الجمهوريّة العربيّة السوريّة
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

خوارزمية تآزريه (اليراع – التطور التفاضلي) لرفع كفاءة الطاقة وخفض نسبة ثقوب التغطية في شبكات الحساسات اللاسلكية

أطروحة مقدّمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الإلكترونيات التطبيقية

إعــداد

م. أريتاس أحمد خليل

إشــراف

أ. د. م. محمد الحسين

العام الدراسي

2025-2024

ا

قرار لجنة الحكم

أقدّم أسمى آيات الشـــكر والامتنان والمحبّة لأعضـــاء لجنة الحكم الموقّرة لقبولهم قراءة خلاصـــة بحثي والحكم على رسالتي:

الأستاذ الدكتور محمد الحسين جامعة دمشق اختصاص اتصالات بصرية عضواً ومشرفاً علمياً

الأستاذ الدكتور.عبد الكريم السالم جامعة البعث اختصاص اتصالات عضواً

الأستاذ المساعد الدكتور.طلال حمود جامعة دمشق اختصاص معالجة إشارة عضواً

الدكتور.محمد ميهوب جامعة دمشق اختصاص اتصالات ساتيلية عضواً

الدكتور.نضال زيدان جامعة دمشق اختصاص تصميم الدارات الالكترونية عضواً

بموجب قرار مجلس البحث العلمي والدراســـات العليا رقم / 472/ م.ب.د المتخذة بالجلســـة رقم /4/ تاريخ 2024/11/4 والقاضي بتأليف لجنة الحكم.

تصريح خطّي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1- أنّ كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2- أنّه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

م. أريتاس أحمد خليل

شكر وتقدير

أتوجه بجزيل الشكر والتقدير للمشرف على البحث الأستاذ الدكتور المهندس محمد الحسين، لما قدمه لي من نصائح وتوجيهات ودعم علمي ولم يبخل بتقديم الجهد والوقت اللازم لإخراج هذا العمل إلى النور.

وكذلك أتوجه بالشكر الجزيل للدكتورة جمان أبو حبيب ولجميع أعضاء الهيئة التدريسية في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات الذين أغنوا البحث بتوجيهاتهم أثناء السيمنارات الدورية .

وأخيراً أتقدم بالشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة الحكم الموقرين الذين أسهمت ملاحظاتهم وتوجيهاتهم في إغناء هذا البحث.

الإهـداء

إلى والدي العزيز رحمه الله، الذي كان دائمًا مصدر إلهامي ودعمي، فبدون تضحياتك لما كنت هنا اليوم.

إلى أمي الحبيبة، التي كانت دائمًا النور الذي يضيء طريقي، وحنانها الذي لا ينضب هو ما جعلني أستطيع تحقيق أحلامي.

إلى زوجتي الغالية، التي كانت لي السند والداعم الحقيقي في كل مراحل حياتي، فحبك هو القوة التي تدفعني للأمام.

إلى إخوتي الأعزاء، الذين شاركوني كل لحظة من الفرح والحزن، فأنتم دائمًا في قلبي ودعواتي.

إلى دكاترة القسم الأفاضل، الذين علموني الكثير وفتحوا أمامي آفاق المعرفة، فلكم مني كل الشكر والتقدير.

وإلى جميع شركاء النجاح

Table of Contents فهرس المحتويات

قرار لجنة الحكم I

تصريح خطّي II

شكر وتقدير III

الإهــداء IV

فهرس المحتويات Table of contents V

فهرس الأشكال List of figures VII

فهرس الجداول List of tables X

قائمة المصطلحات والاختصارات List of terms and abbreviations XI

المُستخلص 1

ABSTRACT 2

الفصل الأول الإطار العام للبحث General framework of the research 3

1.1 مقدّمة Introduction 4
2.1 بعض الدراسات السابقة Some previous studies 5
3.1 مشكلة البحث Research problem 14
4.1 هدف البحث Research aim 15
5.1 أهمية البحث Research significance 15
6.1 مسوغات البحث Research justification 16
7.1 محددات البحث Research delimitations 16
8.1 حدود البحث Research limitations 17
9.1 منهج البحث وأدواته Research methodology and tools 17
10.1 بنية الأطروحة Thesis structure 18

الفصل الثاني الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث Theoretical basis related to the research 19

1.2 مقدمة Introduction 20
2.2 نظرة عامة على شبكات الحساسات اللاسلكية 21
3.2 تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية ومتطلباتها WSN applications and their requirements 22
1.3.2 الرعاية الصحية Healthcare 22
2.3.2 الصناعة: التصنيع والشبكات الذكية Industry: manufacturing and smart grids 24
3.3.2 أنظمة النقل Transportation systems 25
4.3.2 السلامة العامة والأنظمة العسكرية Public safety and military systems 26
5.3.2 البيئة والزراعة Environment and agriculture 27
6.3.2 شبكات الحساسات تحت الأرض وتحت الماء Underground and underwater sensor networks. 28
4.2 تغطية شبكات الحساسات اللاسلكية Coverage of wireless sensor networks 30
1.4.2 مميزات التغطية 30
2.4.2 حدود التغطية: 30
3.4.2 علاقة التغطية بحياة الشبكة وتسليم البيانات 31

4.4.2 التسميات Nomenclature 33
5.2 نموذج الاستشعار Sensing model 35
6.2 تصنيف التغطية Coverage classification 36
7.2 استهلاك الطاقة Energy consumption 38
.1.7.2 تعريفات مدة الحياة وكفاءة الطاقة Lifetime and energy-efficiency definitions 39
.2.7.2 معايير شبكات الحساسات اللاسلكية منخفضة الطاقة Low-power wsn standards 40
8.2 آليات توفير الطاقة Energy-saving mechanisms 47
1.8.2 تحسين الراديو Radio optimization 47
2.8.2 تقليل المعلومات Data reduction 50
3.8.2 مخططات العمل والسكون Sleep/wakeup schemes 52
4.8.2 التوجيه الموفر للطاقة Energy-efficient routing 54
5.8.2 الشحن Charging 56
9.2 بروتوكول التوجيه الهرمي للمجموعات التكيفية منخفضة الطاقة Low energy adaptive clustering hierarchy protocol 59
10.2 الخوارزميات الأمثلية في شبكات الحساسات اللاسلكية 61
1.10.2 خوارزمية اليراع Firefly 62
2.10.2 خوارزمية التطور التفاضلي Differential evolution 66

الفصل الثالث التنفيذ العملي والنتائج Implementation and results 71

1.3 بيئة العمل 72
1.1.3 عتاديات العمل 72
2.1.3 مقاييس الأداء 73
2.3 نمذجة خوارزميات اليراع والتطور التفاضلي (FA – DE) 74
1.2.3 نمذجة خوارزمية اليراع FA 75
2.2.3 نمذجة خوارزمية التطور التفاضلي DE 77
3.2.3 مقارنة بين الخوارزميتين 78
3.3 التقسيم الاقليدي الزاوي مع خوارزمية اليراع AEPFA 79
4.3 خوارزمية هجينة بين خوارزميتي اليراع والتطور التفاضلي H-FADE 102
1.4.3 توصيف المسألة 102
2.4.3 مبدأ عمل الخوارزمية H-FADE 103
5.3 الخاتمة Conclusion 118

الآفاق المستقبلية Future work 121

منشورات البحث Research publications 122

المراجع References 124

فهرس الأشكال List of Figures

الشكل 2-1. بنية شبكة WSN بسيطة [I DAANOUNE,2020] 21

الشكل 2-2. بنية عقدة التحسس [K CHEN,2017]. 22

الشكل 2-3. تصنيف تطبيقات WSN [D NUMAN,2019]. 22

الشكل 2-4. رسم توضيحي لشبكة مستشعرات الجسم[K CHEN,2017] 23

الشكل 2-5. بنية الإطار للوضع الممكّن في معيار IEEE 802.15.[E EVANGELAKOS,2022]. 41

الشكل 2-6. معمارية MQTT-S لشبكة WSN مع اتصالات Pub/Sub. [S BIDHENDI,2022] 44

الشكل 2-7. نموذج استهلاك الطاقة الراديوية [S BIDHENDI,2022] 46

الشكل 2-8. تصنيف الآليات الموفرة للطاقة [K CHEN,2017]. 47

الشكل 2-9. مثال على ترميز الشبكة [K CHEN,2017]. 51

الشكل 2-10. مثال على طريقة التحكم في الطوبولوجيا المطبقة على الشبكة [S. MISRA, 2011]. 54

الشكل 2-11. المخطط التدفقي لخوارزمية اليراع [A IDREES,2023]. 65

الشكل 2-12. مخطط صندوقي لخوارزمية DE الأساسية [S D L,2023]. 67

الشكل 2-13. المخطط التدفقي لخوارزمية DE [S D L,2023]. 69

الشكل 3-1. توزع العقد بشكل منتظم على كامل المنطقة. [الباحث] 76

الشكل 3-2. عدد العقد الحية في الشبكة بدلالة الجولات في خوارزمية FA. [الباحث] 77

الشكل 3-3. عدد العقد الحية في الشبكة بدلالة الجولات في خوارزمية DE. [الباحث] 77

الشكل 3-4. مقارنة بين DE– FAعدد العقد الحية بدلالة الجولات [الباحث] 78

الشكل 3-5. انتشار العقد ضمن الحقل وموقع المحطة القاعدية في الزاوية [الباحث] 80

الشكل 3-6. علاقة عدد العقد الحية بدلالة الجولات[الباحث] 81

الشكل 3-7. طريقة التقسيم الإقليدية لحقل التغطية [الباحث] 83

الشكل 3-8. المخطط التدفقي للطريقة المقترحة [الباحث] 84

الشكل 3-9. مقارنة بين الخوارزميات LEACHوFA بالشكل العام وFA عند AEPFA. عند توزيع عشوائي وتموضع ثابت[الباحث] 85

الشكل 3-10. مقارنة بين الخوارزميات LEACHوFA بالشكل العام وFA عند AEPFA. عند اخذ متوسط للنتيجة عند 15 تكرار [الباحث] 86

الشكل 3-11. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات لخوارزمية AEPFA عند طاقة ابتدائية ل 0.5 86

الشكل 3-12. كمية البيانات المرسلة بدلالة استهلاك الطاقة [الباحث] 87

الشكل 3-13. كمية البيانات المرسلة بدلالة استهلاك الطاقة الكلي وفق طريقة اخذ المتوسط ل 15 نتيجة 88

الشكل 3-14. موت أول عقدة وفق قيمة الطاقة الابتدائية للعقد. [الباحث] 89

الشكل 3-15. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 50 عقدة في حالة التوزيع عشوائي والتموضع ثابت [الباحث] 90

الشكل 3-16. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 50 عقدة في حالة التوزيع عشوائي وأخذ المتوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 91

الشكل 3-17. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 100عقدة توزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث] 91

الشكل 3-18. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 100عقدة توزيع عشوائي واخذ المتوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 92

الشكل 3-19. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 150 عقدة بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث] 92

الشكل 3-20. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 150 عقدة بتوزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 نتيجة [الباحث] 93

الشكل 3-21. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 300× 300 وطاقة لـ6 بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت. [الباحث] 94

الشكل 3-22. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 300×300 م^2 وطاقة لـ6 باستخدام توزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 تكرار. [الباحث] 94

الشكل 3-23. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 400×400 م^2 وطاقة 10 لـ [الباحث] 95

الشكل 3-24. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 400×400وطاقة 10 لـ في حالة توزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 95

الشكل 3-25. تموضع المحطة القاعدية بالنسبة للحقل المراقب 96

الشكل 3-26. تغير منحني عدد العقد بدلالة الجولات عند تغير موقع المحطة القاعدية في توزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث] 96

الشكل 3-27. تغير منحني عدد العقد بدلالة الجولات عند تغير موقع المحطة القاعدية مع اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 97

الشكل 3-28. نموذج التغطية المتبع [الباحث] 98

الشكل 3-29. تغطية المنطقة وفق نموذج النشر [الباحث] 99

الشكل 3-30. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات عند مواقع مختلة للمحطة القاعدية [الباحث] 100

الشكل 3-31. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات عند مواقع مختلة للمحطة القاعدية عند اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 100

الشكل 3-32. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الجولات عند مواقع مختلفة للمحطة القاعدية بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث] 101

الشكل 3-33. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الجولات عند مواقع مختلفة للمحطة القاعدية عند اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث] 101

الشكل 3-34. مبدأ عمل خوارزمية H-FADE، [الباحث] 104

الشكل 3-35. المخطط التدفقي للخوارزمية H-FADE [الباحث] 105

الشكل 3-36. توزع العقد وفق التوزع العشوائي مساحة منطقة M2 100×100 وموقع BS (0,125) [الباحث] 106

الشكل 3-37. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة أولية للعقد لـ1[الباحث] 107

الشكل 3-38. توزع العقد بالنشر العشوائي والتموضع الثابت مع تموضع المحطة القاعدية في مركز المنطقة [الباحث] **107.....**

الشكل 3-39. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة أ 3 [الباحث]**.....108**

الشكل 3-40. مخطط نشر العقد العشوائي مع التموضع الثابت ضمن الحقل مع إيضاح موقع المحطة القاعدية [الباحث] **.....109**

الشكل 3-41. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE، DE، FA، LEACH .[الباحث] **.....109**

الشكل 3-42. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة أولية للعقد أ3 و متوسط النتيجة لـ 15 تكرار[الباحث] **.....110**

الشكل 3-43. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات لكل من الخوارزميات DE،FA ، LEACH و H-FADE [الباحث] **.....110**

الشكل 3-44. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات للخوارزميات DE،FA ، LEACH و H-FADE واخذ متوسط 15 تكرار[الباحث] **111**

الشكل 3-45. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الطاقة اللازمة لإرسالها وذلك من أجل كل من الخوارزميات DE،FA ، LEACHو H-FADE [الباحث]**.....111**

الشكل 3-46. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الطاقة اللازمة لإرسالها وذلك للخوارزميات DE،FA ، LEACH و-H FADE عند اخذ متوسط 15 تكرار [الباحث] **.....112**

الشكل 3-47. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFA عند موقع محطة قاعدية (100,100) وطاقة أولية للعقد 3 جول[الباحث] **.....113**

الشكل 3-48. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFA عند موقع محطة قاعدية (100,100) وطاقة أولية للعقد 3 جول عند اخذ متوسط 15 تكرار[الباحث]**.....113**

الشكل 3-49. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFAعند موقع محطة قاعدية (125,125) وطاقة أولية للعقد 5 جول [الباحث] **.....114**

الشكل 3-50. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFAعند موقع محطة قاعدية (125,125) وطاقة أولية للعقد 5 جول واخذ متوسط ل 15 تكرار [الباحث] **.....114**

الشكل 3-51. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFAعند موقع محطة قاعدية (150,150) وطاقة أولية للعقد 7 جول [الباحث] **.....115**

الشكل 3-52. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFAعند موقع محطة قاعدية (150,150) وطاقة أولية للعقد 7 جول واخذ المتوسط لـ 15 تكرار[الباحث] **.....115**

الشكل 3-53. يعبر عن موت العقد عند تغير القيمة الابتدائية لطاقة العقد بدلالة الجولات [الباحث]**.....116**

الشكل 3-54. مخطط مقارنة تغير عدد العقد الحية بدلالة عدد الجولات بالنسبة AEPFA –H-FADE [الباحث]**117**

الشكل 3-55. طول فترة الاستقرار عند استخدام خوارزميات العمل [الباحث]**.....117**

فهرس الجداول List of Tables

الجدول 2–1. متطلبات تطبيقات WSN [K CHEN,2017]..... 29

الجدول 2–2. ملف تعريف استهلاك الطاقة لعقدة تحسس TELOSB [K CHEN,2017]..... 39

الجدول 2–3. خصائص المعايير اللاسلكية [S BIDHENDI,2022]..... 45

الجدول 2–4. خصائص دورة العمل [K CHEN, 2017]..... 53

الجدول 2–5. الترابط بين الآليات الموفرة للطاقة ومتطلبات التطبيقات [K CHEN,2017]..... 60

الجدول 2–6. التطبيقات والآليات الموفرة للطاقة [K CHEN,2017]..... 61

الجدول 2–7. الفئات الرئيسية لتقسيم MSA [P MANN,2017]..... 62

الجدول 3-1. القيم المعتمدة في إجراء المحاكاة [اغلب المراجع]..... 76

الجدول 3-2. عدد العقد الحية المتبقية بدلالة تغير الجولات لخوارزمية FA وخوارزمية DE [الباحث]..... 78

الجدول 3–3. مقارنة بين خوارزمية اليراع وخوارزمية التطور التفاضلي..... 79

الجدول 3–4. موسطات سيناريو العمل [الباحث]..... 80

الجدول 3-5. مواقع العقد المعتمدة في المحاكاة $\mathbf{r}i = (xi, yi)$ التموضع الثابت[الباحث]..... 81

الجدول 3-6. تغير العقد الحية بدلالة الجولات عند BS في الزاوية والطاقة الأولية للعقد J 3. [الباحث]..... 82

الجدول 3–7. عدد العقد أثناء الجولات [الباحث]..... 87

الجدول 3–8. كمية البيانات المرسلة أثناء الجولات *108 بت [الباحث]..... 88

الجدول 3–9. كمية الطاقة المستهلكة اثناء الجولات مقدرة بـ J [الباحث]..... 89

الجدول 3–10. قيم الجولات الموافقة لموت أول عقدة في الشبكة عند استخدام قيم طاقة أولية مستخدمة..... 90

الجدول 3–11. عدد الجولات عند موت أول و10 % من العقد [الباحث]..... 93

الجدول 3–12. موسطات المحاكاة المستخدمة في محاكاة الخوارزمية الهجينة H-FADE..... 106

الجدول 3–13. عدد العقد الحية بدلالة الجولات للخوارزميات المدروسة [الباحث]..... 112

الجدول 3-14. المقارنة بين الخوارزمية المقترحة مع بعض الأبحاث السابقة [الباحث]..... 120

List of Terms and قائمة المصطلحات والاختصارات Abbreviations

المصطلح باللغة الإنكليزية	الاختصار	المصطلح باللغة العربية
Adaptive LEACH Low-Energy Clustering Hierarchy	LEACH	التسلسل الهرمي للتجميع التكيفي منخفض الطاقة
Artificial Intelligence	AI	الذكاء الصنعي
Ant Colony Optimization.	ACO	تحسين مستعمرة النمل
Artificial Neural Networks.	ANN	شبكات عصبونية صنعية
Artificial Bee Colony	ABC	مستعمرة النحل الصنعية
Angular Euclidean Partition Method with the Firefly Algorithm	AEPFA	خوارزمية اليراع مع تقسيم اقليدي زاوي
Base Station	BS	محطّة قاعدية
Bat Algorithm	BA	خوارزمية الوطواط
Bit Error Rate	BER	معدل الخطأ بالبت
Channel	-	قناة الاتصال
Classification Algorithms	-	خوارزميات التصنيف
Cluster Head	CH	رأس العنقود
Cuckoo Search Optimization.	CSO	تحسين بحث الوقواق
Computational Intelligence.	CI	الذكاء الحسابي
Coverage	-	التغطية
Data collection	-	تجميع البيانات
Differential evolution algorithm	DE	خوارزمية التطور التفاضلي
Efficiency	-	المردود
Emulation	-	المضاهاة
Energy Consumption	EC	استهلاك الطاقة
Factor	F	معامل

Firefly algorithm	FA	خوارزمية اليراع
Genetic Algorithm	GA	الخوارزمية الجينية
Heterogeneous	-	غير متجانسة
Hierarchical	-	هرمية
Hybrid	-	هجين
Hybrid Firefly Algorithm and Differential Evolution	H-FADE	خوارزمية هجينة بين اليراع والتطور التفاضلي
Internet of Things	IoT	إنترنت الأشياء
Internet Protocol Adders	IP Address	العنوان المنطقي
Intelligent Transportation Systems		أنظمة النقل الذكية
Lifetime	-	مدة حياة
Local Area Network	LAN	الشبكات المحلية
Machine Learning	ML	تعلّم الآلة
Micro-Electro-Mechanical System	MEMS	المنظومات الكهرُميكانيكية الصُغَريَّة
Mobility	-	التنقّل
Mote	-	عقدة صغيرة
MAS Multi-Agent Systems.		أنظمة MAS المتعددة الوكلاء
Multipath	-	متعدد المسارات
Network	-	شبكة
Neural Networks	NN	الشبكات العصبونية
Nature Inspired.	NI	مستوحاة من الطبيعة
Node	-	عقدة
Open Networking Foundation	ONF	مؤسسة التشبيك المفتوحة
Packet	-	رزمة
Packet Delivery Ratio	PDR	نسبة تسليم الرزم
Packet Loss Ratio	PLR	نسبة فقد الرزم

Parameters	-	موسِطات
Performance measurement	-	مقاييس الأداء
Particle Swarm Optimization	PSO	تحسين سرب الجسيمات
Quality of Service	QoS	جودة الخدمة
Real time	-	الزمن الحقيقي
Reinforcement Learning	RL	التعلّم المعزّز
Reliability	-	الموثوقية
Router	-	موجّه
Routing	-	توجيه
Scalability	-	قابلية التوسع
Sensor node	-	عقدة التحسس
Simulation	-	المحاكاة
Sink node	-	عقدة الوجهة
Sleep mode	-	وضع السكون
Source	-	المصدر
Synchronization	SYN	تزامن
Throughput	-	معدّل التدفّق
Transmission Control Protocol	TCP	بروتوكول التحكم بالإرسال
Transport Control Protocol		بروتوكول التحكم في النقل
Transport Control Protocol/Internet Protocol	TCP/IP	بروتوكول التحكم في النقل/بروتوكول الإنترنت
Time Division Multiple Access	TDMA	الوصول المتعدد بتقسيم الزمن
Time Difference of Arrival	TDA	فرق وقت الوصول
Wireless LAN	WLAN	شبكة محلية لاسلكية
Wireless Sensor Networks	WSN	شبكات الحسّاسات اللاسلكية

المُستخلص

خلفية البحث: مكّنت التطورات الحديثة في مجال الاتصالات اللاسلكية والأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة من تطوير شبكات الحساسات اللاسلكية (WSN) والتي تعتبر واحدة من أكثر التقنيات الواعدة في المستقبل القريب. شبكة الحساسات اللاسلكية هي أجهزة صغيرة تعمل بالبطاريات. يمكن نشرها بأعداد كبيرة للكشف عن الأحداث وإرسال تقارير دورية عن محيطها. تعمل العقد بشكل مستقل في منطقة غير مراقبة لفترة طويلة من الزمن. وقد يكون استبدال البطاريات باهظ التكلفة أو حتى مستحيلًا في بيئة معادية. لذلك من الضروري تطوير حلول تراعي الطاقة لزيادة عمر شبكات الحساسات وتحسين تغطيتها.

هدف البحث: يهدف البحث إلى تطوير استراتيجيات فعّالة للحفاظ على الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية WSN وتقليل ثقوب التغطية في الحقول المراقبة. يسعى البحث إلى تحسين مدة حياة الشبكة من خلال اقتراح بروتوكولات تجميع جديدة تعالج مشكلة اختيار رأس العنقود.

المواد والطرائق: تم استخدام خوارزميات متقدمة مثل خوارزمية اليراع (FA) وخوارزمية التطور التفاضلي (DE) لتطوير طرق جديدة للحفاظ على الطاقة. كما تم تقديم طريقة التقسيم الإقليدي الزاوي باستخدام خوارزمية اليراع (AEPFA) ، والتي تهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة الناجم عن مواقع المحطة القاعدية. تم تطوير خوارزمية هجينة تجمع بين خوارزمية اليراع وخوارزمية التطور التفاضلي (H-FADE) لتحسين أداء الشبكة.

النتائج العملية: أظهرت النتائج أن الطريقة الهجينة المقترحة (H-FADE) أدت إلى:

- زيادة مدة حياة الشبكة بشكل ملحوظ.
- تقليل ثقوب التغطية في الحقل المراقب.
- تحسين أداء الشبكات مقارنة بالطرق التقليدية مثل بروتوكول LEACH وFA وDE.

تم اختبار الطريقة الهجينة وأثبتت جدواها وفاعليتها في تحقيق الأهداف المرجوة

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث: يعتبر الحفاظ على الطاقة يعد عاملاً حاسماً في تحسين أداء شبكات الاستشعار اللاسلكية. كما أن استخدام الخوارزميات المتقدمة مثل H-FADE يمكن أن يسهم بشكل كبير في إطالة عمر الشبكة وتعزيز تغطيتها، مما يفتح آفاقًا جديدة لتطبيقات إنترنت الأشياء في مجالات متعددة

الكلمات المفتاحية: شبكة استشعار لاسلكية، بروتوكول التجميع، الحفاظ على الطاقة، خوارزمية اليراع، خوارزمية التطور التفاضلي، التقسيم الإقليدي، خوارزمية هجينة.

Abstract

Background of the Research: Recent advances in wireless communications and microelectromechanical systems have enabled the development of wireless sensor networks (WSNs), which are one of the most promising technologies in the near future. WSNs are small, battery-powered devices. They can be deployed in large numbers to detect events and send periodic reports about their surroundings. Nodes operate autonomously in an unattended area for a long period of time. Replacing batteries can be expensive or even impossible in a hostile environment. Therefore, it is essential to develop energy-conscious solutions to increase the lifetime of sensor networks and improve their coverage.

Research Objective: The research aims to develop effective energy conservation strategies in Wireless Sensor Networks (WSN) and reduce coverage holes in monitored fields. The research seeks to improve network lifetime by proposing new clustering protocols that address the issue of inappropriate cluster head selection.

Materials and Methods: Advanced algorithms such as the Firefly Algorithm and Differential Evolution were used to develop new energy conservation methods. The Angular Euclidean Partitioning using the Firefly Algorithm (AEPFA) was introduced, aiming to reduce energy consumption due to base station locations. A hybrid algorithm combining the Firefly Algorithm and Differential Evolution (H-FADE) was developed to enhance network performance.

Practical Results: The results showed that the proposed method (H-FADE) led to:

- increase in network lifetime.

- A reduction in coverage holes in the monitored field.

- Improved network performance compared to traditional methods such as the LEACH protocol, FA, and DE.

The hybrid method was tested and proved its validity and effectiveness in achieving the desired goals.

Conclusions from the Researcher's Perspective: Researchers concluded that energy conservation is a critical factor in enhancing the performance of Wireless Sensor Networks. The use of advanced algorithms such as H-FADE can significantly contribute to extending the network's life and enhancing its coverage, opening new horizons for IoT applications in various fields.

Keywords: Internet of Things, Wireless Sensor Network, Clustering Protocol, Energy Conservation, Firefly Algorithm, Differential Evolution, Angular Euclidean Partitioning, Hybrid Algorithm.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

General Framework of the Research

يستعرض الفصل الأول الإطار العام للبحث General Framework of the Research، مقدّمة عن البحث وبعض الدراسات السابقة المتعلّقة به ومشكلته والهدف منه، إضافةً إلى أهمية ومسوّغات ومحددات وحدود ومنهج البحث وأدواته، وكذلك توضيح بنية الأطروحة.

1.1 مقدّمة Introduction

فتح تطوير شبكات الحساسات اللاسلكية WSNs مؤخراً مجالاً جديداً ومثيراً للاهتمام لإنشاء أنواع جديدة من التطبيقات. تتكون WSN من عدد كبير من عقد التحسس التي تراقب بيئتها، وتعالج البيانات إذا لزم الأمر (باستخدام المعالجات الدقيقة) وترسل وتستقبل البيانات المعالجة من وإلى عقد التحسس الأخرى. وترتبط هذه العقد، الموزعة في البيئة، بالمحطة القاعدية – في شبكات مركزية – أو بعقد تحسس أخرى عبر الشبكة وفي الشبكات المركزية، تقوم المحطة القاعدية بجمع البيانات التي تم تحسسها ليستخدمها المستخدم النهائي. في كثير من الحالات، تكون المحطة القاعدية قادرة على تنشيط عقد التحسس عبر البث، عن طريق إرسال معلومات سياسة الشبكة والتحكم [Le *et al*., 2008] كما هو الحال مع الشبكات الأخرى.

تستخدم عقد التحسس عموماً في بيئات لا يمكن الوصول إليها، وهنا برزت الحاجة إلى الاعتماد على بطارياتها (وتجميع الطاقة، مثل الخلايا الشمسية) لا يعد شحن أو تغيير عقد التحسس خياراً. ولذلك، فإن أحد أكبر التحديات التي تواجه WSN هو توفير الطاقة وهو أحد العوامل الرئيسية التي تحدد مدة حياة الشبكة بالكامل.

