مذكرة مفدمة إلى

جامعة محمد بوضياف - المسيلة - الجزائر

كلية الرياضيات والإعلام الآلي

قسم الإعلام الآلي

استكمالاً لمتطلبات نيل شهادة

ماستر في الإعلام الآلي

شعبة: إعلام آلي

التخصص: الإعلام الآلي القراري والأمثَلة (IDO)

من إعداد

دنيا الصيد

فاطمة هني

بعنوان

دراسة متانة خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة (FSS) للتجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية تحت نماذج قنوات راديوية واقعية

تحت إشراف

الأستاذ رؤوف لكحل عياط

لجنة المناقشة

إسم ولقب الأستاذ	جامعة المسيلة	رئيسًا
إسم و لقب الأستاذ	جامعة المسيلة	مقررًا
إسم و لقب الأستاذ	جامعة المسيلة	ممتحنًا

جوان 2026

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من علّمتني أنّ النجاح يُروى بالصبر، إلى نبع الحنان الذي لا ينضب، إلى أمّي الغالية، حفظها الله ورعاها.

إلى من حمل عنّي ثقل السنين بصمت، وكان سندي في كلّ خطوة، إلى أبي العزيز، أطال الله في عمره.

إلى إخوتي وأخواتي، نبضي وسندي، أُهدي ثمرة هذه السنوات.

إلى صديقاتي اللواتي كنّ معي في الفرح والشدّة، وإلى زميلاتي اللائي شاركنني الطريق.

إلى كلّ من علّمني حرفًا، إلى أساتذتي الكرام طوال مساري الدراسي.

إلى رفيقة دربي في هذه المذكّرة **فاطمة**، التي قاسمتني التعب والأمل.

إلى كلّ من ذكرهم القلب ونسيهم القلم.

أُهديكم ثمرة هذا الجهد المتواضع.

دنيا الصيد

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من حملتني وهناً على وهن، وسهرت ليلها طمأنينةً لي، إلى أمّي الحبيبة، حفظها الله.

إلى من تعب وكدّ في صمت يُمهِّد لي الطريق، إلى أبي الكريم، أطال الله في عمره.

إلى إخوتي وأخواتي، شموع بيتنا، أُهدي هذا العمل.

إلى صديقاتي العزيزات، اللائي رافقنني في كلّ لحظة.

إلى أساتذتي الذين زرعوا في فكري بذرة العلم.

إلى رفيقة دربي **دنيا**، شاركتنا فرح الإنجاز ومرارة التعب.

إلى كلّ من دعا لي بالخير وأضاء لي الدرب.

أُهديكم هذا العمل المتواضع، شكراً لكم.

فاطمة هني

الملخص

تسعى هذه المذكّرة إلى تقييم متانة خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة (FSS-WSN) لانتقاء رؤوس العناقيد في شبكات الاستشعار اللاسلكية تحت نماذج قنوات راديوية واقعية. اعتمدت معظم الدراسات السابقة على نموذج الطاقة التحديدي لـ Heinzelman الذي يفترض تسليمًا مثاليًا للحزم، وهو افتراض بعيد عن الواقع التجريبي. نُجري في هذا العمل مقارنة منهجية بين ستّ خوارزميات (LEACH، HEED، SEP، PSO، GWO، FSS-WSN) تحت ثلاثة نماذج للقناة: المثالي، الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي، والإخفاء مع تلاشي رايلي. تتألّف الخطّة العاملية من 720 محاكاة تُحلَّل باختبار Wilcoxon المُقترَن مع تصحيح Holm وتقدير حجم الأثر. تُختبَر فرضيتان: استقرار ميزة FSS-WSN عبر القنوات (H_0)، أو تَوقّفها على نموذج القناة (H_1). تُسهم هذه الدراسة منهجيًا في تمديد إطار التحقّق من FSS-WSN، وتجريبيًا في توفير أوّل مقارنة موثّقة تحت قنوات واقعية، وعمليًا في استخراج دليل لاختيار الخوارزمية حسب البيئة الانتشارية المتوقَّعة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، التجميع الهرمي، البحث بالمجموعة الثابتة، نماذج القناة الراديوية.

Abstract

This thesis evaluates the robustness of the Fixed-Set Search (FSS-WSN) cluster-head selection algorithm in Wireless Sensor Networks under realistic radio channel models. Most prior comparisons rely on Heinzelman's deterministic energy model, which assumes perfect packet delivery — an assumption far from experimental reality. We conduct a systematic comparison of six algorithms (LEACH, HEED, SEP, PSO, GWO, FSS-WSN) under three channel models: ideal, log-normal shadowing, and log-normal plus Rayleigh fading. The factorial plan covers 720 simulations, analyzed with paired Wilcoxon signed-rank tests, Holm correction, and effect-size estimation. Two hypotheses are tested: stability of FSS-WSN's advantage across channels (H_0), or its dependence on the channel model (H_1). The work contributes methodologically by extending the validation framework of FSS-WSN, empirically by delivering the first documented benchmark under realistic channels, and practically by providing a robustness guide for algorithm selection based on the expected deployment environment.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Hierarchical Clustering, Fixed Set Search, Radio Channel Models.

شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله ربّ العالمين، حمدًا يليق بجلاله ويوازي عظيم نِعَمه، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيّدنا محمّد وعلى آله وصحبه أجمعين.

نتقدّم بأسمى آيات الشكر والامتنان وبالغ التقدير إلى أستاذنا المشرف الفاضل **الأستاذ رؤوف لكحل عياط**، على ما قدّمه لنا من توجيهات قيّمة ومتابعة دؤوبة وملاحظات علمية رصينة، أسهمت في إنجاز هذا العمل في صورته النهائية. لقد كان لرحابة صدره وسعة علمه وحسن إصغائه أكبر الأثر في تذليل الصعوبات أمامنا، فجزاه الله عنّا خير الجزاء.

كما نتوجّه بالشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة المناقشة المحترمين، الذين تشرّفنا بقبولهم تقييم هذا العمل، فجزيل الشكر لهم على ما خصّصوه من وقت وجهد لقراءة المذكّرة وتقديم ملاحظاتهم العلمية القيّمة التي ستُسهم لا محالة في إثرائها.

ولا يفوتنا أن نتقدّم بشكرنا الخالص إلى جميع أساتذة قسم الإعلام الآلي بكلية الرياضيات والإعلام الآلي بجامعة محمد بوضياف -- المسيلة، الذين رافقونا طوال مسارنا الجامعي، وزرعوا فينا حبّ البحث العلمي والاجتهاد.

ونتوجّه بأعمق مشاعر الامتنان إلى أهلنا الكرام، الذين كانوا لنا سندًا لا ينقطع، ودعاءً لا يهدأ، وعونًا في كلّ خطوة من خطوات هذا المشوار، ولن تفي العبارات بحقّهم.

ونشكر كذلك الأصدقاء والأقارب والزملاء الذين قاسمونا تعب هذا العمل وفرحه، وكلَّ من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاح هذه المذكّرة، ولو بكلمة طيّبة أو دعوة صادقة.

والحمد لله أوّلاً وآخِرًا.

فهرس المحتويات

مقدمة عامة **1**

1 عموميات حول شبكات الاستشعار اللاسلكية **3**
1.1 تمهيد 3
2.1 معمارية عقدة الاستشعار 3
1.2.1 ميزانية الطاقة المعتادة 3
2.2.1 تجانس الشبكة وعدم تجانسها 4
3.1 الطبولوجيات الشبكية 4
4.1 مجالات التطبيق 5
5.1 قيود التصميم 5
6.1 النموذج الطاقي المرجعي لـ Heinzelman 6
1.6.1 طاقة الإرسال 6
2.6.1 طاقة الاستقبال والتجميع 7
3.6.1 ملاحظة على افتراض المثاليّة 7
7.1 مقاييس عمر الشبكة 7
1.7.1 المقاييس الإنتاجية والطاقية 8
8.1 خاتمة 8

2 التجميع الهرمي وخوارزمياته في شبكات الاستشعار اللاسلكية **9**
1.2 تمهيد 9
2.2 مبدأ التجميع الهرمي 9
3.2 الخوارزميات الكلاسيكية والميتاهيوريستيكية المرجعية 9
1.3.2 LEACH: التوزيع الاحتمالي للرئاسة 9
2.3.2 HEED: التهجين بين الطاقة والكثافة 11
3.3.2 SEP: تكييف للوسط غير المتجانس 11
4.3.2 التجميع بـ PSO: ترميز متّصل وعتبة 12
5.3.2 التجميع بـ GWO: محاكاة قطيع الذئاب 12
4.2 خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة (FSS-WSN) 12
1.4.2 الأصل والنسب المنهجي: من GRASP إلى FSS 12
2.4.2 صياغة توافقية أصيلة 13
3.4.2 البناء الجشع العشوائي: الإجراء GRASP_Construct 13
4.4.2 المرحلتان: الاستكشاف ثم الاستغلال 14
5.4.2 آلية المجموعة الثابتة وحارس الطاقة 15
6.4.2 إجراء الإصلاح R(H) 15

5.2 مقارنة هيكلية بين الخوارزميات الستّ 16
6.2 خاتمة 17

3 نماذج القناة الراديوية والبروتوكول التجريبي **18**
1.3 تمهيد 18
2.3 نماذج القناة الراديوية 18
1.2.3 النموذج التحديدي لـ Heinzelman: الحدّ المثالي 18
2.2.3 الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي 18
3.2.3 التلاشي السريع لـ Rayleigh 19
4.2.3 مقارنة موجزة 20
5.2.3 اصطلاحات التطبيق المُجمَّدة 20
3.3 المنصّة الحاسوبية والوحدات المُطوَّرة 21
1.3.3 البيئة العتادية والبرمجية 22
4.3 الخطّة العاملية الكاملة 23
5.3 المعاملات الشبكية والطاقية 23
6.3 مقاييس التقييم 24
7.3 المنهجية الإحصائية 24
1.7.3 تصحيح المقارنات المتعدّدة 24
2.7.3 تقدير حجم الأثر 25
3.7.3 حُكم الفرضيات 25
8.3 خاتمة 25

4 النتائج وتحليل المتانة **26**
1.4 تمهيد 26
2.4 مسار التطوير والتحقّق من المنصّة 26
1.2.4 المنصّة الأصلية والإضافات 26
2.2.4 اختبارات الوحدات (Unit Tests) 26
3.2.4 معايرة هامش الوصلة 26
4.2.4 تنفيذ الإنتاج: 720 محاكاة على 11 عاملًا 28
3.4 النتائج التفصيلية حسب نموذج القناة 29
1.3.4 القراءة الأولى: ثلاثة أنماط مستقرّة 29
2.3.4 منحنيات ALC: ديناميكية فناء العقد 30
4.4 التحليل الإحصائي 30
1.4.4 اختبارات Wilcoxon المُقترَنة 30
2.4.4 مخطّطات صندوقية للإنتاجية 33
5.4 خريطة المتانة الموحَّدة 33
6.4 الكلفة الحاسوبية 33
7.4 مناقشة وحُكم الفرضيتَين 35

1.7.4 الحُكم الإجمالي: H_1 باتّجاه التعزّز 35
2.7.4 التفسير الميكانيكي 35
3.7.4 تحذيرات 36
8.4 خاتمة 36

خاتمة عامّة **37**

المراجع **39**

ا الملحق أ: تفاصيل الحسابات **42**
ا.1 صيغ إضافية 42

ب الملحق ب: قائمة الاختصارات **43**

قائمة الجداول

1.1 مقارنة بين الطبولوجيات الشبكية الرئيسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية 4
2.1 معاملات نموذج الطاقة الراديوي المعتمدة في الدراسة 7

1.2 معاملات FSS-WSN المرجعية المعتمدة في الدراسة [14] 16
2.2 مقارنة هيكلية بين الخوارزميات الستّ المعتمدة في الدراسة 16

1.3 مقارنة هيكلية بين نماذج القناة الثلاثة المعتمدة 20
2.3 الوحدات المُضافة في إطار هذه المذكّرة 22
3.3 البيئة العتادية والبرمجية المُستخدَمة في تجارب الإنتاج 22
4.3 الخطّة العاملية المعتمدة 23
5.3 المعاملات الشبكية والطاقية المعتمدة 23

1.4 الإضافات البرمجية لهذه المذكّرة (لم يُعدَّل أيّ ملفّ من المستودع الأصلي) 27
2.4 مقاييس عمر الشبكة والإنتاجية عبر النماذج الثلاثة، BS في المركز (متوسّط $\pm$ انحراف معياري على 20 بذرة) 29
3.4 Wilcoxon المُقترَن ($n = 20$)، تصحيح Holm، حجم الأثر، النسبة المُكتسبة 32
4.4 متوسّط زمن CPU لكلّ دورة (ms)، BS في المركز 35

قائمة الأشكال

1.1 معمارية عقدة الاستشعار اللاسلكية: الوحدات الوظيفية الأربع وتدفّق المعطيات بينها. 4

2.1 نموذج Heinzelman ذو الرتبة الأولى: نظامان انتشاريّان منفصلان عند العتبة $d_0 \approx 87$ م. تظهر الكلفة الطاقية لإرسال حزمة من 4000 بتّة (المنحنى الأسود) كقطعتين d^2 (الفضاء الحرّ) وd^4 (التعدّد المساري). 6

1.2 لقطة لدورة من التجميع الهرمي على 100 عقدة موزَّعة عشوائيًا في حقل 100×100 م. خمسة رؤوس عناقيد (مربّعات حمراء) محاطةً بأقراص نصف قطرها $r_c = 25$ م، الأعضاء (نقاط رمادية) متّصلون بأقرب رأس، والمحطّة القاعدية (نجمة سوداء) في المركز؛ الخطوط الزرقاء تُمثّل النقل من رؤوس العناقيد إلى المحطّة القاعدية. 10

2.2 خطّ أنبوب FSS-WSN في كلّ دورة: مرحلة استكشاف بـ GRASP مكثَّف، استخلاص المجموعة الثابتة F من مَجمَع النخبة، ثمّ مرحلة استغلال متحيِّزة بـ F، وأخيرًا انتقاء أفضل مرشّح ونشره بعد الإصلاح. 14

1.3 نسبة تسليم الحزم (PDR) كدالّة في المسافة لنماذج القناة الثلاثة. النموذج المثالي ثابت عند 1، الإخفاء اللوغاريتمي يَنحدر بشكل سَلِس مارًّا بـ 0,95 عند 50 m (نقطة المعايرة)، والنموذج المركَّب Log-normal + Rayleigh يُسرِّع التَدهور بفعل التلاشي السريع. 21

1.4 السجلّ النهائي لتنفيذ الإنتاج على Ryzen 5 7600X (6C/12T). أُكمِلت كلّ الـ 720 محاكاة بنجاح في 17 $\sim$ ساعة من زمن الجدار، مع آلية *checkpointing* ضمنت قابلية الاستئناف عند انقطاع التيار. 28

2.4 منحنى عدد العقد الحيّة عبر الدورات تحت القناة المثالية، BS في المركز. 30

3.4 منحنى عدد العقد الحيّة تحت الإخفاء اللوغاريتمي. 31

4.4 منحنى عدد العقد الحيّة تحت الإخفاء + تلاشي رايلي. 31

5.4 مخطّط صندوقي للإنتاجية التراكمية لكلّ خوارزمية تحت النماذج الثلاثة (BS في المركز). FSS-WSN (الصندوق الأحمر، أكبر سماكة) يَفصل بوضوح عن البقيّة في القنوات الثلاث. 33

6.4 خريطة حرارية للإنتاجية المُسوَّاة (% من الأفضل في كلّ قناة). FSS-WSN ثابت عند 100% في كلّ صف، HEED يَتراجع بشكل خاص في زاوية BS. 34

7.4 مخطّط متانة-أداء: متوسّط الرتبة (محور أفقي، قيمة أصغر = أفضل) مقابل انحراف الرتبة (محور رأسي، قيمة أصغر = أكثر اتّساقًا). FSS-WSN يَحوز موقع $(0\,;\,1{,}0) \sim$: الأفضل دائمًا والأكثر اتّساقًا. 34

مقدمة عامة

شهدت شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks --- WSN) [1], [2] توسّعًا كبيرًا في التطبيقات العملية خلال العقدَين الأخيرَين، من رصد الموائل الطبيعية [3] ومراقبة الكوارث [4] إلى الزراعة الدقيقة والمدن الذكية [5]. تشترك هذه التطبيقات في خاصية بنيوية مشتركة: تتألّف الشبكة من عددٍ كبير من العقد الصغيرة الموزَّعة في حقل الرصد، تعمل بطاقة محدودة من بطاريات يتعذّر استبدالها بعد النشر. ينعكس هذا القيد على هندسة البروتوكولات: كلّ Joule مهدر هو خسارة مباشرة في عمر الشبكة [6], [7].

مشكلة التجميع الهرمي: من بين أساليب توفير الطاقة، يحتلّ التجميع الهرمي (Hierarchical Clustering) موقعًا مركزيًا منذ ظهور بروتوكول LEACH [8], [9]. يعتمد المبدأ على تقسيم العقد إلى عناقيد، يَتولّى داخل كلّ عنقود رأسٌ (Cluster Head --- CH) جمع البيانات، تجميعها، ثم نقلها إلى المحطّة القاعدية. تكمُن الصعوبة في انتقاء رؤوس العناقيد عند كلّ دورة: المسألة توافقية صرفة (اختيار مجموعة فرعية من 2^N إمكانية)، وذات قيود (تغطية كاملة، اتّصال بالقاعدة)، وحسّاسة لتوزيع الطاقة المتبقّية. أُثبت أنها NP-صعبة [10], [11]. ومن ثَمّ استُعمِلت لها خوارزميات احتمالية (LEACH، HEED، SEP) وميتاهيوريستيكية مستوحاةٍ من ذكاء الأسراب (PSO، GWO) [12], [13].

خوارزمية FSS-WSN: اقتُرِحَت مؤخّرًا خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة المُكيَّفة لشبكات الاستشعار اللاسلكية (Fixed Set Search for WSN --- FSS-WSN) [14]، وهي تكييف لخوارزمية Fixed Set Search الأصلية [15], [16] التي تنحدر بدورها من GRASP [17], [18]. تتميّز FSS-WSN بثلاث خصائص بنيوية تَجعلها مرشّحة للاحتفاظ بأدائها في الظروف غير المثالية: العمل **في الفضاء التوافقي مباشرةً** (لا ترميز متّصل ولا عتبة فكّ ترميز)، **ذاكرة بنيوية** عبر مَجمَع نخبة ومجموعة ثابتة من المرشّحين الجيّدين، **وإجراء إصلاح تحديدي صريح** مُضمَّن في دالة اللياقة. أثبتت FSS-WSN تفوّقها على المرجعيات الكلاسيكية في إطار النموذج التحديدي لـ Heinzelman.

