fixed Set وعقد أخرى مختارة بطريقة موجهة.

11.7.3 البحث المحليLocal Search :

بعد بناء الحل الجديد، يتم تطبيق مرحلة البحث المحلي من أجل تحسينه. البحث المحلي يعتمد على فكرة بسيطة، وهي تعديل صغير في الحل الحالي ثم اختبار هل أدى هذا التعديل إلى تحسين الأداء.

في هذا العمل، يتم البحث المحلي من خلال عملية استبدال. أي يتم حذف رأس عنقود من الحل، ثم إضافة عقدة أخرى غير مختارة، وبعد ذلك يتم حساب Score للحل الجديد.

إذا كان لدينا الحل:

$$S=\{4,10,25,40\}$$

يمكن حذف العقدة 10 وإضافة العقدة 33:

$$S'=\{4,25,40,33\}$$

ثم تتم المقارنة:

$$Score(S')>Score(S)$$

إذا كانت النتيجة صحيحة، يتم قبول الحل الجديد. أما إذا لم يتحسنScore ، يتم الاحتفاظ بالحل القديم.

- أهمية البحث المحلي تكمن في أنه يسمح بتحسين الحلول بعد بنائها، بدل الاكتفاء بالحل الناتج من Fixed Set.فقد يكون الحل جيدًا، لكن استبدال عقدة واحدة فقط قد يجعله أفضل من حيث الطاقة أو الاتصال أو المسافة.

- من الناحية الرياضية، تتم عملية البحث المحلي عن طريق استكشاف الجوار - (Neighborhood (N(S))للحل الحالي .(S) يتم توليد الجوار عن طريق استبدال رأس عنقود واحد) (u) حيث $u \in$ S)) بعقدة عادية واحدة) (v) حيث .($v \notin S$) إذا كان الحل الجديد ('S) يحقق تقييماً أعلى أي أن(Score(S') > Score(S)) ، يتم اعتماده. هذا يضمن تحسيناً دقيقاً (Fine-tuning) للحلول دون إحداث تغيير جذري يدمر البنية القوية للمجموعة الثابتة.(Fixed Set)

وبذلك تلعب Local Search دورًا مهمًا في رفع جودة الحلول النهائية.

12.7.3 التعامل مع الركود Stagnation :

أثناء تنفيذ الخوارزمية، قد يحدث أن تمر عدة تكرارات دون أي تحسن في أفضل .Score تسمى هذه الحالة **Stagnation**أو الركود.

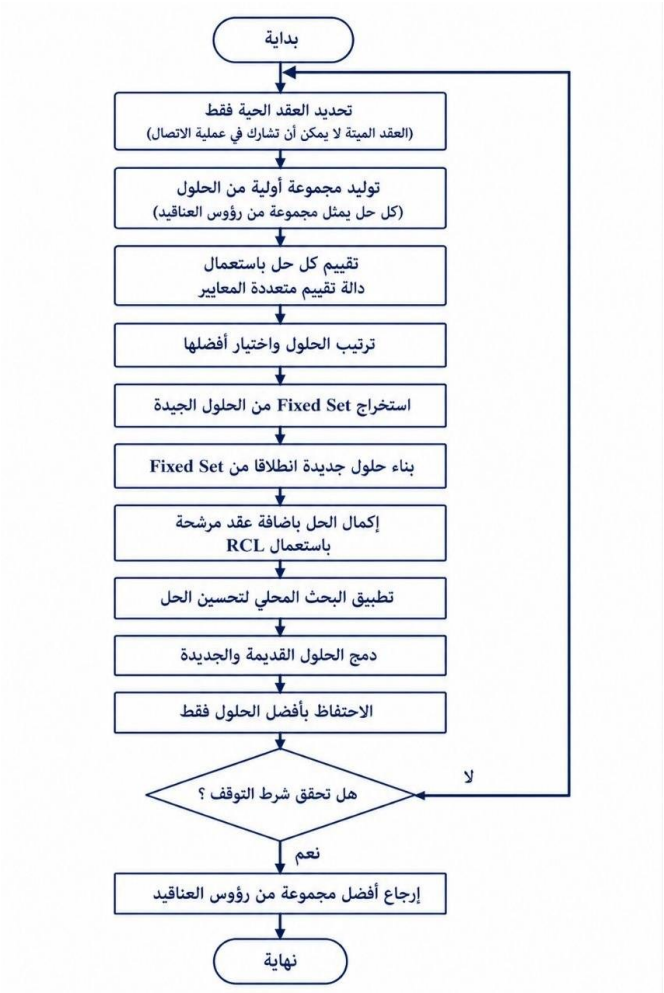
الركود يعني أن الخوارزمية أصبحت تدور حول نفس النوع من الحلول، ولم تعد قادرة على إيجاد حل أفضل. لمعالجة ذلك، يتم تغيير بعض الإعدادات داخلFSS ، خاصة حجم.Fixed Set

حجم Fixed Set يؤثر مباشرة على سلوك الخوارزمية:

- إذا كان Fixed Set كبيرًا، فإن الخوارزمية تعتمد كثيرًا على الحلول السابقة، أي أنها تزيد من الاستغلال.
- إذا كان Fixed Set صغيرًا، فإن الخوارزمية تترك حرية أكبر لإضافة عقد جديدة، أي أنها تزيد من الاستكشاف.

لذلك، عند حدوث الركود، يتم تغيير حجم Fixed Set من أجل فتح المجال أمام حلول مختلفة. هذه الآلية تساعد الخوارزمية على الخروج من الحلول المحلية، وتزيد من قدرتها على تحسين الأداء مع مرور التكرارات**[23]** .

13.7.3 المراحل العامة لخوارزميةFSS :



الشكل رقم 3: مراحل عمل خوارزمية FSS

3. 8 . تحليل سلوك خوارزميةFSS :

تعتمد خوارزمية FSS على توازن مهم بين الاستكشاف والاستغلال. الاستغلال يظهر من خلال استعمال Fixed Set، لأن الخوارزمية تحتفظ بالعقد التي أثبتت فعاليتها داخل الحلول الجيدة. أما الاستكشاف فيظهر من خلال التنويع، وإضافة عقد جديدة، وتغيير حجم Fixed Set عند حدوث الركود.

هذا التوازن مهم جدًا في مشكلة اختيار رؤوس العناقيد. فإذا اعتمدنا فقط على الاستغلال، قد تبقى الخوارزمية عالقة في حل محلي. وإذا اعتمدنا فقط على الاستكشاف، تصبح العملية عشوائية جدًا وتحتاج إلى وقت كبير للوصول إلى حل جيد.

ما يميز FSS هو أنها لا تبدأ من الصفر في كل مرة، بل تستفيد من التجارب السابقة. فعند كل تكرار، يتم الاحتفاظ بالأجزاء الجيدة من الحلول، ثم يتم بناء حلول جديدة حولها. وهذا يسمح بتقليل فضاء البحث وتحسين جودة الحلول تدريجيًا.

"إضافة إلى ذلك، تتميز خوارزمية FSS عن غيرها من الخوارزميات الميتاهوريستية الشهيرة (مثل الخوارزميات الجينية) بكونها تحد من فضاء البحث عبر تثبيت العناصر القوية .(Fixed Set) هذا الاستغلال الذكي للمعلومات السابقة يقلل من التعقيد الحسابي (Computational Complexity) ويُسرّع من سرعة التقارب (Convergence rate)نحو الحل الجيد، مقارنة بالطرق التي تبني الحلول بطريقة عشوائية بحتة في كل تكرار".

9.3 الفرق بين FSS و LEACH وK-Means :

تختلف الخوارزميات الثلاث في طريقة اختيار رؤوس العناقيد:

- تعتمد LEACH على العشوائية والاحتمال. لذلك فهي بسيطة وسريعة، لكنها لا تضمن اختيار رؤوس عناقيد مناسبة من حيث الموقع أو الطاقة أو الاتصال.
- أما K-Means فتعتمد على المسافة، حيث تحاول تكوين عناقيد متوازنة مكانيًا. لكنها لا تهتم بشكل كافٍ بالطاقة المتبقية أو بقدرة رؤوس العناقيد على الوصول إلى المحطة الأساسية.
- أما FSS فهي تعتمد على التحسين متعدد المعايير. فهي لا تختار رؤوس العناقيد بناءً على معيار واحد، بل تعتمد على دالة تقييم تشمل Throughput و Compactnessو Connectivityو .Energyكما أنها تستفيد من أفضل الحلول السابقة من خلالFixed Set ، ثم تحسن الحلول باستعمال Local Search.

لذلك، يمكن اعتبار FSS أكثر مرونة من LEACH وK-Means، لأنها تجمع بين التقييم متعدد المعايير والبحث الذكي داخل فضاء الحلول.

10.3 علاقة FSS بأهداف هذا العمل :

الهدف الأساسي من هذا العمل هو تحسين أداء شبكة الاستشعار اللاسلكية من خلال اختيار رؤوس عناقيد مناسبة. وتخدم FSS هذا الهدف من عدة جوانب.