تنطبق بعض المتطلبات على معظم تطبيقات شبكات الحساسات [Rabaey *et al.*, 2000 H. Edgar Pottie and Kaiser, 2000، Akyildiz *et al.*, 2002،and Callaway, 2004] وهي كالتالي:

- مدة الحياة الافتراضية: يعتبر زيادة مدة حياة الشبكة حيوياً وأساسيا لأنه لا يمكن الوصول إلى أجهزة التحسس بعد النشر.
- حجم الشبكة: تكون الشبكة الأكبر ذات أهمية في معظم التطبيقات لأنها تغطي مساحة أكبر وبالتالي تراقب المزيد من الأحداث.
- تقليل الأخطاء: تقدم الشبكة قليلة الاستقرار بيانات غير كاملة. فهذا يعني أن مراقبة البيئة غير دقيقة وقد يتم ضياع العديد من الأحداث. عند النقل إلى المحطة القاعدية، فهذا يعني أن

فقدان الرزم كبير وفي كلتا الحالتين، تكون المعرفة بالبيئة غير كاملة وبالتالي فإن البيانات المجمعة غير موثوقة. [Shankar *et al.*, 2003]. تملي هذه المتطلبات المعايير التالية في بروتوكولات الاتصال:

- انخفاض استهلاك الطاقة: يجب أن يستهلك الاتصال بين العقد والمحطة القاعدية الطاقة المتاحة ببطء كنتيجة مباشرة للحاجة إلى مدة حياة أطول للعقد، حيث يتم استهلاك غالبية طاقة العقد في الاتصال.
- متوافق مع الاتصالات متعددة القفزات: تتجنب العقد الاتصال المباشر مع المحطة القاعدية (حيث أن استهلاك الطاقة يتناسب مع مربع المسافة على الأقل). وبدلاً من ذلك، يفضل أن تستخدم عدة عقد خلال المسار كقفزات للتواصل.
- قابلية التوسع: يجب أن يكون بروتوكول الاتصال موثوقاً به من حيث إنشاء الاتصال بين أجهزة التحسس. يجب أن يعمل هذا البروتوكول كالمعتاد عندما يصبح حجم الشبكة أكبر.
- الموثوقية: يعد نقل البيانات بشكل موثوق من حيث فقدان الرزم أحد الاهتمامات الرئيسية لتوفير درجة عالية من الكفاءة في أنظمة المراقبة والتحكم، إضافة الى صحة عدم تغير البيانات

يعد استخدام تقنيات الاتصال الموفرة للطاقة، مع الأخذ في الاعتبار القدرة على القفزات المتعددة وقابلية التوسع والموثوقية، أمراً مرغوباً فيه للغاية. وكنتيجة مباشرة، سيتم تحسين مدة حياة الشبكة.

2.1 بعض الدراسات السابقة Some Previous Studies

تمثل مشكلة إطالة مدة حياة الشبكة مشكلة صعبة في WSN [Mohammad Bagher, 2021]. يتم في هذا القسم مراجعة بعض الأعمال ذات الصلة بمشكلة التغطية واستهلاك الطاقة.

اقترح المؤلفون في [Y. Xu, 2017] تقنية تسمى الأمانة الجغرافية التكيفية Geographic Adaptive Fidelity (GAF) لتوفير الطاقة في الشبكات المخصصة. يقوم GAF بتقسيم الشبكة إلى شبكات بناءً على معلومات الموقع. يتم تفعيل عقدة واحد في كل شبكة للقيام بمهام التحسس والتوجيه. ستكون العقد الأخرى الموجودة في نفس الشبكة إما في وضع السكون أو الاستماع.

اقترح [C. Vu, 2018] أسلوب جدولة موزع موفر للطاقة لتغطية K في شبكات الحساسات (DESK) Distributed Energy-Efficient Scheduling Approach for K-Coverage، الذي يعمل في جولات تحتاج

فقط إلى معلومات الجيران ذوي القفزة الواحدة. تقرر كل عقدة حالته (نشط أو سكون) بناءً على نموذج تغطية المحيط الذي تم تقديمه بواسطة [Chi-Fu, 2005].

اقترح العمل المقدم في [Y. Yue, 2021] تحسيناً للتغطية في WSNs. أولاً، تم بناء نموذج رياضي يأخذ في الاعتبار توفير الطاقة، واستخدام العقد، والتغطية. ومن ثم، استخدموا لتحسين طريقة تحسين الحيتان، خوارزمية الجيب وجيب التمام.

اقترح العمل في [D. Liang, 2021] أربع خوارزميات لحل مشكلة تحسين التغطية في WSN بشكل إرشادي أو تقريبي. يتم تعريف هذه المشكلة على أنها مجموعة من الأهداف التي يجب تغطيتها بواسطة مجموعة معينة من العقد المتنقلة. يتم استخدام خوارزمية الإرسال الخاصة بالعقد لزيادة الأهداف المغطاة وتحت قيود تحديد الحد الأقصى لمسافة الحركة لكل عقدة حسب العتبة. تمت دراسة مشكلة تقليل الطاقة بأكملها في حين أن تغطية الأهداف تلبي متطلبات الغطاء الجزئي بواسطة [Y. Ran, 2021]. وتم تسميته (Minimum Power Partial Multi-Coverage (MinPowerPMC مشكلة الحد الأدنى من الطاقة الجزئية المتعددة التغطية في WSN. يوجد في هذه المشكلة عدد ثابت من الأهداف بحيث يجب تغطية كل هدف بعدد معين من العقد (متطلبات التغطية).

اقترح المؤلفون في [M, Pawan, 2021]، إرشاداً مدركاً للطاقة لحل مشكلة التغطية k. تنتج الخوارزمية الإرشادية مجموعة من K تغطية غير المنفصلة لتعزيز مدة حياة WSN.

يدرس العمل في [C. Luo, 2020] جدولة مجموعات التغطية القصوى في WSN. صيغت المشكلة كبرنامج، وثم تم اقتراح النهج الجشع لحل هذه المشكلة. وبعد ذلك قدم الباحثون طريقة تقريبية لحل المشكلة المصاغة.

قدم العمل في [Q. Li, 2020] نموذجاً رياضياً لحل مشكلة التغطية الضعيفة. صاغها المؤلفون كخوارزمية تحسين. يمكن للخوارزمية المقترحة تقليل مسافة العقد المتحركة وزيادة وقت الخدمة في الشبكة. اقترح المؤلفون في [Prasan Sahoo, 2017] خوارزميتين لحل جدولة السكون والتي تسمى (جدولة مجموعة تغطية K القائمة على الجدولة المسبقة Pre-Scheduling-based K-coverage Group Scheduling (PSKGS) وجدولة تغطية K ذاتية التنظيمSelf-Organised K-Coverage Scheduling SK . تعمل

PSKGS على تحسين الكشف عن الجودة مدى الحياة كما يعمل نهج SKS على تقليل تكلفة معالجة الأجهزة واتصالها وبالتالي تحسين مدة حياة الشبكة.

اقترح المؤلفون في [X. Lu, 2018] طريقة تجميع تعتمد على التقسيم المربع. يعتمد التقسيم الفرعي على نطاقات الاتصال والتحسس بالإضافة إلى التجميع الثانوي. يتم تنفيذ خوارزمية الجدولة في كل مجموعة، لضمان تغطية الشبكة. في [R. Mishra, 2019]، يتم تقسيم مجال التغطية إلى دوائر متحدة المركز حيث تكون منطقة كل حلقة متكافئة. في كل حلقة، يتم تخطيط تابع الكثافة الاحتمالية وفقا لكثافة العقد.

تم اقتراح خوارزمية لتوزيع العقدة بناءً على دالة كثافة الاحتمال. يضمن نظام التوزيع هذا التغطية وتوفير الطاقة وتحسين مدة حياة الشبكة.

قدم [A. Idrees, 2015] بروتوكولاً يسمى تحسين التغطية الموزعة مدى الحياة للحفاظ على التغطية وتحسين مدة حياة الشبكة في WSN. على الرغم من إدخال العديد من بروتوكولات توفير الطاقة للحفاظ على التغطية وتعزيز مدة حياة الشبكة، لا توجد طريقة يمكن أن تضمن تغطية مجال التحسس مع الحد الأدنى الأمثل لعدد العقد على المدى الطويل. يمكن توفير حلول من خلال الأساليب المركزية للتحسين، ويمكن أن يؤدي ذلك إلى إستهلاك كمية كبيرة من الطاقة بسبب زيادة تكلفة وقت تنفيذ الخوارزمية واتصالات العقد في الشبكة. تعتمد الحلول على المعلومات المحلية للأجهزة المجاورة فهي ليست مثالية في الشبكات الكثيفة. يمكن الأساليب الموزعة توفير الطاقة لأنها تقلل من تكاليف التواصل ووقت التنفيذ فيما بين العقد. من شأن كل من الأساليب الموزعة والمركزية أن تنتج تغطية غير كاملة مدى الحياة في WSN.

تم إجراء العديد من الدراسات حول تحسين مدة الحياة وتقليل تكلفة الطاقة لشبكات WSN. تم القيام بالعديد من الأعمال في مجال ترميز الشبكات لاختيار رؤوس العنقود في [M. Khabir, 2018] مع الأخذ في الاعتبار الطاقة المتبقية أو المسافة من المحطة القاعدية (BS). تم تنفيذ خوارزمية تجميع هرمية لـWSN تسمى بروتوكول التسلسل الهرمي للتجميع التكيفي منخفض الطاقة Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) من أجل بروتوكولات موفرة للطاقة وقابلة للتطوير في [S. H. Gajjar, 2012]. السلبية لبروتوكول LEACH هو أنه يمكن اختيار رأس العنقود Cluster Head (CH) بشكل عشوائي من مجموعة العقد. اقترح [S.; Kumar, 2023] خوارزمية توجيه بناء على metaheuristic في WSN

Meta-heuristic Optimized Cluster head selection-based Routing Algorithm for WSNs (MOCRAW) كانت لها عمليتان: خوارزمية اختيار رأس العنقود المثالية Cluster Head Selection Algorithm (CHSA) وخوارزمية بحث عن المسار Route Search Algorithm (RSA). تم استخدام وظيفة مصفوفة مستوى الطاقة لإنشاء العناقيد في CHSA. وجرى اختيار رأس العنقود بناءً على المسافة بينه وبين المحطة القاعدية والطاقة المتبقية والكثافة وتكوين الكتلة. تم اكتشاف المسار الأمثل بين المصدر والوجهة. في RSA. بالإضافة إلى ذلك، كان التوجيه الخالي من الحلقات يهدف إلى تخفيف حمل الاتصالات. تم الوصول إلى كفاءة MOCRAM من خلال مقاييس مختلفة، مثل استهلاك الطاقة، وعدد العقد الحية، وزمن الوصول. تم تنفيذ عملية المحاكاة داخل بيئة محاكاة NS2. تم تحسين كفاءة الطاقة الإجمالية لـ MOCRAM بنسبة 8–10% مقارنةً بتقنيات أخرى.

اقترح [M. Rami Reddy, 2023] تقنية اختيار رأس العنقود الموفر للطاقة المستندة إلى خوارزمية الذئب الرمادي Energy-Efficient Cluster Head Selection in Wireless Sensor Networks Using an Improved Gray Wolf Optimization Algorithm (EECHIGWO). تهدف هذه التقنية إلى اختيار رأس العنقود الأمثل لتحسين مدة حياة الشبكة، واستقرار الشبكة، وكفاءة الطاقة، ومتوسط الإنتاجية في WSN. تم أخذ المعلمات مثل متوسط المسافة داخل المجموعة، والطاقة المتبقية، ومسافة المحطة القاعدية، وعامل موازنة عقدة CH في الاعتبار في اختيار الرأس CH. تمت محاكاة تنفيذ تقنية EECHIGWO في MATLAB ومقارنتها بأحدث بروتوكولات اختيار رأس العنقود. تم اختبار أداء نظام EECHIGWO من حيث استهلاك الطاقة وعدد العقد الميتة ومتوسط الإنتاجية وجولات التشغيل. تم تعزيز استقرار الشبكة الإجمالي لـ EECHIGWO بنسبة عالية تفوق الخوارزميات الأخرى في الشبكة.

اقترح [D. Samiayya, 2023] خوارزمية تحسين هجينة أفعى–حوت Hybrid Snake Whale Optimization (HSWO) لاختيار CH الأمثل لتعزيز مدة حياة الشبكة في WSN. كان له ثلاث مراحل: اختيار CH، والتهيئة، واختيار المسار. تم اختيار CH الأمثل في اختيار CH، مع الأخذ في الاعتبار مقاييس مختلفة مثل المسافة والتأخير. تم إنشاء نماذج المسافة والطاقة والسكان في التهيئة. تم تسليم البيانات إلى الوجهة عبر المسار الأمثل دون انقطاع الارتباط في اختيار المسار. تمت مقارنة فعالية خوارزمية HSWO مع بعض الخوارزميات المختلفة لتقنيات اختيار رأس العنقود الحالية، لإثبات نتائج أفضل فيWSN. وتم مقارنة طاقة الشبكة، والإنتاجية، واستهلاك الطاقة، ونسبة تسليم الرزم، ومدة حياة

الشبكة، والوقت الحسابي بمقدار 0.98، و0.975 ميجا بت في الثانية، و0.59 مللي جول، و99.6%، و5600 جولة، و0.1 ثانية باستخدام نهج HSWO. ومع ذلك، تستغرق عملية اختيار CH المزيد من الوقت.

اقترح [Ramalingam, 2023] تقنية اختيار رأس العنقود موفرة للطاقة تعتمد على تحسين الأرانب الاصطناعية Energy-Efficient Cluster Head Selection Mechanism for Livestock Industry using Artificial Rabbits Optimization (EECHS-ARO) فيWSN. ويهدف هذا النهج إلى تحسين مدة حياة الشبكة وتقليل استخدام الطاقة في الشبكة. تم حساب التابع الهدف لتحديد CH الأمثل في العنقود، باستخدام عوامل موازنة الطاقة المتبقية، والمسافة، وCH. تم تقييم محاكاة نهج EECHS-ARO في بيئة محاكاة MATLAB. تم تقييم أداء EECHS-ARO مقارنة بخوارزميات أخرى. ونتيجة لذلك، تمت زيادة نسبة تسليم الرزم ومدة الحياة الإجمالي للشبكة بنسبة 5%–15%. ومع ذلك، فقد تطلب الأمر مزيدا من الوقت للتقارب لاختيار CH في الشبكة. قام [N. Arunachalam, ,2021] بتكييف خوارزمية بحث السنجاب Squirrel Search Optimization-Based Cluster Head Selection Technique (SSO-CHST) لإطالة مدة حياة شبكة الحساسات عبر اختيار رؤوس العناقيد في WSN. تم حساب تابع الهدف لتحديد CH. تم اعتبار العقدة ذات قيمة تابع الهدف العالية CH. تمت محاكاة تقنية SSO-CHST باستخدام بيئة MATLAB 2014a. أظهرت طريقة SSO-CHST تحسينا بنسبة 9–15% في مدة حياة الشبكة مقارنةً بالطرائق المعيارية. أظهرت استراتيجية SSO-CHST انخفاضاً بنسبة 7–14% في استهلاك الطاقة مقارنةً بالطرائق الأخرى.

اقترح [R. Abraham, 2023] اختيار CH الموفر للطاقة القائم على خوارزمية بحث الفلامينغو. تم تكييف تقنية المجموعة فائقة الحجم لتجميع العقد ومعالجة البيانات الشاملة في الشبكة. تم اختيار أقصر مسار بين BS وCH لنقل رزم البيانات باستخدام Q- learning لتجنب المشكلات الناجمة عن ظروف الشبكة المعقدة. تم حساب تابع الهدف مع الأخذ في الاعتبار معلمات مختلفة: استهلاك الطاقة، والمسافة بين BS وCH، ومنطقة التغطية. أجريت التجارب في بيئة محاكاة MATLAB 2018a. أظهرت نتائج التجربة أن نهج خوارزمية الفلامينغو عزز أداء الشبكة من خلال تقليل استهلاك الطاقة واختيار المسار الأمثل.

اقترح [S. Ambareesh, 2023] تحسين (Hybrid Jarratt Butterfly HJBO) استنادا إلى اختيار المسار الأمثل عبر CH. تم دمج HJBO مع نهج FUZZY TOPSIS في اختيار المسار الأمثل لتحديد المسار الأمثل. تم إرسال البيانات المجمعة إلى BS. تم التحقق من أداء نهج HJBO من حيث استهلاك الطاقة، والتأخير، والإنتاجية، ومدة حياة الشبكة توضح نتائج نهج HJBO مقارنة بأنظمة أخرى فيما يتعلق بعدد العقد في بيئة محاكاة MATLAB 2018a. أنه تم تحسين مدة حياة الشبكة وإنتاجية HJBO. اقترح [S.J. Pratha, 2023] اختيار CH الهجين في WSN لزيادة استقرار الطاقة ومدة حياة الشبكة. اقترحت هذه الورقة خوارزمية تحسين تلقيح الفراشة والزهور الهجينة Hybrid Mutualism Mechanism-Inspired Butterfly and Flower Pollination Optimization Algorithm (HMMB-FBOA) لاختيار CH الأمثل بناءً على أهداف متعددة، وهي الطاقة المتبقية وتكلفة الشبكة والتقارب وتغطية الشبكة. تجاوزت سرعة التقارب الإجمالية لخوارزمية HMMB-FPOA المستوى المتوقع بسبب تكامل خوارزميات (FPOA) و(Bees Optimization Algorithm (BOA . تم تصميم طريقة HMMB-FPOA لتحقيق التوازن بين مرحلتي الاستغلال والاستكشاف، بهدف إطالة مدة الحياة الإجمالية للشبكة. تمت محاكاة أداء HMMB-FPOA في بيئة MATLAB R2016a. تمت مقارنة نتائج محاكاة HMMB-FPOA مع خوارزميات أخرى، زادت الطاقة المتبقية بحدود 19.14%. تم تحسين مدة حياة الشبكة وعدد الرزم المسلمة إلى محطات القاعدة تحت قنوات مختلفة بنسبة 16,21% مقارنة بمخططات اختيار القنوات المرجعية.

اقترح [M. Sindhuja, 2023] اختيار رأس مجموعة موفر للطاقة باستخدام تحسين النسر الأفريقي Energy-Aware Multi-Object Cluster Head Selection using African Vulture Optimization (MOCHSAPGAN-AVO) لتجميع البيانات بشكل آمن فيWSN. أجرى عملية توجيه عبر CH، وتم اختيار CH وحساب تابع الهدف بعوامل مختلفة، بما في ذلك التأخير والطاقة والمسافة. تم نقل البيانات إلى المحطة القاعدية عبر المسار الأمثل بمجرد تحديد CH. تم اختيار المسار الأمثل بناءً على معيارين مثاليين: الاتصال ومعدل الخدمة. تمت محاكاة أداء MOCHSAPGAN-AVO. أظهرت نتائج المحاكاة أن طريقة MOCHSAPGAN-AVO أقل تأخيراً ونسبة محسنة لتسليم الرزم بنسبة مقارنةً بالطرائق المعيارية. اقترح [V. Cherappa, 2023] تقنية تجميع فعالة تعتمد على بروتوكول التوجيه باستخدام خوارزمية تحسين سمكة أبو شراع التكيفية (Adaptive Sailfish Optimization (ASFO. استخدم ASFO لتحديد CH الأمثل من العقد المناسبة. يقوم نهج ASFO المقترح بنقل البيانات بكفاءة باستخدام بروتوكول التوجيه Clustering

and Multi-Hop Routing (CMRP). تم تقييم أداء ASFO من حيث معدل تسليم الرزمة Packet Delivery Ratio (PDR) وتأخير الرزمة، واستهلاك الطاقة، ومدة حياة الشبكة، بلغت الدقة الإجمالية لتقنية ASFO المقترحة 93.19% مقارنة بخوارزميات أخرى.

قدم الباحثون في [Z. Wang, 2017]، تقنية تعمل على تحسين الطاقة التقليدية لبروتوكول LEACH من حيث اكتساب الطاقة. تسمى هذه التقنية (LEACH-Improvement (LEACH-Impt. كان إنفاق الطاقة في LEACH-Impt أقل من بروتوكول LEACH.

قام باحثون [K. Haseeb, 2016] بتنفيذ بروتوكول توجيه أكثر تحملاً لهذه القيود. مع الأخذ بالحسبان كثافة حركة المرور، والطاقة المتبقية، ومعدل أخطاء الرزمة، يتم وضع بروتوكول للمساعدة في تحسين المسار تم تطوير الصيانة وموازنة التحميل في [K. Haseeb, 2017]. توفر المجموعات الموزونة الموفرة للطاقة مع التوجيه المتين (Weighted Energy-Efficient Clustering with Robust Routing (WECCR موازنة الطاقة بين العقد. مع الأخذ بالحسبان الطاقة المتبقية، والمسافة بين العقدة وعقدة المحطة القاعدية، وعدد العقد المجاورة، من أجل الحصول على توجيه موفر للطاقة، تم إنشاء بروتوكول توجيه يسمى بروتوكول توجيه المجموعات الموفر للطاقة القائم على تحسين الوزن والمعلمات Energy-Efficient Clustering Routing Protocol Based on Weighting and Parameter Optimization (WPO-EECRP) في [G. Han, 2018]. من خلال تعديل بعض معلمات التجميع، يوفر WPO-ECRP تحكما مناسبا في المجموعات ويظهر قابلية توسع جيدة. تم تقديم بروتوكول التوجيه القائم على التجميع في مجموعات (Adaptive Energy Aware Cluster (AECR والذي يعتبر طاقة العقدة امر مهم مقارنة بالمسافة بين العقد.

اقترح في [K. Haseeb, 2017] خوارزمية البحث التوافقي (Harmonic Search Algorithm (HSA التي تأخذ في الاعتبار وضع العقدة والطاقة والمسافة داخل المجموعة والمسافة بين CH وعقدة المحطة القاعدية كتوابع هدف، وتقوم الخوارزمية في [P. Lalwani, 2018] بتقسيم الشبكة إلى عناقيد وإنشاء المسارات في WSN. تعتمد خوارزمية تجميع الأسد الكسرية (Fractional Lion Optimization (FLION على المسافة بين العناقيد والمسافة داخل العنقود، CH، وطاقة العقدة العادية وتأخير الإرسال لإنشاء طريقة توجيه مثالية في WSN تم تطويره في [N. Sirdeshpande, 2017]. يحسن مدة حياة الشبكة بفضل التحديد السريع للقناة. تم تطوير طريقة التحسين المستوحى بصريا (Optics Inspired Optimization (OIO لتحديد أنظمة التوجيه

والتجميع المثالية التي يزيد تعقيدها الحسابي مع حجم الشبكة في [P. Lalwani, 2018]. تم فحص التحسين Novel Chemical Reaction Optimization (NCRO) لتوفير مجموعات غير متكافئة وخطط التوجيه في [P. C. Srinivasa, 2017]. تسهل هذه التقنية اختيار CHs الأمثل مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة غير المتوازن. تم نشر تقنيات تحسين أسد النمل Ant Lion Optimization for Clustering (ALOC) لاختيار CH الأمثل في [G. Yogarajan, 2023]. تعمل ALOC على الطاقة المتبقية، وعدد المحاور المجاورة لكل عقدة، والمسافة بين العقد، والمسافة بين العقدة والمحطة القاعدية. وقد لوحظ تحسن في كفاءة استخدام الطاقة في الشبكة. تم تنفيذ استراتيجية التحسين المستندة إلى الجغرافيا الحيوية Biogeography Based Optimization (BBO) لإنتاج الطريق المثالي الأكثر إيجازا بين CH وعقدة المحطة القاعدية في [P. Lal, 2019]. وقد ساهمت هذه التقنية في تقليل استهلاك الطاقة للشبكة وزيادة حجم رزم البيانات التي تستقبلها المحطة القاعدية. للعثور على CHs مثالية من مجموعات العقد، تم تقديم خوارزمية بحث الجاذبية Gravitational Search Algorithm (GSA) التي تأخذ في الاعتبار الطاقة المتبقية للعقدة في [P. Azad, 2013]. تم تطوير بروتوكول التوجيه التطوري متعدد المسارات الموفر للطاقة Evolutionary Multipath Energy-Efficient Routing (EMEER) الذي يعتمد على خوارزمية بحث الوقواق لتجميع WSN بناءً على خصائص التشابه ومستوى الطاقة كما في [N. A. Morsy, 2018]. تم إجراء دراسات استقصائية بناءً على عوامل مختلفة في [Osamy, *et al.*, 2022]. [Sridhar *et al.*, 2022] [Majid *et al.*, 2022]. اظهر استبيان تفوقا في الأداء لحل مختلف تحديات WSN باستخدام تقنيات الذكاء الحسابي ومع ذلك، لم يتم إجراء تقييمات في الوقت الفعلي على سيناريوهات WSN الواقعية، [Sarobin & Ganesan 2015] يقدم مسحاً آخر بخصوص تقنيات ذكاء السرب Swarm Intelligence (SI) في .WSN لقد قدموا بعض التحليلات الجديدة وأظهروا أن يمكن تحسين كفائة الطاقة من خلال فهم تحديات .WSN تشير االدراسات إلى أن معظم التقنيات الحالية تعتمد على المحاكاة وتركز في الغالب على WSNالثابتة. الاستطلاع الذي أجراه [Jabbar *et al,.* 2023] يناقش التحسين لـ WSN باستخدام الحوسبة المستوحاة من الواقع. كما أنه تم عرض الأساليب الهجينة المستخدمة لمعالجة بعض المشكلات المرتبطة بالأنظمة غير البيولوجية. يتم استخدام مجموعة متنوعة من الخوارزميات مثل مستعمرة النمل Ant Colony Optimization (ACO)، وخوارزمية السرب Particle Swarm Optimization (PSO). يمكن استخدام ذكاء السرب SI لحل مشكلات التوجيه لأنه قابل للتطوير وقوي وقابل للتكيف كما في [Montoya *et al*., 2010] ركزت على الموضوعات الرئيسية المتعلقة

بشبكات WSN، مثل التغطية والاتصال ومدة حياة .WSN قدم المؤلفون خوارزميات ومبادئ الذكاء الاصطناعي لحل مشاكل WSN. يستشعر الوكلاء البيئة بمساعدة العقد ويتفاعلون معها يتم توفير مسح شامل حول مخططات التوجيه المستندة إلى SI لـ WSN بواسطة [Gui *et al*., 2016]. لقد قاموا بمقارنة بروتوكولات التوجيه المختلفة المستندة إلى SI لإظهار مزايا وعيوب كل تقنية. تتضمن تقنيات SI الأكثر شيوعا التي تمت مناقشتها ACO وPSO والعديد من تقنيات SI الأخرى. لقد أوضحوا أن انخفاض النفقات العامة وميزات الحساب في الوقت الفعلي للتقنيات المعتمدة على ACO توفر أداءً أفضل في توجيه الشبكة. ومع ذلك، لدى ACO العديد من العيوب، مثل أن أدائها يعتمد بشكل كبير على الدورة السابقة. في الشبكات الديناميكية، تعتبر ACO بمثابة خوارزمية توجيه جيدة. في سيناريوهات العقدة غير المتصلة بشكل جيد، يعتبر PSO غير مفيد .تمتلك ABC قيودا مثل سرعة التقارب المنخفضة مقارنةً بالخوارزميات الأخرى. لقد قدموا أيضا نهجا قائما على المجموعة للتوجيه في WSN باستخدام Spider Monkey Optimization (SMO). يعد تعقيد الزمان والمكان مشكلة في هذه التقنية.

قدم الاستطلاع بواسطة[Al Aghbari *et al.,* 2019] أحدث تقنيات تحسين الذكاء الاصطناعي لحل تحدي التوجيه في .WSN يتم فحص تقنيات التحسين لتوضيح الاستراتيجية التي ستؤدي عملاً أفضل. تم عرض التقنيات الأكثر استخداما في WSN هي PSO وACO وGA تمت مناقشة مخطط تجميع خاص يسمى مراكز الطاقة التي تبحث على أساس Energy Centers Searching using Particle Swarm Optimization (EC-PSO).

يختار [Wang *et al*., 2019] أولاً البروتوكول CHs عن طريق تقسيم موقع العقد وفقا للطرائق الهندسية. ثم يتم استخدام PSO لفحص طاقة الشبكة وCH رأس العنقود المحدد هو العقدة الأقرب إلى مركز الطاقة. تقترح الخوارزمية استراتيجية حماية مع استهلاك منخفض للطاقة. ومن خلال دمج النهج المذكور أعلاه، سيعمل البروتوكول بشكل أساسي على إطالة مدة حياة الشبكة. نظرا لأنه يستخدم تقنية هندسية لتحقيق التوزيع المتساوي لـ CHs أثناء التشغيل الأولي، فإن EC-PSO مناسب فقط لإعدادات الشبكة ذات العقد الموزعة بشكل موحد. استخدم المؤلفون[Ruan & Huang, 2019] ، نهجا قائما على PSO وقدموا آلية توجيه متعددة القفزات الديناميكية غير المتكافئة PSO based Uneven Dynamic Clustering Multi-Hop Routing Protocol (PUDCRP). استخدمت هذه الطريقة استراتيجية التجميع التكيفية للمساعدة في تحقيق

التوازن بين كل عقدة واستخدام الطاقة. يتم توفير تقنية بناء المسار بمساعدة خط الاتصال لاختيار العقدة المناسبة كإيصال البيانات. تم تقديم [Yu et al., 2019] تقنية أخرى للتعامل مع التجمعات غير المتكافئة في WSN. لمعالجة مشكلة موازنة طاقة WSN، تم اقتراح طريقة توجيه تجميعية غير متساوية تعتمد على تحسين سرب اليرقات المتلألئة Glowworm Swarm Optimization (GSO) لشبكات WSN. لتحديد أفضل تقنية للتجميع، يدمج خوارزمية التوجيه بالتجمع غير المتساوي Uneven Clustering Routing Algorithm (UCRA-GSO) متغيرات تشمل كثافة العقد، ومسافة قرب CH، وطاقة عقدة رأس العنقود. تقترح [Elhoseny et al., 2020] نظاما جديدا للتجميع والتوجيه متعدد المراحل قائماً على SI لـ WSN، يتم استخدام نهج PSO المحسن في البداية لاختيار CHs وكفاءة هيكلة المجموعات بذكاء.