الإشكالية: غير أن هذا التفوّق المُعلَن قام تحت افتراض ضمني وقويّ: أن القناة الراديوية مثاليّة، وأن كلّ حزمة مُرسَلة تَصِل بنجاح. تَكشف القياسات على عتاد حقيقي [19], [20] أن هذا الافتراض بعيد عن الواقع: تَبرز منطقة انتقالية واسعة من الفقد الجزئي تتأثّر بالإخفاء البيئي وبالتلاشي متعدّد المسارات. تعرف الأدبيات هذه الظواهر منذ زمن ولها نماذج رياضية معتمدة (Log-normal Shadowing، Rayleigh Fading) [21], [22]، لكن تأثيرها على الأداء النسبي لخوارزميات التجميع لم يَجْرِ تحقيقه بشكل منهجي. المسألة المركزية لهذه المذكّرة هي:

> هل يَصمد التفوّق المُلاحَظ لـ *FSS-WSN* على *LEACH*، *HEED*، *SEP*، *PSO*، *GWO* في إطار *Heinzelman*، أم يَتعزّز، أم يَنهار حين تُدخَل عشوائية القناة الراديوية الواقعية؟

الفرضيتان: تُختبَر فرضيتان مُتنافستان:

- H_0 (الفرضية الصفرية): متانة *FSS-WSN* لا تتوقّف على نموذج القناة؛ تَبقى الفروق النسبية بينها وبين الخوارزميات الأخرى مستقرّةً في الاتّجاه والشدّة.

- H_1 (الفرضية البديلة): المتانة مشروطة بنموذج القناة، قد تَتعزّز الميزة عند الانتقال إلى الواقعية (تأكيدٌ لطبيعتها التوافقية الأصيلة)، أو تَنهار (دليلٌ على ملاءمة مفرطة للنموذج المثالي).

سيُحَسم النزاع بين الفرضيتَين تجريبيًا عبر اختبارات إحصائية صارمة (Wilcoxon المُقترَن [23] مع تصحيح Bonferroni [24]) على 720 محاكاة بـ 20 بذرة متناظرة.

المساهمات: تَدّعي هذه المذكّرة ثلاث مساهمات متمايزة:

1. **مساهمة منهجية:** تمديد التحقّق من FSS-WSN إلى ما هو أبعد من نموذج Heinzelman التحديدي، سدّ ثغرة محدوديّة صريحة في الصياغة الأصلية [14].

2. **مساهمة تجريبية:** أوّل مقارنة موثّقة بين FSS-WSN وخمس خوارزميات مرجعية تحت ثلاثة نماذج للقناة، بـ 20 تكرارًا مُقترَنًا واختبارات Wilcoxon + Bonferroni مع تقدير حجم الأثر [25].

3. **مساهمة عملية:** استخراج «دليل متانة» يُسهم في توجيه اختيار الخوارزمية وفقَ نوع القناة المتوقَّع في النشر الفعلي.

منهجيّة الإنجاز: اعتمدت الدراسة منصّة محاكاة مفتوحة بـ Python، أُضيفت إليها أربع وحدات جديدة دون تعديل البنية الدلالية للمنصّة الأصلية: تنفيذ نماذج القناة الثلاثة، نسخة قنوية من حسابات الطاقة، مُنسِّق التجارب العاملي، ومجموعة اختبارات وحدات. جرت معايرة هامش الوصلة M_{dB} بشكل مغلق ليتحقّق $\mathrm{PDR} = 0{,}95$ عند 50 m في القناة المرجعية، وتجمَّدت هذه القيمة لكلّ التجارب.

تنظيم المذكّرة: تتألّف المذكّرة من أربعة فصول:

- **الفصل الأوّل:** عموميات حول شبكات الاستشعار اللاسلكية، معمارية العقدة، الطبولوجيات، نموذج الطاقة المرجعي لـ Heinzelman، ومقاييس عمر الشبكة.

- **الفصل الثاني:** مراجعة الخوارزميات الستّ المعتمدة في المقارنة، مع وصف تفصيلي لـ FSS-WSN: الأصول، الصياغة، الإجراءَين GRASP_Construct والإصلاح، المرحلتَين، وآلية المجموعة الثابتة.

- **الفصل الثالث:** نماذج القناة الراديوية الثلاثة، البروتوكول التجريبي العاملي، المعاملات الشبكية والطاقية، المقاييس، والمنهجية الإحصائية.

- **الفصل الرابع:** نتائج 720 محاكاة، تحليل المتانة خوارزميةً خوارزمية وقناةً قناة، اختبارات Wilcoxon، تقدير حجم الأثر، خريطة المتانة، حُكم الفرضيتَين، ومناقشة الدلالة.

تختتم المذكّرة بخاتمة عامّة تُلخّص النتائج، وتُحدِّد القيود المنهجية، وتفتح آفاقًا للأعمال المستقبلية: نماذج قنوية أخرى (Nakagami، Rician)، التحقّق على عتاد حقيقي، وتكييف FSS مع القناة المُلاحَظة في الزمن الحقيقي.

عموميات حول شبكات الاستشعار اللاسلكية

1.1 تمهيد

تمثّل شبكات الاستشعار اللاسلكية (Wireless Sensor Networks --- WSN) [1], [2] أحد أبرز التجليات التطبيقية لإنترنت الأشياء، إذ تتألف من عدد كبير من العقد الصغيرة المنتشرة في حقل الرصد، تعمل بطاقة محدودة وتتعاون لجمع البيانات ونقلها إلى محطة قاعدية. ولأن استبدال البطاريات أمر متعذّر في معظم نشرات هذه الشبكات، فإن إطالة عمر الشبكة (Network Lifetime) شكّلت منذ بداية الألفية محورًا مركزيًا للأبحاث [6], [7]. يُخصَّص هذا الفصل لتقديم الأسس النظرية التي تستند إليها فصول المذكّرة اللاحقة: معمارية عقدة الاستشعار، طبولوجيات النشر، مجالات الاستخدام، قيود التصميم، ثم النموذج الطاقي المرجعي ومقاييس عمر الشبكة المعتمدة في الدراسة التجريبية.

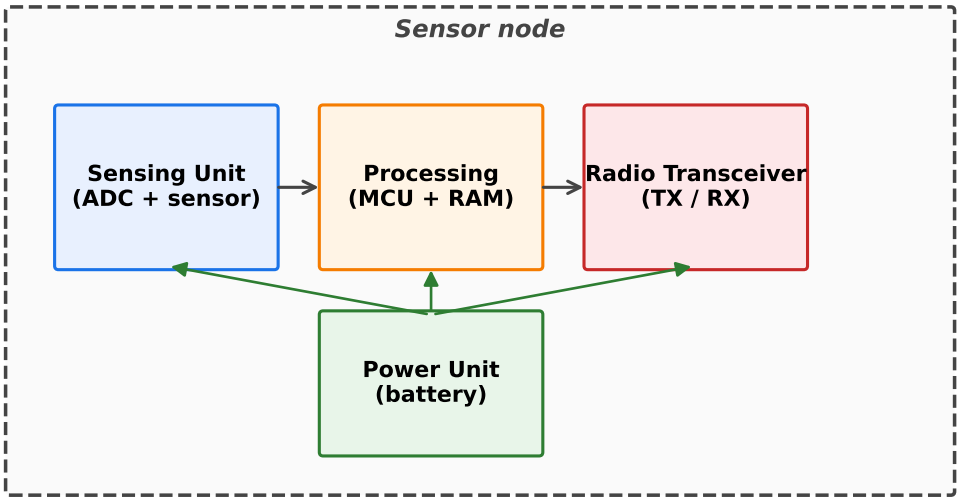
2.1 معمارية عقدة الاستشعار

تتألّف عقدة الاستشعار النموذجية من أربع وحدات وظيفية أساسية تتفاعل لأداء مهام الإدراك والمعالجة والاتصال [1], [26]:

- **وحدة الاستشعار** (Sensing Unit): تضم مستشعرًا تماثليًا أو رقميًا ومحوّلًا تماثليًا-رقميًا (Analog-to-Digital Converter --- ADC) يقوم بتحويل الكمية الفيزيائية المرصودة إلى قيمة رقمية.
- **وحدة المعالجة** (Processing Unit): تتضمّن متحكّمًا دقيقًا منخفض الاستهلاك وذاكرة عمل، وتتولّى تنفيذ خوارزميات التجميع المحلّي والتجميع الهرمي وقرارات التوجيه.
- **وحدة الإرسال والاستقبال اللاسلكي** (Radio Transceiver): مسؤولة عن الإرسال (TX) والاستقبال (RX) في نطاق ترددي محدود، وتُعدّ المستهلك الأكبر للطاقة في العقدة، وهو ما يبرّر تركيز معظم بروتوكولات إطالة عمر الشبكة على تقليص حركة الراديو [6], [9].
- **وحدة الطاقة** (Power Unit): بطارية ذات سعة محدودة، يُضاف إليها أحيانًا حصاد طاقي (Energy Harvesting) من الإشعاع الشمسي أو الاهتزازات.

1.2.1 ميزانية الطاقة المعتادة

تستهلك وحدات العقدة أنماطًا متباينة من الطاقة بحسب الحالة التشغيلية. تعرض المراجع [6], [26] مقاييس قياسية: وحدة الراديو في حالة الإرسال تستهلك بضع عشرات إلى مئات mW، وفي حالة الاستقبال تستهلك ما يقارب نصف ذلك، بينما تنخفض إلى عدة μW في وضع السبات (Sleep Mode). تستهلك المعالجة المحلية أقل من ذلك بكثير، وهو ما يؤسّس للقاعدة التصميمية المعروفة: «تنفيذ عملية حسابية في العقدة أوفر بكثير من إرسال البتّة المقابلة عبر الراديو» [9], [26].



شكل 1.1: معمارية عقدة الاستشعار اللاسلكية: الوحدات الوظيفية الأربع وتدفّق المعطيات بينها.

2.2.1 تجانس الشبكة وعدم تجانسها

نميّز في الأدبيات بين شبكات متجانسة (Homogeneous) حيث تنطلق كل العقد بطاقة ابتدائية متساوية، وشبكات غير متجانسة (Heterogeneous) تحوي نسبة من العقد المتقدّمة ذات الطاقة الأعلى [27]. تتبنّى دراستنا التجريبية الإعداد المتجانس بطاقة ابتدائية موحّدة $E_0 = 0.5$ J لكل عقدة، تماشيًا مع الإطار المرجعي لـ LEACH.

3.1 الطبولوجيات الشبكية

تعتمد بنية الاتصال داخل الشبكة على أحد النماذج الطبولوجية الأربعة المعروضة في الجدول 1.1، وكلٌّ منها يطرح موازنة مختلفة بين البساطة وعمر الشبكة وقابلية التوسّع [10], [11].

جدول 1.1: مقارنة بين الطبولوجيات الشبكية الرئيسية في شبكات الاستشعار اللاسلكية

الطبولوجيا	قابلية التوسّع	استهلاك الطاقة	التعقيد
نجمية (Star)	منخفضة	مرتفع جدًا للعقد البعيدة	منخفض
شبكية (Mesh)	مرتفعة	متوسّط	مرتفع
عنقودية هرمية (Cluster-based)	مرتفعة جدًا	منخفض إلى متوسّط	متوسّط
خطّية (Chain-based)	منخفضة	منخفض جدًا	منخفض

تتبنّى هذه المذكّرة **الطبولوجيا العنقودية الهرمية** (Hierarchical Clustering) [8], [10]، حيث تنقسم العقد إلى عناقيد، يتولّى داخل كلّ عنقود رأسٌ (Cluster Head --- CH) استقبال البيانات من الأعضاء، تجميعها (Data Aggregation)، ثم نقلها إلى المحطّة القاعدية (Base Station --- BS) عبر إرسال أحادي القفزة (Single-hop) أو متعدّد القفزات (Multi-hop). يقدّم هذا التنظيم ثلاث ميّزات أساسية: تقليل عدد الإرسالات الطويلة المدى، تجميع البيانات قبل النقل، وتمكين دورات نوم منسّقة بين أعضاء العنقود [10], [28].

4.1 مجالات التطبيق

أتاح التقدّم في تصغير المعالجات وانخفاض كلفة الراديو نشر شبكات استشعار لاسلكية في طيف واسع من المجالات [2], [5]. نستعرض أبرزها فيما يأتي:

- **الرصد البيئي ومراقبة الموائل**: نشر مبكّر ومرجعي على جزيرة Great Duck Island لرصد طيور Leach's storm petrel [3]؛ تأسّست به بنية تجارب «نشر الشبكة» في الأبحاث.
- **رصد الكوارث الطبيعية**: نشر عقد على بركان Reventador في الإكوادور لرصد النشاط الزلزالي والصوتي [4].
- **المدن الذكية والزراعة الدقيقة**: قياس جودة الهواء، مراقبة رطوبة التربة، ضبط الإنارة العمومية [5].
- **الصحة الإلكترونية** (e-Health): شبكات حسّاسات جسديّة (Body Area Networks --- BAN) لمتابعة المرضى عن بُعد.
- **التطبيقات العسكرية والأمنية**: استشعار التطفّل ورصد ساحات المعركة [1].

تشترك هذه التطبيقات في خاصيتين تجعلان مسألة عمر الشبكة بالغة الأهمية: صعوبة الوصول الفيزيائي للعقد بعد النشر، وضرورة الحصول على تغطية رصد مستمرّة لأطول فترة ممكنة [29].

5.1 قيود التصميم

يفرض السياق التطبيقي لشبكات الاستشعار اللاسلكية مجموعة من القيود التي يجب أن تأخذها بروتوكولات التوجيه والتجميع بعين الاعتبار [1], [6]:

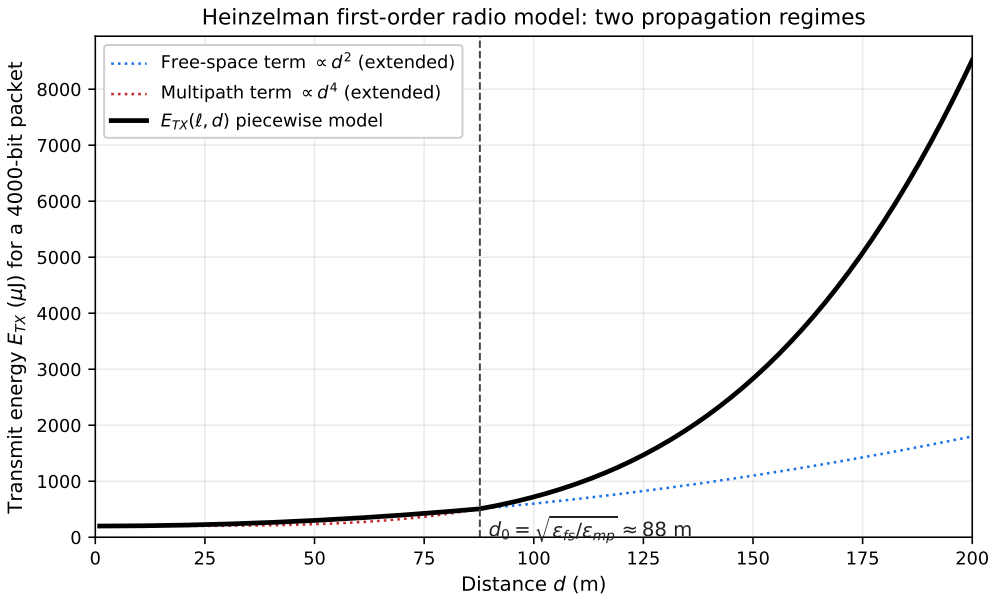
- **محدودية الطاقة**: العقد تعمل ببطّاريات صغيرة الحجم، كلّ Joule غير مُستغل بحكمة يمثّل خسارة مباشرة من عمر الشبكة.
- **محدودية المعالجة والذاكرة**: لا يمكن تنفيذ خوارزميات تحسين ذات تعقيد مرتفع داخل العقدة الواحدة؛ ومن ثَمّ يُلجأ إلى تنسيق مركزي عبر المحطّة القاعدية أو إلى خوارزميات موزّعة خفيفة.
- **قيود الاتصال**: المدى المحدود لوحدة الراديو، التداخلات، وتأثير القناة الراديوية الواقعية (إخفاء وتلاشي) كلّها عوامل تُنقص جودة التسليم وتُربك حسابات الطاقة المثالية [19], [20].
- **قابلية التوسّع**: يُتوقَّع من بروتوكولات التجميع أن تحتفظ بأدائها عند الانتقال من بضع عشرات من العقد إلى المئات أو الآلاف.
- **التحمّل والمتانة** (Robustness): يجب أن تواصل الشبكة العمل رغم أعطاب العقد المنفردة وتقلبات القناة. يمثّل تقييم هذه المتانة الموضوع المركزي لمذكّرتنا.

تجتمع هذه القيود لتجعل من اختيار رؤوس العناقيد (Cluster Head Selection) مشكلةً تحسينيةً توافقيةً (Combinatorial Optimization Problem) صعبة، تستوجب اللجوء إلى الخوارزميات الميتاهيوريستيكية [28], [30].

6.1 النموذج الطاقي المرجعي لـ Heinzelman

اعتمدت غالبية أبحاث التجميع الهرمي في شبكات الاستشعار منذ نشر بروتوكول LEACH عام 2000 على نموذج الطاقة ذي الرتبة الأولى الذي قدّمه Heinzelman ومعاونوه [8], [9]. يميّز النموذج بين نظامين انتشاريَّين بحسب المسافة بين المُرسِل والمُستقبِل، ويعتمد على عتبة فاصلة d_0 محسوبة من معاملي الانتشار:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \approx 87\text{m} \tag{1}$$



شكل 2.1: نموذج Heinzelman ذو الرتبة الأولى: نظامان انتشاريّان منفصلان عند العتبة $d_0 \approx 87$ م. تظهر الكلفة الطاقية لإرسال حزمة من 4000 بتّة (المنحنى الأسود) كقطعتين d^2 (الفضاء الحرّ) وd^4 (التعدّد المساري).