- فمن ناحيةThroughput : تعطي الخوارزمية وزنًا كبيرًا لهذا المعيار، مما يجعلها تفضل الحلول التي تسمح بوصول عدد أكبر من البيانات إلى المحطة الأساسية.
- Connectivity: تتحقق الخوارزمية من قدرة رؤوس العناقيد على الوصول إلى المحطة الأساسية، سواء بشكل مباشر أو عبر رؤوس عناقيد أخرى Energy .
- Energy : تراعي الخوارزمية الطاقة المتبقية في رؤوس العناقيد، حتى لا يتم اختيار عقد ضعيفة جدًا.
- Compactness: تحاول الخوارزمية تقليل المسافة بين العقد ورؤوس العناقيد، مما يقلل الطاقة المستهلكة أثناء الاتصال الداخلي.

وبذلك، فإن FSS لا تحسن جانبًا واحدًا فقط من الشبكة، بل تحاول تحقيق توازن بين عدة جوانب مهمة.

11.3 خاتمة الفصل :

تم في هذا الفصل عرض مفهوم التحسين وعلاقته بمشكلة اختيار رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية. كما تم توضيح أن هذه المشكلة تُعد مشكلة تحسين متعددة الأهداف، لأنها تعتمد على عدة معايير مثل الطاقة، الاتصال، المسافة، وكمية البيانات الواصلة إلى المحطة الأساسية.

كما تم شرح الخوارزميات المستخدمة للمقارنة، وهي LEACH كطريقة احتمالية، و K-Meansكطريقة قائمة على التجميع المكاني. بعد ذلك تم التركيز على خوارزمية FSS باعتبارها الخوارزمية المقترحة في هذا العمل.

وقد تم توضيح أن FSS تعتمد على استخراج Fixed Set من أفضل الحلول، ثم بناء حلول جديدة وتحسينها باستعمال البحث المحلي. هذا يجعلها مناسبة لمشكلة اختيار رؤوس العناقيد، خاصة عندما يكون الهدف هو تحقيق توازن بين Throughput و Connectivityوالطاقة و.Compactness

في الفصل الموالي، سيتم عرض نتائج المحاكاة وتحليل أداء الخوارزميات الثلاث اعتمادًا على المقاييس المعتمدة في هذا العمل.

الفصل الرابع: المحاكاة والتقييم التجريبي

1.4 مقدمة الفصل:

بعد التطرق في الفصول السابقة إلى الإطار النظري لشبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN) ومناقشة التحديات الكبرى التي تواجهها، وخاصة مشكلة استنزاف الطاقة والاتصال، وبعد استعراض خوارزميات التجميع (Clustering)مثل K-Means وتفصيل الخوارزمية المقترحة المعتمدة على البحث الميتاهيورستي Fixed Set) (Search - FSS، ننتقل في هذا الفصل إلى التقييم العملي.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة وتحليل أداء خوارزمية FSS ومقارنتها بشكل شامل مع خوارزمية K-Means ضمن بيئة محاكاة برمجية. سيتم عرض إعدادات المحاكاة، ثم التحليل التفصيلي لأربعة سيناريوهات مختلفة من حيث توزع العقد وموقع المحطة الأساسية، بالاعتماد على مقاييس الأداء الرئيسية: الإنتاجية(Throughput) ، وعمر الشبكة(Network Lifetime) ، والتكلفة الحسابية (Computational Cost) .

2.4 بيئة المحاكاة :

1.2.4 أدوات المحاكاة :

تم تطوير بيئة المحاكاة بالكامل باستخدام :

لغة**Python** : وهي لغة برمجة مرنة للغاية ومعتمدة على نطاق واسع في الحوسبة العلمية ومحاكاة الشبكات. الدافع وراء اختيار بايثون هو الدعم الواسع للمكتبات وقدرات المعالجة القوية. على وجه التحديد،**[25]** ، **[28]**

تم استخدام المكتبات الرئيسية التالية:

NumPy : استخدمت للعمليات الرياضية المعقدة، وحسابات المسافات، ومعالجة المصفوفات بكفاءة عالية والمطلوبة لنمذجة عقد الاستشعار ومواقعها**[26]** .

Matplotlib وSeaborn : استُخدمت لإنشاء تمثيلات رسومية عالية الجودة، بما في ذلك طبولوجيا الشبكة، والمنحنيات البيانية، والمخططات الشريطية(Bar charts) ، ومخططات الصندوق (Box plots) للتحليل الإحصائي المقارن**[27]** .

2.2.4 إعدادات ومعلمات الشبكة :

تمت صياغة نموذج الشبكة بناءً على نموذج طاقة الراديو من الدرجة الأولى (First Order Radio Energy Model). تفترض المحاكاة حقلاً تتوزع فيه عقد الاستشعار بشكل عشوائي. يتم تلخيص معلمات المحاكاة الرئيسية المستخدمة في تجاربنا على النحو التالي:

الوصف	القيمة(Value)	المعلمة(Parameter)
منطقة مربعة يتم نشر العقد فيها.	100×100 m 2	مساحة الشبكة
يتم توزيعها بشكل عشوائي موحد	100 عقدة	عدد العقد (N)
تقع في مركز منطقة المحاكاة لتقليل مسافات الإرسال القصوى.	(50 ,50)	موقع المحطة الأساسية (BS)
طاقة البطارية لكل مستشعر في بداية المحاكاة.	Joule 0.5	الطاقة الابتدائية للعقدة
حجم البيانات المرسلة في كل جولة.	bits 4000	حجم الحزمة (Packet Size)
الطاقة المستهلكة لمعالجة بت واحد.	50 nJ/bit	طاقة الإرسال/الاستقبالelec- E
استهلاك الطاقة في مضخم الإرسال.	10 pJ/bit/m 2	معامل الفضاء الحر ϵfs
أقصى مسافة يمكن للعقدة التواصل	m 50	مدى الإرسال
مدة المحاكاة الكلية للشبكة.	300 جولة	عدد الجولات
لضمان دقة إحصائية وتقليل تأثير	30مرة	عدد مرات التشغيل

3.4 سيناريوهات المحاكاة :

لضمان شمولية الدراسة واختبار متانة الخوارزميات (Robustness) تحت ظروف تشغيل مختلفة، تم تقييم 4 سيناريوهات أساسية:

1. **سيناريو S1-Center** : التوزيع العشوائي الأول للعقد (S1) مع وضع المحطة الأساسية في المركز.

2. **سيناريو S1-Corner** : التوزيع (S1) مع وضع المحطة الأساسية في الزاوية.

3. **سيناريو S2-Center** : التوزيع العشوائي الثاني للعقد (S2) مع المحطة في المركز.

4. **سيناريو S2-Corner** : التوزيع (S2) مع المحطة في الزاوية.

إن تغيير موقع المحطة نحو الزاوية (Corner) يمثل التحدي الأصعب للشبكة، حيث تزيد المسافات بشكل كبير وتتفاقم مشكلة "الثقب الطاقوي(Energy Hole Problem) "، مما يضع قدرة الخوارزمية على التحسين تحت اختبار حقيقي.

4.4النتائج الإجمالية :

يوضح الجدول أدناه ملخصاً للنتائج التي تم الحصول عليها عبر الـ 30 تجربة لكل سيناريو. يظهر من خلال الأرقام التفوق المستمر لخوارزمية.FSS

السيناريو	الإنتاجية (FSS)	الإنتاجية-K) Means)	نسبة التحسن (Gain)	أول عقدة تموت(FSS)	أول عقدة تموت-K) Means)	وقت المعالجة FSS (ثانية)	وقت المعالجة-K Means (ثانية)
S1-Center	119,532.8	108,290.5	+10.38%	967.8	602.4	0.081	0.002
-Corner1S	96,600.8	92,628.9	+4.29%	697.9	223.2	0.051	0.002
-Center2S	141,620.3	130,205.3	+8.77%	1062.9	337.4	0.063	0.002
-Center2S	115,473.6	111,259.5	+3.79%	809.4	221.8	0.047	0.002