3.1 مشكلة البحث Research Problem

أتاحت التطورات الحديثة في الاتصالات اللاسلكية والأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة تطوير شبكات الحساسات اللاسلكية (WSN). تعتبر أجهزة الاستشعار اللاسلكية (عقد التحسس) أجهزة صغيرة ومنخفضة التكلفة تعمل بالبطارية وتمكنها قدرات التحسس من استخلاص المعلومات من بيئتها. يمكن نشرها بأعداد كبيرة لاكتشاف الأحداث ذات الأهمية أو إرسال تقارير دورية عن المناطق المحيطة بها. وهذا يجعلها مناسبة لعدد كبير من التطبيقات التي تتطلب قدرات المراقبة عن بعد. تعمل العقد ذات الطاقة المحدودة بشكل مستقل في منطقة غير مراقبة لفترة طويلة من الزمن. ومع ذلك، قد يكون استبدال البطاريات المستنفذة باهظ التكلفة أو حتى مستحيلاً في بيئة معادية. لذلك من الضروري تطوير حلول صديقة للطاقة لأطالة مدة حياة شبكات الاستشعار ومحاولة تحسين التغطية لتلافي وجود ثقوب تغطية، إن تصميم شبكات الحساسات اللاسلكية الموفرة للطاقة يمثل مشكلة صعبة للغاية. من ناحية، فإن العقد ذات الطاقة المحدودة محدودة الموارد من حيث الذاكرة والقدرات الحسابية، مما يمنع استخدام الخوارزميات المعقدة ويجعل البروتوكولات التقليدية لمكدس TCP/IP غير مناسبة تماماً. من ناحية أخرى، على عكس الشبكات الأخرى، تم تصميم WSN لتطبيقات محددة. تتراوح هذه التطبيقات من أنظمة الإشراف على الرعاية الصحية صغيرة الحجم إلى مراقبة البيئة على نطاق واسع. وبالتالي، فإن أي نشر WSN له لتلبية مجموعة من المتطلبات التي تختلف من تطبيق إلى آخر. ونتيجة لذلك، فإن تقنيات توفير الطاقة عادةً ما تقوم بمقايضة زيادة مدة

حياة الشبكة مع أهداف التحسين الأخرى. تتمثل إشكالية البحث في إيجاد حلول لهذه التحديات، وذلك من أجل تطوير تقنيات جديدة وتحسينات يمكن استخدامها لتحسين أداء WSN.

4.1 هدف البحث Research Aim

يهدف هذا البحث إلى تحسين مدة حياة WSNs وما يرتبط به من تحسين في التغطية وتحسين أداء الشبكة وذلك باستخدام خوارزمية تآزريه بين FA وDE والذي ينعكس على تحسين إدارة موارد الشبكة وتحسين أدائها بما يخدم التطبيق المصممة من أجله.

5.1 أهمية البحث Research Significance

تزداد الحاجة الى التحكم في الطاقة للاستفادة من الموارد المحدودة وبالتالي إطالة مدة حياة الشبكة. ولتحقيق ذلك، يجب أن تؤخذ كفاءة الطاقة بعين الاعتبار في كل خطوة من خطوات تصميم الشبكة، ولا تعمل فقط على التواصل بين العقد ولكن أيضاً على الشبكة ككل. يعد الحفاظ على الطاقة وإدارتها الضامنين الأساسيين لأداء الشبكة، والذي يتضمن التأخير والإنتاجية.

تعد دراسة وبحث الأساليب والخوارزميات لتحسين كفاءة الطاقة وتعزيز التغطية في شبكات الحساسات اللاسلكية أمراً بالغ الأهمية لعدة أسباب:

1. إطالة مدة حياة الشبكة: يمكن أن يؤدي تعزيز كفاءة الطاقة من خلال الخوارزميات المحسنة إلى إطالة زمن تشغيل شبكات الحساسات اللاسلكية بشكل كبير، مما يضمن مدة حياة أطول للشبكة دون الحاجة إلى استبدال البطاريات بشكل متكرر أو إعادة الشحن.

2. تعزيز التغطية: من خلال تطوير الخوارزميات التي تعمل على تحسين التغطية في شبكات الحساسات اللاسلكية، يتم تعزيز القدرة على مراقبة وجمع البيانات من مختلف المجالات، مما يؤدي إلى تطبيقات أكثر فعالية في مجالات مثل المراقبة البيئية، وإدارة الكوارث، والرعاية الصحية.

3. تحسين استهلاك الطاقة: يمكن أن تساعد الخوارزميات الفعالة في تقليل استهلاك الطاقة، خاصة في أجهزة الاستشعار التي تعمل بالبطارية، وهو أمر حيوي للحفاظ على وظائف الشبكة وتقليل التأثير البيئي لاستبدال البطاريات بشكل متكرر.

4. تنوع التطبيقات: تتيح الخوارزميات الموفرة للطاقة نشر شبكات الحساسات اللاسلكية في تطبيقات متنوعة مثل الزراعة الذكية ومراقبة الرعاية الصحية والتحكم في العمليات الصناعية، مما يؤدي إلى توسيع نطاق هذه الشبكات وفوائدها.

يعد البحث وتطوير الأساليب والخوارزميات الموفرة للطاقة لشبكات الحساسات اللاسلكية أمراً ضرورياً لتحسين أداء الشبكة واستدامتها وتعدد استخداماتها عبر التطبيقات المختلفة.

6.1 مسوغات البحث Research Justification

يستند البحث في مجال تحسين أداء WSN من خلال تحسين توفير الطاقة وتخفيض ثقوب التغطية إلى:

1- الحاجة إلى تحسين أداء شبكات الحسّاسات اللاسلكية: تواجه WSN العديد من التحديات التي تؤثر على أدائها من طرائق التوجيه وأليات توفير الطاقة.

2- الإمكانيات التي توفرها خوارزميات التوجيه للشبكات WSN من زيادة مدة حياة الشبكة ويمكنها تحسين أدائها في العديد من المجالات مثل الموثوقية والمردود وأمن المعلومات.

3- التطبيقات المحتملة لتحسين أداء WSN: يمكن أن يؤدي تحسين أداء WSN إلى تحسين جودة مجموعة واسعة من التطبيقات، مثل مراقبة البيئة والمراقبة الصحية والتحكم في الآلات وتطبيقات إنترنت الأشياء.

4- الآثار الإيجابية المحتملة لتحسين أداء WSN: يمكن أن يكون لتحسين أداء WSN آثار إيجابية على العديد من التطبيقات، مما يساهم في تحقيق التنمية الاجتماعية والاقتصادية.

بناءً على ما سبق، يمكن القول إن البحث في مجال تحسين أداء WSN اعتماداً على استخدام خوارزمية تعاونية بين FA وDE هو مجال مهم وذو صلة بالعديد من التطبيقات العملية.

7.1 محددات البحث Research Delimitations

يمكن صياغة محددات البحث على النحو الآتي:

الأداء المطلوب تحسينه: يمكن أن يشمل الأداء المطلوب تحسينه في WSN مدة حياة الشبكة وما يرتبط به من تحسين في التغطية وأداء الشبكة

المحددات المتعلقة بفرضيات البحث: تستند فرضيات البحث إلى مجموعة من المسلمات، والتي تستند بدورها إلى مجموعة من الأبحاث السابقة التي أجريت في مجال تحسين مدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية. ومع ذلك، هناك بعض التحديات التي قد تؤثر على صحة هذه الفرضيات مثل:

- عدم كفاية المعطيات: قد تكون المعطيات المتاحة للبحث غير كافية لاختبار صحة فرضيات البحث.
- العوامل الخارجية: قد تتأثر النتائج التي تم الحصول عليها من البحث بعوامل خارجية، مثل التغييرات في البيئة المحيطة بشبكة الحسّاسات اللاسلكية في التطبيقات العملية.

8.1 حدود البحث Research Limitations

يمكن تحديد حدود البحث على النحو الآتي:

- الحد المكاني: جرى تنفيذ هذا البحث في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.
- الحد الزماني: استغرق تنفيذ هذا البحث مدة ثلاثة أعوام ميلادية.
- الحد التقاني: باستخدام حاسب بخصائص التالية:

(Intel® Core™ i7-6500U)، رام 8 غيغا ويعمل بنظام النوافذ ويندوز 10.

- الحد العلمي: يندرج البحث في مجال العلوم الهندسية ضمن مجال الشبكات اللاسلكيةً، مع التركيز على اقتراح خوارزميّة تآزريه بين FA وDE، ودراسة أداء هذه الخوارزميّة المقترحة في تحسين أداء الشبكة من حيث فاعلية الطاقة والتغطية.

9.1 منهج البحث وأدواته Research Methodology and Tools

سنعتمد في هذا البحث على المنهج التحليلي للحصول على نظام اختيار رؤوس العناقيد في WSN بالإضافة إلى المناهج الاستقرائية التجريبية لتقييم أداء هذا النموذج والتأكد من صلاحيته.

سنقوم في هذا البحث بإجراء نمذجة لمنظومة شبكة حسّاسات لاسلكية، وإجراء عملية تراسل للمعطيات بين العقد والمحطة الرئيسة لدراسة أثر الخوارزمية المستنتجة على مدة حياة الشبكة وتخفيض ثقوب التغطية.

10.1 بنية الأطروحة Thesis Structure

نقترح حلولاً جديدة لتحسين كفاءة استخدام الطاقة لـ WSN في هذه الأطروحة، مع الأخذ في الحسبان متطلبات التطبيقات، تتكون الأطروحة من ثلاثة فصول نستعرضها كالتالي:

قدم الفصل الأول **الإطار العام للبحث General Framework of the Research**، مقدّمة عن البحث وبعض الدراسات السابقة المتعلّقة به ومشكلته والهدف منه، إضافةً إلى أهمية ومسوّغات ومحددات وحدود ومنهج البحث وأدواته، وكذلك توضيح بنية هذه الأطروحة.

يتناول الفصل الثاني **الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث Theoretical Basis Related to the Research**، دراسة نظرية ومرجعية WSNs نبدأ بمراجعة شاملة للآليات الحالية الموفرة للطاقة والمصممة لـ WSN. تقوم هذه الدراسة بمسح مجموعات تطبيقات WSN المختلفة ومتطلباتها المحددة، وتحلل التفاضلات بين متطلبات التطبيق وزيادة مدة حياة الشبكة التي تنشأ عند تصميم WSN. هذه مقدمة شاملة لتحدي الطاقة الذي تواجهه WSN.

يعرض الفصل الثالث **التنفيذ العملي والنتائج Implementation and Results**، برنامج النمذجة المستخدم ومواصفات بيئة الاختبار ودراسة خوارزميات العمل (DE-FA) والطرائق المقترحة للتقليل من مشكلة استهلاك الطاقة وزيادة مدة حياة الشبكة وتخفيض ثقوب التغطية وتحسين أداء الشبكة بشكل عام نختتم هذه الأطروحة من خلال تقديم ملخص لمساهمة الأطروحة، ومناقشة الآفاق المستقبلية.

الفصل الثاني

الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث

Theoretical Basis Related to the Research

استعرض الفصل الإطار العام للبحث وبنية الأطروحة ويستعرض الفصل الثاني الأساسيات النظرية المرتبطة بالبحث Theoretical Basis Related to the Research، لشبكات الحسّاسات اللاسلكية WSNs وبنيتها العامّة.

1.2 مقدمة Introduction

هناك الكثير من الأبحاث المتعلقة بتوفير الطاقة في WSN حيث تم اقتراح العديد من الطرائق في السنوات القليلة الماضية، ولا يزال هناك الكثير من الأبحاث الجارية حول كيفية تحسين استخدام الطاقة في شبكات الحساسات ذات الطاقة المحدودة. ومع ذلك، لا يمكن تطبيق كل الحلول المقترحة. يعتبر نوع التطبيق هو المحدد لكيفية التحسين. على سبيل المثال، إذا كانت تطبيقات السلامة تتطلب استجابة سريعة وفي الوقت المناسب، فهذا ليس ضروري بالنسبة للتطبيقات الأخرى، كما هو الحال في الزراعة حيث لا تكون خاصية التأخير بنفس الأهمية. ينبغي معالجة مشاكل توفير الطاقة في WSN من خلال الأخذ في الاعتبار متطلبات التطبيق بطريقة أكثر منهجية.

قدم في [Yick *et al.,* 2008] مسح عام لـ WSN. تستعرض هذه الدراسة منصات التحسس وأنظمة التشغيل، وقضايا خدمات الشبكة وتحديات بروتوكول الاتصالات، لكنها لا تتناول قضايا الطاقة. قيّم في [G. Anastasi *et al.*, 2009]. تصنيف لخطط الحفاظ على الطاقة. يركز المؤلفون بشكل أساسي على دورة العمل وتقليل كمية البيانات. توجد أيضاً العديد من الدراسات الاستقصائية الخاصة بالتقنيات والتي تركز على آلية واحدة فقط لكفاءة استخدام الطاقة (مثل بروتوكولات التوجيه الموفرة للطاقة، وتقنيات تجميع البيانات، وأساليب تحصيل وتجميع الطاقة في [R. Rajagopalan *et al.*, 2006, K. Akkaya *et al.*, 2005, S. Sudevalayam *et al.*, 2011]) نظراً لأن كل فئة من الحلول تمثل مجالاً بحثياً كاملاً في حد ذاته.

يُقدم تصنيفاً جديداً لآليات كفاءة استخدام الطاقة في هذا الفصل ويولي اهتماماً خاصاً لتصميم شبكات الحساسات الموفرة للطاقة والتي تلبي متطلبات التطبيق. تم التركيز على التفاضلات بين تلبية المواصفات ومدة حياة الشبكة والاستدامة التي تنشأ بالضرورة عند تصميم WSN، ونناقش أيضاً الآليات التي تمكن من تحقيق مقايضة مرضية بين المتطلبات المتعددة.

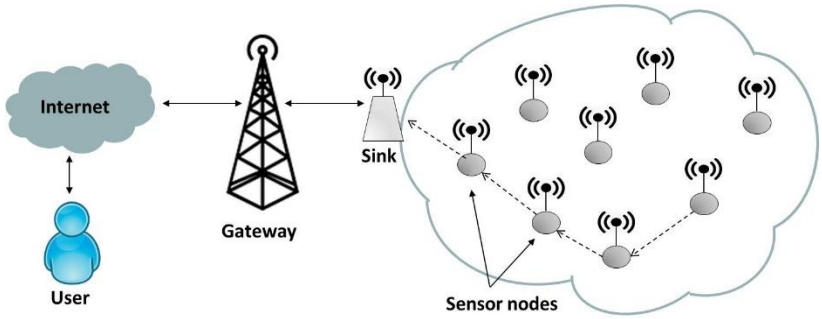
يتم تنظيم هذا الفصل على النحو التالي. نقدم بعض المعلومات الأساسية عن WSN في القسم التالي، بعد ذلك، نقدم الفئات الرئيسية للتطبيقات التي حددناها ومتطلبات كل منها. بعد ذلك، نناقش

المعايير الحالية لـ WSN منخفضة الطاقة ونوضح أن المعايير الحالية لا يمكنها الاستجابة لجميع احتياجات التطبيقات. قَدّم في هذا القسم لمحة عامة عن التغطية وعن آليات توفير الطاقة ومقدمة عن بروتوكول التسلسل الهرمي للتجميع التكيفي منخفض الطاقة ومقدمة عن الخوارزميات الاستدلال الفوقي واستخدامها في شبكات الحساسات اللاسلكية ومقدمة عن خوارزمية اليراع وخوارزمية التطور التفاضلي.

2.2 نظرة عامة على شبكات الحساسات اللاسلكية

تتكون WSN من عقد (تحسس) استشعار فردية، منتشرة في منطقة معينة وتقوم بشكل تعاوني بجمع البيانات وحملها إلى كيان رئيسي من أجل مراقبة الظروف المادية أو البيئية. ويمكن توصيل الكيان الرئيسي، الذي يُشار إليه أيضاً بالمحطة القاعدية، بالبنية التحتية أو بالإنترنت من خلال بوابة، مما يسمح للمستخدمين عن بعد بالوصول إلى البيانات المجمعة. تكمن الميزة الرئيسية لـ WSN في إمكانية نشر الكثير من الوحدات المستقلة الصغيرة كم يظهر في الشكل 2–1.

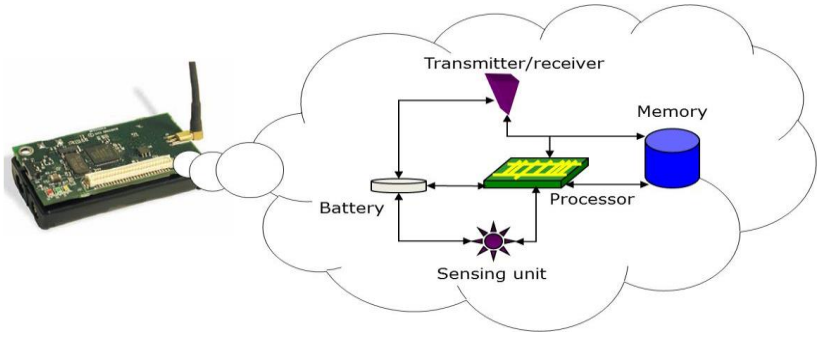
تقوم الوحدات بعد النشر بجمع المعلومات من الوسط المحيط، ووفقاً لبروتوكول اتصال محدد، فإنها تتعاون لتوصيل البيانات نحو المحطة القاعدية من خلال اتصالات أحادية القفزة أو متعددة القفزات.



الشكل 2–1. بنية شبكة WSN بسيطة [I Daanoune,2020]

يوضح الشكل 2–2 بنية عامة لعقدة التحسس. تتكون العقد بشكل أساسي من أجهزة التحسس وتخزين البيانات ومعالجتها. يتم استخدام الراديو بشكل أكثر تحديداً، للتواصل عبر الروابط اللاسلكية مع العقد الأخرى والمحطة القاعدية، بينما تقوم وحدة التحسس بقياس المعلمات الخارجية (مثل درجة الحرارة والتسارع ومستوى الضجيج). قد تكون العقد مجهزة بعناصر إضافية مثل نظام تحديد الموقع، أو مكونات

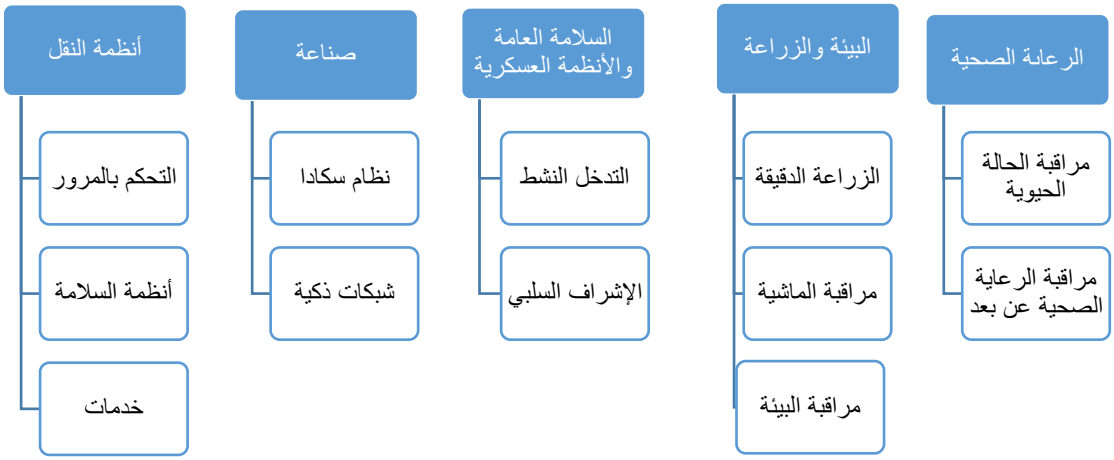
تجميع الطاقة، أو المحركات. يجب أن تظل تكلفة العقد منخفضة لتقليل التكلفة الإجمالية للشبكة، ويجب إيجاد مقايضة جيدة بين مقدار الميزات التي توفرها العقد وتكلفتها.



الشكل 2–2. بنية عقدة التحسس [K Chen,2017].

3.2 تطبيقات شبكات الحساسات اللاسلكية ومتطلباتها WSN applications and their requirements

نقترح في هذا القسم، تصنيفاً لتطبيقات WSN، الواردة في الشكل 2–3



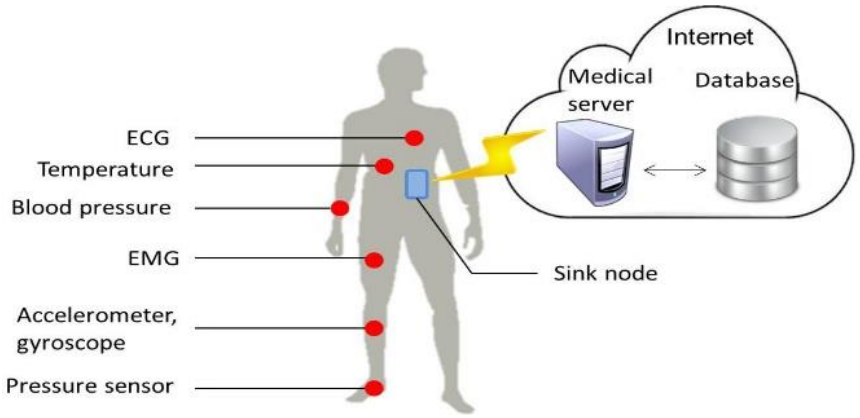
الشكل 2–3. تصنيف تطبيقات WSN [D Numan,2019].

1.3.2 الرعاية الصحية Healthcare

حظيت WSN المستخدمة في أنظمة الرعاية الصحية باهتمام كبير من مجتمع البحث، وتم دراسة التطبيقات المقابلة لها في [H. Alemdar, 2010, J. Ko, 2010, A. Hadjidj, 2013]. تم تحديد نوعين من الأنظمة الموجهة للرعاية الصحية، وهما مراقبة الحالة الحيوية ومراقبة الرعاية الصحية عن بعد. يرتدي المرضى في تطبيقات مراقبة الحالة الحيوية، عقد تحسس تشرف على المعلمات الحيوية الخاصة بهم من

أجل تحديد حالات الطوارئ والسماح لمقدمي الرعاية بالاستجابة بفعالية. وتشمل التطبيقات مراقبة الكوارث ذات الإصابات الجماعية في [T. Gao *et al.*, 2008]، ومراقبة العلامات الحيوية في المستشفيات في [R. Fensli *et al.*,2005]، والكشف عن السقوط المفاجئ أو نوبة الصرع [J. Chen *et al.*,2005].

تتعلق مراقبة الرعاية الصحية عن بعد بخدمات الرعاية غير الحيوية وليس من الضروري التواجد المستمر لأخصائي الرعاية الصحية فيها. على سبيل المثال، يمكن استخدام مستشعرات الجسم لجمع المعلومات ذات الصلة سريرياً للإشراف على إعادة التأهيل كما هو موضح في الشكل 2–4، في [A. Hadjidj *et al.*, 2011]، ومراقبة كبار السن [W. Chang *et al.*, 2011] أو لتقديم الدعم لشخص معاق جسدياً في [H. Ren, *et al.*,2006]. يجب أن تستوفي WSN المستخدمة في الرعاية الصحية العديد من المتطلبات. يتعين تقليل التأخير الشديد في تسليم البيانات في الوقت الفعلي، والسرية والتحكم في الوصول. ويجب على هذه الحساسات دعم التنقل وتوفير جودة الخدمة. يعتبر العمل في الوقت الحقيقي في سياق مبكر والكشف عن حالات الطوارئ مثل النوبات القلبية والسقوط المفاجئ، العامل الحاسم. في هذه الحالة، يجب أن يتم تحديد الموقف واتخاذ القرار في أسرع وقت ممكن لإنقاذ حياة الشخص.



الشكل 2–4. رسم توضيحي لشبكة مستشعرات الجسم[K Chen,2017]

ولذلك، يجب أن يكون تأخير تسليم البيانات بين العقد والمستخدم النهائي قليل من أجل تلبية المتطلبات الصعبة في الوقت الحقيقي. ومن الضروري أيضا أن تدعم شبكات الرعاية الصحية إمكانية تنقل العقد لضمان استمرارية الخدمة عندما يتحرك كل من المرضى ومقدمي الرعاية. تعتبر بيانات الرعاية الصحية المتبادلة حساسة ويجب الحفاظ على خصوصية المعلومات الطبية من خلال تقييد الوصول إليها على الأشخاص المصرح لهم بذلك. وبالتالي يتطلب إنشاء آليات لحماية البيانات والتحقق من هوية المستخدم

تحقيق السرية والتحكم في الوصول عبر شبكة الاتصالات. تتقاسم البيانات الهامة عرض المجال الترددي مثل أجهزة الإنذار مع بيانات أقل حساسية مثل درجة حرارة الغرفة عندما يتم دمج WSN في نظام معلومات المستشفى، ولذلك، يعتبر تحديد أولويات حركة المرور أمر ضروري لتلبية متطلبات التأخير الصارمة من خلال توفير جودة الخدمة.

2.3.2 الصناعة: التصنيع والشبكات الذكية Industry: manufacturing and Smart Grids

تعد أتمتة أنظمة المراقبة والتحكم هدفاً مهماً للعديد من شركات المرافق في مجالات التصنيع ومعالجة المياه وتوزيع الطاقة الكهربائية وتكرير النفط والغاز. تم العمل على دمج WSNS في أنظمة التحكم الإشرافي والحصول على البيانات (Supervisory Control and Data Acquisition SCADA) والشبكات الذكية. تشير أنظمة SCADA إلى أنظمة الحاسب التي تقوم بمراقبة العمليات الصناعية والتحكم فيها. يمكن استخدام أجهزة التحسس اللاسلكية، جنباً إلى جنب مع المحركات، لأتمتة المصنع، وإدارة المخزون، والكشف عن تسرب السوائل أو الغاز. تتطلب هذه التطبيقات إشرافاً دقيقاً على معلمات الصدمات والضجيج ودرجة الحرارة في الأماكن النائية أو التي يتعذر الوصول إليها مثل الخزانات أو المحركات التوربينية أو خطوط الأنابيب [G. Owojaiye, 2013, I. Stoianov, 2007]. تم تحديد الهدف من Smart Grids بمراقبة عملية إمداد الطاقة واستهلاكها بفضل إدارة نظام الطاقة الآلية والذكية. تطبيقات شبكات الحساسات في الشبكات الذكية هي: استشعار المعلمات ذات الصلة التي تؤثر على خرج الطاقة (الضغط، الرطوبة، اتجاه الرياح، الإشعاع، وما إلى ذلك) الكشف عن بعد للمكونات المعيبة التحكم في التوربينات والمحركات والكابلات تحت الأرض وإدارة الطاقة المنزلية في [W. Wang 2011, M. Erol-Kantarci, 2011]. تعتبر المتطلبات الرئيسية للتطبيقات الصناعية حدود التأخير والمتانة والأمن. يمكن أن تكون المنتجات التي يتم تداولها في الصناعة خطيرة للغاية وتتطلب رعاية خاصة في التخزين والتداول، كما في مصفاة النفط، بسبب تقلبها العالي وقابليتها للاشتعال، تتبخر المنتجات ذات نقاط الغليان المنخفضة بسهولة، وتشكل أبخرة قابلة للاشتعال. وبالتالي، فإن الضغط في الخزان أو درجة حرارة الفرن يمكن أن يصبح حرجاً بشكل سريع. ولهذا السبب يجب ضمان حدود صارمة على التأخير حيث يتيح الوقت بين اكتشاف الحالة الشاذة وتدخل المشغل لحل الحادث. تتعرض الشبكات في العديد من الصناعات لاضطرابات متنوعة مثل المكونات المعيبة وفشل العقد وانقطاع الاتصال والازدحام. وذلك لأن العقد تعمل في ظل ظروف قاسية، حيث تتعرض العقد

الموضوعة في خطوط الأنابيب أو الخزانات لضغط ودرجات حرارة عالية، أو اهتزازات مستمرة. لذلك، يجب أن تضمن تطبيقات الصناعة موثوقية البيانات في جميع الأوقات. ونظراً لحساسية البيانات، يجب أخذ التوافر والنزاهة والأصالة والسرية عند تصميم شبكة الاتصالات الصناعية.