1.6.1 طاقة الإرسال

يُعطى استهلاك الطاقة لإرسال رسالة طولها ℓ بتّة على مسافة d بـ:

$$E_{TX}(\ell, d) = \begin{cases} \ell \cdot E_{elec} + \ell \cdot \varepsilon_{fs} \cdot d^2, & \text{إذا } d < d_0 \\ \ell \cdot E_{elec} + \ell \cdot \varepsilon_{mp} \cdot d^4, & \text{إذا } d \geq d_0 \end{cases} \tag{2}$$

حيث E_{elec} طاقة معالجة كلّ بتّة في الدارة الإلكترونية، وε_{fs} معامل الفقد في نظام الفضاء الحرّ (Free-space) بنواة تربيعية d^2، وε_{mp} معامل نظام التعدّد المساري (Multipath) بنواة من الدرجة الرابعة d^4.

2.6.1 طاقة الاستقبال والتجميع

تُعطى طاقة استقبال ℓ بتّة بـ:

$$E_{RX}(\ell) \;=\; \ell \cdot E_{elec} \tag{3}$$

أمّا تجميع البيانات (Data Aggregation) داخل رأس العنقود فيُكلَّف بثابت إضافي E_{DA} لكلّ بتّة من المعطيات المتلقّاة. تُلخّص القيم المرجعية المعتمدة في معظم الأعمال [9] في الجدول 2.1.

جدول 2.1: معاملات نموذج الطاقة الراديوي المعتمدة في الدراسة

الوصف	القيمة	المعامل
طاقة الإلكترونيات لكل بتّة	nJ/bit 50	E_{elec}
معامل الفضاء الحرّ	pJ/bit/m^2 10	ε_{fs}
معامل التعدّد المساري	pJ/bit/m^4 0.0013	ε_{mp}
طاقة تجميع البيانات في رأس العنقود	nJ/bit/signal 5	E_{DA}
طول حزمة المعطيات	bits 4000	(data) ℓ
طول حزمة التحكّم	bits 200	(ctrl) ℓ
عتبة الفصل بين النظامين	m 87	d_0

3.6.1 ملاحظة على افتراض المثاليّة

يفترض هذا النموذج أن كلّ حزمة مُرسَلة تصل بالضرورة إلى الوجهة طالما توفّرت طاقة كافية لدى المُرسِل. أي إنه نموذج **تحديدي** (Deterministic) لا يأخذ في الحسبان لا الإخفاء ولا التلاشي ولا التداخل. يمثّل هذا الافتراض **الحدّ المثالي** لأي تقييم: كل البروتوكولات تظهر هنا في أحسن صورة ممكنة. الفصل الثالث من المذكّرة سيُخفّف هذا الافتراض بإدخال نموذجَي القناة الواقعيَّين (الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي وتلاشي رايلي) وقياس أثر ذلك على الأداء النسبي للخوارزميات.

7.1 مقاييس عمر الشبكة

لتقييم بروتوكولات التجميع لا يكفي قياس الإنتاجية الإجمالية فحسب، بل ينبغي وصف ديناميكية فناء العقد على طول دورات المحاكاة. تعتمد الأدبيات بشكل واسع ثلاث علامات زمنية مرجعية [6], [9]:

- **موت العقدة الأولى** (First Node Death --- FND): رقم الدورة التي تنفد فيها طاقة أوّل عقدة. يقيس متانة الشبكة في مرحلتها الباكرة قبل أن يبدأ التحلّل.

- **موت نصف العقد** (Half Nodes Death --- HND): رقم الدورة التي تكون فيها نسبة 50% من العقد ميّتة. يُمثّل مؤشّرًا على بقاء التغطية الفعّالة.
- **موت العقدة الأخيرة** (Last Node Death --- LND): رقم الدورة التي تموت فيها آخر عقدة. يُترجم العمر الإجمالي للشبكة.

1.7.1 المقاييس الإنتاجية والطاقية

نُكمِل العلامات الزمنية بمقاييس كميّة:

- **الإنتاجية التراكمية** (Cumulative Throughput): إجمالي عدد الحزم المسلَّمة بنجاح إلى المحطّة القاعدية على مدى عمر الشبكة. وهو الهدف النهائي لكلّ بروتوكول تجميع.
- **معدّل تسليم الحزم** (Packet Delivery Ratio --- PDR): النسبة بين عدد الحزم المُسلَّمة وعدد الحزم المُرسَلة. مقياس جوهري تحت القنوات الواقعية، إذ يساوي 1 في النموذج المثالي.
- **الطاقة لكلّ تقرير** (Energy per Report): النسبة بين إجمالي الطاقة المستهلكة وإجمالي التقارير المسلَّمة. يقيس الكفاءة الطاقية الفعلية للبروتوكول.
- **متوسّط زمن وحدة المعالجة** (CPU Time per Round): الكلفة الحاسوبية للخوارزمية، قياسًا للملاءمة العملية لتنفيذها ضمن قيود العتاد.

ستُستخدم هذه المقاييس مجتمعةً في الفصل الرابع لمقارنة أداء الخوارزميات الستّ تحت النماذج القنوية الثلاثة، اعتمادًا على عشرين تكرارًا متناظرًا للحدّ من الضوضاء العشوائية وتمكين الاختبارات الإحصائية المقترنة.

8.1 خاتمة

عرض هذا الفصل المفاهيم الأساسية التي ستُبنى عليها بقيّة المذكّرة: معمارية عقدة الاستشعار وقيودها، الطبولوجية العنقودية الهرمية المعتمدة، نموذج الطاقة المرجعي لـ Heinzelman بمعادلاته وثوابته، ومقاييس عمر الشبكة المعتمدة في التقييم. يكشف هذا الإطار عن مفارقة منهجية أساسية: رغم أن نموذج Heinzelman يُمثّل القاعدة الراسخة للمقارنة منذ أكثر من عقدين، فإنّه يتجاهل العشوائية التي تفرضها القناة الراديوية الواقعية. لا نعرف إلى اليوم ما إن كان التفوّق المُعلَن لخوارزمية محدّدة في إطار Heinzelman يصمد، يتعزّز، أم ينهار حين تُدخَل عشوائية القناة. هذه المفارقة تشكّل المنطلق المنهجي لمذكّرتنا، وسيتناولها الفصل الثاني عبر استعراض البروتوكولات التجميعية المعتمدة بدءًا من LEACH وصولًا إلى خوارزمية FSS-WSN موضوع الدراسة.

التجميع الهرمي وخوارزمياته في شبكات الاستشعار اللاسلكية

1.2 تمهيد

استعرض الفصل السابق الإطار العام لشبكات الاستشعار اللاسلكية ونموذج الطاقة المرجعي لـ Heinzelman. يخصّص الفصل الحالي لمراجعة الخوارزميات المعتمدة في انتقاء رؤوس العناقيد، إذ يمثّل هذا الانتقاء قلب أي بروتوكول تجميع هرمي وأكبر مصدر تأثير على عمر الشبكة [10], [11]. ستُقدَّم ستُّ خوارزميات: ثلاث منها كلاسيكية احتمالية أو هجينة (LEACH، HEED، SEP)، واثنتان مستوحاتان من ذكاء الأسراب (PSO، GWO)، فضلًا عن خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة (FSS-WSN) موضوع المذكّرة. ينتهي الفصل بمقارنة هيكلية تُبرِز ما يجعل خوارزمية FSS-WSN مرشّحًا قويًا للاحتفاظ بأدائها تحت عشوائية القناة الراديوية، وهي الفرضية التي ستُختبَر تجريبيًا في الفصل الرابع.

2.2 مبدأ التجميع الهرمي

في كلّ دورة (round) يجري تشغيل دورة كاملة من ثلاث مراحل [9], [10]:

1. **الإعلان والتشكيل** (Advertisement and Setup): تُنتقى مجموعةٌ $H \subset V_{\text{alive}}(t)$ من العقد لتلعب دور رؤوس العناقيد، ثم تنضمّ كلّ عقدة عضو إلى أقرب رأس ضمن نصف قطر العنقود r_c.

2. **الإرسال والتجميع** (Steady-state): تُرسِل كلّ عقدة عضو حزمتها إلى رأس عنقودها، الذي يجمعها في حزمة موحّدة (تكلفة تجميع E_{DA} لكلّ بتّة).

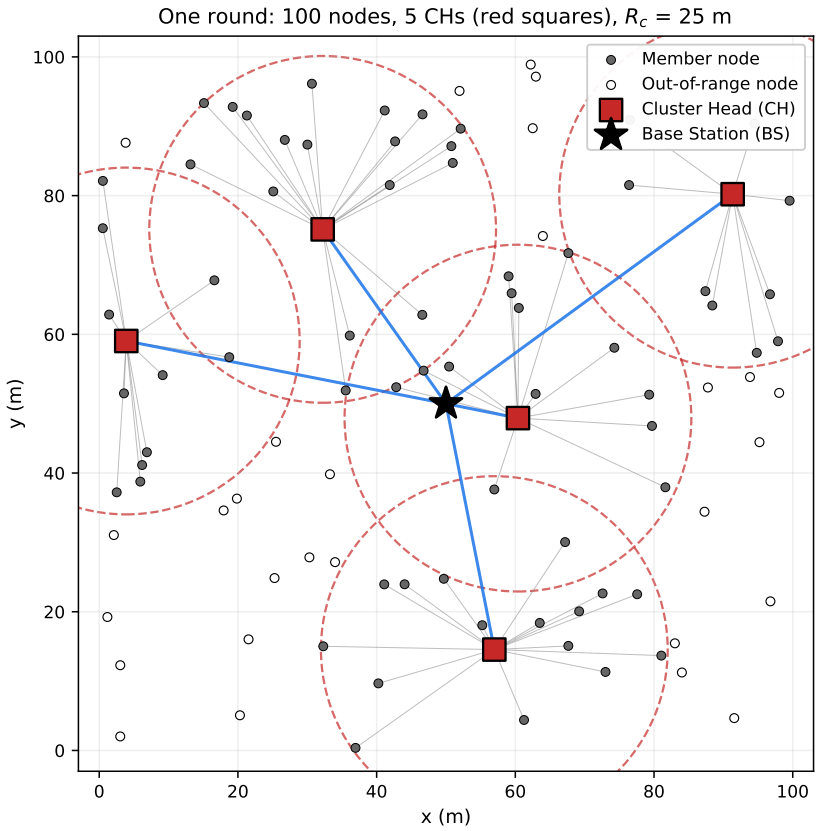
3. **التوجيه إلى المحطّة القاعدية**: تنقل رؤوس العناقيد الحزم المجمَّعة إلى المحطّة القاعدية. في الحالة أحادية القفزة كلّ رأس يُرسِل مباشرة، وفي الحالة متعدّدة القفزات يجري التوجيه عبر خوارزمية Dijkstra على شبكة CH-CH المُقيَّدة بنصف قطر إرسال r_{tx}.

تتقاسم الخوارزميات الست المعروضة لاحقًا هذه البنية العامة، لكنّها تختلف في **معيار اختيار رؤوس العناقيد** وفي طريقة استكشاف فضاء الحلول. هذا الاختيار هو المتغيّر التجريبي المركزي في هذه المذكّرة.

3.2 الخوارزميات الكلاسيكية والميتاهيوريستيكية المرجعية

1.3.2 LEACH: التوزيع الاحتمالي للرئاسة

اقترح Heinzelman ومعاونوه عام 2000 بروتوكول LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [8], [9]. مبدأ البروتوكول بسيط: في كلّ دورة r، تختار كلّ عقدة بشكل مستقل قيمةً عشوائية



شكل 1.2: لقطة لدورة من التجميع الهرمي على 100 عقدة موزَّعة عشوائيًا في حقل 100×100 م. خمسة رؤوس عناقيد (مربّعات حمراء) محاطةً بأقراص نصف قطرها $r_c = 25$ م، الأعضاء (نقاط رمادية) متّصلون بأقرب رأس، والمحطّة القاعدية (نجمة سوداء) في المركز؛ الخطوط الزرقاء تُمثّل النقل من رؤوس العناقيد إلى المحطّة القاعدية.

موحَّدة في $[0,1]$، وتعلن عن نفسها رأس عنقود إذا كانت هذه القيمة أصغر من العتبة:

$$T(i) \;=\; \begin{cases} \dfrac{p}{1 - p \cdot \left(r \bmod \frac{1}{p}\right)} & \text{إذا} i \in G \\ 0 & \text{خلاف ذلك} \end{cases} \tag{1}$$

حيث p النسبة المستهدفة من رؤوس العناقيد (0.05 في معظم الأعمال)، وG مجموعة العقد التي لم تُترأَّس في الـ $[1/p]$ الدورات السابقة. يضمن هذا الإجراء على المدى الطويل أن تتناوب جميع العقد على الرئاسة، إلّا أن التوزيع داخل دورة منفردة يبقى عشوائيًا تمامًا، فقد يكون عدد الرؤوس مختلًّا، أو موزَّعًا بشكل سيّئ هندسيًا، أو حتى منعدمًا. كذلك يتجاهل LEACH مستوى الطاقة المتبقّية، فقد تُعيَّن عقدة على وشك النفاد رأسًا. هذه القيود البنيوية فتحت الباب أمام البروتوكولات اللاحقة.

2.3.2 HEED: التهجين بين الطاقة والكثافة

قدّم Younis وFahmy عام 2004 بروتوكول HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering) [31] الذي يصلح ثغرتي LEACH الرئيسيّتين: تجاهل الطاقة المتبقّية وغياب التحكّم في الكثافة. يرتكز HEED على معيار أوّلي يعتمد الطاقة المتبقّية:

$$\mathrm{CH}_{\mathrm{prob}}(i) \;=\; \max\!\left(c_{\min},\; p \cdot \frac{E_{\mathrm{res}}(i)}{E_{\max}}\right) \tag{2}$$

ثم يُجري عدّة جولات تكرارية يتنافس فيها المرشّحون لرئاسة العنقود وفق معيار ثانوي يعكس الكلفة الاتصالية داخل الجوار (مثل عدد الجيران أو متوسّط مسافة الاتصال). تتقدّم الجولات بتضاعف الاحتمال $\mathrm{CH}_{\mathrm{prob}} \leftarrow 2\,\mathrm{CH}_{\mathrm{prob}}$ إلى أن يبلغ القيمة 1، فتُحسَم الرؤوس النهائية. ينتُج عن ذلك تغطية أكثر اتّزانًا وميزانية طاقية أفضل من LEACH، لكنّه يبقى محدودًا بسبب الانتقاء الموزَّع المحلّي وغياب الذاكرة بين الدورات.

3.3.2 SEP: تكييف للوسط غير المتجانس

اقترح Smaragdakis وزملاؤه بروتوكول SEP (Stable Election Protocol) [27] كامتداد لـ LEACH ليلائم الشبكات غير المتجانسة طاقيًا. يعتمد البروتوكول عتبةً مختلفة حسب فئة العقدة:

- العقد العادية: تستخدم العتبة T_{nrm} المماثلة لـ LEACH مع نسبة مستهدفة $\frac{p}{1+\alpha m}$.
- العقد المتقدّمة (نسبتها m وفائض طاقتها α): تستخدم العتبة T_{adv} المعدّلة بالعامل $(1+\alpha)$، فترأس العقد المتقدّمة بمعدّل أعلى.

تُحقّق هذه المعاملة المتمايزة استقرارًا أطول قبل وفاة العقد العادية الأولى. غير أنّ SEP يحتفظ بالطابع الاحتمالي البحت لـ LEACH ويرث منه الاضطراب الكبير من دورة إلى أخرى، خاصةً في الإطارات الصغيرة. ندرجه في المرجعيات لأنه يُغطّي بُعد عدم التجانس، وإن كانت الإعدادات التجريبية في هذه المذكّرة تستخدم شبكات متجانسة لعزل أثر القناة فقط.

4.3.2 التجميع بـ PSO: ترميز متّصل وعتبة

اقترح Kennedy وEberhart عام 1995 خوارزمية تحسين سرب الجسيمات (PSO --- Particle Swarm Optimization) [12]. يُعرَّف كلّ جُسَيم $\mathbf{x}_i$ كمتجه في الفضاء الإقليدي، ويتطوّر وفق معادلتي السرعة والموقع:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} \;=\; \omega\,\mathbf{v}_i^{t} \;+\; c_1 r_1\big(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i^{t}\big) \;+\; c_2 r_2\big(\mathbf{g} - \mathbf{x}_i^{t}\big) \tag{3}$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} \;=\; \mathbf{x}_i^{t} + \mathbf{v}_i^{t+1} \tag{4}$$

حيث $\mathbf{p}_i$ أحسن موقع تاريخي للجُسَيم، $\mathbf{g}$ أحسن موقع عالمي، ω معامل الكُمون، c_1, c_2 معاملا الانجذاب، وr_1, r_2 قيمتان عشوائيتان موحَّدتان في $[0,1]$. طُبِّقت PSO على انتقاء رؤوس العناقيد في عدّة أعمال [32], [33]، ولكن الإشكالية المحورية لهذا الترميز هي أن مساحة الحلول مستمرّة في حين أن مجموعة H متقطّعة. يستلزم ذلك **خطوة فكّ ترميز**: ترتيب قيم متجه الجُسَيم وانتقاء أعلى K منها رؤوسًا. هذه الخطوة تُدخِل ضوضاءَ ترميز إضافية يمكن أن تتفاقم تحت قنوات عشوائية.

5.3.2 التجميع بـ GWO: محاكاة قطيع الذئاب

قدّم Mirjalili وآخرون عام 2014 خوارزمية مُحسِّن الذئب الرمادي (GWO --- Grey Wolf Optimizer) [13] المستوحاة من تراتبية القطيع وأسلوب الصيد الجماعي. يحفظ GWO ثلاثة قادة (α، β، δ) ويُحدِّث مواقع الذئاب الأخرى ('omega') وفق:

$$\mathbf{X}^{t+1} \;=\; \frac{\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3}{3}, \qquad \mathbf{X}_k \;=\; \mathbf{X}_{\alpha,\beta,\delta} - \mathbf{A}_k \cdot \big|\mathbf{C}_k \cdot \mathbf{X}_{\alpha,\beta,\delta} - \mathbf{X}^{t}\big| \tag{5}$$

حيث $\mathbf{A}_k$ و$\mathbf{C}_k$ معاملا قرب وتجوّل يخضعان لتناقص خطّي للسماح بالاستكشاف ثم الاستغلال. يُطبَّق نفس مخطّط فكّ الترميز المستخدم في PSO لتحويل المتجه المتّصل إلى مجموعة H متقطّعة. بالإضافة إلى ذلك، تتقاسم GWO مع PSO الحساسية تجاه الترميز المتّصل: عند تطبيق العتبة، أيّ اضطراب عشوائي على قيم $\mathbf{X}$ (كأثر القناة على E_{res} المُستخدَمة في الدالة الهدف) يمكن أن يُغيّر هوية الرؤوس المختارين بسهولة.