الجدول رقم 2: النتائج الإجمالية لمقارنة K-Means و FSS عبر 4 سيناريوهات

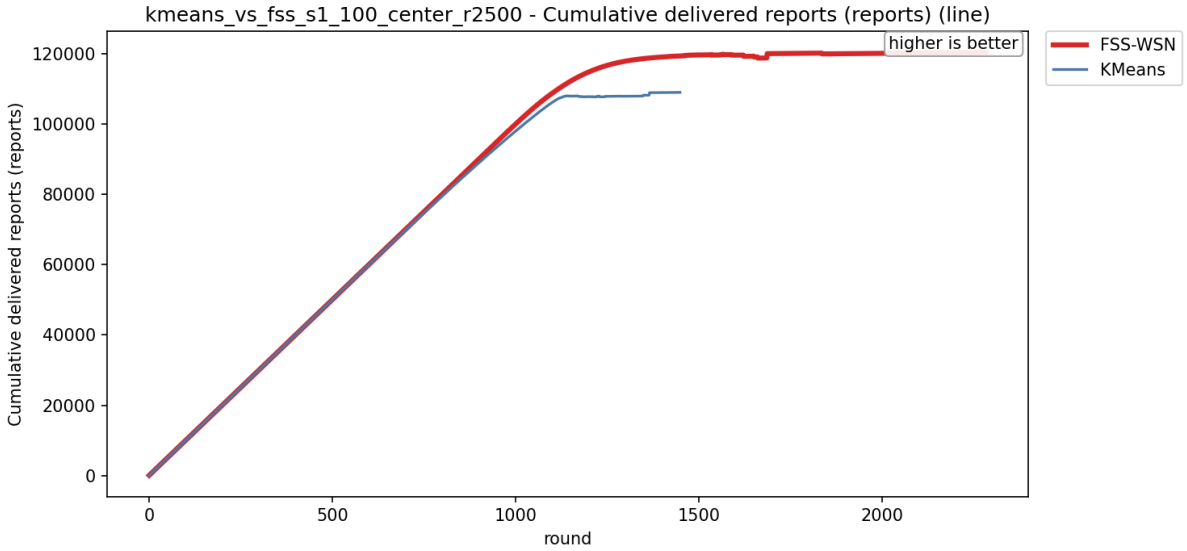
5.4التحليل التفصيلي للسيناريوهات:

1.5.4 تحليل السيناريو الأول(S1-Center) :

في هذا السيناريو تتوسط المحطة مساحة الشبكة، مما يوفر بيئة مثالية للاتصال نظراً لتقارب المسافات نسبياً.

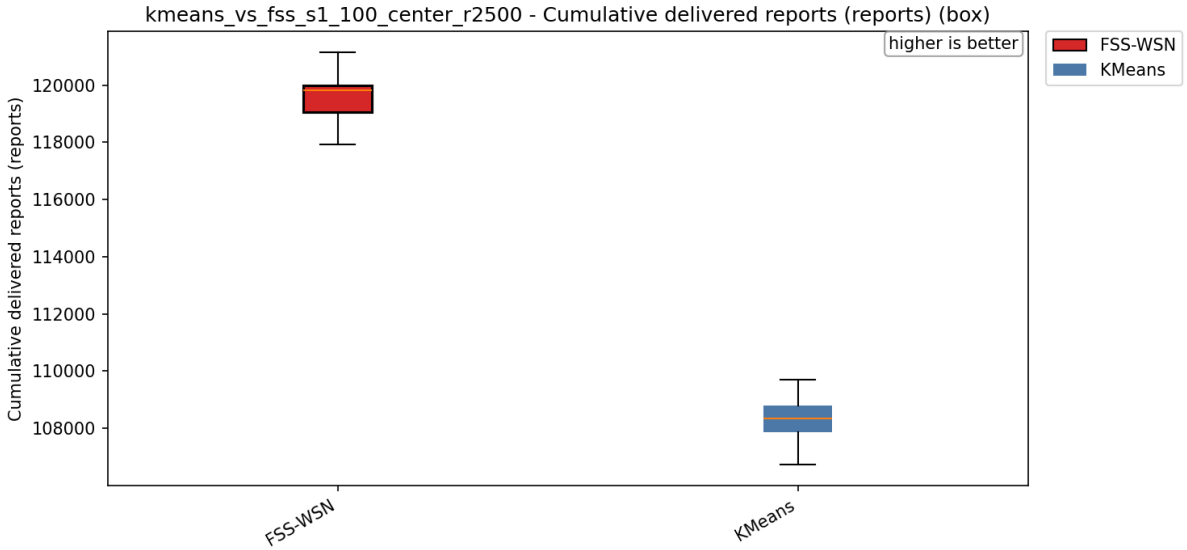
أولاً: تحليل الإنتاجية(Throughput) :

حققت FSS في هذا السيناريو إنتاجية أعلى بزيادة قدرها 10.38%.



الشكل رقم 4: تطور الإنتاجية المتراكمة للسيناريو S1-Center.

يظهر اتساع الفجوة الإيجابية لصالح FSS تدريجيا.

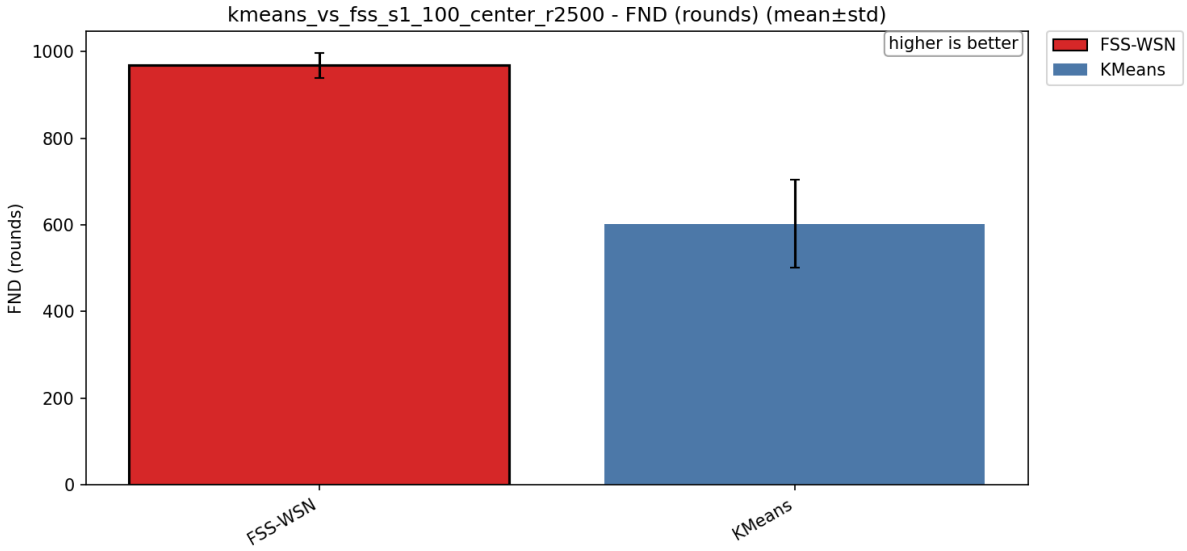


الشكل رقم 5: مخطط الصندوق (Boxplot) للإنتاجية لسيناريو S1-Center.

التشتت الضيق لنتائج FSS يؤكد استقرار الخوارزمية وموثوقيتها في جميع التجارب الـ 30.

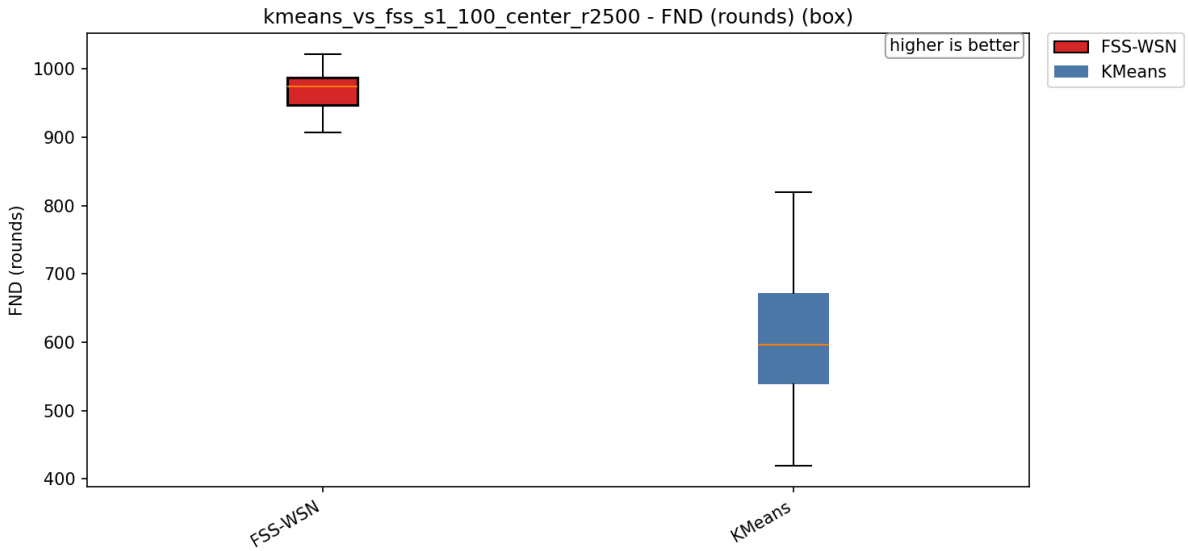
ثانياً: تحليل عمر الشبكة(Network Lifetime - FND) :

مقياس FND (First Node Dies) يعبر عن الجولة التي تفقد فيها الشبكة أول عقدة بسبب استنزاف طاقتها.



الشكل رقم 6: متوسط عمر الشبكة FND لسيناريو .S1-Center

تتجاوز FSS الجولة 900 بسهولة بينما تتراجع K-Means بعد الجولة 600 .