3.3.2 أنظمة النقل Transportation systems

تم إجراء العديد من الدراسات المتعلقة بتكامل WSN وأنظمة النقل: تشمل مراقبة حركة المرور وأنظمة السلامة في الوقت الحقيقي التي تتقاسم عرض المجال الترددي مع الخدمات التجارية. يتم دمج أجهزة التحسس اللاسلكية في أنظمة مراقبة حركة المرور، على الطرق والتقاطعات من أجل جمع بيانات حركة المرور. يمكن حساب المركبات في طوابير الانتظار لضبط إشارات المرور أو عدد اماكن رسوم المرور والممرات المفتوحة في [C. Wenjie 2005, M. Tubaishat 2009]. يتم استخدام أجهزة التحسس اللاسلكية في أنظمة السلامة للتعامل مع مواقف مثل التوقف في حالات الطوارئ، وتجنب الاصطدام، والمساعدة على الدخول في المسار، والتحذيرات من ظروف القيادة الخطرة (موجات التوقف والانطلاق، والجليد على الطريق، وعبور الحيوانات) وفي [A. Pascale 2012, H. Qin 2010]. بالإضافة إلى تطبيقات سلامة الركاب، تتضمن إرشادات حول الطريق لتجنب الازدحام في أوقات الذروة في [K. Faez 2008]، رسوم المرور الذكية عالية السرعة، المساعدة في العثور على مكان لوقوف السيارات في [D. Tacconi *et al.*, 2010] وجمع إحصاءات رحلة السيارات في [J. Tavares *et al.,* 2008]. نظراً للخصائص الحيوية لتطبيقات النقل، يجب أن تضمنWSN المصممة في هذا المجال تأخيرات محددة في الوقت الفعلي والأمن وجودة الخدمة أثناء دعم إمكانية التنقل. يجب أن تضمن الأنظمة المتعلقة بسلامة القيادة تأخيرات مشددة من طرف الى طرف من أجل ضمان أوقات الاستجابة. وهذا يشكل التحدي الرئيسي لمثل هذه التطبيقات لأن حياة الناس في خطر. بالنسبة لتطبيقات مراقبة حركة المرور، تكون المعلومات في الوقت المناسب مطلوبة أيضاً لضمان الإدارة الفعالة لتدفق المركبات في الوقت الفعلي. ستتشارك أنظمة السلامة وتطبيقات الخدمة في أنظمة النقل الذكية (ITSs Intelligent transportation systems) المستقبلية، في نفس القناة اللاسلكية التي تتطلب أدوات لدمج تمايز الخدمة. وفي الواقع، ينبغي أن تحظى المعلومات الهامة والتحكم في حركة المرور بأولوية أعلى من الخدمات الأخرى. تتطور العقد في بيئة ديناميكية للغاية فإن الاتصالات بين المركبات وبين المركبات والبنية التحتية مقيدة بسرعة السيارة. وأخيراً، تثير الخصائص الحيوية لبعض

التطبيقات مشكلات أمنية في شبكة النقل، والتي قد تكون هدفاً لهجوم عبر الإنترنت. وبالتالي، يجب حماية الشبكة من الأختراقات ونعزيز أمن المعلومات بما يضمن حركة المرور أو ظروف الطريق. ويمكن للعقد دعم خوارزميات التشفير المعقدة لتوفير مستوى أعلى من الأمان.

4.3.2 السلامة العامة والأنظمة العسكرية Public safety and Military systems

يمكن لـ WSN أن تساعد في توقع وإدارة الأحداث غير المتوقعة، مثل الكوارث الطبيعية أو التهديدات التي من صنع الإنسان. يتم تصنيف تطبيقات السلامة العامة والتطبيقات العسكرية إلى التدخل النشط والإشراف السلبي. يشير التدخل النشط إلى الأنظمة ذات العقد المرتبطة بالوكلاء للنشر المؤقت تعتبر مخصصة لسلامة الأنشطة الموجهة نحو الفريق. أثناء العمل، يحمل كل عضو عقدة حتى يتمكن القائد البعيد من مراقبة الحالة والمعلمات البيئية. ينطبق هذا على فرق الإنقاذ في حالات الطوارئ، عمال المناجم والجنود في [N. Javaid, 2013]. يتم نشر العقد الثابتة مع الإشراف السلبي، في منطقة كبيرة مثل البنية التحتية المدنية أو الموقع النووي للمراقبة على المدى الطويل. ومن الأمثلة ذات الصلة لتطبيقات المراقبة السلبية المراقبة وتتبع الأهداف في [E. Cayirci, 2006]، الملاحة في حالات الطوارئ، الكشف عن الحرائق في المبنى، مراقبة سلامة الهيكل والوقاية من الكوارث الطبيعية كما هو الحال في حالة التسونامي أو الانفجارات أو الفيضانات في [F. Stajano, 2010, S. Kim, 2008]. تتميز تطبيقات السلامة العامة والتطبيقات العسكرية نظراً لطبيعتها الحرجة، بالحاجة إلى فترات تأخير قصيرة، وتمييز الخدمات، وتوفير سلامة البيانات. ويجب أن تدعم تطبيقات التدخل النشط التنقل، ويجب أن يضمن الإشراف السلبي التغطية. أولاً، هناك عامل حاسم يجب أخذه في الاعتبار عند تصميم نظام السلامة العامة وهو تأخير التسليم، كما هو الحال في تطبيقات الطوارئ، من الضروري الإبلاغ عن الإنذارات في الوقت المناسب. تتعامل أنظمة السلامة العامة والأنظمة العسكرية مع بيانات المراقبة اليومية وبيانات التحذير. وبالتالي، ينبغي إرسال إنذارات الكشف عن الحالات الشاذة في رزم ذات أولوية عالية على التقارير المنتظمة من خلال آلية فعالة لتمييز الخدمة. وأخيرا، يجب أن يضمن كلا النوعين من تطبيقات السلامة العامة سلامة البيانات: ففي التدخل النشط، يمكن أن تعرض البيانات الغير صحيحة العملاء للخطر من خلال تقديم معلومات كاذبة إلى المقر الرئيسي وفي الإشراف السلبي، يمكن لأي شخص سيئ النية التحايل على نظام المراقبة عن طريق إرسال بيانات كاذبة. تتميز تطبيقات التدخل النشط باستخدامها في الظروف البيئية القاسية من حفر

الأنفاق إلى ميدان الحريق. يجب أن تكون الشبكة مقاومة لفشل العقدة وسوء جودة الارتباط في هذه الظروف عن طريق نظام توجيه متسامح مع الأخطاء. تتطلب مراقبة البنية التحتية على المدى الطويل نشر عقد تحسس ثابتة من أجل الإشراف على المنطقة محل الاهتمام. لذلك، قد تواجه تطبيقات الإشراف السلبي مشكلات في التغطية عندما تكون مطلوبة للإشراف الكامل على مبنى أو نفق.

5.3.2 البيئة والزراعة Environment and agriculture

تعتبر WSN مناسبة بشكل خاص لتطبيقات المراقبة الزراعية والمساحات المفتوحة نظراً لأن النشر السلكي سيكون مكلفاً وغير فعال. وقد تم تطوير مجموعة متنوعة من التطبيقات في مجالات الزراعة الدقيقة ومراقبة الماشية والرصد البيئي. تنتشر العقد في الزراعة الدقيقة، في جميع أنحاء الحقل لمراقبة المعلمات ذات الصلة، مثل درجة الحرارة، ورطوبة التربة، وساعات ضوء الشمس، ورطوبة الأوراق، مما يؤدي إلى إنشاء نظام لدعم القرار. تحسين الموارد الغرض الآخر من الزراعة الدقيقة (المياه والأسمدة والمبيدات الحشرية) في [G. Vellidis, 2008]، الحماية من الصقيع، التنبؤ بتطور المرض في [J. Jiang 2008]. تكون المراقبة العامة للماشية في تطبيقات مراقبة الماشية مناسبة لمراقبة الحالة الصحية للماشية، والكشف عن تفشي الأمراض، وتحديد موقعها، والتحكم في جودة المنتج النهائي في [J. I. Huircán, 2010، K. H. Kwong, 2012]. تمت دراسة استخدام WSN لتطبيقات المراقبة البيئية المتنوعة لجرف السواحل، مراقبة جودة الهواء، مياه الشرب المأمونة ومكافحة التلوث في [K. Khedo, 2010]. وإن المتطلبات الرئيسية للتطبيقات البيئية والزراعية هي قابلية التوسع والتغطية وإطالة مدة حياة. ويمكن أن تصل مساحات الحقول الزراعية والمراعي والمواقع المراقبة إلى عدة عشرات من الهكتارات، لذا فإن عدد العقد المنتشرة يتراوح بين العشرات إلى الآلاف. تعتبر قابلية التوسع لهذا السبب مسألة اساسية عند تطوير البروتوكولات لدعم عدد كبير من العقد وضمان التغطية الكاملة للمنطقة الخاضعة للتحكم. أجرت العديد من التجارب الحقيقية في البيئات الطبيعية في [P. Corke, 2010] وأظهرت أن الظروف الخارجية يمكن أن تكون قاسية جداً وتؤثر على الاتصال. يمكن أن تؤدي أوراق الشجر أو المطر أو الرطوبة إلى انهيار الروابط بين العقد، مما يؤدي إلى اتصالات شديدة التباين وغير متوقعة. ولذلك يجب إعداد أنظمة توجيه متسامحة مع الأخطاء لضمان تغطية المنطقة والتعامل مع الفشل أو انقطاع الاتصال المؤقت. في معظم تطبيقات المراقبة البيئية، تكون العقد ثابتة حيث يتم نشرها على الأرض في الحقول أو في الغابات أو على طول ضفاف الأنهار، ويجب

أن تؤخذ في الاعتبار التنقل، سواء كان ذلك مرغوبا أم لا. يمكن أن يكون سبب الإزاحة غير المرغوب فيه بسبب الأمطار الغزيرة أو الرياح أو الحيوانات أو المحركات. عندما يكون التنقل مقصوداً، يتم تضمين العقد في المركبات كما في [J. Valente, 2011] أو حامل طبيعي متحرك كالحيوانات.

6.3.2 شبكات الحساسات تحت الأرض وتحت الماء Underground and underwater sensor networks

تعد شبكات الحساسات تحت الأرض وتحت الماء من الأنواع الناشئة منWSN، والتي تستخدم في فئات مختلفة من التطبيقات كالمراقبة البيئية والسلامة العامة والصناعة. وهي تختلف عن الشبكات الأرضية التقليدية حيث يتم نشر العقد في بيئات خاصة تجعل الاتصالات صعبة وتؤثر على سهولة نشرها. تتكون شبكات الحساسات تحت الأرض من عقد تحسس مدفونة وتتواصل من خلال مواد كثيفة مثل التربة أو الخرسانة. يمكن استخدام هذه الشبكات للإبلاغ عن رطوبة التربة في الزراعة كما في [V. Parameswaran, 2012]، والإشراف على البنية التحتية، كشف التسلل في [Z. Sun, 2011] وأنظمة النقل في [I. F. Akyildiz, 2006]. تعتمد شبكات التحسس تحت الماء على العقد المغمورة وتستخدم في مجموعة متنوعة من التطبيقات مثل مراقبة المحيطات في [O. Bondarenko, 2007]، ومراقبة جودة المياه في [D. Pinto, 2011]، الوقاية من الكوارث، والمراقبة في [I. F. Akyildiz, 2007] ومراقبة خطوط الأنابيب. تشترك شبكات الحساسات تحت الأرض وتحت الماء في متطلبات مشتركة مثل المتانة والتغطية. السمة الرئيسية لهذه الشبكات فقد الاتصالات بسبب الظروف البيئية القاسية. تعاني الاتصالات الصوتية للعقد تحت الماء والموجات الكهرومغناطيسية للعقد تحت الأرض من بطء سرعة الانتشار والضجيج وفقدان المسار، مما يؤدي إلى تدهور الإشارة. ولذلك، فإنها تتطلب تطوير بروتوكولات اتصال محددة لضمان موثوقية التطبيق.

الجدول 2–1.متطلبات تطبيقات WSN [K Chen,2017].

		قابلية التوسع	تغطية	تأخير RT	جودة الخدمة	حماية	إمكانية التنقل	المتانة
الرعاية الصحية	مراقبة الحالة الحيوية	– –	– –	+ +	+	+ +	+ +	+
	المراقبة عن بعد	– –	– –	+	+	+ +	+ +	–
الزراعة والبيئة	الزراعة الدقيقة	+ +	+ +	– –	– –	– –	– –	+
	مراقبة الماشية	+ +	–	–	– –	– –	+	–
	مراقبة البيئة	– –	– –	+	+	+ +	+ +	–
السلامة العامة & والأنظمة العسكرية	التدخل النشط	– –	– –	+ +	+	+ +	+ +	+ +
	الإشراف السلبي	– –	+	+ +	+	+ +	– –	–
مواصلات	التحكم بالمرور	– –	–	+ +	+ +	+ +	+ +	–
	نظام السلامة	– –	–	+ +	+ +	+ +	+	+
	خدمات	– –	– –	–	+	+	+	–
صناعة	أنظمة سكادا	– –	–	+ +	+	+ +	– –	+ +
	الشبكات الذكية	+	–	+ +	+	+ +	– –	+ +
– –								منخفض جدا
–								قليل
+								عالي
+ +								عالي جدا

تعد التغطية أيضاً مشكلة لأنه قد لا يكون من الممكن نشر العقد على النحو الأمثل بسبب شكل الأرض والتكاليف والجهود المطلوبة للحفر. إن هذه الشبكات هي بطبيعتها ثلاثية الأبعاد (مما يثير مشكلات إضافية) حيث يمكن نشر الأجهزة على أعماق متفاوتة اعتماداً على الظاهرة المراد مراقبتها. وإلى جانب هذه المتطلبات، فإن للطاقة أهمية كبيرة نظرا لصعوبة استخراج جهاز لاستبداله أو إعادة شحن بطاريته.

يمكن تلخيص متطلبات WSN الرئيسية التي حددناها في التطبيقات المختلفة مثل قابلية التوسع والتغطية وزمن الوصول وجودة الخدمة والأمن والتنقل والمتانة. في الجدول 2–1، نلخص أهمية هذه المتطلبات لكل فئة من التطبيقات التي تم النظر فيها في هذا القسم. تعمل العقد بشكل مستقل لفترة طويلة من الزمن، تتراوح من أسابيع إلى أشهر، وكل تطبيق مقيد من حيث الطاقة بسبب ندرة موارد بطارية العقد، مما يحد من مدة حياة الشبكة. قد لا يكون من الممكن دائماً تجديد النقاط يدوياً بسبب عددها أو تكلفة الصيانة أو عدم إمكانية الوصول إلى المناطق المراقبة. وهذا هو الحال بالنسبة لتطبيقات مراقبة الصحة الهيكلية، والزراعة الدقيقة ومراقبة البيئة، وأنظمة النقل. يمكن لبعض التطبيقات مثل تطبيقات الرعاية الصحية أن تتحمل استبدال البطارية، ولكننا نعتقد أن الاستنفاد السريع للبطارية يمنع اعتمادها على نطاق واسع. لا تزال الجهود تبذل لاقتراح حلول موفرة للطاقة لشبكات المحمولة على الجسم لتعزيز قبول هذه التقنيات من قبل المرضى. ولهذا السبب يتطلب تصميم WSN، في كلتا الحالتين، تطوير حلول موفرة للطاقة تلبي مجموعة محددة من المتطلبات.

4.2 تغطية شبكات الحساسات اللاسلكية Coverage of wireless sensor networks

تلعب التغطية في WSN دوراً حاسماً في تحديد كفاءة الشبكة وأدائها. فيما يلي النقاط الرئيسية فيما يتعلق بالتغطية وميزاتها وقيودها وتأثيرها على الشبكة:

1.4.2 مميزات التغطية

تؤثر التغطية بشكل مباشر على استهلاك طاقة العقد ومدة حياة الشبكة

– يتم تصنيف بروتوكولات التغطية المختلفة بناءً على تقنيات التغطية ونماذج الاستشعار واستهلاك الطاقة وتوطين العقد

– يمكن نشر العقد بشكل عشوائي أو منتظم بناءً على متطلبات التطبيق، مما يؤثر على كفاءة التغطية واستهلاك الطاقة.

2.4.2 حدود التغطية:

– يمكن أن تؤدي العقد الزائدة عن الحاجة إلى زيادة استهلاك الطاقة بسبب تصادم الرزم وإعادة الارسال أكثر من مرة والتأثير على كفاءة الاتصال.

– قد لا تكون نمذجة المنطقة محل الاهتمام كسطح ثنائي الأبعاد كافية لتطبيقات العالم الحقيقي التي تعمل في أوساط ثلاثية الأبعاد.

– تنشأ تحديات في تصميم استراتيجيات النشر الفعالة التي توازن بين التكلفة والحساب والاتصالات وتغطية المنطقة مع الحفاظ على الاتصال بالشبكة.

3.4.2 علاقة التغطية بحياة الشبكة وتسليم البيانات

تعد التغطية في WSN مسألة مهمة لضمان المراقبة الفعالة وتحسين استهلاك الطاقة والحفاظ على الاتصال بالشبكة. فهي تؤثر بشكل مباشر على مدة حياة الشبكة وكفاءة توصيل البيانات والأداء العام من خلال التأثير على استراتيجيات نشر العقد ومستويات التكرار وقدرات الكشف. وبالتالي تعتبر تغطية العقد أمراً بالغ الأهمية لمراقبة المنطقة بشكل فعال، واكتشاف عمليات الاختراق، وضمان طول مدة حياة الشبكة، تقيس تغطية المنطقة نسبة مساحة المنطقة التي تغطيها العقد إلى مساحة المنطقة الكلية، مما يؤثر على تخطيط الشبكة واستراتيجيات استهلاك الطاقة.

– تحدد تغطية العقدة مستوى تكرار نشر العقد، مما يؤثر على كفاءة الطاقة ومرونة الشبكة.

– تعمل إمكانية الكشف على تقييم قدرة الشبكة على اكتشاف الأجسام المتحركة داخل المنطقة المراقبة، وهو أمر ضروري لتطبيقات كشف التسلل.

وفقا لدراسة استقصائية، هناك ستة عوامل تصميم رئيسية في WSN. وهي نوع التغطية، وجدولة النشاط، ودرجة التغطية، والاتصال بالشبكة، وطريقة النشر [B. Wang, 2016]. وبناءً على ذلك، من الممكن تصنيف مشاكل التغطية في الشبكات اللاسلكية إلى ثلاث فئات فرعية، وهي تغطية المنطقة، وتغطية الهدف (المعروفة أيضاً بتغطية النقاط) وتغطية الحاجز. تم التعامل مع مشكلة تحسين تغطية المنطقة لأول مرة باستخدام طريقة ميدانية ، وكان الهدف هو زيادة التغطية الإجمالية للمنطقة لجميع عقد الاستشعار [Dinh *et al.*, 2015]. الخطوة الأساسية لهذه الخوارزمية هي أن عقد الاستشعار تدفع بعضها البعض بعيداً، وتنشر العقد بالتساوي في جميع أنحاء المجال. يتم تكرار هذه الخطوة حتى يتم تسجيل أي تحسين إضافي للتغطية الإجمالية للعقد، هذا النموذج مفيداً فقط من الناحية النظرية حيث تم وضع العديد من الافتراضات غير العملية.

اقترح [A. Reshi, 2015] نموذج أكثر واقعية لهذه المشكلة، وذلك عند مناقشة تحسين التغطية بمزيد من التفصيل، وهو تغطية المجال المحدد بالكامل بترتيب عقد استشعار منخفضة الكثافة. تم تقديم استراتيجيتين لتحديد الموضع تسمى وضع العقدة الحتمية ونشر العقدة العشوائية لحل المشكلة بدعم من التحليل الرياضي. تم اقتراح نموذج آخر لمشكلة تغطية المنطقة للبحث عن مواقع الموضع الأمثل لعدد محدد مسبقاً من عقد الاستشعار التي تنتج أكبر تغطية استشعار [Yourim and Yong-Huyk, 2013]. تمت إضافة قيد أكثر واقعية في هذا النموذج، بحيث تكون هناك نطاقات استشعار مختلفة في الشبكة، والتي تنبع من حقيقة أن أنظمة WSN عادة ما يتم توسيعها بنماذج جديدة وأكثر قوة من أجهزة الاستشعار التي تمتلك نطاقات استشعار/إرسال أطول وأقوى. مصطلح التغطية

يمكن تصنيف شبكة الاستشعار اللاسلكية بعدة طرائق وفقاً لأنواع العقد المعنية، أو استراتيجية النشر المتبعة، أو بنية الشبكة قيد النظر، أو قابلية التنقل المتضمنة في الشبكة، وما إلى ذلك. هناك طرائق عديدة لتصنيفها. عندما يتم أخذ نوع العقدة المعنية كمعايير تصنيف، يمكن تصنيف WSN على أنها شبكات استشعار لاسلكية ثابتة (أي Static-WSN)، وشبكة استشعار لاسلكية متنقلة (أي Mobile-WSN)، شبكات الحساسات اللاسلكية الهجينة (Hybrid-WSN)، وشبكات الحساسات اللاسلكية والروبوتات (أي WSRN) بناءً على ما إذا كان نوع العقد في الشبكات ثابتاً ومتحركاً وروبوتات ثابتة ومتحركة ومتنقلة، على التوالي. هنا، تتكون شبكات SWSN من العقد الثابتة فقط وهي شبكات الحساسات اللاسلكية التقليدية. تتضمن شبكات MWSN فقط العقد المتنقلة التي يمكنها تغيير موقعها مباشرة بعد النشر في مجال الاستشعار، تتكون شبكات HWSN من كلا النوعين من العقد –الثابتة والمتنقلة –وهي أكثر شيوعاً، وأخيراً، تتكون شبكات WSRN من روبوتات تُستخدم لنقل عقد الاستشعار من مكان إلى آخر بالترتيب لتلبية احتياجات التطبيق. في شبكات WSRN، تظل العقد التي أسقطتها الروبوتات المتنقلة ثابتة طوال المسار المتبقي من إجراءات الشبكة [Mei *et al.*, 2007]، ومع ذلك، فإن WSN العشوائية أكثر شيوعاً عند مقارنتها بشبكات WSN الحتمية. فيما يتعلق ببنيات الشبكة، يتم تصنيف WSN بشكل رئيسي على أنها ذات بنية شبكة مسطحة وبنية شبكة هرمية. في WSN ذات البنية المسطحة، تتمتع كل عقدة في الشبكة بإمكانية لعب أي دور، بينما في WSN الهرمية، يتم اختيار بعض العقد على غيرها لأداء عمليات الخدمة الأكثر كلفة مقارنة بالعقد الأخرى. يمكن أن يؤدي التنقل الذي لا يمكن التحكم فيه إلى إنشاء شبكة أكثر تعقيداً

للعمل معها، في حين يمكن التعامل مع التنقل الذي يمكن التحكم فيه كمزايا إضافية لتسهيل عمليات الشبكة.

يؤدي هذا المجال الواسع من التطبيقات إلى عدد من التحديات التصميمية والتشغيلية والإدارية في WSN. من بين التحديات التي تم طرحها، تعتبر التغطية قضية هامة للغاية تتطلب ملاحظة ومراقبة نقطة أو منطقة واحدة أو أكثر وفقاً لمتطلبات التطبيق. بالإضافة لذلك هناك العديد من الطرائق الأخرى لتصنيف شبكات الحساسات اللاسلكية، إحدى هذه الطرائق هي التغطية المتوقعة. تحاول جميع العقد بشكل تعاوني الحفاظ على التغطية المطلوبة. ومع ذلك، يؤثر نشر العقد على التغطية كثيراً. عندما يتم نشر العقد بشكل منتظم، يمكن تعيين العقد بسهولة لمراقبة مجال الاهتمام (Field of Interest (FoI ولكن يكون تحقيق التغطية المطلوبة أكثر تعقيداً في حالة النشر العشوائي. من وجهة نظر التغطية، يمكن تصنيف WSN على أنها مغطاة بـ 1 أو مغطاة بـ k اعتماداً على عدد عقد الاستشعار (واحدة أو أكثر) المستخدمة لتغطية المنطقة المقصودة (أي تغطية جزئية) أو منطقة الشبكة بأكملها.

إن التغطية وحدها لا تكفي للوفاء بمتطلبات التطبيق إذا لم تكن العقد قادرة على توصيل بياناتها إلى BS، أي أنه ليس فقط الحفاظ على التغطية مطلوباً، ولكن أيضاً صيانة الاتصال بالشبكة مطلوبة أيضاً لنجاح شبكة. فالتغطية والاتصال يكمل كل منهما الآخر بطريقة تجعل أحدهما بلا معنى في غياب الآخر. وبشكل أكثر توضيحاً، عندما تكون الشبكة مغطاة بالكامل ولكن العقد غير قادرة على الاتصال بالمحطة الأساسية، لأنها قد تفشل في تحديد أي مسار إلى BS، فإن عملية الشبكة الشاملة يتوقف. وبالمثل، إذا فقدت العقد التغطية في بعض المناطق المحددة، حتى في ظل وجود شبكة متصلة بالكامل، يُقال إن النظام يعمل جزئياً.

4.4.2 التسميات Nomenclature

يوجد حاجة لعدد من المفاهيم الأولية في التعامل مع التغطية والاتصال في سياق شبكات الحساسات اللاسلكية (المتنقلة) على النحو التالي.

العقد الثابتة Static Nodes: العقد القادرة على تنفيذ العمليات، أي. الاستشعار، الإرسال، الاستقبال، والمعالجة وما إلى ذلك، ولكنها غير قادرة على الانتقال من مكان إلى آخر تسمى العقد الثابتة.

- **العقد المتنقلة Mobile Nodes:** إلى جانب قدرات العقد الثابتة، تم تجهيز العقد المتنقلة أيضاً ببناء يسمح لها بالانتقال من مكان إلى آخر. تعتبر العقد المتنقلة هي العقد الهامة عند النظر في التغطية والاتصال حيث يمكن استخدامها لملء فجوات التغطية بسبب استهلاك طاقة البطارية لبعض العقد الموجودة في الشبكة.
- **التغطية k k-Coverage:** يقال إن نقطة أو منطقة في الشبكة مغطاة بـ k إذا كانت مغطاة بعدد k من عقد الاستشعار. تتمثل ميزة تغطية k في أن النقطة أو الجزء محل الاهتمام يظل تحت المراقبة حتى لو فشلت العقد (k-1) لأي سبب من الأسباب، كنفاد البطارية، حدوث عطل مفاجئ بسبب البيئة المحيطة، وما إلى ذلك.
- **تغطية كاملة :Full/Blanket Coverage** تتطلب التغطية الكاملة أو التغطية الشاملة أن تكون كل نقطة في مجال الاهتمام تحت المراقبة باستخدام عدد واحد أو أكثر من العقد.
- **التغطية المستهدفة** :**Target Coverage** وعلى عكس التغطية الكاملة أو الشاملة، فإن التغطية المستهدفة لا تتطلب سوى بضع نقاط (محددة) ليتم تغطيتها أو وضعها في الملاحظة. يتم تحقيق التغطية المستهدفة بشكل أساسي من خلال استخدام النشر الحتمي للعقد.
- **تغطية المسار/الحاجز** :**Path/Barrier Coverage** يتم التعامل مع تغطية المسار كحالة خاصة من تغطية الهدف حيث يتم وضع جميع النقاط (المهم) المراد مراقبتها على مسار محدد. التطبيق الأكثر ملاءمة لهذا النوع من التغطية هو كشف الدخلاء حيث يمكن اكتشاف الخروقات الأمنية بسهولة.
- **التغطية الساكنة** :**Static Coverage** التغطية الثابتة تتوافق مع العقد الثابتة المنتشرة بكثافة من أجل توفير تغطية شاملة في مجال الاهتمام. نظراً لأن العقد ثابتة ولا يمكن أن تتحرك، فإن أي فشل في العقدة قد يؤدي إلى فجوة في التغطية إذا كانت الشبكة مغطاة بنقطة واحدة فقط (أي مغطاة بعقدة واحدة فقط).
- **التغطية الديناميكية** :**Dynamic Coverage** تسمى التغطية التي تحققها العقد المتنقلة بالتغطية الديناميكية. وبما أن العقد متحركة، فيمكن تحفيزها بسهولة لملء فجوات التغطية بسبب فشل أي عقدة. ويمكن استخدامها أيضاً لتحسين التغطية الشاملة للشبكة وكفاءة الشبكة من خلال توفير موضع العقد في الأماكن المناسبة.