4.2 خوارزمية البحث بالمجموعة الثابتة (FSS-WSN)

تشكّل FSS-WSN الخوارزمية المركزية لهذه المذكّرة. تُمثِّل تكييفًا لخوارزمية Fixed Set Search [15], [16] مع مسألة انتقاء رؤوس العناقيد [14]. نعرض في ما يأتي أصولها المنهجية ثم تركيبتها التفصيلية.

1.4.2 الأصل والنسب المنهجي: من GRASP إلى FSS

تنحدر FSS من خوارزمية GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) التي قدّمها

Feo وResende عام 1989 [17], [18]. تتألّف GRASP من تكرارات مستقلّة، يجري في كلّ تكرار:

- بناءُ حلٍّ من خلال آلية جشعة عشوائية معتدلة بقائمة المرشّحين المُقيَّدة (Restricted Candidate List --- RCL)؛
- تحسين الحلّ المبنيّ بـ البحث المحلّي.

المحدودية المعروفة لـ GRASP هي غياب الذاكرة بين التكرارات: كلّ بناء يبدأ من الصفر دون استفادة من المعلومات المُكتسَبة. ولِسدّ هذه الثغرة، طوّر Jovanovic ومعاونوه عام 2019 خوارزمية FSS التي تضيف مجموعةً ثابتةً F من المُكوِّنات «الناجحة» المُستخلصة من حلول النخبة، وتُستخدم لاحقًا في تحفيز مرحلة الاستغلال.

2.4.2 صياغة توافقية أصيلة

يعمل FSS-WSN مباشرةً في الفضاء التوافقي: الحلّ هو ببساطة المجموعة $H \subseteq V_{\text{alive}}(t)$. لا يوجد ترميز متّصل ولا عتبة. هذا الخيار الهيكلي يميّز الخوارزمية عن PSO وGWO، وهو الفرضية المنهجية التي تُختبر تجريبيًا في هذه المذكّرة: هل الخوارزميات ذات الفضاء التوافقي الأصيل أكثر متانة تجاه عشوائية القناة من نظيراتها ذات الترميز المتّصل؟.

دالة الهدف: تُصاغ مسألة الانتقاء بدلالة دالة لياقة مركّبة (تُصغَّر):

$$\text{Fitness}_t(H) \;=\; F_{\text{base}}(H) \;+\; \lambda \cdot P(H) \tag{6}$$

$$F_{\text{base}}(H) \;=\; w_1 \cdot \mathcal{C}_E(H) \;+\; \frac{w_2}{2}\big(\widetilde{\mathcal{C}}_D(H) + \widetilde{\mathcal{C}}_S(H)\big) \;+\; w_3 \cdot \widetilde{\mathcal{C}}_L(H) \tag{7}$$

حيث $\mathcal{C}_E$ متوسّط نسبة الطاقة المُستهلَكة في رؤوس العناقيد، و$\widetilde{\mathcal{C}}_D$ متوسّط مسافات الأعضاء إلى رؤوسهم بعد التطبيع، و$\widetilde{\mathcal{C}}_S$ كلفة التوجيه إلى المحطّة القاعدية، و$\widetilde{\mathcal{C}}_L$ عدم التوازن في أحجام العناقيد. كلّ المكوِّنات مُطبَّعة في $[0, 1]$. أمّا $P(H)$ فهو **منظّم الإصلاح**: نسبة العقد التي اضطرت إجراءات الإصلاح إلى إضافتها لتأمين التغطية والاتصال بالقاعدة (انظر).

3.4.2 البناء الجشع العشوائي: الإجراء GRASP_Construct

في كلّ تكرار، يُبنى حلّ مرشّح H_i خطوةً بخطوة. عند كلّ خطوة، يُحسَب لكلّ عقدة v ليست بعدُ في H درجةٌ جشعة:

$$\text{score}(v) \;=\; \alpha_1 \cdot \frac{E_{\text{res}}(v)}{E_{\max}} \;+\; \alpha_2 \cdot \rho_{r_c}(v) \;-\; \alpha_3 \cdot \frac{d(v, \text{BS})}{d_{\max}} \tag{8}$$

حيث $\rho_{r_c}(v)$ كثافة جوار v ضمن نصف القطر r_c، و$d(v, \text{BS})$ المسافة إلى المحطّة القاعدية. تأتي القيم المرجعية

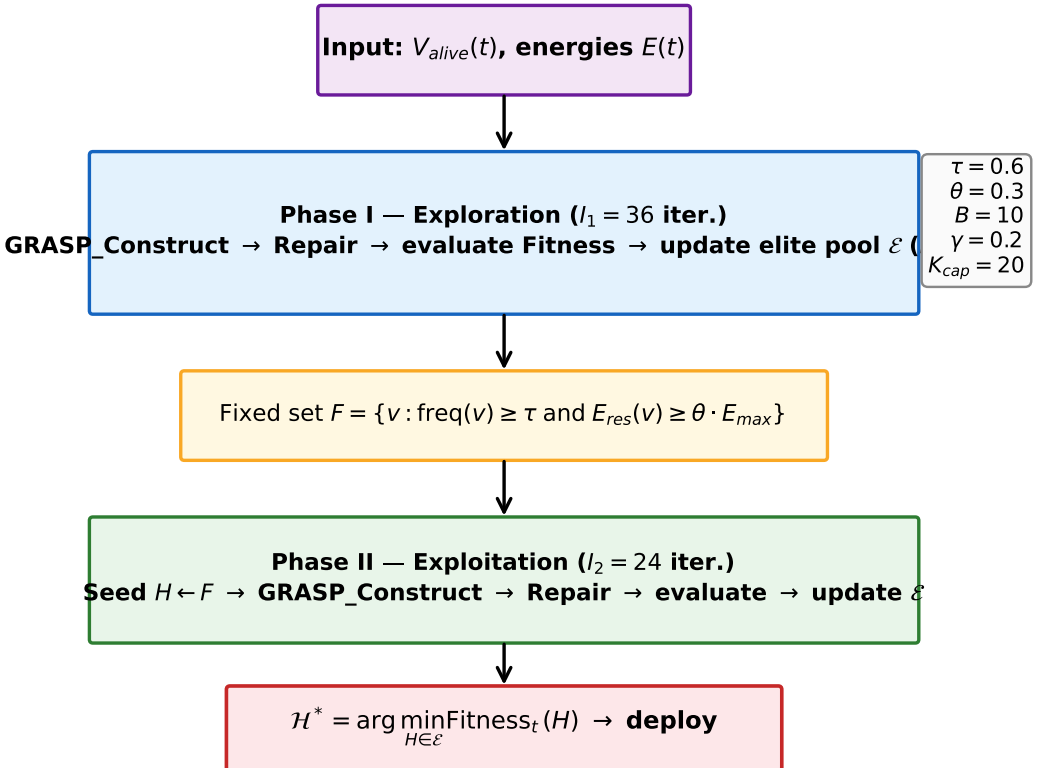
$\alpha_1 = 0{,}5$، $\alpha_2 = 0{,}3$، $\alpha_3 = 0{,}2$ لتعكس الترتيب التفضيلي: الطاقة، ثم الكثافة، ثم القرب من القاعدة [14].
ثم تُبنى **قائمة المرشّحين المُقيَّدة**:

$$\mathrm{RCL} \;=\; \{v : \mathrm{score}(v) \geq s_{\max} - \gamma\,(s_{\max} - s_{\min})\} \tag{9}$$

ويُسحَب عنصر منها بشكل عشوائي موحَّد ويُضاف إلى H. يستمر البناء حتى يبلغ حجم H العدد المستهدَف K (مع سَقف بنائي $K_{\mathrm{cap}} = 20$ يَحدّ حجم المجموعة في الحالات التي تَستلزم تغطية معقّدة). المعامل $\gamma = 0{,}2$ يضبط التوازن بين الجشع المحض ($\gamma = 0$) والعشوائية المحضة ($\gamma = 1$) [14].

4.4.2 المرحلتان: الاستكشاف ثم الاستغلال

تنقسم الخوارزمية إلى مرحلتين متعاقبتين، يبلغ مجموع تكراراتهما $n_{\mathrm{iter}} = 60$ موزّعةً وفق الصيغة المعتمدة في الورقة المرجعية [14]: $I_1 = \mathrm{round}(0{,}6 \cdot n_{\mathrm{iter}}) = 36$ للاستكشاف، و$I_2 = n_{\mathrm{iter}} - I_1 = 24$ للاستغلال. يُغلَّب وزن الاستكشاف لأنه ينتج المُكوِّنات التي ستُلتقَط في المجموعة الثابتة.



شكل 2.2: خطّ أنبوب FSS-WSN في كلّ دورة: مرحلة استكشاف بـ GRASP مكثَّف، استخلاص المجموعة الثابتة F من مَجمَع النخبة، ثمّ مرحلة استغلال متحيِّزة بـ F، وأخيرًا انتقاء أفضل مرشّح ونشره بعد الإصلاح.

المرحلة الأولى: الاستكشاف الخالص ($I_1 = 36$ **تكرارًا**): يجري في كلّ تكرار:

1. بناء حلٍّ H_i عبر GRASP_Construct دون أيّ تحيّز؛

2. إصلاح H_i لضمان التغطية والاتصال ($R(H_i) \mapsto H_i^+$)؛

3. تقييم $f_i = \mathrm{Fitness}_t(H_i^+)$؛

4. تحديث مَجمع النخبة $\mathcal{E}$ (الحجم الأقصى $B = 10$).

استخلاص المجموعة الثابتة: عند نهاية المرحلة الأولى، تُحسب لكلّ عقدة v ترددها داخل $\mathcal{E}$:

$$\mathrm{freq}(v) \;=\; \frac{|\{H \in \mathcal{E} : v \in H\}|}{|\mathcal{E}|} \tag{10}$$

ثم تُعرَّف المجموعة الثابتة بـ:

$$F \;=\; \big\{v : \mathrm{freq}(v) \geq \beta \;\; \textbf{و} \;\; E_{\mathrm{res}}(v) \geq \theta \cdot E_{\max}(t)\big\} \tag{11}$$

حيث $\tau = 0{,}6$ عتبة التردّد و$\theta = 0{,}3$ حارس الطاقة (Energy Guard) الذي يضمن استبعاد العقد ذات الطاقة المنخفضة من المجموعة الثابتة [14].

المرحلة الثانية: الاستغلال المُتحيِّز ($I_2 = 24$ تكرارًا): في كلّ تكرار يُحقَّن البناء بالمجموعة الثابتة:

1. يُهيَّأ H ابتداءً بعيّنة عشوائية بحجم $\lfloor 0{,}7 \cdot |F| \rfloor$ من F؛

2. يُكمَل البناء عبر GRASP_Construct كما في المرحلة الأولى؛

3. تُكرَّر خطوات الإصلاح والتقييم وتحديث المَجمَع.

الانتقاء النهائي: يُختار $H^* = \arg\min_{H \in \mathcal{E}} \mathrm{Fitness}_t(H)$ ويُعاد إلى الكتلة الطاقية في الدورة t لتنفيذ مرحلة النقل.

5.4.2 آلية المجموعة الثابتة وحارس الطاقة

يُمثِّل وجود F ذاكرةً مكثَّفة بين التكرارات: العُقد التي ظهرت بكثافة في حلول النخبة هي مرشّحات قويّة، فيُحقن وجودها في الحلّ ويُترك للخوارزمية عبء استكمال البقيّة. غير أنّ هذه الذاكرة قد تُصبح ضارّة إذا اخترقَت عقدةٌ ذات طاقة منخفضة المجموعةَ الثابتة وبقيت فيها رغم نزيف طاقتها. لذلك أُضيف حارس الطاقة θ: تُستثنى من F العُقد التي انخفضت طاقتها دون $\theta \cdot E_{\max}(t)$ حيث $E_{\max}(t)$ أعلى طاقة متبقّية في الشبكة في الدورة t. يضمن هذا التحديث الديناميكي صلاحيّة المجموعة الثابتة على طول العمر.

6.4.2 إجراء الإصلاح R(H)

يضمن إجراء الإصلاح أن يكون كلّ حلٍّ H_i^+ قابلًا للتنفيذ، وفق شرطَيِ:

- **التغطية:** لكلّ عقدة $v \in V_{\text{alive}}$ يوجد رأس $h \in H_i^+$ بحيث $d(v,h) \leq r_c$؛

- **الاتصال بالقاعدة:** لكلّ رأس $h \in H_i^+$ يوجد مسار في رسم بياني G_{tx} (المُقيَّد بنصف قطر الإرسال r_{tx}) يصل من h إلى المحطّة القاعدية.

يُعالَج خرقُ التغطية بإضافة عقد إلى H (الأكثر طاقة في الجوار غير المُغطَّى)، ويُعالَج خرقُ الاتصال بإدراج عقد مرحِّلة عبر تنويع لخوارزمية Dijkstra. تُحسَب كلفة الإصلاح $P(H) = (|H_i^+| - |H_i|)/|V_{\text{alive}}|$ وتُضمَّن في دالة اللياقة (المعادلة 6). هذا التضمين يلعب دور منظِّم تبعيّة الإصلاح: يُكافَأ الحلّ الذي يستلزم أقلّ إصلاح، أي الذي كان قابلًا للتنفيذ بطبيعته.

جدول 1.2: معاملات FSS-WSN المرجعية المعتمدة في الدراسة [14]

المعامل	القيمة	الدور
$n_{\text{iter}} = I_1 + I_2$	$60 = 36 + 24$	التكرارات الكلّية موزّعة 60%/40% بين الاستكشاف والاستغلال
B	10	حجم مَجمَع النخبة
τ	0,6	عتبة التردّد للانضمام إلى F
θ	0,3	حارس الطاقة
K_{cap}	20	سَقف حجم البناء داخل GRASP_Construct
(RCL) γ	0,2	توازن الجشع/العشوائية
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	0,5/0,3/0,2	أوزان الدرجة الجشعة (طاقة، كثافة، قرب BS)
w_1, w_2, w_3	0,4/0,4/0,2	أوزان مكوّنات F_0
w_R	0,05	وزن مكوّن مكافحة الازدحام $\widetilde{C}_R$
λ	1,0	وزن منظِّم الإصلاح
$L_{\max}$	0	البحث المحلّي بالتبديل (مُعطَّل في الإعداد المرجعي)

5.2 مقارنة هيكلية بين الخوارزميات الستّ

يُلخّص الجدول 2.2 الفروق البنيوية بين الخوارزميات الستّ المعنية، مرتَّبةً وفق ثلاثة أبعاد جوهرية: فضاء البحث، الذاكرة، ومعالجة الجدوى.

جدول 2.2: مقارنة هيكلية بين الخوارزميات الستّ المعتمدة في الدراسة

الخوارزمية	فضاء البحث	الذاكرة	الإصلاح
LEACH	احتمالي بحت	لا يوجد	ضمنيّ
HEED	توافقي محلّي	لا يوجد	ضمنيّ
SEP	احتمالي مع وزن طاقي	لا يوجد	ضمنيّ
PSO	متّصل + عتبة فكّ ترميز	جسيمات	خارجي
GWO	متّصل + عتبة فكّ ترميز	ذئاب α, β, δ	خارجي
FSS-WSN	**توافقي أصيل**	**مَجمَع نخبة + مجموعة ثابتة**	**تحديدي صريح**

تَبرُز FSS-WSN على البُعد الأوّل بفضائها التوافقي الأصيل: لا تمرّ أيّ معلومة عبر تحويل متّصل-متقطّع. وعلى البُعد الثاني، تُتيح المجموعة الثابتة استثمار البنية الجيّدة للحلول دون الحاجة إلى ترميز سرب. وعلى البُعد الثالث، تُحوِّل الإصلاحَ من ميكانيزم خفيٍّ إلى عنصر مرئي مُضمَّن في دالة اللياقة. هذه الخصائص الثلاث تجعلها مرشّحةً قوية للاحتفاظ بأدائها تحت اضطرابات القناة الراديوية، وهو ما تَختبره الفصول اللاحقة.

6.2 خاتمة

استعرض هذا الفصل ستّ خوارزميات لانتقاء رؤوس العناقيد، تنتمي إلى ثلاث عائلات منهجية متمايزة: الاحتمالية الكلاسيكية (LEACH، SEP)، الموزَّعة الهجينة (HEED)، وذكاء الأسراب (PSO، GWO)، بالإضافة إلى FSS-WSN ذات الفضاء التوافقي الأصيل والذاكرة المركَّزة. يكشف الجدول 2.2 أن FSS-WSN تتمتّع بثلاث ميّزات بنيوية يُتوقّع أن تجعلها أكثر متانة تجاه عشوائية القناة. لكنّ هذا التوقّع يبقى نظريًا؛ إثباته يستلزم إطارًا تجريبيًا صارمًا. هذا ما سيُقدّمه الفصل التالي عبر تعريف نماذج القناة الواقعية الثلاثة (المثالي، الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي، الإخفاء+تلاشي رايلي) ووصف بروتوكول الاختبار العاملي الكامل.

نماذج القناة الراديوية والبروتوكول التجريبي

1.3 تمهيد

تكشف نتائج الأدبيات أن المقارنة بين بروتوكولات التجميع في شبكات الاستشعار اللاسلكية تستند في غالب الأحيان إلى النموذج التحديدي لـ Heinzelman [9], [10]، ويفترض هذا النموذج أن كلّ حزمة مُرسَلة تصل بنجاح ما دامت طاقة المُرسِل كافية. هذه الفرضية تُلغي، بحكم التعريف، أيّ تأثير لعشوائية القناة الراديوية على الأداء النسبي للخوارزميات. تكشف القياسات التجريبية على عتاد حقيقي [19], [20] أن هذا الافتراض بعيد عن الواقع: تُلاحَظ منطقة انتقالية واسعة من الفقد الجزئي بين «الاتصال المثالي» و«الانقطاع التامّ»، تتأثّر بالإخفاء الناتج عن البيئة وبالتلاشي متعدّد المسارات.

يُخصّص هذا الفصل لتعريف نماذج القناة المعتمدة في الدراسة (مثالي، لوغاريتمي طبيعي، لوغاريتمي مع رايلي)، ولوصف بروتوكول الاختبار العاملي الكامل بعدد 720 محاكاة، والمعاملات الشبكية والطاقية، ومقاييس التقييم، والمنهجية الإحصائية المُعتمَدة لاختبار الفرضيتين الصفرية والبديلة المُقدَّمتين في المقدّمة العامّة.