الشكل رقم 7: التوزيع الإحصائي لجولة موت أول عقدة .(S1-Center)

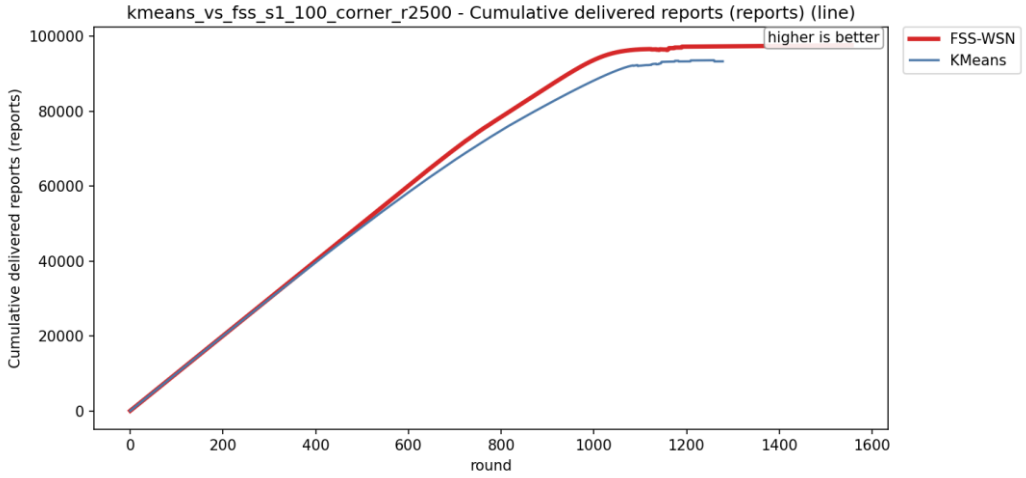
يبرز قوة آلية التقييم في FSS التي تحمي العقد من الاستنزاف المبكر.

2.5.4تحليل السيناريو الثاني(S1-Corner) :

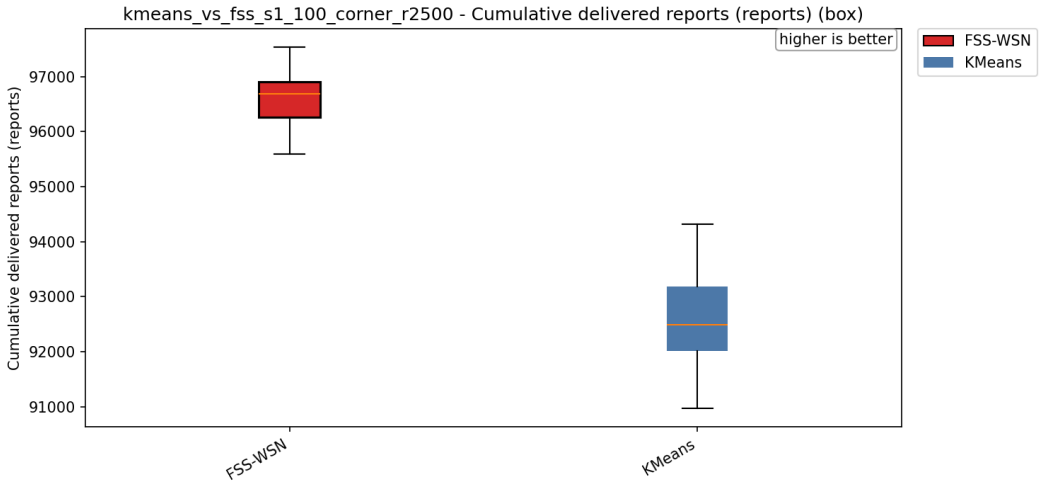
في هذا السيناريو تم نقل المحطة إلى الزاوية لفرض تحدٍ أقسى على الشبكة وزيادة فرص ظهور الثقب الطاقوي.

أولاً: تحليل الإنتاجية(Throughput) :

رغم انخفاض الإنتاجية الإجمالية بسبب طول المسافات، تمكنت FSS من التغلب على K-Means والحفاظ على أفضلية +4.29%.



الشكل رقم 8: تطور الإنتاجية عبر الجولات للسيناريو S1-Corner .

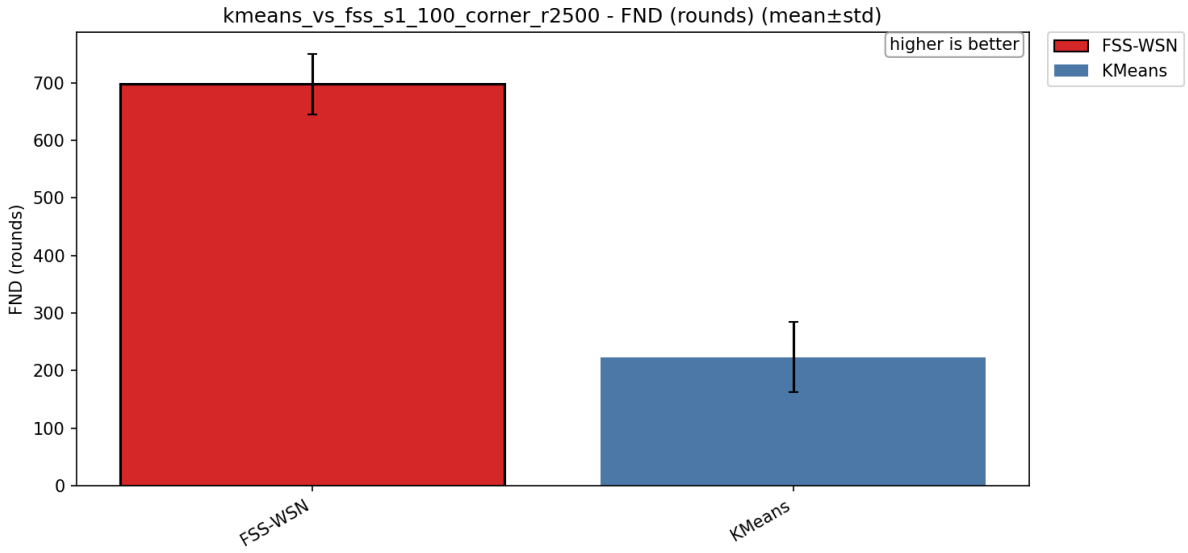


الشكل رقم 9: التوزيع الإحصائي (Boxplot) لإنتاجية S1-Corner

التفوق يبقى مستمراً في معظم تجارب المحاكاة .

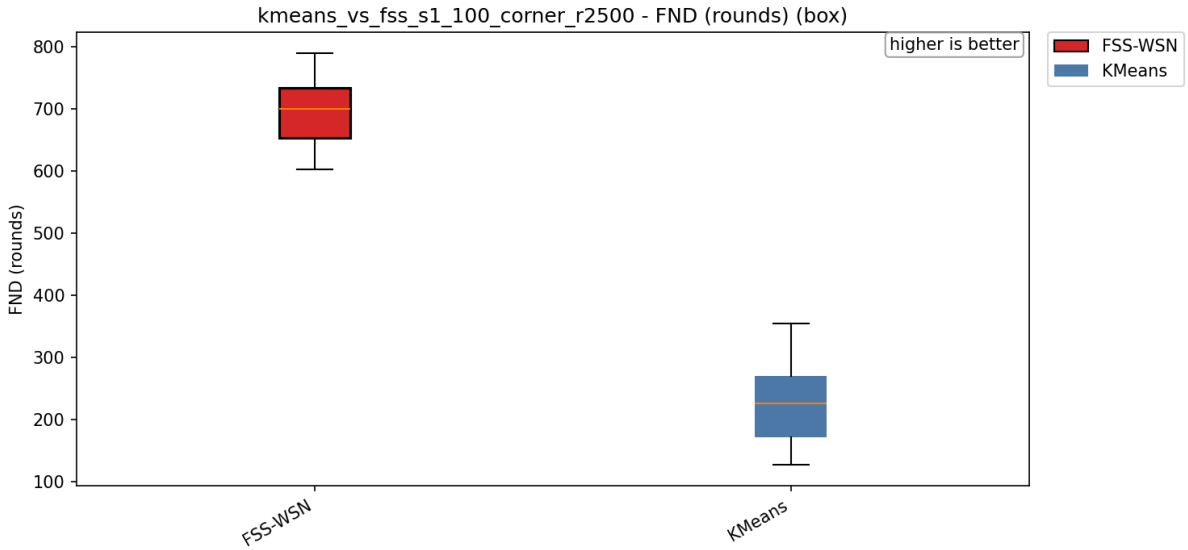
ثانياً: تحليل عمر الشبكة(Network Lifetime - FND) :

هنا تظهر الكفاءة الحقيقية لخوارزمية FSS. انهارت K-Means في وقت مبكر جداً (الجولة 223) بسبب استنزاف العقد القريبة من المحطة، بينما حافظت FSS على حياة الشبكة حتى الجولة 697.



الشكل رقم 10: مقارنة متوسط جولة موت أول عقدة(S1-Corner)

نسبة تحسن تفوق 200% بفضل آلية Fixed Set .