- **درجة التغطية** :**Coverage Degree** تشير درجة التغطية إلى عدد العقد التي تراقب النقطة (المهمة) أو الكائن أو المنطقة يُقال إن النقطة/الجسم/المنطقة مغطاة بالدرجة k، إذا كان عدد k من أجهزة الاستشعار يراقب ذلك باستمرار.
- **زمن التقارب** :**Convergence Time** يشير وقت التقارب إلى الوقت الذي تستغرقه الشبكة في الاستقرار والأداء من خلال اتباع بعض خوارزميات التنظيم الذاتي (Li *et al.,* 2009).
- **نشر التغطية** :**Coverage Deployment** ويشير نشر التغطية إلى الحد الأدنى من عدد العقد التي سيتم نشرها في مجال الاستشعار بطريقة تلبي متطلبات التطبيق، وخاصة في تحقيق درجة التغطية المتوقعة.
- **مجال الاستشعار** -**Sensing Range** يمثل مجال الاستشعار المنطقة التي يمكن استشعارها بواسطة عقدة الاستشعار. يشار إليه بـ S_R.
- **مجال الاتصالات** **Communication Range** يمثل مجال الاتصال المنطقة التي يمكن للعقدة الإرسال إليها. يتم الإشارة إليه بواسطة C_R

5.2 نموذج الاستشعار Sensing Model

تتكون شبكة الاستشعار اللاسلكية من عدد من العقد، كل منها قادرة على الاستشعار والمعالجة والإرسال والاستقبال بسبب الوحدات الوظيفية المعنية. تتكون الشبكة من عدد n من العقد مثل $s_1, s_2, s_3, \dots \dots, s_n$

في ضوء تمثيل WSN باستخدام نظرية الرسم البياني وE هي مجموعة الحواف التي تمثل الروابط بين زوج من العقد على النحو التالي:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots \dots, s_n \quad s_i \in S\} \qquad (1-2)$$

$$E = \{(s_i, s_j) \in S \times S | d(s_i, s_j) \leq R_c \;\; s_i, s_j \in S \,, i \neq j\} \qquad (2-2)$$

هنا $d(s_i, s_j)$ هي المسافة الإقليدية بين المستشعرين s_i و s_j .يتم نشر المستشعر s_i عند نقطة $p(x_i, y_i)$ ، R_c هي نصف قطر تغطية العقدة، ثم يتم الإشارة إلى المسافة الإقليدية لهذه العقدة s_i من النقط$p(x, y)$ بواسطة $d(s_i, P)$ على النحو التالي:

$$d(s_i, P) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \qquad (3-2)$$

هناك نموذجان للاستشعار لتقييم شبكة الاستشعار اللاسلكية: نموذج استشعار القرص ونموذج الاستشعار غير المنتظم.

1.5.2. نموذج استشعار القرص Disc Sensing Model

يعتمد نموذج استشعار القرص على الملاحظة الفيزيائية البسيطة التي يتم فيها تمثيل الاستشعار كحدث اكتشاف وذلك إذا وجد أن الجسم موجود في نطاق الاستشعار للعقدة على النحو التالي:

$$p(s_i, P) = \begin{cases} 1 & d(s_i, P) \leq R_s \\ 0 & d(s_i, P) > R_s \end{cases} \qquad (4-2)$$

$p(s_i, P)$ هو احتمال استشعار الجسم عند النقطة P بواسطة s_i

يُعرف النموذج كونه نموذجاً منطقياً باسم نموذج استشعار القرص.

2.5.2. نموذج الاستشعار غير المنتظم Irregular Sensing Model

يعد نموذج استشعار القرص مثالياً جداً ولا يأخذ في الاعتبار العوامل البيئية، أي العوائق وما إلى ذلك، أثناء صياغة مشكلة الاستشعار. ولذلك، فقد ظهر إلى الوجود نموذج استشعار أكثر واقعية يُعرف باسم نموذج الاستشعار غير المنتظم، والذي يأخذ في الاعتبار جميع هذه العوامل، مثل العوائق البيئية، والظروف الجوية، وما إلى ذلك، التي تؤثر على عملية الاستشعار الشاملة

6.2 تصنيف التغطية Coverage Classification

يتم تصنيف التغطية على نطاق واسع إما حسب درجتها أو على أساس المنطقة المغطاة. بناءً على عدد العقد المستخدمة في مجال الاهتمام، يُقال إن التغطية هي تغطية 1 أو تغطية k. إذا تمت تغطية حقل التغطية FoI بالكامل بواسطة عقدة واحدة فقط، يُقال إنها تحتوي على تغطية 1 بينما إذا كانت FoI تحتوي على عدد k من العقد لتغطية كل نقطة، فيُقال إنها تحتوي على تغطية k.

يمكن تصنيف التغطية استناداً إلى مقدار المساحة التي يتم تغطيتها في FoI (أي التغطية Θ)، على أنها تغطية كاملة وتغطية جزئية. يتم تعريف التغطية الكاملة على أن كل نقطة في FoI تكون تحت مراقبة عقدة واحدة على الأقل. تتطلب التغطية الجزئية تغطية جزء معين فقط من المنطقة. يمكن أن تكون التغطية الجزئية على ثلاثة أنواع: تغطية النقطة، وتغطية المسار، وتغطية المصيدة. هنا، تتطلب تغطية

النقطة فقط نقطة معينة ليتم تغطيتها بينما تشير تغطية المسار إلى تغطية مسار محدد مراد تغطيته. تضمن تغطية المصيدة اكتشاف أي جسم متحرك قبل أن يتحرك في اتجاه معروف مسبقاً. تنقسم تغطية النقاط أيضا إلى تغطية مركزة وتغطية مستهدفة بينما ينقسم المسار إلى تغطية اتجاهية وتغطية شاملة. سيتم مناقشة كل نوع من الأنواع المذكورة أعلاه بمزيد من التفصيل على النحو التالي.

- **التغطية Θ** :**Θ-Coverage** كما هو موضح أعلاه، تتطلب التغطية Θ نسبة مئوية معينة من مجال الاهتمام الذي تغطيه عقد الاستشعار المنتشرة. Θ يمكن العثور عليها بين [0، 1]. في حال Θ≥0، ولكن عند Θ<1، يقال إنها مغطاة جزئياً، وعندما Θ = 1، يقال إن التغطية هي تغطية كاملة.
- **تغطية كاملة :Full Coverage** كما ذكرنا سابقاً، تتطلب التغطية الكاملة المعروفة أيضا باسم التغطية الشاملة وضع كل نقطة في مجال الاهتمام (FoI) Field of interest تحت المراقبة باستخدام 1 أو أكثر من عدد العقد. وبطريقة أخرى، يمكن تعريف التغطية الكاملة بأنها التغطية التي يتم فيها تغطية كل نقطة باستخدام عقدة واحدة على الأقل.
- **تغطية جزئية :Partial Coverage** التغطية الجزئية هي أحد أشكال التغطية Θ التي لا تتطلب تغطية منطقة الاستشعار بأكملها ولكن جزءاً محدداً فقط. ولا يتطلب الرصد البيئي التغطية إلا بدرجة معينة. وبشكل أكثر توضيحاً، يُقال إن منطقة النشر أو الاستشعار أو مجال الاهتمام تكون مغطاة بـ Θ.
- **تغطية النقطة Point Coverage:** تتطلب تغطية النقاط نقطة معينة فقط لتغطيها العقدة.
- **التغطية المركزة Focused Coverage** تتطلب التغطية المركزة مراقبة المنطقة القريبة من نقطة الاهتمام بأولوية أعلى من تلك الخاصة بالمنطقة البعيدة عن نقطة الاهتمام.
- **تغطية المسار Path Coverage:** تتطلب تغطية المسار مجموعة من النقاط المراد مراقبتها والتي تتم محاذاتها على طول المسار الذي يعبر عن عرض منطقة النشر. يمكن أيضاً تصنيف تغطية المسار إما على أنها تغطية اتجاهية أو تغطية مسح.
- **التغطية الاتجاهية Directional Coverage:** تهدف التغطية الاتجاهية إلى كشف حالة الاقتحام بين الحدين اللذين يحاول المتعدي الاختراق من خلالهما. يكتشف الاختراق عبر الحدود الأولى قبل اختراق الحدود الثانية [Bai *et al.,* 2009].

- البديل التالي للتغطية الاتجاهية هو **تغطية الحاجز barrier coverage** الذي يكتشف حالة التسلل بغض النظر عن اتجاه الاختراق. يمكن أن تكون تغطية الحاجز قوية أو ضعيفة. تضمن تغطية الحاجز القوية اكتشاف المتسللين مهما كان المسار الذي يختارونه، في حين تحدد تغطية الحاجز الضعيف التعدي على ممتلكات الغير.
- **تغطية الاجتياح Sweep Coverage:** تغطية الاجتياح هي نوع آخر من تغطية المسار حيث تتم مراقبة مجموعة من النقاط (ذات الأهمية) بشكل دوري بدلاً من المراقبة المستمرة.
- **تغطية الاعتراض Trap Coverage** قد يؤدي النشر غير الخاضع للرقابة (النشر العشوائي) للشبكة إلى عدد من ثغرات التغطية، أي المناطق غير المغطاة في الشبكة.

تلعب التغطية في WSN دورا حاسما في تحديد كفاءة الشبكة وأدائها. فيما يلي النقاط الرئيسية فيما يتعلق بالتغطية وميزاتها وقيودها وتأثيرها على الشبكة:

تعد التغطية في WSN أمراً ضرورياً لضمان المراقبة الفعالة وتحسين استهلاك الطاقة والحفاظ على الاتصال بالشبكة. فهو يؤثر بشكل مباشر على مدة حياة الشبكة وكفاءة توصيل البيانات والأداء العام من خلال التأثير على استراتيجيات نشر العقد وقدرات الكشف.

7.2 استهلاك الطاقة Energy consumption

تعتبر المصادر الرئيسية لاستهلاك الطاقة في العقد هي مهام الاتصالات، تليها عمليات الحساب والتحسس. على الرغم من أن شبكات التحسس المختلفة سيكون لها ملف تعريف مختلف لاستهلاك الطاقة في [G. Anastasi *et al,* 2009]:

- يكون استهلاك الطاقة الراديوية بمقدار كبير في حالات الاستقبال والإرسال، بينما ينخفض استهلاك الطاقة بنسبة كبيرة في حالة السكون. ولذلك، ينبغي إيقاف تشغيل وحدة الراديو كلما أمكن ذلك.
- اعتماداً على التطبيق المحدد، قد يكون النظام الفرعي للاستشعار مصدراً مهماً آخر لاستهلاك الطاقة، لذلك يجب تقليل استهلاكه للطاقة أيضاً. يتحقق ملف تعريف استهلاك الطاقة لمنصة مستشعر من النوع TelosB، الممثل في الجدول 2–2، من هذه الملاحظات. تعد وحدة الراديو هي

العنصر الأكثر استهلاكاً للطاقة، ويكون استهلاك طاقة الراديو في وضع السكون أقل بحوالي عشر مرات منه عندما يتلقى الراديو البيانات.

- ووفقا لهذه النتيجة، فإن TelosB يمكن أن يستمر لمدة 95 ساعة مع دورة عمل بنسبة 100% (راديو قيد التشغيل دائماً، بدون اتصال)، و200 ساعة مع دورة عمل بنسبة 25%

الجدول 2–2. ملف تعريف استهلاك الطاقة لعقدة تحسس TelosB [K Chen,2017]

وحدة	وضع	التيار المقاس [mA]
راديو	استقبال	22.8
راديو	الإرسال	21.7
راديو	الإرسال	12.1
راديو	خامل	2.4
متحكم	وحدة المعالجة المركزية نشطة	2.33
متحكم	وحدة المعالجة المركزية خاملة	2.25
فلاش داخلي	يكتب	1.34- 0.9
فلاش داخلي	يقرأ	0.68

1.7.2. تعريفات مدة الحياة وكفاءة الطاقة Lifetime and energy-efficiency definitions

نقدم تعريفات لمدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية وكفاءة الطاقة في هذا القسم، حيث يتم استخدام هذين المصطلحين في كامل الأطروحة.

توجد تعريفات عديدة كما هو مفصل من قبل [I. Dietrich et al, 2009]، لمدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية، اعتماداً على ما إذا كنا نأخذ في الاعتبار عدد العقد الحية، أو تغطية المنطقة محل الاهتمام، أو الاتصال بين العقد أو جودة خدمة التطبيق. ونتيجة لذلك، فإننا نعطي تعريفاً عاماً لمدة حياة WSN كالوقت المقضي حتى يتم التحقق من حالة معينة في الشبكة. ومن أمثلة هذه الحالات: موت (فقدان الاتصال) عقدة التحسس الأولى أو الأخيرة، لا يمكن لنسبة معينة من العقد الوصول إلى المحطة القاعدية، انخفاض نسبة تسليم البيانات أو معدل التغطية إلى ما دون عتبة محددة مسبقاً. لذلك، يرتبط مدة حياة شبكة الحساسات بمقياس زمني، لكنه يفشل أحياناً في تحديد أبعاد أخرى للشبكة، مثل زمن الوصول أو خصائص تحمل الخطأ.

تم تعريف كفاءة الطاقة لأول مرة على أنها النسبة بين إجمالي كمية البيانات المقدمة وإجمالي الطاقة المستهلكة في [C. E. Jones, 2001]. ولذلك، كلما تم نقل المزيد من البيانات بنجاح لكمية معينة من استهلاك الطاقة، تزداد كفاءة استخدام الطاقة في الحل. تم بعد ذلك اقتراح تعريف أوسع يغطي التعريف السابق: يمكن تعريف كفاءة الطاقة بأنها "استخدام طاقة أقل لتقديم نفس الخدمة" في [L. Berkley, 2015]. وفي هذا السياق، يمكن اعتبار النظام الذي يوفر دقة أعلى للكشف عن الأحداث لنفس الكمية من استهلاك الطاقة موفراً للطاقة. ونتيجة لذلك، تُفهم كفاءة استخدام الطاقة عادةً على أنها تعني مقايضة مُرضية بين معايير التحسين المتعددة (مثل استهلاك الطاقة وزمن الوصول ونسبة تسليم البيانات)، حيث يُترك تقييم فكرة "الرضا" لتقدير المصمم. كما سنرى في الأقسام التالية، فإن زيادة مدة حياة الشبكة يكون منطقياً فقط إذا تم ذلك بطريقة موفرة للطاقة، أي إذا تم أخذ متطلبات التطبيق في الاعتبار.

تتمتع WSN بالقدرة على إحداث ثورة في مهام المراقبة التقليدية. وفي الواقع، فإن توفر مثل هذه العقد منخفضة التكلفة يتيح إمكانية المراقبة في كل مكان دون مراقبة، حتى في المناطق التي يصعب الوصول إليها. ومع ذلك، فإن إنشاء WSN هذه يمثل مشكلة بحثية وهندسية صعبة بسبب تنوع التطبيقات المتصورة والموارد المحدودة للعقد.

2.7.2. معايير شبكات الحساسات اللاسلكية منخفضة الطاقة Low-power WSN standards

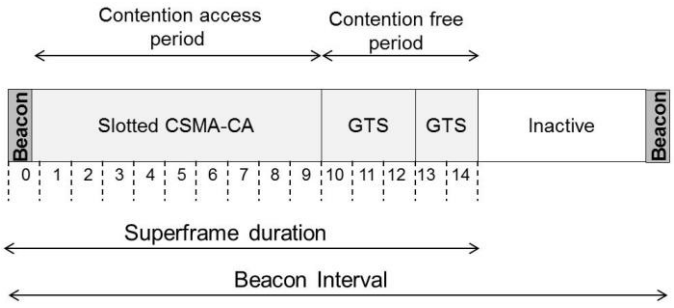
تم تصميم معايير WSN خصيصاً لتأخذ في الاعتبار الموارد المحددة للعقد. فيما يلي نعرض وصفاً موجزاً لمعايير الطاقة المنخفضة بما في ذلك IEEE 802.15.4 وZigBee وWirelessHART وISA100.11a وBluetooth منخفضة الطاقة و IEEE 802.15.6 و6LoWPAN وRPL وMQTT.

- يحدد IEEE 802.15.4 [IEEE802.org/15/pub/TG4, 2014] الطبقات المادية وطبقات MAC لشبكات المنطقة الشخصية اللاسلكية ذات معدل البيانات المنخفض. يسمح المعيار في الوضع الممكّن للمرشد، بتوفير الطاقة من خلال تنفيذ دورة الخدمة، بحيث يمكن لجميع العقد الدخول في وضع السكون بشكل دوري. يرسل المنسق رزم إشارات لمزامنة العقد، وينقسم هيكل الإطار الموضح في الشكل 2–5 إلى ثلاثة أجزاء:

1) فترة وصول للتنافس تستخدم خلالها العقد بروتوكول (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance CSMA/CA) ذات فترة زمنية محددة.

2) فترة خالية من التنافس تحتوي على عدد من الفترات الزمنية المضمونة (Guaranteed Time Slot GTS) التي يمكن للمنسق تخصيصها لعقد محددة

3) فترة غير نشطة يمكن خلالها للأجهزة الطرفية والمنسق الدخول في وضع السكون.



الشكل 2–5. بنية الإطار للوضع الممكّن في معيار IEEE 802.15.[E Evangelakos,2022].

- **تم تطوير ZigBee [Zigbee.org, 2014]** كمعيار مفتوح لتلبية متطلبات الأجهزة منخفضة التكلفة ومنخفضة الطاقة. يحدد ZigBee بروتوكولات اتصالات الطبقة الثانية بناءً على معيار IEEE 802.15.4، ويدعم العديد من طوبولوجيا الشبكة التي تربط المئات والآلاف من الأجهزة. يعمل [Hartcomm.org, 2014] وفقاً لمواصفات IEEE 802.15.4 ويستهدف الأجهزة الميدانية مثل العقد والمشغلات المستخدمة لمراقبة معدات المصنع أو العمليات. الخصائص القياسية هي الأمان المتكامل والموثوقية العالية وكفاءة الطاقة. يعتمد (Wire-less Highway Addressable Remote Transducer WirelessHart) على نظام الوصول المتعدد بتقسيم الزمن (Time Division Multiple Access TDMA) ذو طول ثابت حتى تتمكن العقد من الدخول في وضع السكون. يحدد شبكة مركزية حيث يتم تحديد التوجيه حصرياً بواسطة مدير الشبكة الذي يجمع المعلومات حول كل عقدة مجاورة. ويستخدم هذه المعلومات لإنشاء رسم بياني شامل للشبكة ويحدد بروتوكول توجيه الرسم البياني. من الناحية العملية، لا يحدد المعيار كيفية تنفيذ مثل هذا التوجيه البياني، لذا تقترح بعض الأعمال البحثية بالفعل بروتوكولات توجيه متعددة المسارات للعمليات الصناعية في [Z. Jindong, 2009, G. Gao, 2013]. تأخذ هذه الدراسات جودة الارتباط في الاعتبار عند اتخاذ قرارات

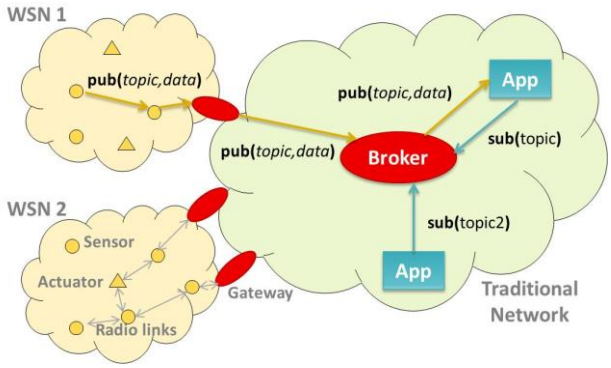
التوجيه، فقد يكون من الممكن استخدام معلومات مستوى بطارية العقدة من أجل زيادة تحسين توفير الطاقة.

- **يعتمد المعيار ISA100.11a [isa.org,2014]** على مواصفات IEEE 802.15.4 وهو مخصص للاتصالات اللاسلكية الموثوقة لتطبيقات المراقبة والتحكم في الصناعة. يستخدم ISA100.11a جدولة عناوين (Media Access Control MAC) حتمية بطول فتحة متغير، مما يسمح للعقد بالانتقال إلى وضع السكون عندما لا يكون ذلك هو الوقت المناسب لها. يحدد المعيار العقد غير الخاصة بجهاز التوجيه والتي لا تعمل كمرسل والتي يعتبر انخفاض الطاقة فيها صغير. أخيراً، يتطلب المعيار من كل جهاز الإبلاغ عن مدة حياة البطارية المقدر وسعة الطاقة المرتبطة به إلى مدير النظام الذي يخصص روابط الاتصال بناءً على إمكانات الطاقة المُبلغ عنها. بالإضافة إلى الاستهلاك المنخفض للطاقة، يركز ISA100.11a أيضا على الأمان القابل للتوسع، المتانة في وجود التدخل وإمكانية التشغيل البيني مع الأجهزة اللاسلكية الأخرى مثل الهواتف المحمولة أو الأجهزة المستندة إلى معايير أخرى.
- **يعالج بلوتوث منخفض الطاقة [bluetooth.com, 2014]** الأجهزة منخفضة التكلفة ذات سعة البطارية المنخفضة جداً ومتطلبات المدى القصير. وهو امتداد لتقنية البلوتوث التي تتيح الاتصال بين الأجهزة الصغيرة التي تعمل بالبطاريات (الساعات ولوحات المفاتيح اللاسلكية الرياضية) وأجهزة البلوتوث (أجهزة الحاسب المحمولة والهواتف المحمولة). فيما يتعلق بكفاءة الطاقة، تم تصميم تقنية بلوتوث منخفضة الطاقة (Bluetooth Low Energy BLE) بحيث يمكن للأجهزة العمل لأكثر من عام بفضل وضع السكون منخفض الطاقة للغاية. يعتبر BLE مناسباً لمجموعة متنوعة من التطبيقات في مجالات الرعاية الصحية والرياضة والأمن.
- **يحدد IEEE 802.15.6** [IEEE 802.org, 2014] طبقات MAC للأجهزة منخفضة الطاقة التي تعمل بالقرب من جسم الإنسان أو داخله للتطبيقات الطبية وغير الطبية. تتكون شبكة منطقة الجسم (Body Area Network BAN) من مركز واحد وما يصل إلى 64 عقدة، منظمة في طوبولوجيا نجمية ذات قفزة واحدة أو قفزتين. على مستوى MAC، هناك ثماني أولويات للمستخدم، بدءاً من بذل أفضل الجهود وحتى تقارير أحداث الطوارئ. يتم التمييز بينها بناءً على الحد الأدنى والحد الأقصى لنوافذ التنافس. يدعم المعيار أيضاً ثلاثة مستويات من الأمان:

المستوى (0) الاتصالات غير الآمنة، المستوى (1) المصادقة فقط والمستوى (2) المصادقة والتشفير.

- **يعتبر البروتوكول (RFC 6550)** [datatracker.ietf.org, 2013] هو بروتوكول توجيه متجه للمسافات للشبكات منخفضة الطاقة (Routing Protocol for Low Power and Loss Network RPL) التي تعاني من فقدان الطاقة والمتوافق مع IPv6، وهو مصمم خصيصاً لتلبية متطلبات العقد ذات الموارد المحدودة. تم تحسين RPL للاتصالات من شخص إلى شخص لجمع البيانات، يقوم RPL بإنشاء رسم بياني غير دوري موجه (Directed Acyclic Graph DAG) مثبت على جهاز توجيه حدودي لـ WSN. تحتفظ العقدة بعدة أصول لإنشاء مسارات مختلفة نحو المحطة القاعدية وتختار العقدة الأصلية المفضلة لها بناءً على وظيفة الهدف التي تستخدم مقاييس التوجيه. يقترح مشروع [tools.ietf.org, 2010] تحديد المسار الذي يقلل من مجموع العدد المتوقع لعمليات الإرسال (Expected Transmission count ETX) عبر الروابط التي تم اجتيازها ولكن تصميم الوظيفة الموضوعية لا يزال يمثل مشكلة بحث مفتوحة. وبالتالي، فمن الممكن إنشاء مجموعة DAG تركز على كفاءة استخدام الطاقة، كما هو الحال في [P. O. Kamgueu, 2013] الذي يستخدم الطاقة المتبقية للعقدة كمقياس توجيه RPL. يقدم RPL ميزات أخرى مثل التسامح مع الأخطاء وآليات الإصلاح الذاتي والأمان.
- **يعتبر البروتوكول MQTT** [O. Gaddour, 2012] [mqtt.org, 2013] (نقل معياري عن بعد لخدمة وضع الرسائل في قائمة انتظار) هو بروتوكول نشر/اشتراك لتوزيع الرسائل من طرف إلى طرف. سيكون البروتوكول المستقبلي لإنترنت الأشياء لتوصيل الأجهزة ذات الترددات المنخفضة. يوضح في الشكل 2–6 البنى التحتية لـ TCP/IP. –العقد اللاسلكية وشبكات المشغلات على شبكات غير تابعة لـ TCP/IP. يقوم الناشرون بإنتاج المعلومات وإرسال بياناتهم إلى الوسيط عبر رسالة عامة. يقوم المشتركون المهتمون بتلقي بيانات معينة بإرسال رسالة فرعية إلى الوسيط. إذا كان هناك تطابق بين موضوعات المشترك وموضوعات الناشر، يقوم الوسيط بنقل الرسالة إلى المشترك. يعمل MQTT-S على توفير الطاقة من خلال دعم بوابات متعددة لموازنة الحمل في الشبكة. كما أنه يدعم العقد في حالة السكون والرزم ذات الحجم المحدود لتكون متوافقة مع ZigBee. يتم التعامل مع معظم منطق البروتوكول في الوسيط والبوابة، مما يجعل تنفيذ الجهاز

خفيفاً في [U. Hunkeler, 2008]. على الرغم من أن MQTT تم تطبيقه بالفعل في مشاريع مختلفة في [mqtt.org, 2013]، هناك نقص في التقييم فيما يتعلق بكفاءة استخدام الطاقة في البروتوكول.



الشكل 2–6. معمارية MQTT–S لشبكة WSN مع اتصالات Pub/Sub. [S Bidhendi,2022]

- **تم تطوير معايير Bluetooth منخفضة الطاقة والمعايير المستندة إلى IEEE 802.15.4** خصيصاً للأجهزة التي تعمل بالبطاريات. إنها تتيح توفير الطاقة من خلال دورة الخدمة وتتضمن أوضاعاً اختيارية يمكن تعطيلها لمزيد من تحسين مدة حياة الشبكة. في الجدول 2–3 قمنا بمقارنة هذين المعيارين الخاصين بـ WSN مع المعايير اللاسلكية الأخرى المعروفة (Wi-Fi وWiMax وWiMedia وBluetooth) فيما يتعلق بمعدل البيانات ونطاق الإرسال وقابلية التوسع والتطبيقات. فيما يتعلق بالتطبيقات، غالباً ما تتفاعل منصات الرعاية الصحية الحالية مع تقنية Bluetooth نظراً لملاءمة هذه التقنية لشبكات منطقة الجسم التي تتطلب نطاقات اتصال محددة ومعدلات بيانات عالية. ومع ذلك، قد تستنزف تقنية البلوتوث طاقة العقد بسرعة. **يمكن استخدام IEEE 802.15.6** في هذه الحالة كبديل عنه. تعد تقنية ZigBee مناسبة لعدد كبير من التطبيقات بفضل قابليتها للتوسع وكفاءتها في استخدام الطاقة. كأتمتة المنزل الذكي، يعد معدل بيانات ZigBee ونطاق الراديو كافيين للإشراف على الغرفة. ومع ذلك، في نظام مراقبة أكثر تعقيداً، يمكن دمج كل من شبكات التحسس المحيطة وشبكات استشعار الجسم معاً وتوصيلها بالإنترنت عبر 6LowPan. في حالة النشر الخارجي على نطاق واسع، قد يصبح نطاق راديو Zigbee الذي يبلغ طوله 100 متر محدوداً بسرعة. في هذه الحالة، نتصور أن البوابات التي تدعم تقنية WiMax ستكون قادرة على ربط الهيكل لتوصيل الشبكة بالإنترنت.

وبالتالي، فإن دمج التقنيات والمعايير المختلفة أمر ضروري للاستجابة لاحتياجات التطبيقات الناشئة والصعبة مثل الشبكات الذكية وأنظمة النقل الذكية وأنظمة معلومات الرعاية الصحية.

الجدول 2–3.خصائص المعايير اللاسلكية [S Bidhendi,2022].