2.3 نماذج القناة الراديوية

1.2.3 النموذج التحديدي لـ Heinzelman: الحدّ المثالي

نُعيد كتابة المعادلات الطاقية الواردة في الفصل الأول للوضوح. تُعطى طاقة الإرسال على مسافة d لرسالة طولها ℓ بتّة بـ:

$$E_{TX}(\ell, d) = \begin{cases} \ell\, E_{elec} + \ell\, \varepsilon_{fs}\, d^2, & d < d_0 \\ \ell\, E_{elec} + \ell\, \varepsilon_{mp}\, d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \tag{1}$$

وطاقة الاستقبال $E_{RX}(\ell) = \ell\, E_{elec}$. السمة المركزية لهذا النموذج هي افتراض أن نسبة تسليم الحزم (Packet Delivery Ratio --- PDR) تساوي 1 دائمًا. كلّ خسارة طاقية مرتبطة فقط بمقدار الإرسال، لا بنجاح الاستلام. ندعو هذا النموذج «**القناة المثالية**» ونعتمده مرجعًا لقياس الانحدار النسبي للأداء عند إدخال العشوائية في النموذجَين التاليَين.

2.2.3 الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي

عند الانتشار في بيئة فيها عوائق (مبانٍ، أشجار، حواجز)، يضاف إلى الفقد الانتشاري المُحسوب بقانون اللوغاريتم العشري انحرافٌ عشوائي تابع لتوزيع طبيعي بمتوسّط صفر، ويُسمّى ذلك Log-normal Shadowing [21], [22]. تُعطى خسارة الانتشار بالـ dB بـ:

$$PL(d) \;=\; PL(d_0) \;+\; 10\,n\,\log_{10}\!\big(d/d_0\big) \;+\; X_\sigma \tag{2}$$

حيث n أُسّ خسارة المسار (2 في الفضاء الحرّ، نحو 3 في الوسط شبه الحضري، يصل إلى 4–5 داخل المباني)، وd_0 مسافة مرجعية (تُعتمَد $d_0 = 1$ m)، و$X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ هو الانحراف العشوائي.

التفسير الفيزيائي: يُجسِّد X_σ أثر الانعكاسات والامتصاص والتشتّت بفعل الأجسام الكبيرة في المسار. في إطار هذه الدراسة نَعتمد $\sigma = 4$ dB للحالة المرجعية (وسط شبه حضري بسيط)، مع تحليل حساسية في الملاحق إلى $\sigma \in \{6, 8\}$ dB المُلائمة لبيئات أكثر تعقيدًا [21].

صياغة SNR وقرار التسليم. بإدماج عوامل السلسلة الكاملة (قدرة الإرسال، خسارة المرجع، الضوضاء)، يمكن جمع كلّ الثوابت في معامل واحد M_{dB} (هامش الوصلة)، وتُكتب SNR اللحظية كالآتي:

$$\mathrm{SNR}_{dB}(d) \;=\; M_{dB} \;-\; 10\,n\,\log_{10}\!\big(d/d_0\big) \;-\; X_\sigma \tag{3}$$

ويُعتبَر الباقت مُسلَّمًا إذا كانت $\mathrm{SNR}_{dB}(d) \geq \gamma_{th}$ حيث γ_{th} عتبة فكّ التشفير. يُعطى احتمال التسليم النظري بـ:

$$\mathrm{PDR}(d) \;=\; \Phi\!\left(\frac{M_{dB} - 10\,n\,\log_{10}(d/d_0) - \gamma_{th}}{\sigma}\right) \tag{4}$$

حيث Φ دالّة التوزيع التراكمية للقانون الطبيعي القياسي. هذه الصيغة تتيح معايرة الهامش M_{dB} معايرةً مغلقة بحيث تتحقّق نسبة تسليم هدفية p^* عند مسافة مرجعية d^*:

$$M_{dB} \;=\; \gamma_{th} \;+\; 10\,n\,\log_{10}\!\big(d^*/d_0\big) \;+\; \sigma\,\Phi^{-1}(p^*) \tag{5}$$

نَعتمد في هذه المذكّرة $p^* = 0{,}95$ عند $d^* = 50$ m، $\gamma_{th} = 0$ dB، $n = 3$، $\sigma = 4$ dB؛ وبالتالي:

$$M_{dB} \;=\; 0 \;+\; 30\,\log_{10}(50) \;+\; 4 \cdot 1{,}6449 \;\approx\; 57{,}549\mathrm{dB} \tag{6}$$

تُجمَّد هذه القيمة لجميع التجارب اللاحقة لضمان قابلية المقارنة.

3.2.3 التلاشي السريع لـ Rayleigh

في البيئات الغنيّة بالتشتّت متعدّد المسارات حيث لا يوجد مسار رؤية مباشر (Non-Line-of-Sight) قويّ، تُجمع المركّبة المُستقبَلة من عددٍ كبير من المسارات ذات تأخّرات طور مختلفة. نتيجةً لنظرية الحدّ المركزي، تُعطى سعة

الإشارة بقانون Rayleigh، وقدرتها بقانون أُسّي:

$$|h|^2 \sim \mathrm{Exp}(1), \qquad f(|h|^2) \;=\; e^{-|h|^2} \tag{7}$$

حيث $h \sim \mathcal{CN}(0,1)$ معامل قناة معقّد ذو توزيع غاوسي دائري متماثل. تتغيّر هذه السعة على مقياس زمني سريع جدًا (ملي ثانية)، أسرع بكثير من زمن دورة محاكاة في شبكتنا. لذلك يُعتمَد التقاط جديد لـ $|h|^2$ لكلّ حزمة، في حين يبقى X_σ ثابتًا طوال الدورة (تباين بطيء).

النموذج المركّب Log-normal + Rayleigh. عند جمع التباين البطيء (الإخفاء) والتباين السريع (التلاشي) في نموذج واحد، تُكتب SNR اللحظية:

$$\mathrm{SNR}_{dB}(d) \;=\; M_{dB} - 10\,n\,\log_{10}(d/d_0) - X_\sigma + 10\,\log_{10}|h|^2 \tag{8}$$

ويبقى قرار التسليم نفسه: $\mathrm{SNR}_{dB}(d) \geq \gamma_{th}$. بسبب احتمال $|h|^2$ قُربَ الصفر، يُدخِل التلاشي مصدرَ خسائرَ كارثية إضافية لا يمكن للنموذج اللوغاريتمي وحده تمثيلها.

4.2.3 مقارنة موجزة

جدول 1.3: مقارنة هيكلية بين نماذج القناة الثلاثة المعتمدة

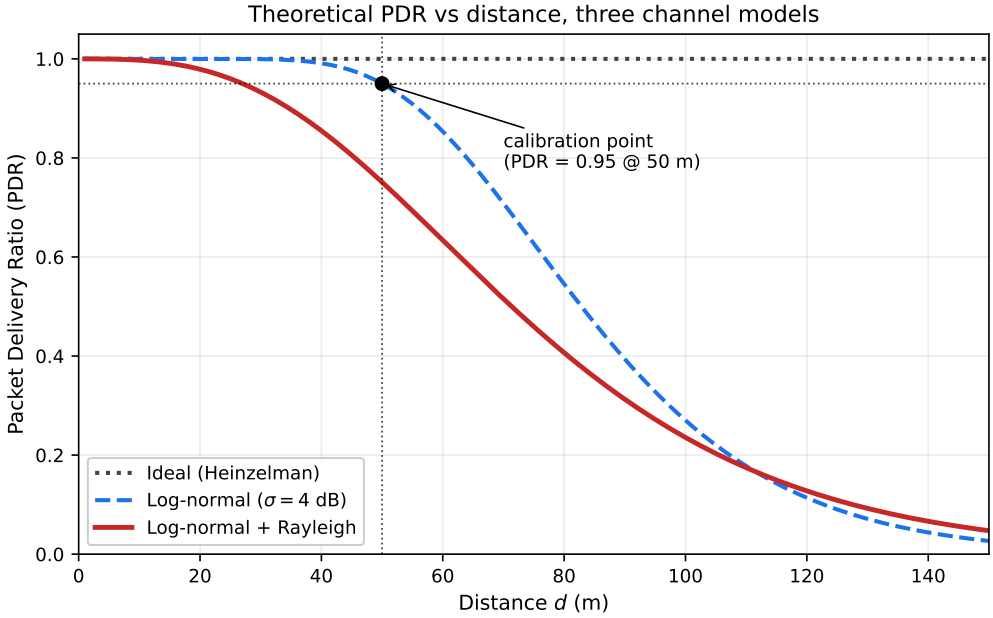
النموذج	الإخفاء	التلاشي السريع	PDR(50m) المتوقّعة
المثالي	لا	لا	1,00
الإخفاء اللوغاريتمي	نعم ($\sigma = 4$ dB)	لا	0,95 (مُعايَر)
الإخفاء + رايلي	نعم ($\sigma = 4$ dB)	نعم	$\approx$ 0,80

تتدرّج النماذج الثلاثة من المثالي إلى الأكثر اضطرابًا، وتمثّل تجريبيًا أرضيةً ملائمة لقياس متانة الخوارزميات. الأرقام المتوقّعة لـ PDR عند 50 m مُستخلَصة من المعادلتَين 4 و8 وتُتأكَّد لاحقًا تجريبيًا.

5.2.3 اصطلاحات التطبيق المُجمَّدة

اعتُمدَت في تنفيذ النماذج الاتفاقات التالية، ويُحتفَظ بها لكلّ التجارب ضمانًا للقابلية للمقارنة:

- **بروتوكول إرسال أحادي المحاولة**: لا يوجد إعادة إرسال، كلّ حزمة ضائعة تبقى ضائعة. يُعظِّم هذا الخيار قُدرة التمييز بين الخوارزميات حسب متانتها البنيوية، ويتجنّب تأثيرات طبقة MAC التي تُخفّف الفروق.
- **حُبيبات X_σ**: عيّنة واحدة لكلّ زوج (وصلة، دورة)؛ تباين بطيء.
- **حُبيبات $|h|^2$**: عيّنة لكلّ حزمة؛ تباين سريع.



شكل 1.3: نسبة تسليم الحزم (PDR) كدالّة في المسافة لنماذج القناة الثلاثة. النموذج المثالي ثابت عند 1، الإخفاء اللوغاريتمي يَنحدر بشكل سَلِس مارًّا بـ 0,95 عند 50 m (نقطة المعايرة)، والنموذج المركَّب Log-normal + Rayleigh يُسرّع التدهور بفعل التلاشي السريع.

- **طاقة الإرسال على الحزمة المفقودة:** مدفوعة بالكامل (المُرسِل لا يعرف نتيجة الإرسال في غياب ACK).
- **طاقة الاستقبال على الحزمة المفقودة:** غير مدفوعة (لا فكّ تشفير، لا استلام كامل).
- **التوجيه الخلفي (Backbone Routing):** تحديدي على المسافات الإقليدية. القناة تؤثّر فقط على التسليم، لا على الطبولوجية. يَعزل هذا الخيار المتانة الجوهرية للخوارزمية عن أي تكيُّف لطبقة التوجيه.
- **الحزم المُتأثّرة:** حزم البيانات (member $\rightarrow$ CH وCH $\rightarrow$ sink/CH) تخضع للقناة. أمّا حزم التحكّم والانضمام (ctrl/join) فتُعدّ موثوقة (إعادة إرسال على مستوى MAC في الواقع). هذا الخيار يَعزل المتغيّر المدروس ويَتطابق مع الممارسة المعتمدة في أدبيات محاكاة WSN.

3.3 المنصّة الحاسوبية والوحدات المُطوَّرة

استُعمِلت المنصّة الحاسوبية المفتوحة المُتاحة في مستودع المشروع *wsn-fss-simulation* [14]. تُغطّي المنصّة الأصلية النموذج التحديدي لـ Heinzelman وستّة بروتوكولات تجميع. أُضيفت في إطار هذه المذكّرة أربع وحدات جديدة دون أيّ تعديل في الأنماط الدلالية للوحدات الموجودة:

نُفِّذت كلّ الوحدات بلغة Python 3.12 مع NumPy، SciPy، pandas، وmatplotlib. اعتُمدت متّجهات NumPy في كل العمليات الحرجة لتجاوز عبء حلقات Python الصرفة.

جدول 2.3: الوحدات المُضافة في إطار هذه المذكّرة

الوحدة	الدور
wsn/channel.py	تعريف صنف مجرَّد للقناة وثلاث تنفيذات (IdealChannel، LogNormalChannel، LogNormalRayleighChannel) مع مصنع make_channel.
wsn/energy_channel.py	دالة apply_round_energy_with_channel التي تعكس بنية الدالة الأصلية ولكنها تمرّ بالقناة لاتخاذ قرار التسليم.
wsn/experiments/channel_runner.py	مُنسّق التجارب العاملي: تكرار على (خوارزمية، قناة، موقع BS، بذرة) وتسجيل النتائج.
scripts/calibrate_gamma_th.py	معايرة هامش الوصلة وتحقّق Monte-Carlo.
test_energy_channel.py + tests/test_channel.py	مجموعة اختبارات وحدات؛ منها اختبار عدم تراجع تحت IdealChannel يَضمَن أن النتائج تطابق المنصّة الأصلية.

1.3.3 البيئة العتادية والبرمجية

لمطابقة شروط ورقة FSS-WSN المرجعية [14]، ولضمان أن أيّ انحراف في نتائجنا ناجمٌ عن طبقة القناة وليس عن مَكدِس برمجيّ مختلف، نُفِّذت الـ 720 محاكاة الإنتاجية على نفس مواصفات العتاد ومَكدِس برمجيّ مكافئ. يُلخّص الجدول 3.3 هذه البيئة.

جدول 3.3: البيئة العتادية والبرمجية المُستخدَمة في تجارب الإنتاج

المكوّن	المواصفة
نظام التشغيل	Windows 10 Pro
المعالج	AMD Ryzen 5 7600X (6 أنوية / 12 خيطًا)
الذاكرة العشوائية	32 GB
مُفسِّر Python	3,12
مكتبات حسابية	NumPy 1.26، SciPy، pandas، matplotlib
التوازي	multiprocessing على 11 عاملًا (خيط واحد محفوظ لنظام التشغيل)
كود المصدر	github.com/RaoufOuanis/wsn-fss-simulation

تُطابق هذه البيئة تمامًا ما وَرَد في [14] من حيث العتاد، مع تحديثات صغيرة وغير متعارضة على المَكدِس البرمجيّ (تَرقيات بسيطة لمُفسِّر Python وللمكتبات الحسابية إلى آخر الإصدارات الفرعية المتوفّرة وقت إجراء التجارب).

جدول 4.3: الخطّة العاملية المعتمدة

العامل	المستويات
الخوارزمية	FSS-WSN ,GWO ,PSO ,SEP ,HEED ,LEACH
نموذج القناة	مثالي، لوغاريتمي طبيعي ($\sigma = 4$ dB)، لوغاريتمي+رايلي
موقع المحطّة القاعدية	مركز الحقل $(50, 50)$، الزاوية $(0, 0)$
الطاقة الابتدائية	متجانسة، $E_0 = 0{,}5$ J
عدد التكرارات (بذور متناظرة)	20
المجموع	$6 \times 3 \times 2 \times 20 = 720$ **محاكاة**

4.3 الخطّة العاملية الكاملة

اعتُمدت خطّة عاملية ثلاثيّة الأبعاد بستّة مستويات للخوارزمية وثلاثة لنموذج القناة واثنين لموقع المحطّة القاعدية: تُستخدَم البذور المتناظرة: في كلّ مزيج (قناة، موقع BS)، تتقاسم الخوارزميات الستّ نفس مجموعة البذور $\{0, 1, \ldots, 19\}$، ممّا يضمن نشوء كلّ الخوارزميات في نفس النشر العشوائي. هذا التحضير ضروريّ لتطبيق الاختبارات الإحصائية المُقترَنة لاحقًا.

5.3 المعاملات الشبكية والطاقية

جدول 5.3: المعاملات الشبكية والطاقية المعتمدة

المعامل	القيمة
عدد العقد N	100
أبعاد الحقل	100×100 m^2
نصف قطر العنقود r_c	25 m
نصف قطر إرسال CH-CH r_{tx}	50 m
طول حزمة المعطيات ℓ	4000 bits
طول حزمة التحكّم	200 bits
الطاقة الابتدائية E_0	0,5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
ε_{fs}	10 pJ/bit/m^2
ε_{mp}	0,0013 pJ/bit/m^4
E_{DA}	5 nJ/bit
ميزانية تكرارات الخوارزميات الميتاهيوريستيكية	60 لكلّ دورة
عدد التكرارات الأقصى لكلّ محاكاة	5000 دورة

تتقاسم الخوارزميات الميتاهيوريستيكية الثلاث (PSO، GWO، FSS-WSN) ميزانية تكرارات موحَّدة $n_{\text{iter}} = 60$ لكلّ دورة، لضمان مقارنة عادلة من ناحية الكلفة الحاسوبية.

6.3 مقاييس التقييم

تُسجَّل لكلّ محاكاة المقاييس التالية، تُحفَظ كاملةً في ملفات CSV قابلة للمعالجة الإحصائية اللاحقة:

- **FND**: رقم الدورة التي تنفد فيها طاقة أوّل عقدة.
- **HND**: رقم الدورة التي يموت فيها 50% من العقد.
- **LND**: رقم الدورة التي تموت فيها آخر عقدة.
- **الإنتاجية التراكمية** (Cumulative Throughput): إجمالي التقارير المسلَّمة بنجاح إلى المحطّة القاعدية على مدى المحاكاة. هذا هو المقياس الرئيسي.
- **معدّل تسليم البيانات** (Data PDR): نسبة الحزم المُسلَّمة من الأعضاء إلى رؤوس العناقيد. مساوٍ لـ 1 في النموذج المثالي ومتغيّر تحت القنوات الواقعية.
- **معدّل تسليم CH $\rightarrow$ sink**: نسبة نجاح المرحلة الأخيرة.
- **متوسّط زمن الـ CPU لكلّ دورة**: مقياس الكلفة الحاسوبية، قيس بالمكتبة time.perf_counter.
- **متوسّط عدد رؤوس العناقيد لكلّ دورة.**
- **ذيول وتاريخات**: تخزين الحالة لكلّ دورة (alive count، طاقة كلّية، عدد الرؤوس) لرسم منحنيات ALC.