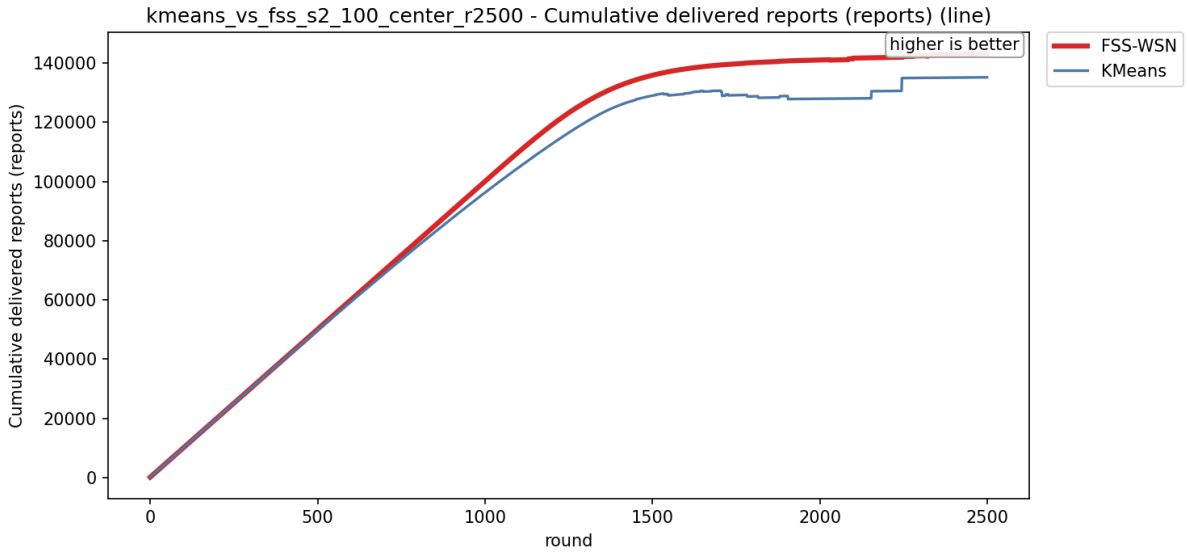
الشكل رقم 11: استقرار نتائج جولة FND في سيناريو الزاوية.S1-Corner

3.5.4 تحليل السيناريو الثالث(S2-Center) :

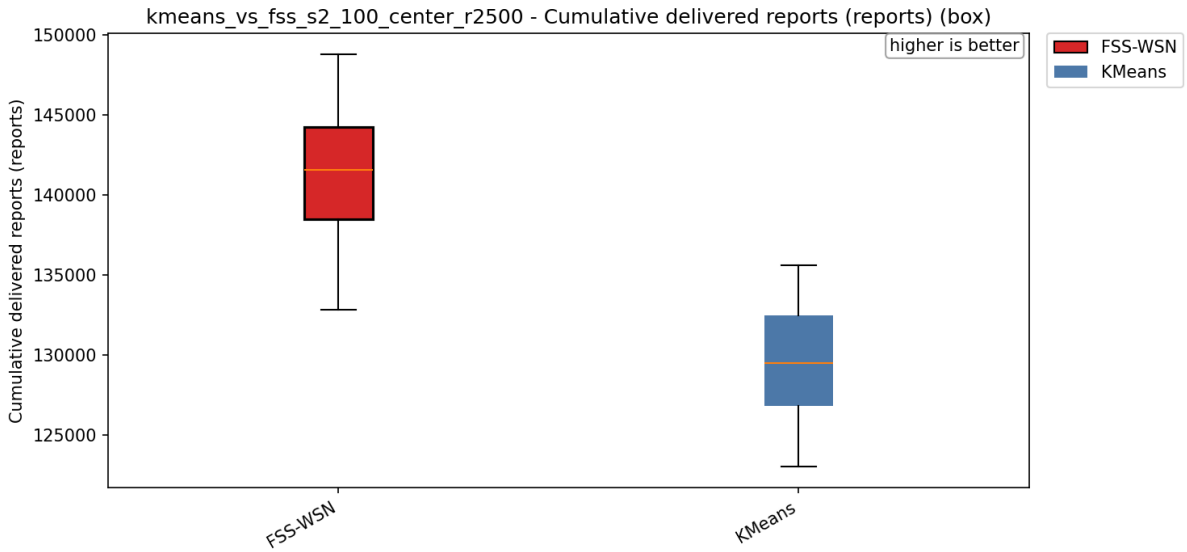
لضمان عدم تحيز النتائج، تم استخدام توزيع جغرافي جديد بالكامل للعقد (S2) مع إعادة المحطة للمركز.

أولاً: تحليل الإنتاجية(Throughput)

حققت FSS في هذا الإعداد أعلى إنتاجية بمتوسط تجاوز 141,000 رسالة بنسبة تحسن +8.77%.



الشكل رقم 12: منحنى الإنتاجية المستمرة لسيناريو S2-Center.

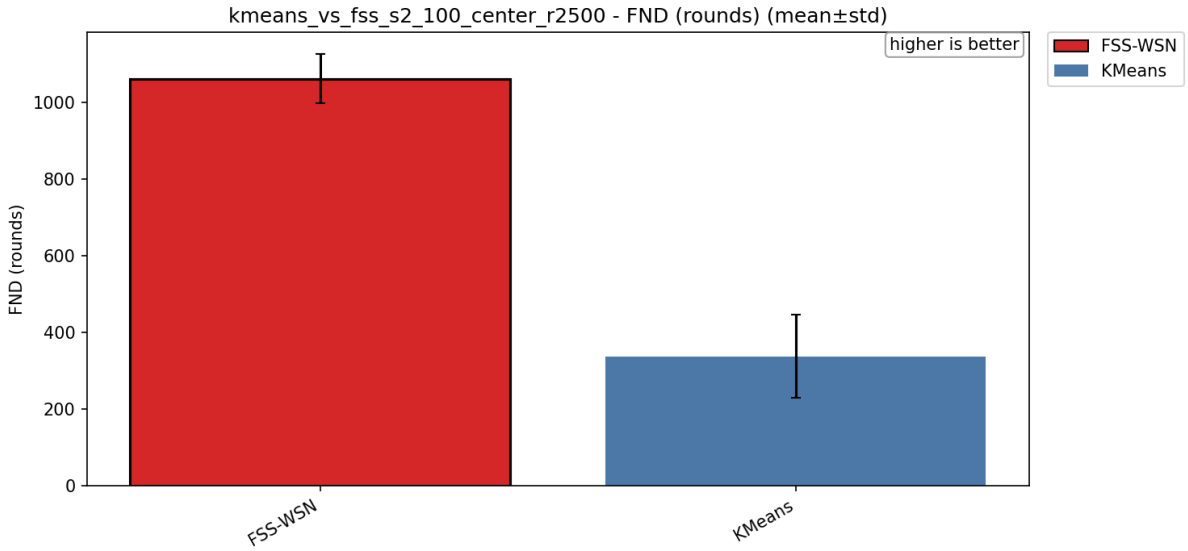


الشكل رقم 13: التوزيع الإحصائي لمخرجات الإنتاجية لسيناريو S2-Center

يؤكد جودة الأداء.

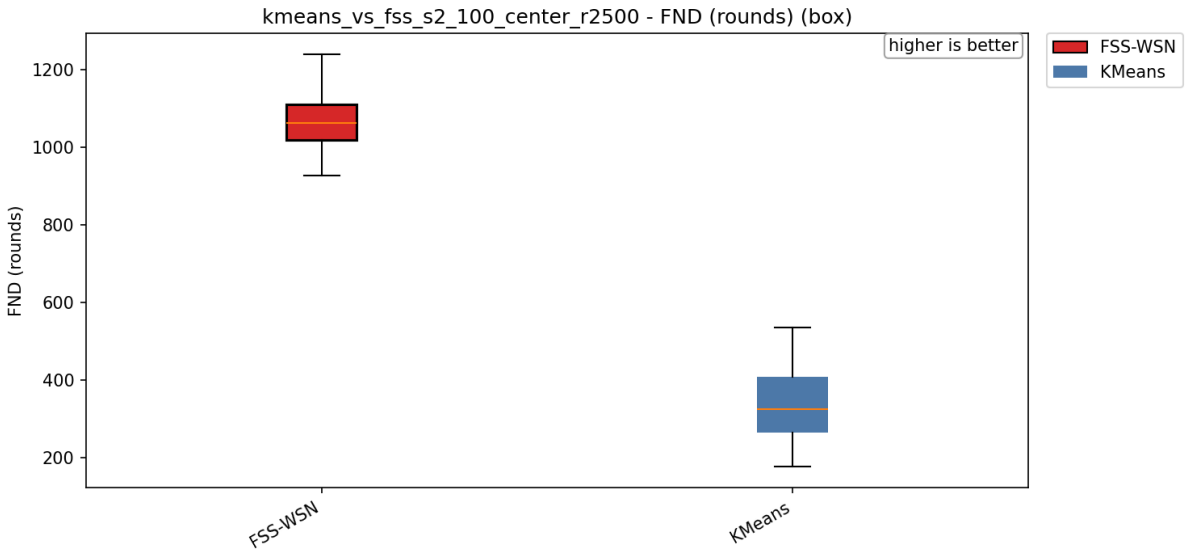
ثانياً: تحليل عمر الشبكة(Network Lifetime - FND) :

تألق أداء خوارزمية FSS بشكل استثنائي هنا، حيث استمرت الشبكة متماسكة بكامل عقدها حتى الجولة 1062، مقارنة بـ 337 جولة فقط لـ K-Means.