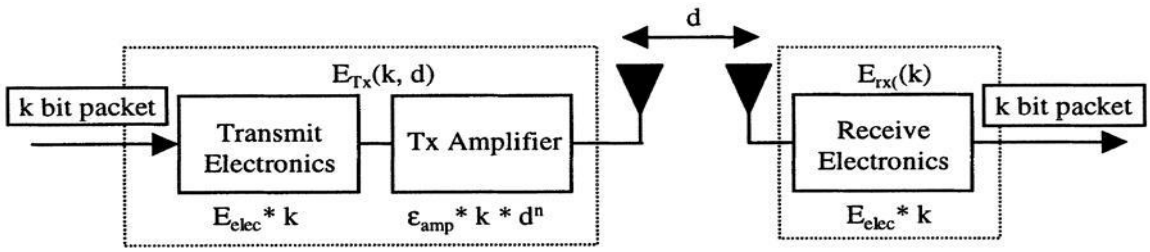
اسم	Wi Fi	Wi max	Wi media	بلوتوث	zgbee	بلوتوث منخفض الطاقة
معيار	IEEE 802.11 B	IEEE 802.16	IEEE 802.15.3	IEEE802.15.1	IEEE 802.15.4	
التطبيقات	خدمة الإنترنت الويب والبريد الإلكتروني والفيديو	موجة عريضة	الوسائط المتعددة في الوقت الحقيقي	إستبدال الكابل	أجهزة منخفضة الطاقة	بلوتوث ↔ طاقة منخفضة
الأجهزة	حاسب محمول، قرص وحدة التحكم	أجهزة الحاسبالطرفية	مكبر صوت لاسلكي، طابعة التلفاز	الهاتف المحمول، الماوس لوحة المفاتيح، وحدة التحكم	الأنظمة المضمنة، أجهزة الاستشعار	ساعة، مستشعر رياضي، لوحة مفاتيح لاسلكية
مدة الحياة المستهدفة	ساعات	–	–	أيام –أشهر	6 أشهر –2 سنة	2–1 سنة
معدلات البيانات	11Mbps	40–30 Mbps	55–11Mbps	3–1Mbps	250–20 كيلوبت في الثانية	1Mbps
نطاق الإرسال	100m	50km	m 10:00	50–10m	100m	10m
حجم الشبكة	32	–	245	7	65000	–
مقياس النجاح	المرونة، السرعة	طويلة المدى	معدلات بيانات عالية	– يكلف – راحة	الموثوقية، التكلفة، طاقة منخفضة	طاقة منخفضة

يعد التقييس قضية أساسية لنجاح WSN. على الرغم من ظهور معايير خاصة بالتطبيقات، مثل WirelessHART وISA100.11a للصناعة، و IEEE 802.15.6 لشبكات استشعار الجسم، إلا أنه لا يزال من الممكن تحسينها فيما يتعلق بمتطلبات التطبيق. تقترح بعض الدراسات البحثية تحسين المعلمات القياسية مثل حجم الرزمة وطول الفتحة وطول نافذة التنافس أو حتى تقديم بروتوكولات بديلة. يحتاج أداء المعايير الحديثة (مثل IEEE 802.15.6، MQTT) إلى مزيد من البحث، بسبب نقص التقييم فيما يتعلق بهذه الحلول ونقص المقارنات مع البروتوكولات الأخرى. ويبدو أيضاً أن المعايير الحالية لا يمكنها الاستجابة لجميع

احتياجات التطبيقات، تم تطوير العديد من الحلول التي تراعي بشدة توفير الطاقة لا سيما فيما يتعلق بالمتطلبات الصعبة في الوقت الفعلي والمسائل الأمنية. بالتوازي مع جهود التقييس المستمرة.

3.7.2. نموذج استهلاك الطاقة Energy consumption model

تكون العقد صغيرة الحجم وقدرات هذه العقدة، من حيث قوة المعالجة والذاكرة والاتصالات وتوفير الطاقة محدودة. تتكون العقدة من دارة التحسس ومعالج إشارة رقمية وعنصر إرسال واستقبال لاسلكي. أجزاء الاتصال في العقد مسؤولة عن غالبية استهلاك الطاقة. لحساب استهلاك الطاقة في الإرسال اللاسلكي، استخدم نموذج استهلاك الطاقة الراديوية المبين في الشكل 2-7



الشكل 2-7. نموذج استهلاك الطاقة الراديوية [S Bidhendi,20 22]

تستخدم بروتوكولات التوجيه في هذه الشبكات نوعين من نماذج القناة كنموذج لفقد المسار في حال فضاء حر وتحتاج طاقة تضخيم $\varepsilon_{fs}d^2$ حيث $\varepsilon_{fs}10$ هي طاقة التضخيم في حال فضاء حر و d هي البعد بين المرسل والمستقبل$\varepsilon_{amp}d^4$.فقدان الطاقة في حال تخامد متعدد القفزات حيث ε_{amp} هي طاقة التضخيم في حال استخدام نموذج التخامد متعدد المسارات .يمكن استخدام متحكم طاقة لاختيار أحد نماذج القنوات السابقة وذلك بإعداد مناسب لمضخم الطاقة كالتالي: إذا كان البعد بين المرسل والمستقبل أقل من عتبة d_0 نستخدم نموذج الفضاء الحر .عندها يستخدم نموذج التخامد متعدد المستويات. وتستهلك الأشعة الراديوية من أجل رسالة مؤلفة من k بت والبعد d ما يلي:[Q Wei *et al.*, 2021]

هذا هو الشكل المبسط لطاقة الإرسال على مسافات قريبة

$$E_{TX}(K,d) = kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 \qquad (5-2)$$

أما الشكل العام

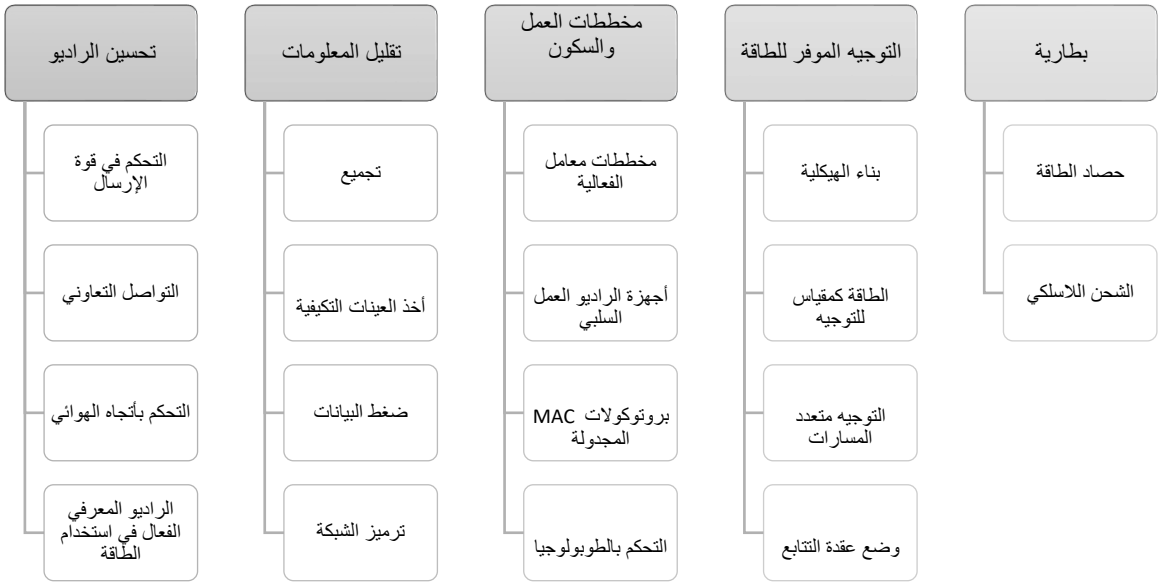
$$E_{TX}(K,d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \qquad (6-2)$$

حيث K عدد بتات الرسالة، d مسافة الإرسال، E_{elec} الطاقة الإلكترونية ε_{amp} ، طاقة التضخيم. تستهلك الاجهزة الراديوية طاقة الاستقبال وتعتمد على عوامل مثل الترميز، التعديل، الترشيح وتوسيع الإشارة.

يستهلك رأس العنقود طاقة استقبال الإشارات من العقد، وطاقة لتجميع الإشارات وطاقة لنقل الإشارة المجمعة إلى المحطة القاعدية.

8.2 آليات توفير الطاقة Energy-saving mechanisms

نستعرض الأساليب الرئيسية الحالية المقترحة لمعالجة مشكلة استهلاك الطاقة في هذا القسم. تم تلخيص التصنيف المقترح لآليات كفاءة استخدام الطاقة في الشكل 2–8.



الشكل 2–8. تصنيف الآليات الموفرة للطاقة [K Chen,2017].

1.8.2 تحسين الراديو radio optimization

وحدة الراديو هي المكون الرئيسي الذي يتسبب في استنفاد بطارية العقد. لتقليل تبديد الطاقة بسبب الاتصالات اللاسلكية، حاول الباحثون تحسين المعلمات الراديوية مثل أنظمة الترميز والتعديل ونقل الطاقة وتوجيهية الهوائي.

يهدف **تحسين التعديل** Modulation optimization إلى العثور على معلمات التعديل المناسبة التي تؤدي إلى الحد الأدنى من استهلاك الطاقة للراديو. يحدث استنفاد الطاقة بسبب استهلاك العناصر الالكترونية واستهلاك طاقة في الإشارة المرسلة. بالنسبة للمسافات القصيرة، يكون استهلاك الدارة أكبر من طاقة الإرسال بينما بالنسبة للمدى الأطول تصبح قوة الإشارة هي المهيمنة. تحاول الأبحاث الحالية إيجاد مفاضلة جيدة بين الحجم (عدد الرموز المستخدمة في تشكيل الإشارة المرسلة)، ومعدل المعلومات (عدد بتات المعلومات لكل رمز)، وزمن الإرسال، والمسافة بين العقد والضجيج. أظهر [F. M. Costa, 2010] أنه يمكن تقليل استهلاك الطاقة المطلوب لتلبية معدل خطأ البت (BER) ومتطلبات التأخير عن طريق تحسين وقت الإرسال.

تم اقتراح **مخططات اتصالات تعاونية Cooperative communications schemes** لتحسين جودة الإشارة المستقبلة من خلال استغلال العديد من الأجهزة ذات الهوائي الواحد والتي تتعاون لإنشاء جهاز إرسال افتراضي متعدد الهوائيات. والفكرة هي استغلال حقيقة أن البيانات عادة ما يتم سماعها من قبل العقد المجاورة بسبب طبيعة البث للقناة. لذلك، يمكن إنشاء تنوع مكاني ومكافحة الخفوت والظلال من خلال إشراك هذه العقد في إعادة إرسال البيانات، متعدد المسارات [A. Nosratinia,2004]. بحث [J. W. Jung,2011] في كيفية استخدام الإرسال التعاوني لتوسيع نطاق الاتصال وبالتالي موازنة دورة العمل للعقد حيث يمكن استبدال عقد تحسس التتابع العادية بعقد تعاونية أخرى. قارن [S. Cui, 2004] استهلاك الطاقة لكل من أنظمة SISO (دخل واحد ومخرج واحد) وأنظمة MIMO الافتراضية (الإدخال المتعدد والمخرجات المتعددة) وإظهار أن أنظمة MIMO يمكن أن توفر بصورة أفضل للطاقة وتأخيراً أصغر من طرف إلى طرف عبر مسافات نطاق إرسال معينة، حتى مع الطاقة العامة الإضافية المطلوبة لتدريب MIMO.

تمت دراسة **التحكم في طاقة الإرسال Transmission Power Control (TPC)** لتعزيز كفاءة الطاقة في الطبقة المادية عن طريق ضبط قوة الإرسال الراديوي [S. Lin, 2006]. في التحكم في الطوبولوجيا التعاونية مع التكيف Cooperative Topology Control with Adaptation CTCA. يقترح المؤلفون في [X. Chu, 2012] التكيف بانتظام قوة النقل لكل عقدة من أجل مراعاة ملف استهلاك الطاقة غير المتكافئ للعقد. ولذلك، فإن العقدة ذات الطاقة المتبقية الأعلى قد تزيد من قوة الإرسال الخاصة

بها، الأمر الذي يمكّن العقد الأخرى من تقليل طاقة النقل الخاصة بها، وبالتالي توفير الطاقة. ومع ذلك، فإن استراتيجية التحكم في استطاعة الإرسال (Transmission Power Control TPC) لها تأثير ليس فقط على الطاقة ولكن أيضا على التأخير وجودة الارتباط والتداخل والاتصال. وفي الواقع، عندما تنخفض طاقة الإرسال، إن خطر التداخل ينخفض ويتعرض عدد أقل من العقد للتنصت. على العكس من ذلك، من المحتمل أن يزداد التأخير، لأنه ستكون هناك حاجة إلى المزيد من القفزات لإعادة توجيه الرزمة. وأخيراً، تؤثر طاقة الإرسال على طوبولوجيا الشبكة لأن الاتصال المحتمل بين العقد سيختلف، كما أنها تفضل إعادة الاستخدام المكاني لعرض المجال الترددي إذا كان من الممكن إجراء اتصالين دون تداخل.

تسمح **الهوائيات الاتجاهية Directional antennas** بإرسال واستقبال الإشارات في اتجاه واحد في كل مرة، مما يحسن مجال الإرسال والإنتاجية. قد تتطلب الهوائيات الاتجاهية توجيه تقنيات تحديد الموقع، ولكن يمكن أن تحدث اتصالات متعددة على مسافة قريبة، مما يؤدي إلى إعادة الاستخدام المكاني لعرض المجال الترددي. وعلى النقيض من العقد متعددة الاتجاهات التي ترسل في اتجاهات غير مرغوب فيها، فإن الهوائيات الاتجاهية تتطلب طاقة أقل بالنسبة لمجال معين. وبالتالي، يمكنها تحسين سعة الشبكة ومدة حياتها مع التأثير على التأخير والاتصال في [H.-N. Dai, 2009]. تم تصميم بروتوكولات MAC جديدة للاستفادة من خصائص الهوائيات الاتجاهية، [E. Karapistoli, 2009]. ومع ذلك، يجب أخذ بعض المشكلات الخاصة بالهوائيات الاتجاهية بعين الاعتبار: تداخل الإشارة، وتعديلات الهوائي.

الراديو المعرفي الموفر للطاقة:Energy-efficient cognitive radio الراديو المعرفي (Cognitive Radio CR) هو راديو ذكي يمكنه تحديد قناة اتصال ديناميكياً في الطيف اللاسلكي ويمكنه تكييف معلمات الإرسال والاستقبال وفقاً لذلك. تعمل تقنية الراديو المعرفة بالبرمجيات (Software-SDR Defined Radio) على إنشاء أجهزة إرسال واستقبال لاسلكية قابلة لإعادة التشكيل بالكامل والتي تعمل تلقائياً على تكييف معلمات الاتصال الخاصة بها مع متطلبات الشبكة، مما يحسن الوعي بالسياق. ومع ذلك، يتطلب CR استهلاكاً كبيراً للطاقة مقارنة بالأجهزة التقليدية بسبب التعقيد المتزايد الذي تنطوي عليه الوظائف الجديدة والمتطورة في [M. Masonta, 2012]. يعد تصميم شبكات الحساسات الراديوية

المعرفية الموفرة للطاقة تحدياً رئيسياً في الاستخدام الذكي لطاقة البطارية. تهتم الدراسات الراديوية المعرفية الحديثة بالتحكم في قوة أجهزة الإرسال في[M. Naeem, 2013]، وتخصيص القناة المتبقية على أساس الطاقة، والجمع بين ترميز الشبكة و CR. تتضمن قضايا البحث المفتوحة تطوير مناهج متعددة الطبقات لـ MAC، وبروتوكولات التوجيه.

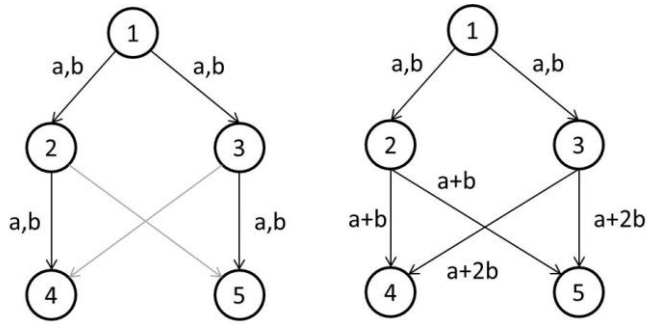
2.8.2 تقليل المعلومات Data reduction

تهدف فئة أخرى من الحلول إلى تقليل كمية البيانات التي سيتم تسليمها إلى المحطة القاعدية. يمكن اعتماد طريقتين معاً: الحد من العينات غير الضرورية والحد من مهام التحسس لأن نقل البيانات والحصول عليها مكلفان من حيث الطاقة.

التجميع :**Aggregation** في أنظمة تجميع البيانات، تقوم العقد الموجودة على طول المسار المؤدي إلى المحطة القاعدية بتجميع البيانات لتقليل كمية البيانات الموجهة نحوها. يمكن للعقدة إعادة إرسال متوسط أو الحد الأدنى فقط من البيانات المستلمة. يؤدي تجميع البيانات إلى تقليل زمن الوصول لأنه يقلل من حركة المرور، وبالتالي تقليل التأخير. ومع ذلك، قد تقلل تقنيات تجميع البيانات من دقة البيانات المجمعة. في الواقع، قد لا يتم استرداد البيانات الأصلية عن طريق المحطة القاعدية، اعتماداً على وظيفة التجميع، وبالتالي يمكن فقدان دقة المعلومات. تم فحص تقنيات تجميع البيانات المخصصة لـ WSN بالتفصيل في [E. Fasolo, 2007].

أخذ العينات التكيفية Adaptive sampling: يمكن أن تستهلك مهام التحسس الطاقة وقد تولد عينات غير ضرورية مما يؤثر على موارد الاتصالات وتكاليف المعالجة. تعمل تقنيات أخذ العينات التكيفية على ضبط معدل أخذ العينات في كل مستشعر مع ضمان تلبية احتياجات التطبيق من حيث التغطية أو دقة المعلومات. يمكن استخدام أجهزة الكشف الصوتية منخفضة الطاقة في تطبيق الإشراف للكشف عن التطفل. وبعد ذلك، عند الإبلاغ عن حدث ما، يمكن تشغيل الكاميرات المتعطشة للطاقة للحصول على معلومات دقيقة كما في [G. Anastasi, 2009]. يمكن استخدام الترابط المكاني لتقليل معدل أخذ العينات في المناطق التي تكون فيها الاختلافات في البيانات المستشعرة منخفضة. في تطبيقات التعرف على النشاط البشري، يقترح [Z. Yan, 2012] ضبط تردد الاستحواذ على نشاط المستخدم لأنه قد لا يكون من الضروري أخذ العينات بنفس المعدل عندما يكون المستخدم جالساً أو قيد التشغيل.

يتم استخدام **ترميز الشبكة (Network Coding NC)** لتقليل حركة المرور في سيناريوهات البث عن طريق إرسال مجموعة خطية من عدة رزم بدلاً من نسخة من كل رزمة. لتوضيح ترميز الشبكة، يوضح الشكل 2–9 طوبولوجيا مكونة من خمس عقد حيث يجب أن تبث العقدة 1 عنصرين من البيانات، a وb. إذا قامت العقد ببساطة بتخزين وإعادة توجيه الرزم التي تستقبلها، فسيؤدي ذلك إلى إنشاء ستة عمليات إرسال للرزم (2 لكل عقدة 1 و2 و3 على التوالي). مع نهج NC، يمكن للعقدتين 2 و3 إرسال مجموعة خطية من عناصر البيانات a وb، لذلك سيتعين عليهم إرسال رزمة واحدة فقط. يمكن للعقدتين 4 و5 فك ترميز الرزمة عن طريق حل المعادلات الخطية. لذلك، يتم حفظ رزمتين إجمالاً في المثال. يستغل ترميز الشبكة المفاضلة بين الحساب والاتصالات نظراً لأن الاتصالات بطيئة مقارنة بالحسابات وأكثر استهلاكاً للطاقة. يظهر في [S. Wang, 2019] الجمع بين الشبكة البرمجة والمجموعات المسيطرة المتصلة لتقليل استهلاك الطاقة بشكل أكبر في سيناريوهات الإرسال.



الشكل 2–9. مثال على ترميز الشبكة [K Chen,2017].

يظهر [I.-H. Hou, 2009] **ترميز الشبكة التكيفي (AdapCode)** وهو بروتوكول لنشر البيانات حيث ترسل العقدة رسالة واحدة لكل N رسالة مستلمة، مما يوفر جزءاً من عرض المجال الترددي يصل إلى (N-1) /N مقارنة بالبيانات الزائدة البسيطة. يمكن لعقدة الاستقبال استرداد الرزم الأصلية عن طريق الحذف الغوسي بعد استلام الرزم المرمزة N بنجاح. يعمل AdapCode على تحسين الموثوقية من خلال تكييف N مع كثافة العقدة، لأنه عندما تزيد N وتنخفض الكثافة، يصبح من الصعب استعادة رزم كافية لفك ترميز البيانات. يتم تعزيز الموثوقية بشكل أكبر من خلال السماح للعقد التي تستقبل أقل من N من الرزم بإرسال إقرار سلبي لاسترداد البيانات المفقودة.

يقوم **ضغط البيانات Data compression** بترميز المعلومات بطريقة تقلل من كمية البيانات اللازمة لتمثيل الرسالة الأولية. يعتبر موفر للطاقة لأنه يقلل من أوقات الإرسال حيث أن حجم الرزمة أصغر. ومع ذلك، فإن خوارزميات الضغط الحالية غير قابلة للتطبيق على العقد بسبب محدودية مواردها. ولذلك، تم تطوير تقنيات محددة للتكيف مع القدرات الحسابية والطاقة التحريكية اللاسلكية.

3.8.2 مخططات العمل والسكون Sleep/wakeup schemes

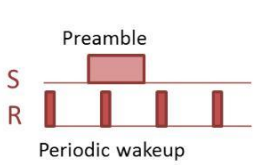
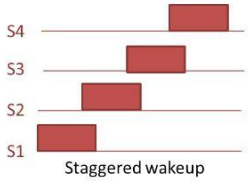
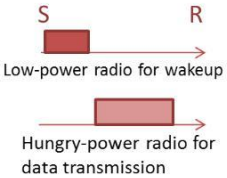
تعد حالات العمل من المصادر الرئيسية لاستهلاك الطاقة في المكون الراديوي. تهدف أنظمة السكون والعمل إلى تكييف نشاط العقدة لتوفير الطاقة عن طريق وضع الراديو في وضع السكون.

تقوم أنظمة Duty cycling schemes بجدولة حالة راديو العقدة اعتماداً على نشاط الشبكة من أجل تقليل الاستماع الخامل وتفضيل وضع السكون. تنقسم هذه المخططات عادةً إلى ثلاث فئات: الالتقاء حسب الطلب وغير المتزامن والمجدول كما في [G. Anastasi, 2015]. ويرد في الجدول 2–4 ملخص لخصائص كل فئة. من المؤكد أن البروتوكولات القائمة على دورة العمل هي الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة ولكنها تعاني من زمن الوصول أثناء السكون لأن العقدة يجب أن تنتظر حتى يستيقظ جهاز الاستقبال. لا يمكن في بعض الحالات للعقدة بث المعلومات إلى جميع جيرانها لأنهم غير نشطين في وقت واحد. أخيراً، يعد إصلاح المعلمات مثل فترات الاستماع والسكون وطول المقدمة ووقت الفتحة مشكلة صعبة لأنها تؤثر على أداء الشبكة. توفر دورة التشغيل المنخفضة كمية كبيرة من الطاقة ولكنها يمكن أن تزيد بشكل كبير من تأخير الاتصال. وبالتالي، يمكن تحديد معلمات البروتوكول قبل النشر من أجل البساطة، على الرغم من أن هذا يؤدي إلى نقص المرونة، أو يمكن إعدادها ديناميكياً لتحسين التكيف مع ظروف حركة المرور. تم إنجاز بعض الأعمال فيما يتعلق بدورة الخدمة لتكييف الفترة النشطة للعقد عبر الإنترنت من أجل تحسين استهلاك الطاقة في وظيفة حركة المرور أو تجاوزات المخزن المؤقت أو متطلبات التأخير أو الطاقة المحصودة كما في [J. Hsu, 2006, R. de Paz, 2012]. لمزيد من التفاصيل حول دورة الخدمة، يمكن العثور على المعلومات في [G. Anastasi, 2005] و [R. Carrano, 2014].

أجهزة الراديو الاستيقاظ السلبي: Passive wake-up radios تهدر دورة الخدمة الطاقة بسبب النشاط غير الضروري، تُستخدم أجهزة الراديو منخفضة الطاقة لتنبيه العقدة فقط عندما تحتاج إلى استقبال

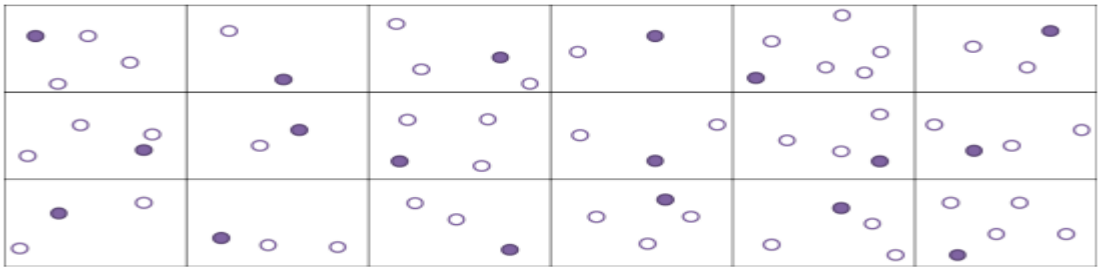
أو إرسال الرزم بينما يتم استخدام الراديو المتعطش للطاقة لنقل البيانات. فكر [H. Ba, 2013] في شبكة مكونة من أجهزة راديو (Radio Frequency Identification RFID) سلبية تسمى WISP-Motes وقارئات RFID. يستخدم راديو RFID الطاقة المنتشرة بواسطة جهاز إرسال القارئ لإثارة انقطاع يؤدي إلى تنشيط العقدة. من الناحية العملية، لا يمكن تجهيز جميع العقد بقارئات RFID نظراً لاستهلاكها العالي للطاقة. يعد هذا عيباً كبيراً لأنه، إلى جانب المجال التشغيلي القصير لأجهزة RFID المنفعلة، فإنه يقيد استخدامها لسيناريوهات القفزة الواحدة. أظهرت عمليات المحاكاة أن WISP-Motes يمكنها توفير قدر كبير من الطاقة على حساب الأجهزة الإضافية وزيادة زمن الوصول في تسليم البيانات. أظهر المؤلفون فوائدها في حالة وجود شبكة متفرقة تتحمل التأخير مع عناصر متنقلة مجهزة بقارئات RFID.

الجدول 2–4.خصائص دورة العمل [K Chen, 2017].

النوع	على الطلب	جدولة موعد	غير متزامن
المبدأ	قم بتنبيه العقدة فقط عندما يريد التواصل معها.	تستيقظ العقد في نفس الوقت الذي تستيقظ فيه العقد المجاورة لها وفقاً لجدول النشاط. ثم يذهبون للسكون حتى موعدهم التالي.	تستيقظ كل عقدة بشكل مستقل ولكن فترة نشاطها يجب أن تتداخل مع جيرانها.
البث	لا	نعم	لا
التزامن	لا	نعم	لا
كفاءة الطاقة	تظل العقد نشطة فقط لأدنى وقت مطلوب	مزيد من التصادمات لأن العقد تستيقظ في نفس الوقت بعد فترة عدم نشاط.	تحتاج العقد إلى النشاط بشكل متكرر. إما أن يرسل المرسل تمهيد طويلة أو أن يظل المستقبل مستيقظاً لفترة أطول.
أمثلة على التطبيقات	تطبيق يحركه الحدث مع دورة عمل منخفضة.	تطبيق لجمع البيانات مع إمكانية التجميع.	تطبيقات الهاتف المحمول عندما لا يمكن التنبؤ بالجوار
التوضيح			

التحكم في الطوبولوجيا: Topology control عندما يتم نشر العقد بشكل متكرر لضمان تغطية جيدة للمساحة، فمن الممكن إلغاء تنشيط بعض العقد مع الحفاظ على عمليات الشبكة والاتصال. تستغل

بروتوكولات التحكم في التكرار لتكييف هيكل الشبكة ديناميكياً بناءً على احتياجات التطبيق من أجل تقليل عدد العقد النشطة. يمكن إيقاف تشغيل العقد غير الضرورية لضمان الاتصال أو التغطية من أجل إطالة مدة حياة الشبكة، كما في الشكل 2–10. لضمان التغطية الميدانية، يجب أن يظل المستشعر نشطاً في كل منطقة مربعة. يتم تعطيل العقد الأخرى، اقتراح [S. Misra, 2011] حل قادر على الحفاظ على تغطية الشبكة مع تقليل استهلاك الطاقة للشبكة عن طريق تنشيط مجموعة فرعية فقط من العقد، مع الحد الأدنى من مساحة التداخل. فكر [E. Karasabun, 2013] في مشكلة اختيار مجموعة فرعية من العقد المتصلة النشطة لجمع البيانات المرتبطة. يعد هذا مفيداً جداً في بعض التطبيقات مثل المراقبة البيئية، عندما تعتمد البيانات المُستشعرة على الموقع، حيث يمكن استنتاج بيانات العقد غير النشطة من تلك الخاصة بالعقد النشطة بسبب الارتباط المكاني. يقترح [A. Bachir, 2013] خوارزمية موزعة مخصصة لقياس درجة الحرارة تسمح لبعض العقد ديناميكياً بالانتقال إلى وضع السكون عندما تكون درجة الحرارة منخفضة (لأن جودة الروابط تتحسن) مع ضمان التغطية والاتصال. ولضمان التغطية الميدانية، يجب أن تظل العقد نشطة في كل منطقة مربعة. يتم تعطيل العقد الأخرى.