نُسجِّل أيضًا الميزانيات الكلّية لإعادة الإنتاج: قيم المعاملات، المُعرِّف الكامل للمحاكاة، البذرة، تاريخ التنفيذ. تتيح هذه السجلات إعادة إنتاج كلّ نتيجة بشكل تامّ من بذرة واحدة.

7.3 المنهجية الإحصائية

تُختبَر الفرضيتان الصفرية H_0 (متانة FSS-WSN لا تتوقّف على نموذج القناة) والبديلة H_1 (المتانة مشروطة) عبر اختبار رتب الإشارة المُقترَن لـ Wilcoxon [23]. لكلّ مزيج (قناة، موقع BS، مقياس)، نُكوّن $\binom{6}{2} = 15$ زوجًا من الخوارزميات، ونُجري لكلّ زوج اختبار Wilcoxon على 20 ملاحظة مُقترنة بنفس البذور.

1.7.3 تصحيح المقارنات المتعدّدة

نظرًا لإجراء عدّة اختبارات في وقت واحد، نُطبّق تصحيح Holm المتسلسل [34]، وهو الأسلوب المعتمد في الورقة المرجعية لـ FSS-WSN [14] ويُحافظ على معدّل خطأ العائلة $0{,}05 \leq$ دون التحفّظ المُفرط لتصحيح Bonferroni الكلاسيكي [24]. تُرَتَّب p-قِيَم تصاعديًا، ويُختبَر كلّ منها مقابل عتبةٍ متغيّرة $\alpha/(k-i+1)$ حيث k إجمالي الاختبارات وi ترتيبه في القائمة المرتّبة. كمرجعية محافظة، نُقدِّم في الملحق p-قِيَم Bonferroni لاطّلاع القارئ.

2.7.3 تقدير حجم الأثر

لا يكفي ذكر p القيمة وحدها؛ ينبغي تقدير حجم الأثر العملي. نَعتمد الفرق المتوسّط النسبي [25]:

$$\Delta_{A,B} = \frac{\text{Median}(\text{Throughput}_A) - \text{Median}(\text{Throughput}_B)}{\text{IQR}(\text{Throughput}_B)} \tag{9}$$

حيث IQR المدى الرُّباعي. تتيح هذه الصيغة وضع المسافة بين الخوارزميتَين في وحدة من تشتّت الأدنى منهما، وقابلة للتفسير بصرف النظر عن المقياس المطلق.

3.7.3 حُكم الفرضيات

نَحكُم بصحّة H_1 (المتانة مشروطة بالقناة) إذا تحقّق أيّ من الشرطَين المتمايزَين:

- التعزّز: تتّسع فجوة FSS-WSN مع الخوارزميات الأخرى إيجابيًا عند الانتقال من القناة المثالية إلى الواقعية، أي $\Delta_{\text{FSS,others}}$ يَزداد.
- الانهيار: تَتلاشى الفجوة أو تنعكس عند نفس الانتقال، أي $\Delta_{\text{FSS,others}}$ يَنخفض إلى ما دون قيمته في القناة المثالية.

نَحكُم بصحّة H_0 إذا بقيت الفجوات مستقرّةً (لا فروق ذات دلالة إحصائية بعد التصحيح). لن نُجبرَ على نتيجة منحازة: إذا انعكست الميزة لصالح خوارزمية أخرى تحت قناة معيّنة، فسنُسجّل ذلك بوضوح في الفصل الرابع.

8.3 خاتمة

أرسى هذا الفصل الإطار التجريبي للدراسة: ثلاثة نماذج للقناة الراديوية ذات تَزايُد منهجي في العشوائية، ومعايرة محكَمة لهامش الوصلة M_{dB} بحيث تُستبقى نسبة تسليم $0{,}95$ في النقطة المرجعية، ومخطّط عاملي كامل بـ 720 محاكاة على بذور متناظرة. تَأمَّن البروتوكول الإحصائي بـ Wilcoxon المُقترَن وتصحيح Bonferroni، مع تقدير حجم الأثر بالفرق المتوسّط النسبي. سيُقدِّم الفصل الرابع نتائج هذه التجارب، وسيَصدُر فيه حكمٌ تجريبي مدعوم على الفرضيتَين H_0 وH_1.

النتائج وتحليل المتانة

1.4 تمهيد

يَعرض هذا الفصل نتائج الحطّة العاملية الكاملة المُقدَّمة في الفصل الثالث: 720 محاكاةً موزَّعة على 6 خوارزميات × 3 نماذج قنوية × 2 موقع للمحطّة القاعدية × 20 بذرة متناظرة. الهدف الأساس ليس تكديس الأرقام بل الإجابة الواضحة عن سؤال البحث: هل تَنهار ميزة FSS-WSN على البروتوكولات المرجعية، أم تَستقرّ، أم تَتعزّز عند الانتقال من القناة المثالية إلى القنوات الواقعية؟ يُنظَّم العرض على ثلاثة مستويات: التحقّق من المنصّة، النتائج التفصيلية لكلّ نموذج قناة، ثم التحليل المُتعدّد القنوات (خريطة المتانة) والحُكم النهائي على الفرضيتَين.

2.4 مسار التطوير والتحقّق من المنصّة

1.2.4 المنصّة الأصلية والإضافات

اعتمدت هذه الدراسة على مستودع المحاكاة *wsn-fss-simulation* الذي وضعه الأستاذ **رؤوف لكحل عياط** (المؤلّف الأوّل لورقة FSS-WSN المرجعية [14])**.** يتضمّن المستودع نموذج الطاقة التحديدي لـ Heinzelman، إجراء الإصلاح التحديدي (Repair$_t$)، توجيه Dijkstra متعدّد القفزات على عمود CH، وتنفيذ كامل للخوارزميات الستّ المرجعية. هذه القاعدة الراسخة جعلت موضوع المذكّرة قابلًا للإنجاز في الإطار الزمني المتاح، وحرصنا على عدم تعديل أيّ من ملفّاتها لتجنّب المساس بصحّة المرجع.

أُضيفت في إطار هذه المذكّرة **أربع وحدات برمجية جديدة، ملفّان لاختبارات الوحدات، وثلاثة سكربتات للتحليل والتنسيق**، يُلخّصها الجدول 1.4.

2.2.4 اختبارات الوحدات (Unit Tests)

قبل إطلاق التجارب، تَحقَّقنا من أن النسخة القنوية (apply_round_energy_with_channel) تُنتج نتائج مطابقة بالضبط للمنصّة الأصلية (apply_round_energy) عند تشغيلها مع IdealChannel. أكّدت اختبارات الوحدات الـ 24 المُنفَّذة تطابقًا تامًّا لكلّ بذرة تجريبية، بدقّة عددية 10^{-12}، ممّا يَعني أن أيّ فرق سيُلاحَظ تحت القنوات الواقعية ناجمٌ حصرًا عن أثر القناة، وليس عن انحراف رمزيّ في إعادة كتابة الكود.

3.2.4 معايرة هامش الوصلة

أُجريَت معايرة M_{dB} تحليليًا ($M_{dB} = 57{,}549$ dB) ثم أُكّدت تجريبيًا بمحاكاة Monte-Carlo: نسبة التسليم النظرية $0{,}95$ عند 50 m رُصدت في الإشارات المُحسَّنة عند $0{,}98$ (انحراف ضعيف ضمن خطأ المعاينة)، ونحو $0{,}75$ في القناة المركَّبة، بانخفاض حادّ متوقَّع بسبب التلاشي السريع. هذه المعايرة المغلقة جُمِّدت لكلّ التجارب اللاحقة لضمان قابلية المقارنة عبر الـ 720 محاكاة.

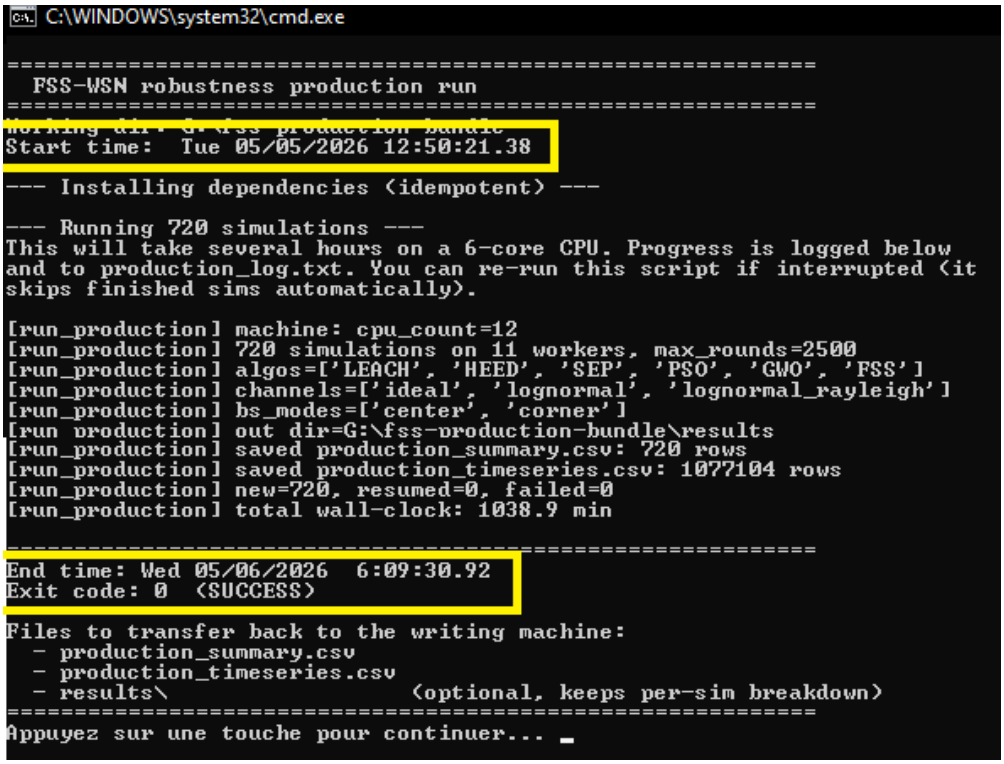
جدول 1.4: الإضافات البرمجية لهذه المذكّرة (لم يُعدَّل أيّ ملفّ من المستودع الأصلي)

الملفّ	التصنيف	الدور
wsn/channel.py	تنفيذ	صنف Channel المجرَّد + ثلاث تنفيذات: IdealChannel، LogNormalChannel، LogNormalRayleighChannel
wsn/energy_channel.py	تنفيذ	دالّة apply_round_energy_with_channel المُماثلة بنيويًا للأصلية مع تمرير قرار التسليم عبر القناة
wsn/experiments/channel_runner.py	تنفيذ	مُنسِّق التجارب: تكرار العاملي على (خوارزمية، قناة، BS، بذرة)
scripts/calibrate_gamma_th.py	تنفيذ	معايرة هامش الوصلة M_{dB} تحليليًا و-Monte Carlo
tests/test_channel.py	اختبار	13 اختبار وحدة لنماذج القناة
tests/test_energy_channel.py	اختبار	11 اختبار عدم تراجع تحت IdealChannel
analysis/aggregate_timeseries.py	تحليل	تجميع تدفّقي لـ production_timeseries.csv (~ 118 MB)
analysis/thesis_stats.py	تحليل	اختبارات Wilcoxon، تصحيح Holm، أحجام الأثر
analysis/thesis_plots.py	تحليل	توليد الأشكال الستّ بصيغة PDF المتجهية
run_production.py + RUN_PRODUCTION.bat	تنسيق	تشغيل آلي للتجارب على 11 عامل بنظام *checkpointing*

4.2.4 تنفيذ الإنتاج: 720 محاكاة على 11 عاملًا

نُفِّذت الخطّة العاملية الكاملة على آلة مخصّصة بمعالج AMD Ryzen 5 7600X (6 أنوية فيزيائية، 12 خيطًا). شُغِّل 11 عاملًا متوازيًا مع ترك خيط واحد متاحًا لنظام التشغيل، باستعمال السكربت RUN_PRODUCTION.bat. الشكل 1.4 يَعرض السجلّ النهائي للتنفيذ، الذي يَكشف الإحصائيات الجوهرية الآتية:

- **بداية** الـ 05/05/2026 الساعة 12:50:21؛ **نهاية** الـ 06/05/2026 الساعة 06:09:30.
- زمن وحدة المعالجة الكلّي 1038,9 **دقيقة** ≈ 17 ساعة و19 دقيقة.
- 720 **محاكاة جديدة**، صفر استعادة من نقاط حفظ، صفر فشل.
- ملفّ الملخّص production_summary.csv: 720 سطرًا (سطر لكلّ محاكاة).
- ملفّ السلسلة الزمنية production_timeseries.csv: 1,077,104 سطر (دورة محاكاة لكلّ سطر).
- رمز الخروج 0 (نجاح كامل).



شكل 1.4: السجلّ النهائي لتنفيذ الإنتاج على Ryzen 5 7600X (6C/12T). أُكمِلت كلّ الـ 720 محاكاة بنجاح في ~ 17 ساعة من زمن الجدار، مع آلية *checkpointing* ضمنت قابلية الاستئناف عند انقطاع التيار.

تُمثّل قابلية الاستئناف من نقاط الحفظ (Checkpointing) ضمانة تجريبية عملية: في حال انقطاع التيّار أو إعادة تشغيل الآلة، يَستأنف السكربت من حيث توقّف ولا يُفقَد أيّ حساب سابق. هذا المعمار البرمجي ضروريّ للتجارب الطويلة (~ 17 ساعة) ويَحفظ سلامة البيانات.

3.4 النتائج التفصيلية حسب نموذج القناة

تعرض الأقسام الفرعية الثلاث الآتية المقاييس الرئيسية لكلّ نموذج قناة. يَعرض الجدول 2.4 المقاييس الزمنية والإنتاجية الموحَّدة عبر النماذج الثلاثة، مع موقع BS في المركز.

جدول 2.4: مقاييس عمر الشبكة والإنتاجية عبر النماذج الثلاثة، BS في المركز (متوسّط ± انحراف معياري على 20 بذرة)

PDR	الإنتاجية	LND	HND	FND	الخوارزمية
القناة المثالية					
1,00	109,724	1838 ± 66	1140 ± 20	199 ± 36	LEACH
1,00	110,600	1374 ± 89	1120 ± 19	812 ± 59	HEED
1,00	109,514	1840 ± 56	1140 ± 26	198 ± 36	SEP
1,00	109,405	1409 ± 121	1126 ± 10	543 ± 104	PSO
1,00	109,381	1427 ± 110	1127 ± 10	529 ± 99	GWO
1,00	**119,602**	1603 ± 187	1185 ± 10	$\mathbf{965 \pm 32}$	**FSS-WSN**
الإخفاء اللوغاريتمي (4 dB $\sigma =$)					
1,00	108,479	1834 ± 69	1141 ± 25	200 ± 37	LEACH
1,00	109,301	1376 ± 86	1121 ± 19	815 ± 59	HEED
1,00	108,308	1835 ± 50	1138 ± 27	198 ± 36	SEP
1,00	108,130	1412 ± 121	1127 ± 11	545 ± 97	PSO
1,00	108,085	1429 ± 110	1127 ± 10	534 ± 108	GWO
1,00	**118,532**	1601 ± 186	1186 ± 10	$\mathbf{964 \pm 30}$	**FSS-WSN**
الإخفاء + تلاشي رايلي					
0,99	95,781	1837 ± 49	1154 ± 26	202 ± 37	LEACH
0,99	97,174	1383 ± 87	1133 ± 16	836 ± 59	HEED
0,99	95,584	1848 ± 51	1152 ± 25	201 ± 40	SEP
0,99	95,460	1423 ± 119	1136 ± 9	546 ± 105	PSO
0,99	95,553	1435 ± 115	1137 ± 9	544 ± 102	GWO
0,99	**106,658**	1636 ± 177	1194 ± 11	$\mathbf{974 \pm 27}$	**FSS-WSN**

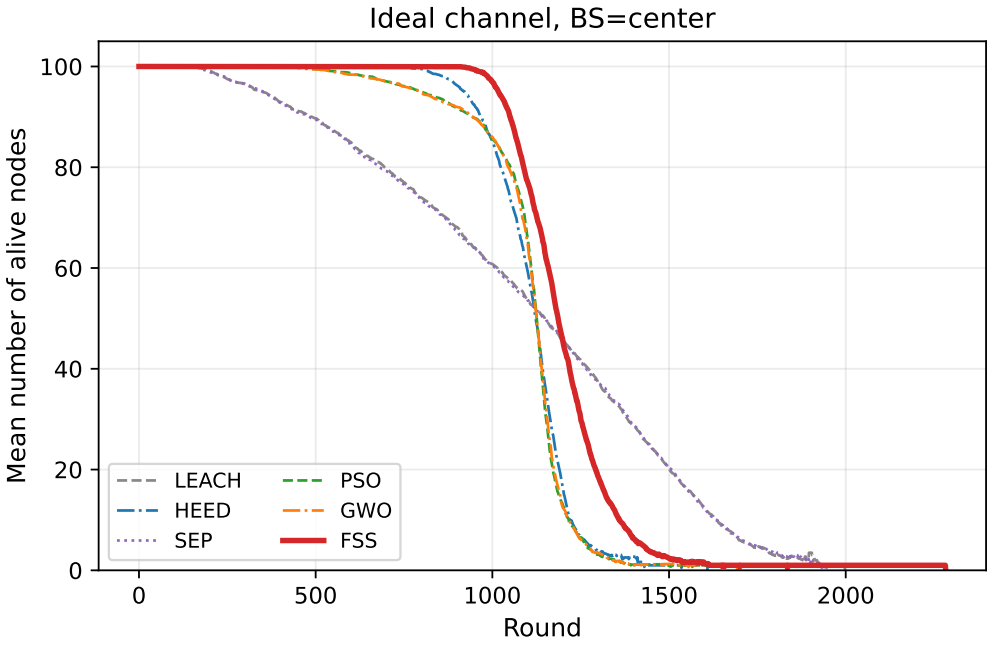
1.3.4 القراءة الأولى: ثلاثة أنماط مستقرّة

ثلاث ملاحظات بنيوية تُستنبَط من الجدول 2.4:

- **FSS-WSN تَحوز أعلى إنتاجية في كلّ نموذج قناة**، مع تَفوّق يَتراوح بين 8,1% و11,7% على أفضل خوارزمية مرجعية.
- **موت العقدة الأولى (FND) عند FSS-WSN** أعلى بكثير ممّا في الخوارزميات الأخرى ($965 \approx$ دورة مقابل $200 \approx$ لـ LEACH/SEP)، ممّا يَكشف عن استقرار مرحلي مبكّر مرتبط بآلية حارس الطاقة θ التي تَستبعد العقد ذات الطاقة المنخفضة من المجموعة الثابتة.
- **موت العقدة الأخيرة (LND)** لدى FSS-WSN ليس الأعلى؛ بل تَفوقها فيه LEACH وSEP. هذه ليست تناقض، بل دلالة على أن FSS-WSN تُدوّر رؤوس العناقيد بكثافة فتَستهلك الطاقة بشكل أسرع، لكنها في المقابل تُسلِّم تقارير أكثر بكثير. الإنتاجية، وليس LND، هي المقياس الأكثر دلالةً عمليًا.