الشكل رقم 14: متوسط جولة موت أول عقدة في توزيع S2-Center

يوضح استمرارية كبيرة لخوارزمية FSS .



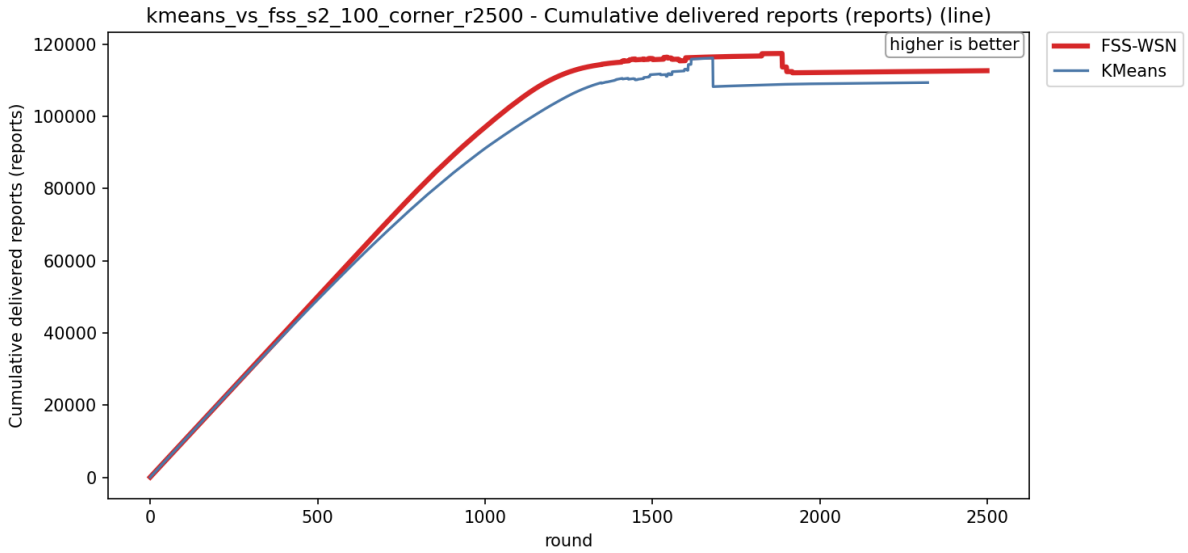
الشكل رقم 15: مخطط الصندوق لعمر الشبكة FND لسيناريو S2-Center .

4.5.4تحليل السيناريو الرابع(S2-Corner) :

يمثل هذا السيناريو الدمج بين صعوبة وضع الزاوية (Corner) والتوزيع المختلف.(S2)

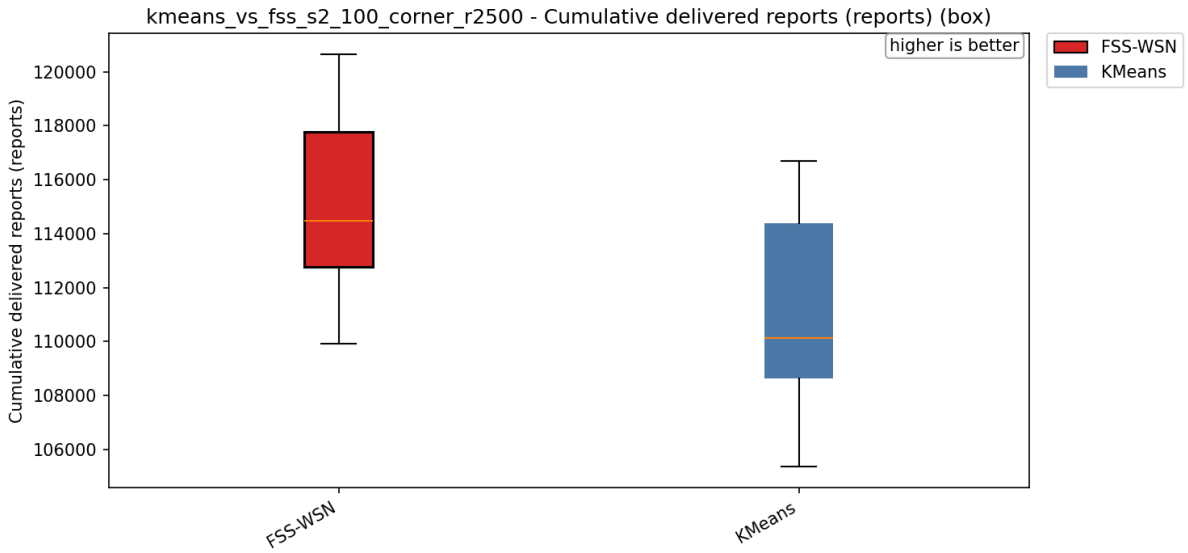
أولاً: تحليل الإنتاجية(Throughput) :

حافظت FSS على أفضليتها رغم صعوبة الموقع محققة زيادة بنسبة 3.79%.



الشكل رقم 16: منحنى الإنتاجية لسيناريو S2-Corner

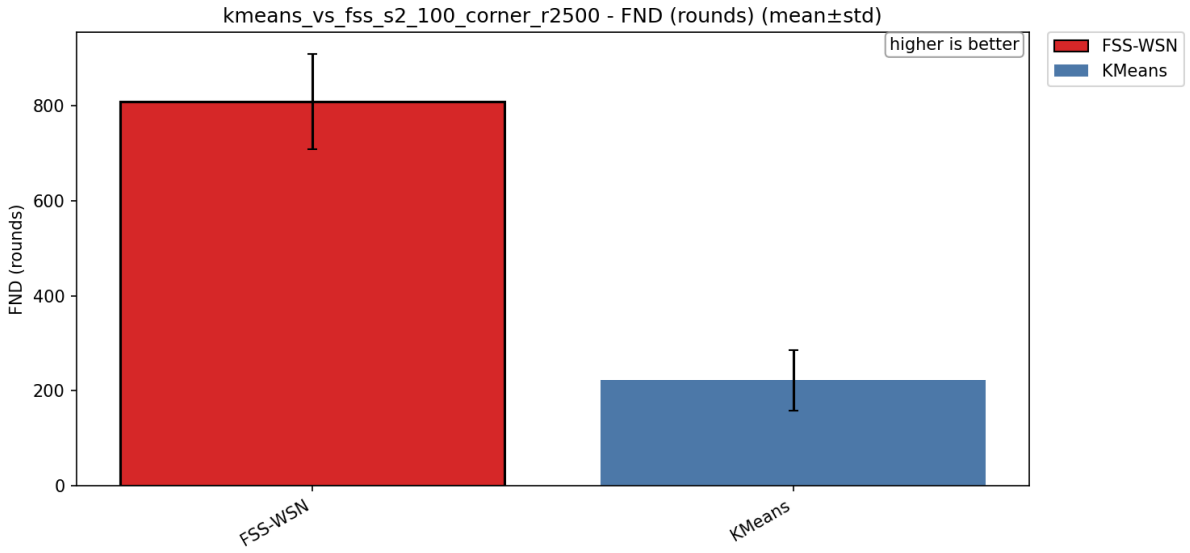
يبرز معدل إرسال متفوق ومستمر.



الشكل رقم 17: التوزيع الإحصائي للإنتاجية لسيناريو S2-Corner .

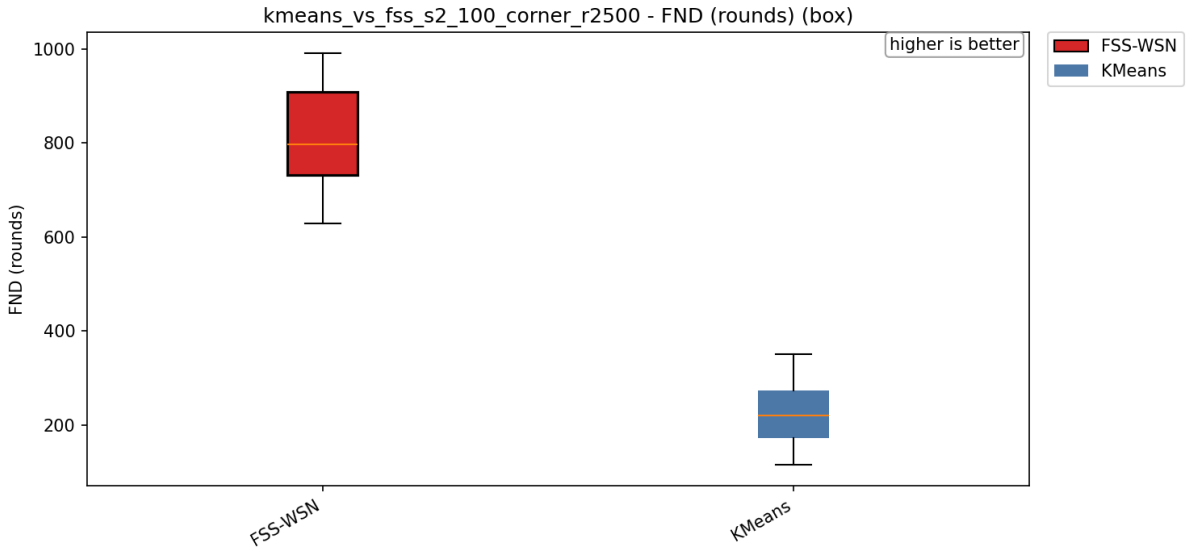
ثانياً: تحليل عمر الشبكة(Network Lifetime - FND) :

كشأن السيناريو S1-Corner ، تعرضت K-Means لانهيار مبكر (الجولة 221)، في حين قامت FSS بتدوير حمل الطاقة بذكاء وحافظت على حياة أول عقدة حتى الجولة 809.