الشكل 2–10. مثال على طريقة التحكم في الطوبولوجيا المطبقة على الشبكة [S. Misra, 2011].

4.8.2 التوجيه الموفر للطاقة Energy-efficient routing

يعد التوجيه عبئاً إضافياً يمكن أن يستنزف احتياطيات الطاقة بشكل كبير وخاصة في أنظمة القفزات المتعددة، يتشكل الضغط على العقد الأقرب إلى المحطة القاعدية لأنه يتعين عليها توجيه المزيد من الرزم. ولذلك، فإن بطاريتهم تستنزف بشكل أسرع. فيما يلي، نناقش الآليات العامة لتوفير الطاقة لنماذج التوجيه المختلفة. لإجراء مراجعة موسعة لبروتوكولات التوجيه المراعي للطاقة.

تقوم **معماريات المجموعة Cluster architectures** بتنظيم الشبكة في مجموعات، حيث تتم إدارة كل مجموعة بواسطة عقدة محددة تعرف باسم رأس العنقود CH. يكون رئيس المجموعة مسؤولاً عن تنسيق

أنشطة الأعضاء والتواصل مع مراكز CH الأخرى أو المحطة القاعدية. تم اقتراح تقنيات عنقودية لتعزيز كفاءة الطاقة لأنها تساعد على الحد من استهلاك الطاقة عبر وسائل مختلفة:

1) تقلل من نطاق الاتصال داخل المجموعة مما يتطلب طاقة إرسال أقل،
2) تحد من عدد عمليات الإرسال بفضل الاندماج الذي يقوم به CH
3) تقلل العمليات كثيفة الاستهلاك للطاقة مثل التنسيق والتجميع لرأس العنقود،
4) تمكن من إيقاف تشغيل بعض العقد داخل المجموعة بينما يتولى CH مسؤوليات إعادة التوجيه.
5) تعمل على موازنة استهلاك الطاقة بين العقد عبر CH. تعمل البنى العنقودية أيضاً على تحسين قابلية توسيع الشبكة بالإضافة إلى كفاءة الطاقة، وذلك من خلال الحفاظ على التسلسل الهرمي في الشبكة في [Y. Liu, 2016].

الطاقة كمقياس توجيه :**Energy as a routing metric** يعتبر الحل الآخر لإطالة مدة حياة شبكات الحساسات هو النظر إلى الطاقة كمقياساً في مرحلة إعداد المسار. ومن خلال القيام بذلك، لا تركز خوارزميات التوجيه على أقصر المسارات فحسب، بل يمكنها تحديد الخطوة التالية بناءً على طاقتها المتبقية. قدم [Y. M. Lu, 2014] وظيفتين جديدتين. يمكن لوظيفة المسار المستندة إلى تابع التكلفة الأسية والجيبية (ESCFR Exponential and Sine Cost Function based Route) تعيين تغيير بسيط في الطاقة العقدية المتبقية إلى تغيير كبير في قيمة دالة التكلفة. من خلال إعطاء الأفضلية للعقد ذات الطاقة المتبقية العالية أثناء اختيار المسار، تقوم الوظيفة بفرض توازن الطاقة. يأخذ بروتوكول التوجيه القائم على تابع التكلفة المزدوجة (Double Cost Function based Routing DCFR) في الاعتبار معدل استهلاك الطاقة للعقد بالإضافة إلى الطاقة المتبقية. يعتبر الأساس المنطقي وراء ذلك هو أن العقد الموجودة في النقاط الساخنة لديها معدلات استهلاك عالية للطاقة. وبالتالي، فإن استخدام هذه الوظيفة يؤدي إلى تحسين أداء موازنة الطاقة لبروتوكول التوجيه، حتى في الشبكات التي بها عوائق.

التوجيه متعدد المسارات Multipath routing: تعد بروتوكولات التوجيه ذات المسار الواحد أبسط بشكل عام من بروتوكولات التوجيه متعددة المسارات، إلا أنها يمكن أن تستنزف طاقة العقد الموجودة على المسار المحدد بسرعة. في المقابل، يتيح التوجيه متعدد المسارات موازنة الطاقة بين العقد عن طريق تناوب العقد الموجهة. يكتشف بروتوكول التوجيه متعدد المسارات الموفر للطاقة (Energy-Efficient Multistage

Routing Protocol EEMRP) في [Y. M. Lu, 2007] مسارات متعددة منفصلة للعقدة باستخدام دالة التكلفة اعتماداً على الطاقة ومسافات الارسال وتخصيص معدل حركة المرور لكل مسار محدد. ينشئ بروتوكول الوصول إلى القنوات الموفرة للطاقة (Energy Efficient Channel Accessing EECA) لتخفيف التصادم بين عنوانين MAC للعقد طريقين منفصلين عن العقدة وخاليين من الاصطدامات بين المصدر والمحطة القاعدية. تعمل بروتوكولات التوجيه متعدد المسارات أيضاً على تحسين موثوقية الشبكة من خلال توفير مسارات متعددة، مما يمكّن الشبكة من التعافي بشكل أسرع من الفشل، بينما يجب إعادة حساب مسار جديد في أنظمة المسار الواحد، عندما تنفد طاقة العقدة، [Z. Wang, 2015].

وضع عقدة المناولة Relay node placement: يمكن أن يؤدي الاستنفاذ المبكر للعقد في منطقة معينة إلى تقسيم الشبكة أو إنشاء ثغرات في الطاقة. في بعض الأحيان، يمكن تجنب هذا الموقف بفضل الموضع الأمثل للعقد من خلال التوزيع المتساوي أو عن طريق إضافة عدد قليل من العقد ذات الإمكانات المحسنة. يساعد ذلك على تحسين توازن الطاقة بين العقد وضمان التغطية والاتصال. ركز [M. Younis, 2007] العديد من الأعمال على إيجاد الحد الأدنى لعدد عقد التتابع أو وضعها بالشكل الأمثل لإطالة مدة حياة الشبكة.

حركة المصب Sink mobility: تستنفد العقد الموجودة بالقرب من المحطة القاعدية في بنيات WSN التي تستخدم محطة قاعدة ثابتة، بطاريتها بشكل أسرع من العقد الأخرى، مما يؤدي إلى انقطاع الاتصال بالشبكة قبل الأوان. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن كل حركة المرور يتم توجيهها نحو المحطة القاعدية مما يزيد من عبء العمل على العقد الأقرب إلى المحطة القاعدية. لزيادة مدة حياة الشبكة، من الممكن موازنة الحمل بين العقد باستخدام محطة قاعدة متنقلة تتحرك حول الشبكة لجمع معلومات العقد. تعمل حركة المحطة القاعدية أيضاً على تحسين الاتصال في البنى المتفرقة وتعزيز الموثوقية لأن الاتصال يحدث بطريقة قفزة واحدة. وبالتالي، فإنه يقلل من التنافس والاصطدامات وفقدان الرسائل في [D. Dandekar, 2013].

5.8.2 الشحن Charging

تتناول العديد من الدراسات البحثية الحديثة تقنيات تجميع وتحصيل الطاقة والشحن اللاسلكي. كلاهما حلان واعدان يهدفان إلى إعادة شحن بطاريات العقد دون تدخل بشري.

حصاد الطاقة Energy harvesting: تم تطوير تقنيات جديدة لتمكين العقد من تجميع واستخلاص الطاقة من البيئة المحيطة بها مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحركية في [S. Sudevalayam, 2011]. يمكن للوحدات القابلة لإعادة الشحن بالمقارنة مع العقد التقليدية، أن تعمل بشكل مستمر، ومن الناحية النظرية، لمدة غير محدودة من الزمن. تقوم بتحويل الطاقة المحيطة إلى طاقة كهربائية ثم استهلاكها مباشرة أو تخزينها لاستخدامها لاحقاً. تتطلب معماريات حصاد الطاقة مخططات للتنبؤ بالطاقة من أجل إدارة الطاقة المتاحة بكفاءة، وتتطلب العقد تقديراً لتطور الطاقة لضبط سلوكها ديناميكياً لاستمرارها حتى دورة إعادة الشحن التالية. ومن ثم، يمكنهم تحسين المعلمات الحاسمة مثل معدل أخذ العينات، وطاقة الإرسال، ودورة الخدمة لتكييف استهلاكهم للطاقة وفقاً لدورية وحجم المصدر المراد التجميع منه. ومن المهم ملاحظة أن العقد تظل محدودة الطاقة بين فرصتين للحصاد، لذلك لا تزال بحاجة إلى تنفيذ آليات توفير الطاقة. يمكن للعقد التي تستخدم الألواح الشمسية لتجديد بطارياتها أن تعمل بشكل مكثف خلال النهار. تدخل العقد في الليل في الوضع المحافظ لاستخدام الطاقة المخزنة. يكون للعقد توزيع غير متساوٍ للطاقة المتبقية بسبب الاختلاف في كمية الطاقة المجمعة، ويجب أخذ ذلك في الاعتبار عند تصميم البروتوكولات، يتم تعيين فترات نوم أطول ونطاقات إرسال أقل للعقد ذات الطاقة المتبقية المنخفضة [P. Nintanavongsa, 2013]. في حين قد يتم تفضيل العقد ذات الطاقة المتبقية العالية عند اختيار مسار التوجيه.

الشحن اللاسلكي Wireless charging: تؤدي الأبحاث الحديثة في نقل الطاقة اللاسلكية إلى زيادة استدامة WSN وجعلها جاهزة للعمل بشكل دائم، حيث يمكن استخدام هذه التقنيات لنقل الطاقة بين الأجهزة دون الحاجة إلى أي اتصال بين المرسل والمستقبل. يمكن تحقيق الشحن اللاسلكي في WSN بطريقتين: الإشعاع الكهرومغناطيسي والاقتران بالرنين المغناطيسي يُظهر [L. Xie, 2013] أن تقنية الإشعاع الكهرومغناطيسي متعدد الاتجاهات قابلة للتطبيق على WSN ذات متطلبات طاقة منخفضة للغاية وأنشطة استشعار منخفضة (مثل درجة الحرارة والضوء والرطوبة). وذلك لأن الموجات الكهرومغناطيسية تعاني من انخفاض سريع في كفاءة الطاقة عبر المسافة، وقد تشكل تكنولوجيا الإشعاع النشط مخاوف تتعلق بالسلامة على البشر. في المقابل، يبدو أن الاقتران بالرنين المغناطيسي هو التقنية الواعدة لتلبية احتياجات الطاقة لشبكات WSN بفضل الكفاءة الأعلى في نطاق عدة أمتار. تطبيقات نقل الطاقة اللاسلكية في WSN

عديدة. وقد تم تطبيقه بالفعل لتشغيل العقد الطبية والأجهزة القابلة للزرع، لتجديد العقد المدمجة في الخرسانة بطريقة لاسلكية ولتشغيل عقدة أرضية من طائرة بدون طيار في البحث [B. Griffin, 2017]. ومن المفترض أن يسمح ظهور تقنية شحن الطاقة اللاسلكية بالتغلب على قيود الطاقة، حيث أصبح من الممكن الآن تجديد عناصر الشبكة بطريقة أكثر قابلية للتحكم. وبهذه الطريقة، قام بعض الباحثون بالفعل بالتحقيق في استخدام أجهزة الشحن المحمولة التي توفر الطاقة مباشرة للعقد المنتشرة كما في [K. Kaushik, 2013]. إن التعاون في مجال الطاقة الذي تثيره تقنيات الشحن اللاسلكي، حيث تكون العقد قادرة على تقاسم الطاقة بين الجيران. لذلك، في الشبكات اللاسلكية المستقبلية، ستقوم العقد بحصاد الطاقة من البيئة ونقل الطاقة إلى العقد الأخرى، مما يجعل الشبكة مكتفية ذاتياً. ومن أجل القيام بذلك، أظهرت الدراسات الحديثة جدوى نقل الطاقة متعدد القفزات، والتي تفتح آفاقاً جديدة لتصميم بروتوكولات الشحن اللاسلكي وأنظمة الطاقة التعاونية.

تم بذل العديد من الجهود لتحسين مدة حياة WSN من خلال مجموعة متنوعة من الآليات الموفرة للطاقة ويوجد ارتباط كبير بين كفاءة الطاقة ومتطلبات التطبيقات، لذا يجب تحسين مقاييس الأداء المختلفة معاً. تؤثر بروتوكولات التوجيه الموفرة للطاقة وأنظمة السكون/التنبيه بشكل مباشر على زمن وصول الشبكة. وبالمثل، فإن تحسين الراديو يستبدل جودة الإشارة بالحفاظ على البطارية، ويمكن أن تؤثر أساليب تقليل البيانات على دقة المعلومات المجمعة. إذا كانت تقنيات إعادة شحن العقد واعدة، فإن آليات توفير الطاقة تبقى ضرورية. نلخص آليات توفير الطاقة المختلفة ومتطلبات WSN التي تؤثر عليها بشكل مباشر في الجدول 2–5. يمكن أن نرى أن حلول التوجيه الموفرة للطاقة يمكنها تحسين المتانة باستخدام بروتوكولات التوجيه متعددة المسارات التي توفر مسارات بديلة في حالة فشل العقدة. قمنا بربط الجدولين 2–1 (الذي يمثل متطلبات التطبيقات) والجدول 2–5 (الذي يمثل الترابط بين الآليات الموفرة للطاقة والمتطلبات الأخرى) في الجدول 2–6، من أجل توضيح كيف يمكن استخدام بعض التقنيات الموفرة للطاقة في تطبيقات محددة لتحسين معايير متعددة بشكل مشترك. وفيما يلي مثال لشرح كيفية قراءة الجدول 6.2: في التطبيقات الزراعية، يمكن أن تؤثر مخططات السكون/التنشيط على التغطية باستخدام آليات التحكم في الطوبولوجيا. يمكن العثور على مبررات هذه العبارات في الجدول 2–5.

يعتبر تطوير حلول يمكنها تحقيق مفاضلة مرضية بين المتطلبات المتعددة وذلكً للترابط بين أهداف التصميم المختلفة.

9.2 بروتوكول التوجيه الهرمي للمجموعات التكيفية منخفضة الطاقة Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol

يعتبر LEACH بروتوكول التوجيه الهرمي للمجموعات التكيفية منخفضة الطاقة. الهدف الرئيسي من هذا البروتوكول هو الحفاظ على الحمل المتوازن بين جميع العقد. ويحافظ على التسلسل الهرمي من خلال الحفاظ على ثلاثة مكونات يطلق عليهم اسم المحطة القاعدية ورأس العنقود وعقد المجموعة. تستقبل المحطة المركزية المعلومات من جميع العقد وتستخدمها لمزيد من المعالجة. رأس العنقود هو العقدة التي تم اختيارها عشوائياً من بين العقد مع معايير عدم اختيارها أكثر من مرة كرأس عنقود. يتم الحفاظ على المعيار لتجنب التحميل الزائد لنفس العقدة مرة أخرى. بفضل قابليته المحدودة للتطوير، يختار رأس العنقود العقد الموجودة بداخله. تقوم المجموعة بذلك عن طريق إرسال رسائل الطلب إلى العقد المجاورة لها. تتم إضافة العقد التي ترسل إلى رأس العنقود الإقرار مرة أخرى إلى مجموعتها. تعمل العقد العنقودية على استشعار البيانات من مكان نشرها ونقلها إلى رأس العنقود، الذي ينتقل إلى وضع السكون. سينتظر رئيس المجموعة المعلومات من جميع العقد التي أضافها إلى شبكة المجموعة الخاصة به. بعد تلقي المعلومات، يبدأ رئيس المجموعة في تجميع المعلومات وإرسال المعلومات المجمعة إلى المحطة القاعدية تحدث مرحلتان في بروتوكول LEACH مرحلة الإعداد والحالة المستقرة. في مرحلة إعداد رأس العنقود، يتم اختيار عقدة المجموعة بواسطة رأس العنقود المعين. في مرحلة الحالة المستقرة، سيتم نقل المعلومات من العقدة إلى رأس النقود والبيانات المجمعة من رأس العنقود إلى المحطة القاعدية. يتميز البروتوكول LEACH هذا بعبء العمل المتوازن بين العقد، ونهج سهل وبسيط، وعملية معالجة اقتصادية وسهلة. العيب الرئيسي لهذا النهج هو أن العمل في رأس العنقود مثقل لأن سعته يجب أن تكون عالية بما يكفي لتلقي البيانات وإرسال تلك البيانات إلى المحطة القاعدية سوف يهدر رأس العنقود المزيد من الطاقة إذا كان بعيداً عن عقدة المحطة القاعدية يتم اختيار رأس العنقود بشكل عشوائي والذي قد لا يكون لديه طاقة كافية لاستقبال البيانات وتجميعها ونقلها إلى رأس العنقود إذا مات رأس العنقود، تفقد المعلومات التي تم جمعها بواسطة العقد بالكامل مما يؤدي إلى سوء إدارة الطاقة.

وقد تم توضيح الترابط بين الآليات اللموفرة للطاقة ومتطلبات التطبيقات في الجدول 2–5

الجدول 2–5. الترابط بين الآليات الموفرة للطاقة ومتطلبات التطبيقات [K Chen,2017].

آليات موفرة للطاقة		متطلبات المتأثرة	التبرير
تقليل المعلومات	التجميع، وأخذ العينات التكيفية المضغوطة	التأخير جودة الخدمة قابلية التوسع	• يمكن أن تعمل أساليب تقليل البيانات على تحسين زمن الوصول عن طريق تقليل كمية الرزم التي سيتم إرسالها، مما يقلل وقت الانتظار في قوائم الانتظار. • يمكن لهذه الطرائق تحسين جودة الخدمة عن طريق إعطاء أولوية أعلى لفئة معينة من البيانات عند أداء وظيفة التجميع أو عند أخذ عينات من المعلمات. • تعرض التقنيات خصائص جيدة لقابلية التوسع من خلال تقليل حمل حركة المرور.
مخططات النشاط والسكون	عامل الفعالية	المتانة	• يمكن لأنظمة دورة العمل التكيفية تكييف فترة السكون مع ظروف الشبكة لتحسين الوعي بالسياق. • يمكن استخدام التحكم في الطوبولوجيا لتعزيز تغطية الشبكة من خلال وصف كيفية مراقبة مجال التحسس. • يمكن لبروتوكولات MAC القائمة على TDMA تحقيق تأخير جيد في ظل حركة المرور العالية. • يمكن لبروتوكولات TDMA/CSMA MAC أن تعزز جودة الخدمة من خلال توفير فترات زمنية مضمونة للبيانات الدورية ذات المعدل العالي والفترات القائمة على التنافس لحركة المرور غير الدورية ذات المعدل المنخفض.
	السيطرة على طوبولوجيا	تغطية	
	بروتوكول MAC القائم على TDMA	تأخير	
	بروتوكول TDMA/CSMA MAC الهجين	جودة الخدمة	
تحسين الراديو	التحكم في قوة الإرسال	تغطية	• تؤثر تقنيات التحكم في قوة الإرسال والهوائيات الاتجاهية على التغطية من خلال ضبط نطاق الاتصال (واتجاهه)، وبالتالي اتصال العقدة. • تؤثر الاتصالات الراديوية الإدراكية والاتصالات التعاونية على جودة الإشارة من خلال اختيار القنوات الذكية وإعادة الإرسال التعاوني
	هوائي اتجاهي	التغطية، المتانة	
	الاتصالات التعاونية الراديو المعرفي الموفرة للطاقة	المتانة	
التوجيه الموفر للطاقة	هيكلية العقدة	قابلية التوسع	• تعمل البنى العنقودية على تحسين قابلية التوسع من خلال الحفاظ على التسلسل الهرمي في الشبكة. • تعمل بروتوكولات التوجيه متعددة المسارات على تعزيز المتانة من خلال توفير مسارات توجيه بديلة في حالة فشل العقدة. • يمكن لاستراتيجيات وضع عقدة التتابع التحكم في الاتصال بين العقد وتغطية الشبكة. • يمكن للمحطة القاعدية المتنقلة أن يحسن قابلية التوسع من خلال ربط الشبكات المتفرقة.
	التوجيه متعدد المسارات	المتانة	
	وضع عقدة التتابع	تغطية	
	محطة قاعدية متنقلة	التنقل وقابلية التوسع	

سينخفض مدة حياة رأس العنقود بمجرد أن يعمل كرأس وقد يتم استنفاذه بسرعة، وما إلى ذلك. نعرّف أولا عمليات الشبكة على أنها انتخاب رؤوس العناقيد وتحسين البيانات وإرسالها واستقبالها ويتم تقسيم عمليات الشبكة إلى جولات(Rounds) والجولة تعني فترة زمنية معينة يتم في بدايتها عمليات انتخاب جديدة لرؤوس العناقيد وتنتهي بوصول البيانات الى المحطة القاعدية. يلاحظ بأن بروتوكول LEACH يعتمد على قيمة عشوائية في انتخاب رأس العنقود وهو الأمر الذي لا يضمن الانتخاب بطريقة عادلة (الانتخاب حسب الطاقة المتبقية الأكبر) وبالتالي عدم استقرار في الشبكة حيث تتبدد طاقة بعض العقد بشكل مبكر وتستمر طاقة عقد أخرى لفترات أطول.

الجدول 2-6. التطبيقات والآليات الموفرة للطاقة [K Chen,2017].

	الرعاية الصحية	الزراعة وبيئة	صناعة	السلامة العامة والأنظمة العسكرية	أنظمة مواصلات
تخفيض بيانات	جودة الخدمة مع الضغط، أخذ العينات التكيفية	قابلية التوسع مع التجميع	جودة الخدمة وقابلية التوسع مع التجميع والضغط وأخذ العينات التكيفية		
مخططات النشاط والسكون	تأخير مع TDMA	تغطية مع التحكم في الطوبولوجيا	جودة الخدمة، تأخير مع التهجين TDMA/CSMA	المتانة مع التكيف مع معامل فعالية	تأخير مع TDMA
توجيه كفاءة الطاقة	جودة الخدمة مع طوبولوجيا نجمية 1-قفزة واتصالات	تغطية مع عقدة التتابع تحديد موقع قابلية التوسع محطة قاعدية متنقلة	المتانة التوجيه متعدد المسارات قابلية التوسع البناء العنقودي		تغطية مع عقدة التتابع تحديد موقع قابلية التوسع محطة قاعدية متنقلة

10.2 الخوارزميات الأمثلية في شبكات الحساسات اللاسلكية

لجأ الباحثون إلى حل مشكلات التحسين بشكل تقليدي باستخدام العديد من طرائق البرمجة الرياضية مثل البرمجة الخطية والبرمجة الديناميكية وأساليب نيوتن وغيرها. تعتبر خوارزميات البحث الإرشادية العليا (Metaheuristic search algorithm MSAs) من التقنيات الواعدة لحل مسائل اتخاذ القرار الأمثلي من خلال الاستفادة من آليات البحث المستوحاة من الظواهر الطبيعية المختلفة، كما تعد MSA بشكل عام أكثر مرونة وقدرة على الوصول إلى حلول شبه عامة (Global) لمسائل الأمثَلة المحددة بشكل أكثر كفاءة دون الحاجة إلى تعديلات جوهرية في هيكل الخوارزمية. ظهرت الاتجاهات في مجالات الذكاء الاصطناعي في العقود القليلة الماضية لتطوير MSA جديدة مع أداء بحث أمثلي لحل أنواع مختلفة من هذه المسائل.

اعتماداً على مصادر الإلهام المستخدمة لتوليد حلول جديدة، يمكن تقسيم MSA الحالية إلى أربع فئات رئيسية كما هو واضح في الجدول 2–7.

الجدول 2–7. الفئات الرئيسية لتقسيم MSA [P Mann,2017]

MSAs	اسم الخوارزمية
الخوارزميات التطورية	البرمجة التطورية (Evolutionary programming) الخوارزمية الوراثية (genetic algorithm) خوارزمية التطور المشتركة (co-evolving) البرمجة الوراثية (genetic programming) التطور التفاضلي (differential evolution) نموذج التطور البشري (human evolutionary model)
خوارزميات ذكاء السرب	عناصر السرب (Particle swarm optimization) مستعمرة النمل (ant colony optimization) مستعمرة النحل (artificial bee colony) خوارزمية اليراع (firefly algorithm)
الخوارزميات القائمة على الإنسان	خوارزمية Jaya أمثّلة التعلم- التعليم(teaching–learning based optimization) التطور الاجتماعي وأمثّلة التعلم (socio evolution and learning optimization)
الخوارزميات القائمة على الفيزياء	خوارزمية البحث الجاذبية (Gravitational search algorithm) المغناطيسية الكهربائية (electro-magnetism optimization) التفاعل النووي (nuclear reaction optimization)

1.10.2 خوارزمية اليراع Firefly

تم تقديم خوارزمية اليراع في عام 2008 بناءً على أنماط السلوك في الطبيعة. هذه الخوارزمية هي نوع من الخوارزميات الاسترشادية Metaheuristic، المستوحاة من الطبيعة، والتي تُستخدم في جميع طرائق ذكاء المجموعة (SI) تقريباً. تمت مناقشة التوجيه باستخدام خوارزمية Firefly في شبكات الحساسات اللاسلكية حيث تقوم العقد بالإعلان عن مقدار استهلاكها للطاقة في الشبكة، وتقارن كل عقدة الطاقة التي تم الحصول عليها مع طاقتها الخاصة بحيث يتم الحصول على مستوى الجذب تم وصف زيادة مدة حياة العقد في الشبكة في [X.-S. Yang, 2013] باستخدام خوارزمية Firefly في [S. Łukasik, 2009]. تعمل هذه الخوارزمية على موازنة طاقة العقد وتزيد من مدة حياة الشبكة. يتم التوجيه باستخدام شجرة لنقل البيانات المجمعة. في جميع الأعمال التي أجريت على خوارزمية Firefly، جميع العقد في الشبكة على دراية بمعلومات موقعها. يتم تقديم حل لإطالة مدة حياة الشبكة باستخدام رؤوس عناقيد متنقلة يمكن التحكم فيها في [Rong Hu, 2022]. يتم تحديد رأس العنقود بناءً على الطاقة المتبقية، ونسبة عدد الأعضاء في

نصف قطر المنطقة، وطاقة الإشارة المستقبلة. رُوّج في [X. Liu, 2020] لتقنية اختيار رأس العنقود في الشبكة باستخدام خوارزمية اليراع المتزامنة. في المرحلة التالية من التنفيذ، تمت مقارنة أدائها مع مجموعة LEACH والتكتل الهرمي الموفر للطاقة. كانت الطريقة المقترحة فعالة مع عدد أقل من الرزم المفقودة وزيادة كفاءة الطاقة. على الرغم من أن PSO تحقق حلولاً أفضل لوظائف الاختبار المختلفة لتحسين الوسائط المتعددة من خوارزمية GA firefly فهي متفوقة على كل من PSO وGA من حيث الكفاءة ومعدل النجاح. وتتفوق خوارزمية اليراع في مهام التحسين المقيدة المستمرة عند مقارنتها بـ PSO

يعتمد FA في الأساس على الافتراضات الثلاثة التالية: (1) جميع اليراعات وحيدة الجنس. (2) الجاذبية تتناسب مع سطوعها، مما يعني أن اليراع الأقل سطوعاً ستنتقل إلى اليراع الأكثر سطوعاً. (3) ستستمر اليراع في التحرك بشكل عشوائي إذا لم يتم العثور على يراع أكثر سطوعاً في السرب، يمكن تمثيل سطوع اليراع كمقلوب قيمة دالة الهدف لمشكلة تحسين معينة. بالتالي يتناسب سطوع اليراع عكسياً مع قيمة الدالة، يقترب اليراع ذو الدليل i الاقل سطوعاً إلى اليراع ذو الدليل j الاكثر سطوعاً وفق العلاقة التالية [science/firefly-algorithm, 2022]

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i + \beta_0 e^{-\gamma|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}\left(\mathbf{r_j} - \mathbf{r_i}\right) + \alpha(rand - 0.5) \qquad (7-2)$$

حيث β_0 : هذا البارامتر يحدد قوة الجذب بين اليراعات. كلما كان β_0 أكبر، كان الجذب بين اليراعات أقوى

γ: هذا البارامتر يحدد مدى الرؤية بين اليراعات. كلما كان γ أكبر، كان مدى الرؤية أصغر وبالتالي الجذب بين اليراعات أقل.

α: هذا البارامتر يحدد قوة العامل العشوائي في الخوارزمية. كلما كان α أكبر، كان التنقل العشوائي لليراع أكبر.