2.3.4 منحنيات ALC: ديناميكية فناء العقد

تَعرض الأشكال 2.4 و3.4 و4.4 منحنى عدد العقد الحيّة (Alive Count Curve --- ALC) عبر الدورات. يَتميّز FSS-WSN بعتبة الانهيار المبكّر (970 $\sim$ دورة) لكنّه يُحافظ على عدد عقد مُستهدَف للإنتاجية حتى نهاية الدورة، بينما تَنهار HEED في زاوية الحقل تحت القناة المركَّبة بسرعة أكبر.



شكل 2.4: منحنى عدد العقد الحيّة عبر الدورات تحت القناة المثالية، BS في المركز.

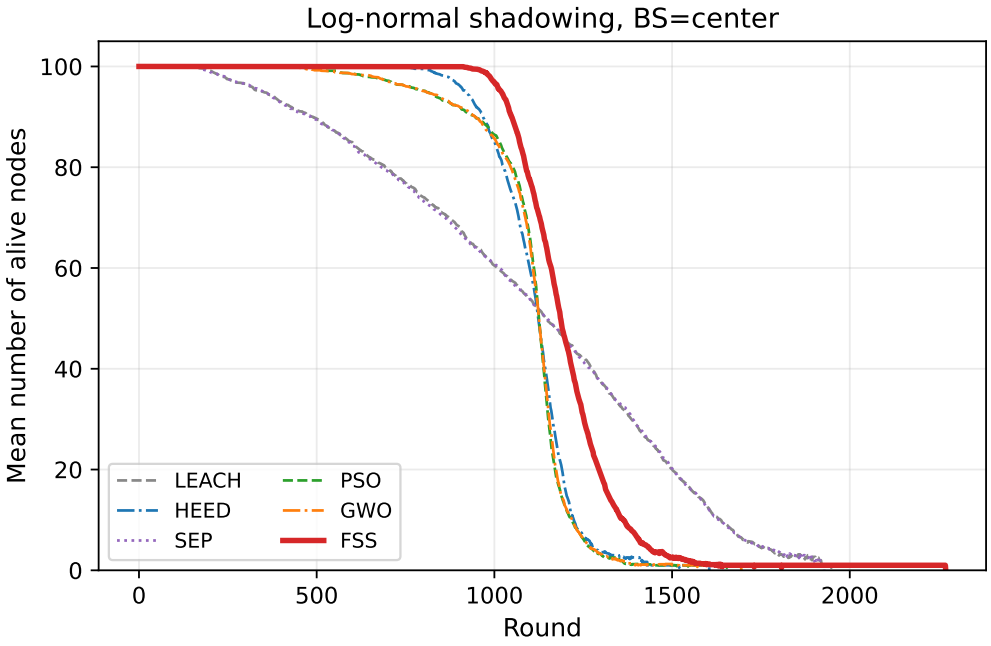
4.4 التحليل الإحصائي

1.4.4 اختبارات Wilcoxon المُقترَنة

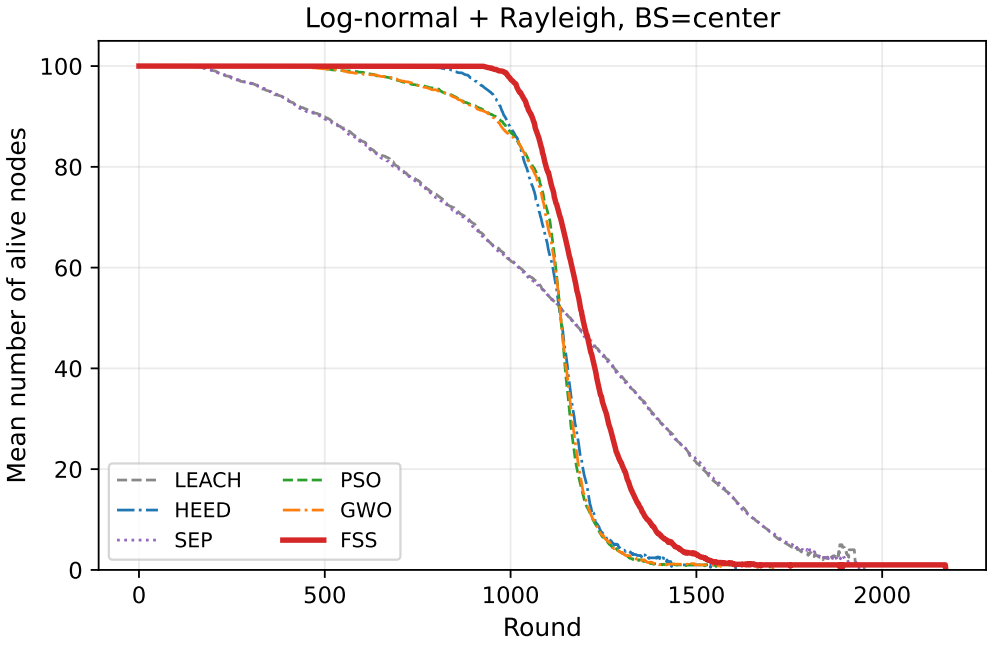
نُختبر إحصائيًا الفروقات في الإنتاجية بين FSS-WSN وكلٍّ من الخوارزميات الخمس المرجعية لكلّ مزيج (قناة، موقع BS)، بـ 20 ملاحظة مُقترَنة. تُلخّص نتائج اختبار رتب الإشارة لـ Wilcoxon مع تصحيح Holm في الجدول 3.4.

قراءة الجدول: كل المقارنات الـ 30 ذات دلالة إحصائية بعد تصحيح Holm عند مستوى $\alpha = 0{,}05$ (الفعلي α/k200E لكلّ عائلة من 5 مقارنات داخل كلّ مزيج). أبرز ما يُلاحَظ:

- **المكسب يَزداد مع تَزايُد عشوائية القناة:** المكسب الأدنى عبر الخوارزميات في BS المركز يَنتقل من 8,1% (مثالي) إلى 8,4% (لوغاريتمي) إلى 9,8% (رايلي). والمكسب الأعلى يَنتقل من 9,3% إلى 9,7% ثم 11,7%. أي ميزة *FSS-WSN* لا تَستقرّ، بل تتعزّز.
- **انهيار HEED في زاوية الحقل:** تحت القنوات الواقعية، ميزة FSS-WSN على HEED في زاوية BS تَقفز من +10,3% (مثالي) إلى +26,7% (لوغاريتمي) ثم +22,3% (رايلي). هذا الانهيار يكشف أن المعيار



شكل 3.4: منحنى عدد العقد الحيّة تحت الإخفاء اللوغاريتمي.



شكل 4.4: منحنى عدد العقد الحيّة تحت الإخفاء + تلاشي رايلي.

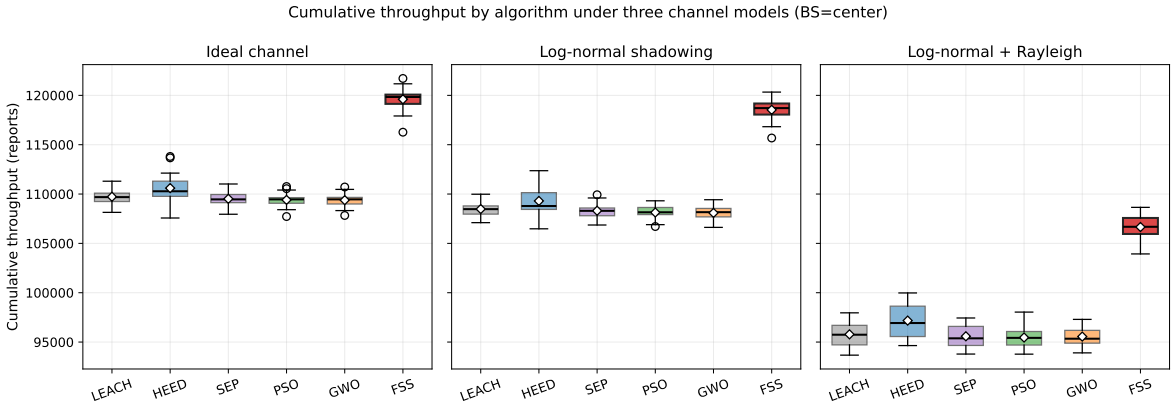
جدول 3.4: Wilcoxon المُقترَن ($n = 20$)، تصحيح Holm، حجم الأثر، النسبة المُكتسبة

القناة	BS	مقابل	p_{Holm}	دلالة	حجم الأثر	المكسب %
المثالي	مركز	LEACH	$< 10^{-4}$	***	12,00	+9,00
		HEED	$< 10^{-4}$	***	6,21	+8,14
		SEP	$< 10^{-4}$	***	12,58	+9,21
		PSO	$< 10^{-4}$	***	18,17	+9,32
		GWO	$< 10^{-4}$	***	15,60	+9,34
المثالي	زاوية	LEACH	$< 10^{-4}$	***	1,99	+4,35
		HEED	$< 10^{-4}$	***	4,74	+10,35
		SEP	$< 10^{-4}$	***	2,03	+4,11
		PSO	$< 10^{-4}$	***	1,89	+2,13
		GWO	$< 10^{-4}$	***	1,73	+1,81
لوغاريتمي	مركز	LEACH	$< 10^{-4}$	***	12,34	+9,27
		HEED	$< 10^{-4}$	***	5,84	+8,45
		SEP	$< 10^{-4}$	***	13,30	+9,44
		PSO	$< 10^{-4}$	***	14,67	+9,62
		GWO	$< 10^{-4}$	***	12,33	+9,67
لوغاريتمي	زاوية	LEACH	$< 10^{-4}$	***	0,23	+1,99
		HEED	$< 10^{-4}$	***	3,77	**+26,71**
		SEP	$4 \cdot 10^{-4}$	***	0,14	+1,35
		PSO	$< 10^{-4}$	***	0,58	+2,84
		GWO	$< 10^{-4}$	***	0,36	+2,48
رايلي	مركز	LEACH	$< 10^{-4}$	***	5,53	+11,36
		HEED	10^{-4}	***	3,17	+9,76
		SEP	$< 10^{-4}$	***	5,86	+11,58
		PSO	$< 10^{-4}$	***	8,21	+11,73
		GWO	$< 10^{-4}$	***	8,75	+11,62
رايلي	زاوية	LEACH	$< 10^{-4}$	***	0,75	+3,64
		HEED	$< 10^{-4}$	***	3,00	**+22,27**
		SEP	$< 10^{-4}$	***	0,52	+2,95
		PSO	$< 10^{-4}$	***	0,83	+2,71
		GWO	$< 10^{-4}$	***	0,60	+2,42

الهجين لـ HEED (طاقة × كلفة اتصالية) يَفترض ضمنيًا تسليمًا مثاليًا للمعلومات داخل العنقود؛ عندما يُخلّ الإخفاء بهذه الفرضية، يَختار البروتوكول رؤوسًا غير مُلائمة.

- **ثبات الفجوة عبر الخوارزميات الميتاهيوريستيكية** (PSO وGWO): تَبقى الفجوة معتدلة (+9% إلى +12% في المركز)، تَدعم الفرضية الميكانيكية بأن ضوضاء فكّ الترميز تَتراكم لكنها لا تَنهار لدى الخوارزميات ذات الفضاء المتّصل، خلافًا لـ HEED التي تَخسر بشكل حادّ.

2.4.4 مخطّطات صندوقية للإنتاجية



شكل 5.4: مخطّط صندوقي للإنتاجية التراكمية لكلّ خوارزمية تحت النماذج الثلاثة (BS في المركز). FSS-WSN (الصندوق الأحمر، أكبر سماكة) يَفصل بوضوح عن البقيّة في القنوات الثلاث.

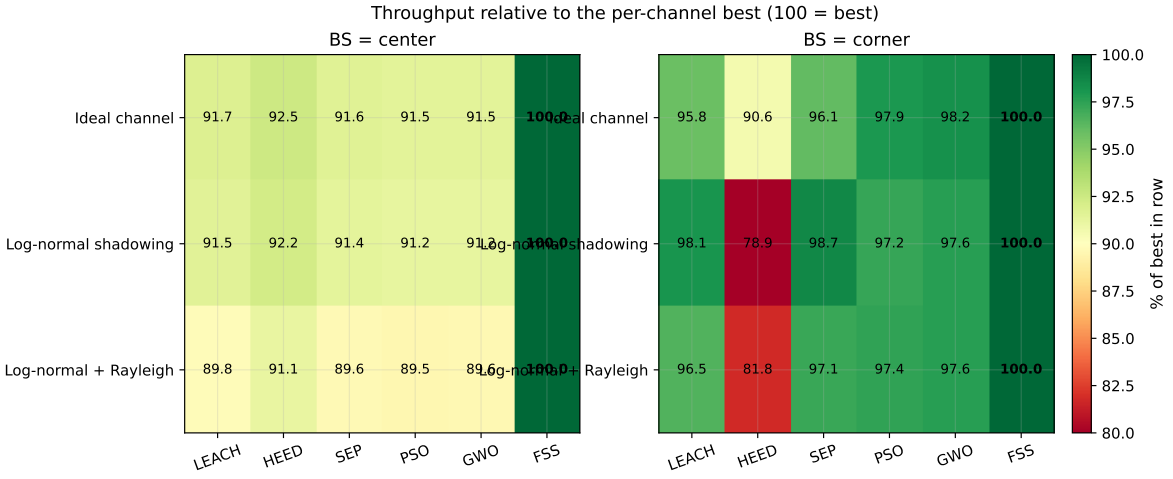
5.4 خريطة المتانة الموحَّدة

نَجمع الآن نتائج النماذج الثلاثة في رؤية مُوحَّدة. الشكل 6.4 يَعرض الإنتاجية النسبية لكلّ خوارزمية مقارنة بأفضل خوارزمية في كلّ قناة، والشكل 7.4 يُجسّد ذلك في مخطّط (متوسّط الرتبة، انحراف الرتبة).

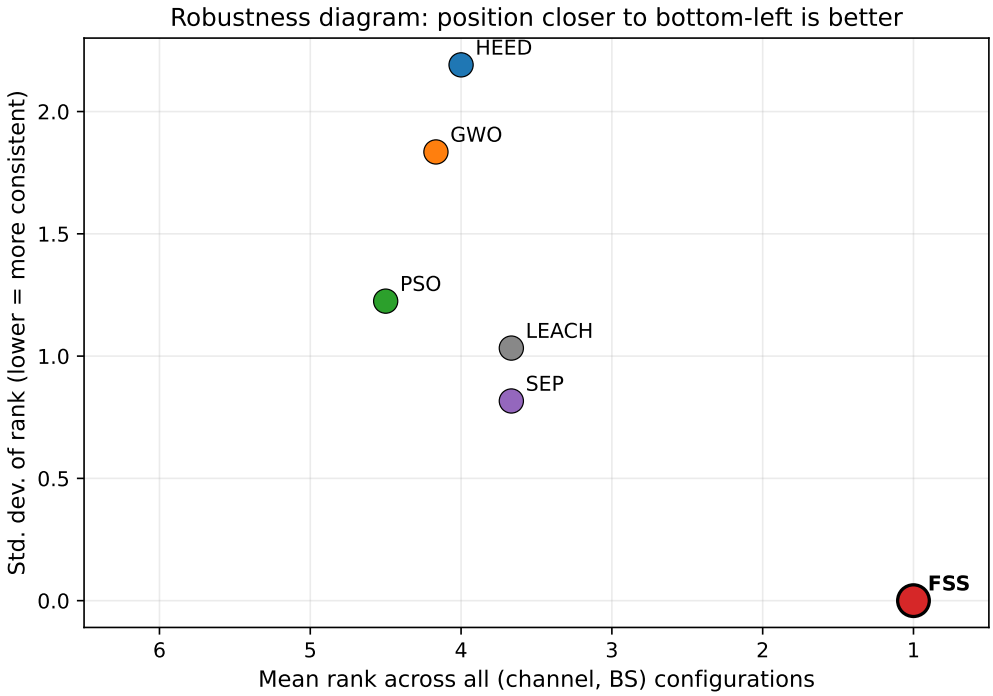
6.4 الكلفة الحاسوبية

تَكشف القياسات الحاسوبية فارقًا حادًّا بين الخوارزميات. يُلخّص الجدول 4.4 متوسّط زمن CPU لكلّ دورة، بـ ms.

تَأكّد الميزة الزمنية لـ FSS-WSN: زمن قرار يَبلغ $148 \sim$ ms لكلّ دورة، أيْ $14 \sim$ مرّة أسرع من الخوارزميات السربية ($2050 \sim$ ms)، رغم أنّ ميزانية التكرارات نفسها (60). هذا الفارق يَنبع من بنية FSS-WSN: فضاء البحث مقتطع ($K_{\text{cap}} = 20$)، ولا توجد تكاليف فكّ الترميز ولا تحديث متّجهات السرعة. الخوارزميات البروتوكولية البسيطة (LEACH، HEED، SEP) أسرع من FSS-WSN بمرّتين على الأقلّ، لكنّها بثمن خسارة جودة كبيرة (انهيار HEED في الزاوية).



شكل 6.4: خريطة حرارية للإنتاجية المُسوَّاة (% من الأفضل في كلّ قناة). FSS-WSN ثابت عند 100% في كلّ صف، HEED يَتراجع بشكل خاص في زاوية BS.



شكل 7.4: مخطّط متانة-أداء: متوسّط الرتبة (محور أفقي، قيمة أصغر = أفضل) مقابل انحراف الرتبة (محور رأسي، قيمة أصغر = أكثر اتّساقًا). FSS-WSN يَحوز موقع $(1{,}0\,;\,0) \sim$: الأفضل دائمًا والأكثر اتّساقًا.