الشكل رقم 18: متوسط جولة موت أول عقدة S2-Corner ،

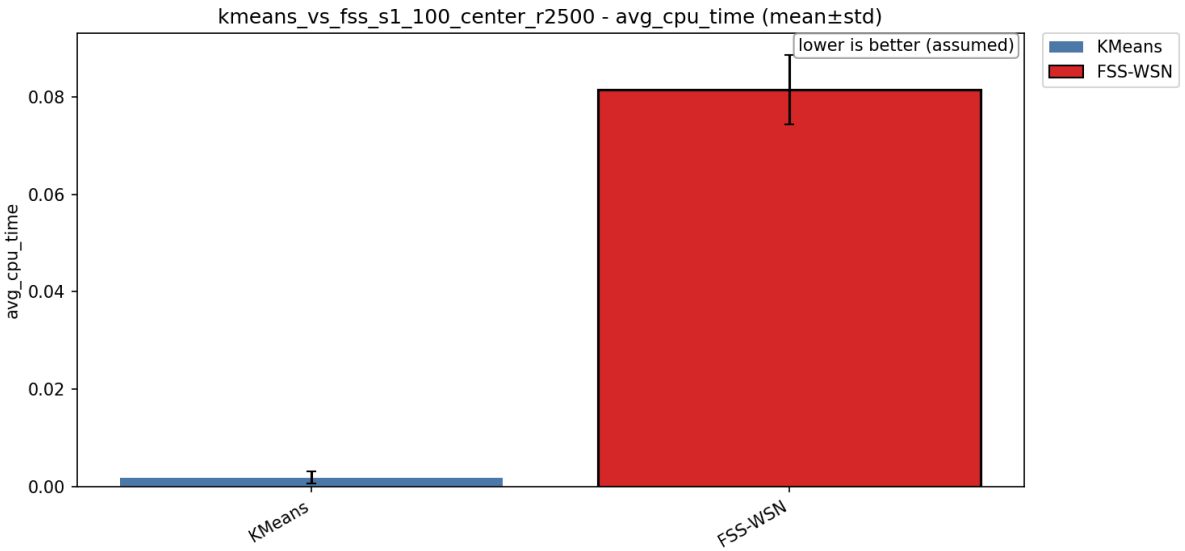
يثبت مناعة FSS ضد مشكلة المسافات البعيدة.



الشكل رقم 19: التوزيع الإحصائي الثابت لنتائج FND لسيناريو S2-Corner عبر التجارب.

5.5.4التكلفة الحسابية لجميع السيناريوهات(Computational Cost) :

يجب دائماً موازنة جودة النتائج العالية مع التكلفة اللازمة لحسابها في بيئة محدودة الموارد مثل.WSN



الشكل رقم 20: متوسط الزمن اللازم لحساب العناقيد في كل جولة بوحدة الثانية.

بالمقارنة بين الخوارزميتين، تعتبر K-Means خفيفة وسريعة جداً (حوالي 0.002 ثانية للجولة)، بينما تطلبت FSS زمناً يتراوح بين 0.047 و0.081 ثانية .

إن التكلفة الإضافية في FSS راجعة لطبيعتها كخوارزمية تحسين بحثية تقوم بتوليد وتقييم حلول متعددة في فضاء بحث منفصل للوصول إلى العناقيد المثلى. ورغم ذلك، فإن تكلفة لا تتعدى أجزاء قليلة من الثانية لكل جولة تعتبر مقبولة تماماً، وتعتبر استثماراً ناجحاً ومبرراً بالنظر إلى الأرباح الهائلة والزيادة الكبيرة في إنتاجية وعمر الشبكة.

6.4 الاستنتاجات العامة والمناقشة:

بناءً على النتائج الشاملة للسيناريوهات الأربعة، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

1. **تفوق مطلق :**أثبتت خوارزمية (FSS) المقترحة قدرتها العالية وتفوقها المطلق على خوارزمية (K-Means) في كافة ظروف المحاكاة.

2. **التغلب على مشكلة الثقب الطاقوي :**أثبتت النتائج أن دمج معايير (الطاقة المتبقية والاتصال) داخل دالة التقييم، بالإضافة إلى تثبيت الحلول (Fixed Set) ساهم بشكل جذري في منع استنزاف العقد، خاصة عند تواجد المحطة الأساسية في الأطراف (سيناريوهات(Corner ، حيث حققت FSS زيادة في عمر الشبكة تجاوزت أحياناً حاجز الـ200.%

3. **متانة الخوارزمية (Robustness)**: تؤكد مخططات الصندوق (Boxplots) الخاصة بجميع السيناريوهات استقرار أداء FSS وثباته تجاه التغيرات العشوائية لتوزع العقد، مما يؤهلها كخوارزمية قوية وموثوقة.

1.6.4 تحقيق فرضيات الدراسة:

تؤكد هذه النتائج التطبيقية والمخططات البيانية بشكل قاطع الفرضيات التي تم طرحها في الفصل الأول من هذه المذكرة، وتجيب عن إشكالياتها كما يلي:

***الفرضية الأولى :**أثبتت المحاكاة أن دمج التحسين متعدد الأهداف (الطاقة + جودة الاتصال) في اختيار رؤوس العناقيد يعطي نتائج أفضل بكثير من الاعتماد على معيار واحد كالمسافة الجغرافية (مثلما تفعل-K Means).

***الفرضية الثانية :**تأكد عملياً أن خوارزميةFSS ، من خلال آلية البحث المنفصل والاحتفاظ بالحلول المتميزة(Fixed Set) ، نجحت في تجاوز مشكلة الثقب الطاقوي وتوزيع الحمل الطاقوي بذكاء بين العقد.

***الفرضية الثالثة :**أُثبت أن الخوارزميات الميتاهيورستية (Metaheuristics) تُعتبر حلاً ممتازاً لشبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث أطالت عمر الشبكة (Network Lifetime) ورفعت الإنتاجية (Throughput) بشكل هائل، متجاوزة التكلفة الحسابية الإضافية الطفيفة التي تتطلبها.

7.4. الآفاق المستقبلية(Future Works) :

بناءً على النتائج المشجعة التي تم التوصل إليها في هذا البحث، وأهمية موضوع شبكات الاستشعار اللاسلكية في التكنولوجيا الحديثة، نقترح العديد من الآفاق والتطويرات المستقبلية لاستكمال وتوسيع هذا العمل:

1. **توسيع بيئة المحاكاة لتطبيقات أضخم :**اختبار خوارزمية FSS على شبكات ذات نطاق واسع جداً (Large-scale WSN)تضم أكثر من 1000 عقدة حسية لدراسة قابلية التوسع.(Scalability)

2. **إدراج العقد المتحركة(Mobile Nodes)** :تطبيق وتطوير الخوارزمية في بيئة تحتوي على عقد حسية تتحرك باستمرار(Mobile WSN) ، وهو ما سيفرض تحديات جديدة تتطلب تحديث العناقيد ديناميكياً وفي وقت حقيقي.

3. **التطبيق العملي في إنترنت الأشياء(IoT)** : تجربة دمج الخوارزمية مع بروتوكولات حقيقية خاصة بإنترنت لأشياء (مثل MQTT أو(CoAP ، وتطبيقها على سيناريوهات واقعية مثل المدن الذكية أو أنظمة مراقبة الغابات.

4. **تطوير دالة التقييم(Fitness Function)** : إضافة المزيد من المعايير لدالة التقييم مثل نسبة تأخير الإرسال (Delay) ومعدل فقدان الحزم البيانية (Packet Loss Ratio) لتكون الخوارزمية مناسبة للتطبيقات الحساسة للوقت المباشر.(Real-time Applications)

8.4 خاتمة الفصل :

مثل هذا الفصل التطبيق العملي والرديف التجريبي للمفاهيم النظرية المذكورة في الفصول السابقة. من خلال المحاكاة البرمجية وتحليل الأرقام والمخططات البيانية المستخرجة لأربع سيناريوهات دقيقة ومتنوعة، أثبتت هذه الدراسة صحة الفرضيات المطروحة في بداية المذكرة.

في الختام، يُمكننا التأكيد بقوة على أن خوارزمية البحث الميتاهيورستي Fixed Set Search (FSS) المدمجة مع التقييم متعدد الأهداف تُعد بديلاً ذكياً، ثابتاً، وفعالاً لخوارزميات التجميع التقليدية، وتساهم بفعالية في تقديم حلول واقعية ومستدامة للتحديات الطاقوية في شبكات الاستشعار اللاسلكية.

الخاتمة العامة

شهدت شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs) تطوراً متسارعاً جعلها الركيزة الأساسية للعديد من التطبيقات الحديثة كالمدن الذكية، والمراقبة البيئية، والرعاية الصحية. ومع ذلك، فإن الطبيعة المحدودة لموارد هذه الشبكات —وعلى رأسها الطاقة— فرضت تحديات تقنية معقدة. وقد شكلت مسألة اختيار "رؤوس المجموعات (Cluster Heads) "وتوجيه البيانات إحدى أهم العقبات التي تؤثر بشكل مباشر على استقرار الشبكة وعمرها الافتراضي. من هذا المنطلق، جاءت هذه المذكرة لتبحث في كيفية إيجاد آلية ذكية وفعالة لتنظيم هذه الشبكات وتقليل استهلاكها للطاقة مع ضمان وصول البيانات بكفاءة عالية.

في بداية هذا العمل، قمنا بدراسة الإطار النظري لشبكات الاستشعار اللاسلكية، حيث استعرضنا بنيتها، طرق الاتصال فيها، ونموذج استهلاك الطاقة. وقد أوضحت الدراسة المرجعية أن الاعتماد على الخوارزميات التقليدية —كالطرق الاحتمالية العشوائية (مثل : LEACH أو الطرق الهندسية البحتة مثل: K-Means) لم يعد كافياً لتلبية المتطلبات المتزايدة للشبكات الحديثة، نظراً لقصورها في تحقيق توازن حقيقي بين المعايير المتعارضة، كاستهلاك الطاقة وجودة الاتصال.

ولمعالجة هذه الفجوة البحثية، تم اقتراح استخدام نهج يعتمد على الذكاء الاصطناعي وتحديداً خوارزميات التحسين الميتاهيوريستية .(Metaheuristics) وقد وقع الاختيار على خوارزمية البحث في المجموعات الثابتة (Fixed Set Search - FSS)، نظراً لقدرتها الفائقة على التعامل مع فضاءات البحث المنفصلة (Discrete Spaces)، واعتمادها على مبدأ "التعلم من الحلول السابقة "عبر تثبيت العناصر القوية في مجتمع الحلول.

لتكييف هذه الخوارزمية مع طبيعة شبكاتWSN ، تم تصميم دالة تقييم متعددة الأهداف-(Multi objective Fitness Function)تدمج معايير حاسمة هي: الإنتاجية(Throughput) ، المسافة (Compactness)، جودة الاتصال(Connectivity) ، والطاقة المتبقية.(Residual Energy)

ولإثبات فعالية المقاربة المقترحة، تم تصميم وبناء بيئة محاكاة متكاملة باستخدام لغة البرمجة .(Python) أتاحت لنا المحاكاة إجراء مقارنة إحصائية عادلة ودقيقة بين خوارزمية FSS المقترحة وبروتوكول التجميع الهندسي المرجعي (K-Means) تحت نفس الظروف والمعلمات، وذلك على مدار 30 تجربة عشوائية لضمان الموثوقية.

وقد أثبتت النتائج المستخلصة من المحاكاة التفوق الواضح والمؤكد لخوارزمية .FSS فمن حيث عمر الشبكة، نجحت الخوارزمية في تأخير زمن موت أول عقدة (FND) بشكل ملحوظ، مما يعني تفادي مشكلة الثقب الطاقوي والتوزيع العادل للأعباء. ومن حيث الأداء العام، سجلت FSS أعلى معدلات الإنتاجية مع الحفاظ على ترابط الشبكة، مؤكدة بذلك صحة الفرضية القائلة بأن دمج معايير متعددة في خوارزمية بحث ذكية يقدم حلاً أكثر شمولية واستقراراً.

الآفاق المستقبلية :

إن البحث العلمي مسار مستمر لا يتوقف عند نتيجة واحدة. ورغم النجاح الذي حققته هذه الدراسة، إلا أنها تفتح أبواباً لمزيد من التطوير والبحث المستقبلي. ومن أبرز الآفاق التي نوصي بها:

الشبكات المتحركة(Mobile WSNs) : تكييف خوارزمية FSS للعمل في بيئات ديناميكية تكون فيها العقد الحسية أو المحطة الأساسية في حالة حركة مستمرة (مثل استخدام الطائرات بدون طيار UAVs لجمع البيانات.

التكامل مع إنترنت الأشياء(IoT) : اختبار قابلية التوسع (Scalability) للخوارزمية من خلال محاكاتها على نطاق واسع يضم آلاف العقد، لتكون نواة أساسية في إدارة بيانات المدن الذكية.

تطبيق التعلم الآلي (Machine Learning): دمج نماذج التنبؤ المدعومة بالذكاء الاصطناعي مع الخوارزمية للتنبؤ باستهلاك الطاقة المستقبلي للعقد واتخاذ قرارات استباقية.

الأمن السيبراني(Security) : إدراج عامل "الثقة والأمان "كمعيار إضافي في دالة التقييم، لتجنب اختيار العقد المعرضة للاختراق كرؤوس مجموعات، وضمان توجيه آمن للبيانات.

قائمة المراجع:

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," Computer Networks, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4

[2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," Computer Networks, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002

[3] W. Dargie and C. Poellabauer, Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470666388

[4] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith, "Vineyard computing: Sensor networks in agricultural production," IEEE Pervasive Computing, vol. 3, no. 1, pp. 38–45, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.1269125

[5] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," Ad Hoc Networks, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.06.003

[6] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados, "Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 551–591, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/SURV.2012.062612.00084

[7] J. Li and P. Mohapatra, "Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks," Pervasive and Mobile Computing, vol. 3, no. 3, pp. 233–254, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2005.08.001

[8] X. Wu, G. Chen, and S. K. Das, "On the energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks," in Proc. IEEE MASS, 2006, pp. 180–187. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/MOBHOC.2006.278553

[9] I. Dietrich and F. Dressler, "On the lifetime of wireless sensor networks," ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 5, no. 1, pp. 1–39, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1464420.1464425

[10] A. A. Abbasi and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks," Computer Communications, vol. 30, no. 14–15, pp. 2826–2841, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2007.05.024

[11] X. Liu, "A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks," Sensors, vol. 12, no. 8, pp. 11113–11153, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s120811113

[12] M. K. Ahmed and Z. K. Farej, "Survey on clustering techniques for wireless sensor networks and cluster head selection model," European Journal of Computer Science, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.24018/ejcompute.2024.1.1.1

[13] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Proc. 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 2000, pp. 1–10. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926982

[14] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660–670, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190

[15] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in Proc. 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967, pp. 281–297. [Online]. Available: https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512992

[16] A. K. Jain, "Data clustering: 50 years beyond K-means," Pattern Recognition Letters, vol. 31, no. 8, pp. 651–666, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011

[17] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, 3rd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2009. [Online]. Available: https://mitpress.mit.edu/9780262033848/

[18] P. Kuila and P. K. Jana, "Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach," Engineering

Applications of Artificial Intelligence, vol. 33, pp. 127–140, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.04.009

[19] E.-G. Talbi, Metaheuristics: From Design to Implementation. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470496916

[20] C. Blum and A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison," ACM Computing Surveys, vol. 35, no. 3, pp. 268–308, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/937503.937505

[21] A. S. Rostami et al., "Routing and clustering in wireless sensor networks using metaheuristic algorithms: A review," Telecommunication Systems, vol. 67, no. 3, pp. 433–449, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11235-017-0363-2

[22] R. Jovanovic and S. Voss, "Fixed set search applied to the traveling salesman problem," Journal of Heuristics, vol. 25, no. 6, pp. 899–917, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10732-019-09408-y

[23] M. G. C. Resende and C. C. Ribeiro, "Greedy randomized adaptive search procedures: Advances, hybridizations, and applications," in Handbook of Metaheuristics, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2010, pp. 283–319. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_11

[24] R. Jovanovic, S. Voss, and A. Milanovic, "A matheuristic based on Fixed Set Search for the minimum weighted vertex cover problem," Journal of Heuristics, vol. 26, no. 4, pp. 499–521, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s10732-020-09439-0

[25] Python Software Foundation, "Python 3 Documentation," 2025. [Online]. Available: https://docs.python.org/3/

[26] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," Nature, vol. 585, pp. 357–362, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

[27] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007. [Online].

Available: https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

[28] J. Grus, Data Science from Scratch: First Principles with Python. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2015. [Online]. Available: https://www.oreilly.com/library/view/data-science-from/9781492041122/

[29] A. Nayak and I. Stojmenovic, Wireless Sensor and Actuator Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470535561