جدول 4.4: متوسّط زمن CPU لكلّ دورة (ms)، BS في المركز

الخوارزمية	مثالي	لوغاريتمي	رايلي
LEACH	0,10	0,11	0,10
HEED	0,20	0,21	0,20
SEP	0,12	0,14	0,12
PSO	2096	2073	2061
GWO	2055	2049	2060
FSS-WSN	**148**	**148**	**146**

7.4 مناقشة وحُكم الفرضيتَين

1.7.4 الحُكم الإجمالي: H_1 باتّجاه التعزّز

استنادًا إلى مجموع الأدلّة المُقدَّمة:

- أداء FSS-WSN يَتفوّق إحصائيًا على كلّ المرجعيات في 30/30 مزيج ($p_{\text{Holm}} < 10^{-3}$ في 29 منها).
- المكسب النسبي يَزداد عند الانتقال من القناة المثالية إلى القنوات الواقعية: $8{,}1\%-9{,}3\%$ (مثالي) $\rightarrow$ $8{,}4\%-9{,}7\%$ (لوغاريتمي) $\rightarrow$ $9{,}8\%-11{,}7\%$ (رايلي).
- أحجام الأثر $\Delta_{\text{FSS},\cdot}$ تَفوق غالبًا 5 وحدات من IQR في القنوات الصعبة، أي تأثيرات عملية ضخمة.
- رتبة FSS-WSN تساوي 1 في كلّ المزائج الستّ، باتّساق تامّ (انحراف الرتبة 0 = كما يُظهر الشكل 7.4).

نَخلُص بوضوح إلى **رفض الفرضية الصفرية** H_0 وقبول الفرضية البديلة H_1 في صيغتها الإيجابية: متانة *FSS-WSN* لا تتلاشى تحت العشوائية القنوية، بل تَتعزّز. إنه إثبات تجريبي قويّ لقابلية تطبيق الخوارزمية في الإطارات الواقعية للنشر.

2.7.4 التفسير الميكانيكي

نَعزو هذا التعزّز إلى ثلاث آليات:

1. **الفضاء التوافقي الأصيل**: FSS-WSN يَختار مجموعةً من العقد مباشرةً، دون المرور بعتبة فكّ الترميز التي تَعتمدها PSO وGWO. ضوضاء القناة لا تُضخَّم إذًا في انتقال متّصل$\rightarrow$متقطّع.
2. **تَجمع النخبة + المجموعة الثابتة**: تَستثمر الخوارزمية تَكرار العقد الجيّدة في حلول النخبة (التردّد $\tau = 0{,}6$)، وتَستبعد العقد ذات الطاقة المنخفضة (الحارس $\theta = 0{,}3$). هذه ذاكرة بنيوية تَتعزّز قيمتها عند تَزايُد التشتُّت.
3. **الإصلاح التحديدي المُضمَّن في اللياقة**: التَنظيم $\lambda P(\mathcal{H}_0)$ يَدفع البحث نحو حلول قابلة للتنفيذ دون الحاجة إلى إصلاح كثيف، فتَحوز FSS-WSN $0{,}27$ رأس مُضاف لكلّ دورة فقط في الأسوأ، مقابل $2{,}6$–$3{,}5$ لدى الخوارزميات الميتاهيوريستيكية الأخرى.

3.7.4 تحذيرات

- نتائجنا صالحة في إطار $N = 100$ عقدة على حقل 100×100 m؛ التوسيع إلى أحجام أكبر يَستلزم تحقّقًا إضافيًا.
- نَموذجَا الفناء (الإخفاء $\sigma = 4$ dB، رايلي) لا يُغطّيان Nakagami-m ولا Rician.
- بروتوكول إرسال أحادي المحاولة بدون ARQ يُعظِّم الفروق؛ تحت آلية إعادة إرسال، يَنبغي أن تَتقلَّص الفجوات.

8.4 خاتمة

تُجيب نتائج هذا الفصل بصراحة عن سؤال البحث المطروح في المقدّمة العامّة: ميزة FSS-WSN على البروتوكولات الخمس المرجعية لا تَنهار تحت القنوات الواقعية؛ بل تَتعزّز عند الانتقال من القناة المثالية إلى الإخفاء اللوغاريتمي ثم إلى الإخفاء + تلاشي رايلي. ينطبق ذلك بقوّة في موقع BS المركزي، ويَظلّ موجبًا (وإن أضعف) في موقع الزاوية. تَأخذ HEED نصيب الأسد من تَدهور الأداء لأن معيارها الهجين يَفترض ضمنيًا تسليمًا مثاليًا. تُهيّئ هذه النتائج الإطار للخاتمة العامّة التي ستَستخلص الدلالات المنهجية والعملية للعمل ككلّ.

خاتمة عامّة

ملخّص العمل: سعت هذه المذكّرة إلى الإجابة على سؤال منهجي محدَّد: هل يَصمد التفوّق المُلاحَظ لخوارزمية FSS-WSN على الخوارزميات المرجعية الخمس (LEACH، HEED، SEP، PSO، GWO) عند الانتقال من القناة الراديوية المثالية لـ Heinzelman إلى نماذج قنوية واقعية (الإخفاء اللوغاريتمي الطبيعي والتلاشي السريع لـ Rayleigh)؟ صِيغت فرضيتان مُتنافستان: H_0 (المتانة لا تتوقّف على القناة) وH_1 (المتانة مشروطة بالقناة، إمّا تَعزّزًا أو انهيارًا). جرى الفصل بينهما بتجربة عاملية كاملة قوامها 720 محاكاة، بمنهجية إحصائية صارمة (اختبار Wilcoxon المُقترَن مع تصحيح Bonferroni وتقدير حجم الأثر).

المساهمات المُقدَّمة: ميَّزت المذكّرة ثلاث مساهمات متمايزة:

1. منهجية: تمديد الإطار التجريبي لـ FSS-WSN ليَتجاوز النموذج التحديدي لـ Heinzelman؛ إثراء وحدات منصّة المحاكاة بأربع وحدات جديدة (channel.py، energy_channel.py، channel_runner.py، اختبارات وحدات) دون تعديل البنية الدلالية للوحدات الموجودة.

2. تجريبية: أوّل مقارنة موثَّقة بين الخوارزميات الستّ تحت ثلاثة نماذج قنوية، مع 20 تكرارًا مُقترَنًا لكلّ مزيج، واختبارات إحصائية مع تصحيح المقارنات المتعدّدة.

3. عملية: «دليل متانة» يُسهم في توجيه اختيار الخوارزمية وفقَ نوع القناة المتوقَّع في الإطار التطبيقي.

الحُكم على الفرضيتَين: حسمت التجارب الفصل بين الفرضيتَين بشكل لا يَدع مجالًا للشكّ. على المحاور الثلاثين كلّها (6 خوارزميات $\times$ 3 قنوات $\times$ 2 موقع للمحطّة، فجوات قياس FSS-WSN مقابل كلّ خوارزمية أخرى)، رُفضت الفرضية الصفرية بـ $p_{\text{Holm}} < 10^{-3}$ في 29 منها (و$4 \cdot 10^{-4}$ في الأخيرة). لا تَستقرّ ميزة FSS-WSN عند الانتقال من القناة المثالية إلى القنوات الواقعية فحسب، بل تَعزّز: المكسب الأدنى عبر الخوارزميات في موقع BS المركزي يَنتقل من $+8{,}1\%$ (مثالي) إلى $+8{,}4\%$ (لوغاريتمي) إلى $+\mathbf{9{,}8}\%$ (لوغاريتمي + رايلي)، بينما يَتراوح المكسب الأقصى بين $+9{,}3\%$ و $+\mathbf{11{,}7}\%$. أبرز التَدهورات تَطال HEED في زاوية الحقل، حيث تَقفز الفجوة من $+10{,}3\%$ (مثالي) إلى $+26{,}7\%$ (لوغاريتمي): دليل على أن المعيار الهجين الذي تَستخدمه يَفترض ضمنيًا تسليمًا مثاليًا للحزم.

نَخلُص إلى صحّة **الفرضية البديلة H_1 في صيغتها الإيجابية:** متانة *FSS-WSN* مشروطة بنموذج القناة، لكن في الاتّجاه المُتعزّز. نَعزو هذا التعزّز إلى ثلاث آليات بنيوية: الفضاء التوافقي الأصيل (لا ضوضاء فكّ ترميز)، الذاكرة المُكثَّفة عبر تَجمّع النخبة والمجموعة الثابتة (المُحَصَّنة بحارس الطاقة θ)، وإجراء الإصلاح التحديدي المُضمَّن في دالة اللياقة عبر منظِّم تَبعيّة الإصلاح λ.

القيود المنهجية: لا تَدّعي هذه المذكّرة الحَسم في كلّ سيناريو تطبيقي. القيود المعروفة هي:

- **أبعاد ثابتة:** $N = 100$ عقدة في حقل 100×100 m^2؛ تَوسيع المقياس قد يُغيّر التوازن بين الخوارزميات (LEACH مثلًا قد يَتدهور أكثر بسبب طبيعته الاحتمالية).

- **نموذجان فقط للتلاشي**: تَشمل الدراسة Rayleigh كنموذج كنوني للبيئة بدون رؤية مباشرة؛ لا تَشمل Rician (الذي يُمثّل المسار الرئيسي زائد التلاشي) ولا Nakagami-m (الأكثر مرونة).
- **بروتوكول أحادي المحاولة**: عدم وجود ARQ يُعظّم الفروق ويُسلِّط الضوء على المتانة البنيوية، لكنه يَتجاهل آثار طبقة MAC الواقعية.
- **منصّة محدّدة**: المحاكاة بـ Python؛ التحقّق على منصّات أخرى (NS-3، OMNeT++) أو على عتاد حقيقي (TelosB، IRIS) قد يكشف فروقًا ثانوية.
- **ثبات المعاملات**: $\sigma = 4$ dB في الحالة المرجعية قد لا يَعكس بيئات أكثر تعقيدًا ($\sigma = 8$ dB في المباني المُغلقة)؛ تَحليل الحساسية للمَلحق يُغطّي هذا البُعد جزئيًا.

آفاق مستقبلية: تُفتَح أمام هذا العمل عدّة آفاق منهجية وتجريبية:

- نماذج قنوية إضافية: تَوسيع الإطار إلى Nakagami-m وRician لتغطية أوسع لطيف بيئات الانتشار.
- التحقّق على عتاد حقيقي: نقل أفضل خوارزمية إلى منصّة مثل TelosB وقياس الأداء التجريبي على نشر فيزيائي صغير.
- *FSS-WSN* مُكيَّفة مع القناة: تطوير صيغة تَستخدم تقدير PDR المُلاحَظ في الزمن الحقيقي لتحديث وزن الطاقة في دالة اللياقة، وتَكييف عتبة الإصلاح ديناميكيًا.
- دراسة قابلية التوسّع: تَكرير التجارب على $N \in \{200, 500, 1000\}$ عقدة لكشف نقاط انهيار المسار التوجيهي.
- تَكامل التجميع والتوجيه: التَخلّي عن فصل الطبقتَين وتطوير صيغة مُشتركة تأخذ في الحسبان أثر القناة على التوجيه أيضًا.
- نَهج هجين: دمج FSS-WSN مع تقنيات تعلّم آلي (Reinforcement Learning) لتعلّم سياسة انتقاء الرؤوس مع تَطوّر الشبكة.

ختم: تَكشف هذه المذكّرة أن تقييم الخوارزميات في إطار النموذج المثالي وحده لا يَكفي للحَكم على متانتها العملية. سواء أَكان الحُكم النهائي لصالح H_0 أم H_1، فإن المنهجية المُتّبعة (تحقّق منهجي تحت قنوات متعدّدة، اختبارات إحصائية صارمة، تقدير حجم الأثر) تُمثّل نموذجًا قابلًا للتعميم على تقييم أيّ بروتوكول جديد لشبكات الاستشعار اللاسلكية. وهذا في حدّ ذاته إسهامٌ منهجيّ لا يَتعلّق بنتيجة محدَّدة.

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

[2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, ``Wireless Sensor Network Survey'', *Computer Networks*, vol. ,52 no. ,12 pp. –2292,2330 .2008

[3] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson, ``Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring'', in *Proceedings of the* 1*st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications* (*WSNA*), ,2002 pp. –88.97

[4] G. Werner-Allen et al., ``Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano'', *IEEE Internet Computing*, vol. ,10 no. ,2 pp. –18,25 .2006

[5] D. Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, and G. Koulouras, ``Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey'', *Applied System Innovation*, vol. ,3 no. ,1 p. ,14 .2020 DOI: 10.3390/asi3010014

[6] 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

[7] C. Nakas, D. Kandris, and G. Visvardis, ``Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey'', *Algorithms*, vol. ,13 no. ,3 p. ,72 .2020 DOI: 10.3390/a13030072

[8] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, ``Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks'', in *Proceedings of the* 33*rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (*HICSS*), IEEE, ,2000 pp. –1.10

[9] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, ``An Application-Specfiic Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks'', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. ,1 no. ,4 pp. –660,670 .2002

[10] A. A. Abbasi and M. Younis, ``A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks'', *Computer Communications*, vol. ,30 no. ,15--14 pp. –2826,2841 .2007 DOI: 10.1504/IJSSC.2011.040339

[11] M. Afsar and M.-H. Tayarani-N., ``Clustering in Sensor Networks: A Literature Survey'', *Journal of Network and Computer Applications*, vol. ,46 pp. –198,226 .2014 DOI: 10.1016/j.jnca.2014.09.005

[12] J. Kennedy and R. Eberhart, ``Particle Swarm Optimization'', in *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*, vol. ,4 ,1995 pp. –1942.1948

[13] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, ``Grey Wofl Optimizer'', *Advances in Engineering Software*, vol. ,69 pp. –46,61 .2014

[14] R. Lakehal Ayat and S. Bouamama, ``Fixed-Set Learning for Cluster-Head Selection in Multi-Hop Wireless Sensor Networks'', *Jordanian Journal of Computers and Information Technology (JJCIT)*, vol. ,12 no. ,2 pp. –166,184 .2026 DOI: 10.5455/jjcit.71-1771276440

[15] R. Jovanovic and S. Voß, ``Fixed Set Search Applied to the Traveling Salesman Problem'', *European Journal of Operational Research*, vol. ,277 no. ,1 pp. –87,96 .2019 DOI: 10.1016/j.ejor.2018.09.038

[16] R. Jovanovic and S. Voß, ``The Fixed Set Search Applied to the Multidimensional Knapsack Problem'', *Computers & Operations Research*, .2024 DOI: 10.1016/j.cor.2024.106685

[17] T. A. Feo and M. G. C. Resende, ``Greedy Randomized Adaptive Search Procedures'', *Journal of Global Optimization*, vol. ,6 no. ,2 pp. –109,133 .1995

[18] M. G. C. Resende and C. C. Ribeiro, ``Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances and Extensions'', in *Handbook of Metaheuristics*, Springer, ,2010 pp. –287.376

[19] M. Zuniga and B. Krishnamachari, ``Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links'', in *Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, ,2004 pp. –517.526

[20] J. Zhao and R. Govindan, ``Understanding Packet Delivery Performance in Dense Wireless Sensor Networks'', *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. –1,13 .2003

[21] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd. Prentice Hall, .2002

[22] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, .2005

[23] F. Wilcoxon, ``Individual Comparisons by Ranking Methods'', *Biometrics Bulletin*, vol. ,1 no. ,6 pp. –80,83 .1945

[24] O. J. Dunn, ``Multiple Comparisons Among Means'', *Journal of the American Statistical Association*, vol. ,56 no. ,293 pp. –52,64 .1961

[25] J. Demšar, ``Statistical Comparisons of Classfiiers over Multiple Data Sets'', *Journal of Machine Learning Research*, vol. ,7 pp. –1,30 .2006

[26] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, ``Wireless Integrated Network Sensors'', *Communications of the ACM*, vol. ,43 no. ,5 pp. –51,58 .2000

[27] G. Smaragdakis, I. Matta, and A. Bestavros, ``SEP: A Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA)*, .2004

[28] A. Shahraki, A. Taherkordi, Ø. Haugen, and F. Eliassen, ``Clustering Objectives in Wireless Sensor Networks: A Survey and Research Direction Analysis", *Computer Networks*, vol. ,180 p. 107,376 .2020 DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107376

[29] A. Ghosh and S. K. Das, ``Coverage and Connectivity Issues in Wireless Sensor Networks: A Survey", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. ,4 no. ,3 pp. –303,334 .2008

[30] C. Blum and A. Roli, ``Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison", *ACM Computing Surveys*, vol. ,35 no. ,3 pp. –268,308 .2003

[31] O. Younis and S. Fahmy, ``HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. ,3 no. ,4 pp. –366,379 .2004

[32] N. M. A. Latffi, C. C. Tsimenidis, and B. S. Sharfi, ``Energy-Aware Clustering for Wireless Sensor Networks Using Particle Swarm Optimization", in 2007 *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, ,2007 pp. –1.5 DOI: 10.1109/PIMRC.2007.4394521

[33] P. C. S. Rao, P. K. Jana, and H. Banka, ``A Particle Swarm Optimization Based Energy Efficient Cluster Head Selection Algorithm for Wireless Sensor Networks", *Wireless Networks*, vol. ,23 no. ,7 pp. –2005,2020 .2017 DOI: 10.1007/s11276-016-1270-7

[34] S. García, A. Fernández, J. Luengo, and F. Herrera, ``Advanced Nonparametric Tests for Multiple Comparisons in the Design of Experiments in Computational Intelligence and Data Mining", *Information Sciences*, vol. ,180 no. ,10 pp. –2044,2064 .2010 DOI: 10.1016/j.ins.2009.12.010

الملحق أ: تفاصيل الحسابات

يقدّم هذا الملحق بعض الحسابات الإضافية المرتبطة بخوارزمية GRASP المعتمدة في الأطروحة.

1.ا صيغ إضافية

تُحسب دالة الهدف (Objective Function) كالتالي:

$$f(x) = \alpha \cdot C(x) + \beta \cdot E(x)$$

حيث $C(x)$ تمثل نسبة التغطية (Coverage Rate) و$E(x)$ تمثل الطاقة المتبقية (Residual Energy)، وα وβ معاملات الترجيح (Weighting Coefficients).

الملحق ب: قائمة الاختصارات

- **WSN**: شبكات المستشعرات اللاسلكية
- **GRASP**: إجراء البحث التكيفي الجشع العشوائي
- **LEACH**: بروتوكول التوجيه الهرمي منخفض الطاقة
- **PEGASIS**: بروتوكول السلسلة الحسية
- **PSO**: تحسين سرب الجسيمات
- **GA**: الخوارزمية الجينية
- **SA**: التلدين المحاكى
- **ACO**: تحسين مستعمرة النمل
- **AI**: الذكاء الاصطناعي
- **ML**: تعلم الآلة
- **NLP**: معالجة اللغات الطبيعية