$\mathbf{r_i}$: موقع اليراع الحالي. $\mathbf{r_j}$: موقع اليراع الأكثر إضاءة.

rand: قيمة عشوائية بين 0 و 1. $\left|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\right|$ المسافة الفاصلة بين اليراعين i و j.

السكان الأصلي هو مجموعة اليراعات العشوائية التي يتم إنشاؤها في البداية.

خلال كل تكرار (iteration) من الخوارزمية، يتم تقييم كل يراع في السكان وتحديث مواقعها وفقًا لمعادلة الحركة التي تعتمد على البارامترات β_0 و γ و α.

يتم اختيار أفضل يراع (أو مجموعة من اليراعات) في السكان كأساس لتوليد جيل جديد من اليراعات في التكرار التالي.

يتم تكرار هذه العملية من توليد سكان جديدة وتقييمها واختيار الأفضل منها حتى يتم الوصول إلى الحل الأمثل أو استيفاء شرط التوقف. إذن السكان هي مجموعة الحلول المرشحة التي تتطور عبر التكرارات المتعاقبة للخوارزمية باستخدام آليات الجذب والتحرك العشوائي التي تعتمد على قيم البارامترات المختلفة. وللسكان دورًا محوريًا في آلية البحث والتطوير التي تقوم عليها خوارزمية FA. في خوارزمية اليراع، السرب Swarm هو المجموعة الكاملة من اليراعات Fireflies التي تتفاعل مع بعضها البعض وتتحرك داخل فضاء البحث عن الحل الأمثل.

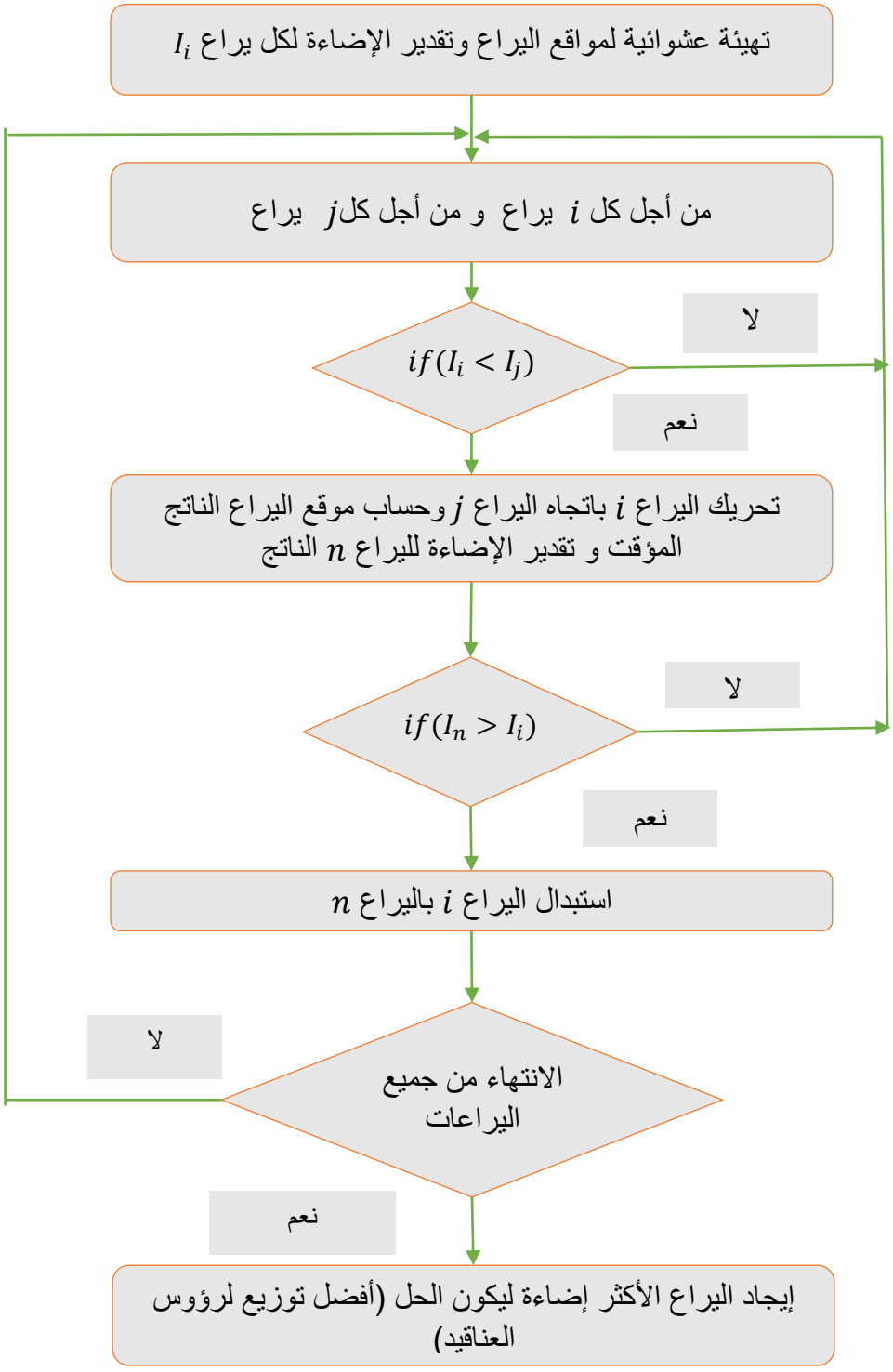
الفرق بين السكان والسرب:

1. السكان Population: هي مجموعة محدودة من اليراعات (الحلول المرشحة) التي يتم تقييمها وتطويرها في كل تكرار من الخوارزمية.

2. السرب Swarm: هو المجموعة الكاملة من جميع اليراعات الموجودة في فضاء البحث، بما في ذلك تلك التي لم يتم اختيارها للسكان في التكرار الحالي.

بمعنى آخر: السكان هي مجموعة محدودة من الحلول المرشحة التي يتم التعامل معها في كل تكرار.

لمعالجة مشاكل الأمثلة واسعة النطاق مع تعزيز التنوع السكاني. تم تقسيم الأفراد



الشكل 2–11. المخطط التدفقي لخوارزمية اليراع [A Idrees,2023].

– السرب هو المجموعة الكاملة من جميع الحلول الممكنة (اليراعات) في فضاء البحث.

خلال تنفيذ خوارزمية اليراع، يتم تحديث مواقع اليراعات في السكان بناءً على تفاعلاتهم مع باقي اليراعات في السرب ككل، وفقًا لمعادلات الحركة التي تعتمد على البارامترات المختلفة.

يمكن استخدام منظورات متعددة وطرائق مختلفة لزيادة مدة حياة WSN بافتراض أن شبكة الحساسات اللاسلكية تتألف من L عقدة و N_{CH} رأس عنقود. اختيار رؤوس العناقيد هي مهمة خوارزمية اليراع بحيث يتكون السرب من N يراع. يتألف اليراع من N_{CH} عقدة هي رؤوس العناقيد، حيث يعتر كل يراع هو حل للمسألة. تعمل الخوارزمية وفق الخطوات المخطط التدفقي المبين بالشكل 2–11.

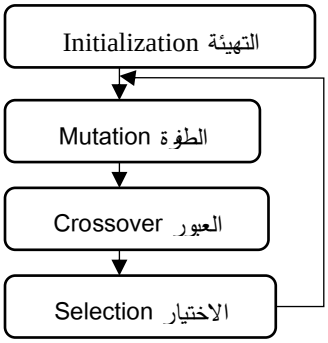
2.10.2 خوارزمية التطور التفاضلي Differential Evolution

تمتاز خوارزمية التطور التفاضلي DE بإمكانية تعزيز قدرة البحث المحلي عن طريق الحفاظ على تعدد السكان، والسبب هو أن DE لا يتطلب الكثير من الضبط الدقيق لمعامل معدل التقاطع. على العكس من ذلك، لا تضمن حلاً مثالياً لأن التقارب غير مستقر في الحل المحلي الأمثل [Nathan S, 2022].

أُقترحت في [S. Dash, S.Mishra, 2022]، خوارزمية DE مع مجموعة متعددة السكان وفق استراتيجيات الطفرات

إلى مجموعات فرعية متعددة، حيث قُدم مخطط طفرات جديد لإنتاج حلول جيدة النوعية من خلال استخدام معلومات لأفضل الأفراد أو أي أفراد يتم اختيارهم عشوائياً من طوبولوجيا سكانية معينة. على الرغم من الأداء الجيد لهذه الخوارزمية في حل المسائل واسعة النطاق، إلا انه تم الحصول على إعدادات المعلمات من خلال عملية الضبط اليدوي بدلاً من تلك التكيفية.

يتكون الإطار العام لخوارزمية التطور التفاضلي الأساسية من أربع مراحل، وهي التهيئة، الطفرة، التقاطع والاختيار. التهيئة هي عملية لمرة واحدة، بينما يتم تكرار الآليات الثلاث المتبقية في عملية البحث لـ DE في فضاء الحلول المكون من D– بُعد حتى يتم استيفاء المعايير المطلوبة، يبين الشكل 2–12. المخطط العام لخوارزمية DE. يمكن تلخيصها كالتالي:



الشكل 2−12. مخطط صندوقي لخوارزمية DE الأساسية [S D L,2023].

- التهيئة: هي العملية الأولى التي تحدث في DE للبحث عن حل أمثلي (فرد من المجتمع) عام مكون من D بُعد لفضاء المعلمات الحقيقية، يكون الحل الفردي في DE كشعاع على الشكل التالي:

$$X_i = \left(X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}\right) \qquad (8-2)$$

- الطفرة: من الناحية البيولوجية، يتم تعريف الطفرة على أنها تغيير في الخاصية. تُعتبر الطفرة عملية اضطراب عشوائي يتم إجراؤها على متغيرات القرار المختارة. يتم تحديد الجيل القادم في فلسفة DE (التكرار k) [https://arabdars.com/product,2020]

$$Y_i^k = X_i^k + F\left(X_{r2}^k - X_{r3}^k\right) + F\left(X_{r4}^k - X_{r5}^k\right) \qquad (9-2)$$

حيث i هو مؤشر السكان لحل DE المحدد كشعاع أساسي، وr_2،r_3،r_4،r_5 هي المؤشرات السكانية لحلول DE التي تم اختيارها عشوائياً لبناء فرد (شعاع) متحول. حيث$r_5 \neq r_4 \neq r_3 \neq r_2 \neq$. $r_1 \neq i$،

F (معامل الضبط): هذا البارامتر يحدد مقدار التغيير في الجيل الجديد. يجب اختيار قيمة F بعناية، حيث أن التجربة أظهرت أن القيم الأفضل تتراوح بين 0.4 و 0.95. القيمة الأولية الملائمة هي بين 0.7 و0.9.

X_i^k: هذا هو الفرد (الحل) الحالي في الجيل الحالي k.

$\left(X_{r2}^k, X_{r3}^k, X_{r4}^k, X_{r5}^k\right)$ هذه هي أفراد (حلول) عشوائية مختارة من السكان الحالية في الجيل k. هذه الأفراد تستخدم لتوليد الفرد الجديد Y_i^k

- العبور: في هذه المرحلة، يَعبُر كل من الهدف والأفراد الطافرة مكوناتها معاً بطريقة احتمالية لإنتاج شعاع تجريبي. يتم التحكم في مخطط العبور المنتظم بواسطة معدل عبور (Crossover Rate CR) له قيمة بين $[0,1]$. يمكن تحديد الحل التجريبي الناتج عن العبور على النحو التالي:

$$Z_i^k = \begin{cases} Y_{i,j}^k \ if \ rand_{i,j}[0,1] \leq CR \ or \ j = n \\ X_{i,j}^k \qquad otherwise \end{cases} \qquad (10-2)$$

حيث $rand_{i,j}$ هو رقم عشوائي يقع في المجال $[0,1]$ و $n \in \{1,2, \dots, D\}$ هو مؤشر بُعد تم اختياره عشوائياً لضمان مكون واحد على الأقل من مكونات الحل التجريبي Z_i^k موروث من الفرد المانح $Y_{i,j}^k$.

- الاختيار: تُمكّن عملية الاختيار DE من تحديد بقاء الحل المستهدف (الأصل) أو التجريبي (النسل) في التكرار التالي X_i^{t+1} لعملية البحث مع الاحتفاظ بحجم السكان لـ DE في كل جيل. بمجرد تكوين المجتمع الجديد في الجيل التالي. يتم وصف عملية اختيار DE رياضياً على النحو التالي:

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} Z_i^k \ if \ \ f(Z_i^k) \leq f(X_i^k) \\ X_i^k \qquad otherwise \end{cases} \qquad (11-2)$$

حيث $f(.)$ هي عامل يستخدم لتحديد التابع الهدف أو قيمة الملاءمة لحل فردي. إذا كان أحدث فرد تجريبي لـ Z_i^k ينتج قيمة تابع هدف أفضل، فسيتم استبدال الفرد المستهدف الحالي X_i^k بواسطة Z_i^k في التكرار التالي. يظهر في الشكل 2−13. المخطط التدفقي لخوارزمية التطور التفاضلي المستخدمة في تحديد رؤوس العناقيد في الشبكة.

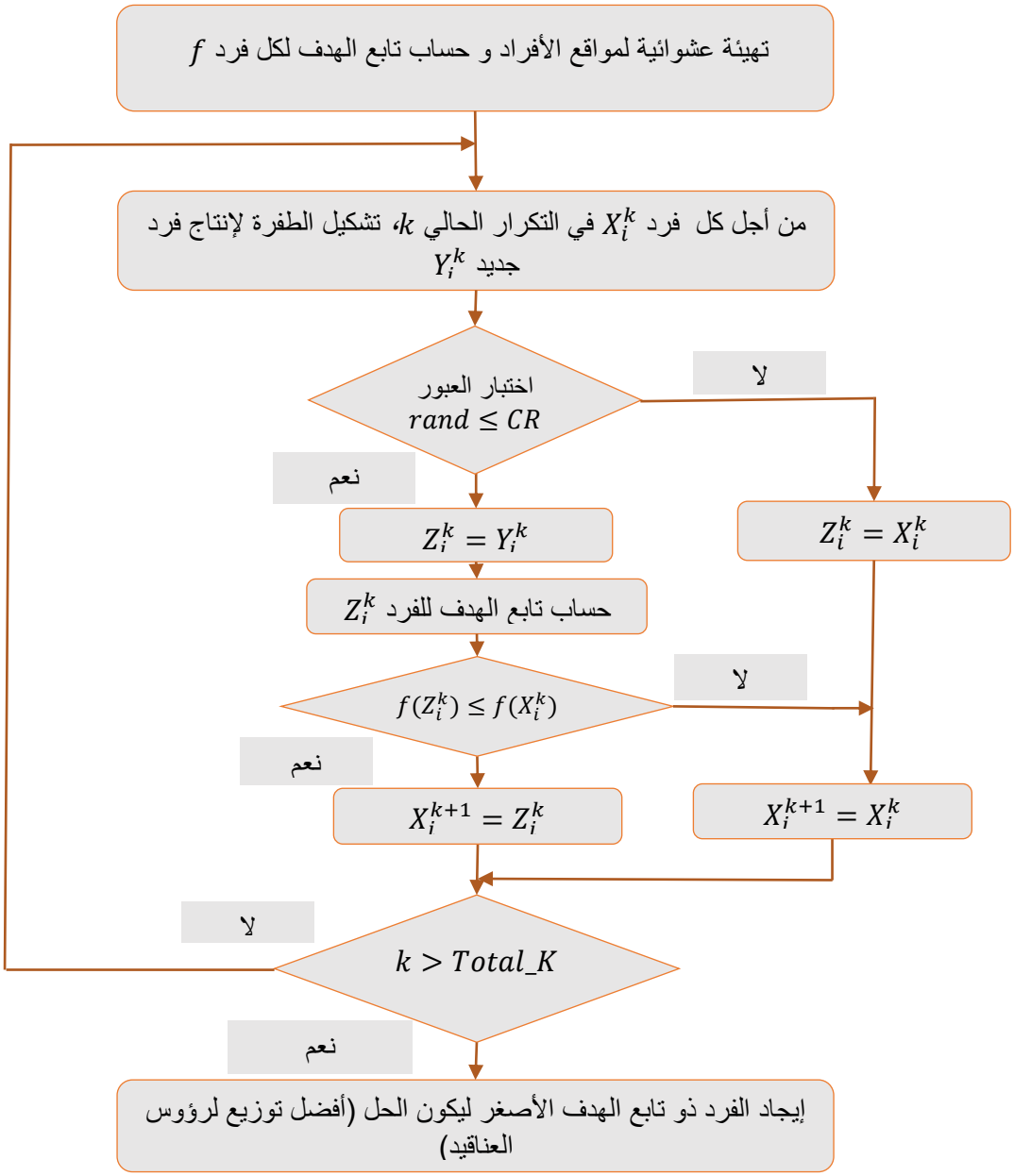
هناك فرق بين مفهومي السكان والأبعاد في خوارزمية التطور التفاضلي:

السكان [https://hiragate.com/22569]

السكان هي مجموعة الأفراد (الحلول) التي تتطور عبر الأجيال. يتم اختيار هذه الأفراد العشوائية من السكان الحالية وتستخدم في معادلة التطور لتوليد الفرد الجديد في الجيل التالي. هذه السكان تمثل مجموعة الحلول المرشحة والتي تتطور عبر الأجيال باستخدام خوارزمية التطور التفاضلي.

الأبعاد

الأبعاد في خوارزمية التطور التفاضلي تشير إلى عدد المتغيرات أو المكونات التي يتكون منها كل فرد (حل) في السكان.



الشكل 2–13. المخطط التدفقي لخوارزمية DE [S D L,2023].

يتم اختيار مقطع من المتجهة (الفرد) يتكون من عدد من المكونات المتتالية يبدأ عشوائيًا من المكون k.

إذن، السكان تمثل مجموعة الحلول المرشحة، بينما الأبعاد تشير إلى عدد المتغيرات أو المكونات التي يتكون منها كل حل في السكان. يتم التعامل مع هذه الأبعاد في معادلة التطور لتوليد أفراد جديدة في الأجيال اللاحقة.

تكون المهام الموكلة لخوارزمية التطور التفاضلي في شبكة الحساسات اللاسلكية التي تتألف منL عقدة و N_{CH} رأس عنقود، هي اختيار رؤوس العناقيد بحيث يتكون المجتمع من N فرد، ويتألف الفرد من N_{CH} عقدة هي رؤوس العناقيد، حيث يعتر كل فرد هو حل للمسألة.

2-11 خلاصة الفصل الثاني

شهدنا في العقد الماضي انتشاراً لمجالات التطبيق المحتملة لـ WSN. وتشمل هذه التطبيقات، على سبيل المثال لا الحصر، الإشراف على الرعاية الصحية الحيوية، والزراعة الدقيقة واسعة النطاق، ومراقبة العمليات الصناعية الموجهة نحو الأمان، وأنظمة الشبكة الذكية على مستوى الدولة. في هذا الفصل، تم عرض مسح للتطورات الحديثة في تطوير حلول موفرة للطاقة لشبكات WSN مع الأخذ في الاعتبار متطلبات التطبيق. أولاً تصنيف تطبيقات WSN المختلفة ومتطلباتها المحددة. ثم تصنيف جديد لخطط الحفاظ على الطاقة ومن ثم تحليلاً شاملاً لكيفية تأثير هذه التقنيات على أداء التطبيقات. أخيراً تم مراجعة بعض الأساليب الحالية التي تسمح بتحقيق المفاضلة بين المتطلبات المتعددة لشبكات تحسس فعالة ومستدامة. بالإضافة إلى مقدمة عن الخوارزميتين اليراع والتطور التفاضلي ومقدمة عن بروتوكول LEACH.

الفصل الثالث

التنفيذ العملي والنتائج

Implementation and Results

ستعرض الفصل الثالث التنفيذ العملي والنتائج Implementation and Results، وسيناريوهات الإجراء العملي المختلفة وتوضيح النتائج التي تمّ الحصول عليها ومناقشتها. يشمل هذا الفصل نتائج وتحليل السيناريوهات المختلفة، حيث جرى دراسة ونمذجة كل من خوارزمية FA وخوارزمية DE في WSN ومن ثم استخدام التقسيم الاقليدي لمنطقة الحقل المراقب مع خوارزمية FA ومن ثم نمذجة الخوارزمية الهجينة بين FA وDE ومقارنتها مع الخوارزميات السابقة (FA – DE – وFA باستخدام التقسيم الاقليدي) ودراسة أداء هذه الخوارزميّة المقترحة في تحسين أداء الشبكة ومقارنة النتائج مع نتائج بعض الدراسات السابقة.

1.3 بيئة العمل

1.1.3 عتاديات العمل

تم تنفيذ المحاكاة في بيئة الماتلاب MATLAB الإصدار 2022

MATLAB هي لغة برمجة متعددة النماذج وبيئة حوسبة رقمية تم تطويرها بواسطة MathWorks

ويسمح MATLAB بمعالجة المصفوفات، وتخطيط الوظائف والبيانات، وتنفيذ الخوارزميات، وإنشاء واجهات المستخدم، والتفاعل مع البرامج المكتوبة بلغات أخرى.

MATLAB عبارة عن بيئة ولغة برمجة مستخدمة على نطاق واسع وغنية بالميزات، مع إمكانات تدعم تطوير البرامج الأكاديمية والمهنية.

فيما يلي النقاط الأساسية حول استخدام MATLAB لتصميم ومحاكاة شبكة الحساسات اللاسلكية WSN:

MATLAB هي أداة تستخدم على نطاق واسع لتصميم ومحاكاة WSN. وهو يوفر إمكانيات للنمذجة والتحليل وتقييم أداء أنظمة .WSN

تتضمن بعض أدوات محاكاة WSN الرئيسية المعتمدة على MATLAB OMNET+ وTOSSIM وSensorSim. تتيح هذه الأدوات للمستخدمين تصميم جوانب مختلفة من WSN مثل سلوك العقدة وطوبولوجيا الشبكة وبروتوكولات الاتصال.

يمكن ربط MATLAB بمنصات الأجهزة مثل Arduino لتنفيذ واختبار نماذج WSN الأولية. يوفر MATLAB أدوات تعتمد على واجهة المستخدم الرسومية لتصميم وتقييم أداء WSN، بما في ذلك جوانب مثل التغطية والاتصال واستهلاك الطاقة.

استخدم الباحثون MATLAB لتصميم WSN المختلفة والخوارزميات ومبادئ جمع البيانات. تتيح مرونة MATLAB إمكانية إنشاء نماذج أولية سريعة واختبار مفاهيم WSN الجديدة.
باختصار، يعد MATLAB أداة متعددة الاستخدامات ومعتمدة على نطاق واسع لأبحاث WSN وتصميمها ومحاكاتها، مما يسمح للمستخدمين بتصميم أنظمة WSN وتحليلها وتنفيذها.
تم في الاطروحة استخدام حاسب بالخصائص التالية:
(Intel® Core™ i7-6500U)، 8 غيغا رام ويعمل بنظام النوافذ ويندوز 10.

2.1.3 مقاييس الأداء

يمكن استخدام مقاييس أداء متعددة لتقييم أداء WSN في عمليات المحاكاة التجريبية. أحد المقاييس الأساسية هو العمر التشغيلي للشبكة (مدة حياة). يتم تعريف مدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية عادةً على أنه الفاصل الزمني من بداية تشغيل الشبكة، إلى الوقت الذي "يموت" فيه عدد من العقد الحرجة (أي استنفاد إمدادات الطاقة للعقد الحرجة إلى الحد الذي لم تعد فيه الشبكة مفيدة). تم استخدام عدد من التقنيات المختلفة في الأدبيات لتقييم مدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية يتم تعريف مدة حياة شبكة الحساسات اللاسلكية على أنه الحد الأدنى من

i) الزمن الذي تنخفض فيه النسبة المئوية للعقد الحية (أي العقد التي لم يتم استنفاد بطارياتها) إلى ما دون عتبة محددة يتم تحديدها تبعاً لمتطلبات التطبيق.
ii) الزمن الذي ينخفض فيه عدد العقد المتصلة بالشبكة إلى ما دون عتبة محددة وفي حالة الدراسة 10% من العقد خرجت من الخدمة.
iii) الزمن الذي تنخفض فيه التغطية عن حد معين.

يركز الباحثون بشكل عام على التغطية ويعتبرون مدة حياة الشبكة هو الفترة التي يمكن خلالها تغطية المنطقة بأكملها (الوقت الذي لم تعد فيه بعض العقد قادرة على توجيه بياناتها إلى المحطة القاعدية) استخدم بعض الباحثين نسبة الشحن وتسليم الرزم المقيسة لتقييم مساهمتهم في جمع البيانات. يتم استخدام حمل إعادة التوجيه العادي لرؤية حمل البيانات الذي تم إنشاؤه للعثور على التوجيه.

- **فترة الاستقرار** :Stability period هو الزمن الفاصل بين زمن بدء عمل الشبكة حتى زمن موت أول عقدة فيها، وتعتبر بعض التطبيقات الحرجة أن مدة حياة الشبكة يتم تمثيله بهذه الفترة فقط.

- **فترة عدم الاستقرار** :Period of instability هو الزمن الفاصل بين زمن موت أول عقدة حتى زمن موت آخر عقدة فيها، وكلما كانت فترة الاستقرار أكبر وفترة عدم الاستقرار أصغر كانت الموثوقية أكبر.
- **عدد العقد الحية** :Number of Alive nodes هو عدد الحساسات التي لم تفقد كامل طاقتها .
- **عدد العقد الميتة** :Number of dead nodes هو عدد الحساسات التي فقدت كامل طاقتها وأصبحت غير قادرة على القيام بالوظيفة المنوطة بها.
- **النسبة المئوية للتغطية:** هي نسبة مئوية لتغطية العقد من المساحة الكاملة للمنطقة المراد مراقبتها
- **كمية البيانات المستلمة في المحطة القاعدية:** هي النسبة ما بين كمية البيانات المستلمة في المحطة القاعدية إلى كمية الطاقة المستهلكة لتسليمها

2.3 نمذجة خوارزميات اليراع والتطور التفاضلي (FA – DE)

في هذا القسم يتم مناقشة نموذج الشبكة. باعتبار أن الشبكة تتكون من $L = 100$ عقدة الحساسات المختلفة التي يمكنها تحسس المعلومات ومراقبتها والحصول عليها ويتم نشرها بشكل منتظم داخل منطقة 400×400 م^2. وتتوضع المحطة القاعدية في المركز. يتم وضع الافتراضات التالية لنمذجة الشبكة.

- جميع العقد في الشبكة ثابتة ومقيدة بالطاقة، يمكن لكل عقدة أداء مهام الحساسات بشكل دوري ولديها دائماً البيانات اللازمة لنقلها إلى المحطة القاعدية.
- يمكن وضع محطة قاعدة ثابتة داخل أو خارج مجالات تحسس الشبكة.
- جميع العقد قادرة على تغيير طاقتها المرسلة.
- جميع العقد مؤهلة للعمل إما في جمع المعلومات أو كرأس عنقود.
- يعتمد اتصال البيانات على القفزة الواحدة.

تابع الهدف المعتمد يتألف من جزأين، الأول يتعلق بالمسافة بين العقد ورأس العنقود الموافق من جهة، والمسافة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية. الجزء الثاني مرتبط بطاقة العقد وطاقة رؤوس العناقيد

[S.M. Hosseini, *et al*., 2019]:

$$f_1 = \min\left(\frac{\sum_{CH} dis(CH, Node_{in}CH)}{Number_{of}Node_{in}CH} + dis(CH, BS)\right) \quad (1-3)$$

$$f_2 = \frac{\sum_{Node} E_{Node}}{\sum_{CH} E_{CH}} \quad (2-3)$$

يعبر التابع f_1 عن المسافة المتوسطة بين العقد ورأس العنقود الموافق مضافاً إليه المسافة بين رأس العنقود والمحطة القاعدية. يجب أن يكون هذا التابع أصغر مايمكن. بينما يعبر التابع f_2 عن نسبة الطاقة لجميع العقد إلى طاقة جميع رؤوس العناقيد. ويجب أن تكون هذه النسبة أصغر ما يمكن. ومنه يكون التابع الهدف كالتالي:

$$f = \gamma f_1 + (1-\gamma) f_2 \quad (3-3)$$

- تم إجراء نمذجة لكل من خوارزمية FA وخوارزمية DE على التوالي ومقارنة النتائج. بداية سيتم بناء نموذج حاسوبي لخوارزمية FA واستخدامه ضمن WSN لمحاولة تبيان مدى تأثر مدة حياة الشبكة عند استخدام هذه الخوارزمية وآلية موت العقد سيتم تنفيذ الخوارزميتين (FA – DE) وفق موسطات المحاكاة المبينة في الجدول 3–1. يبين الشكل 3–1. توزع العقد بشكل منتظم على كامل المنطقة على شكل دوائر، ورؤوس العناقيد على شكل نجوم والمحطة القاعدية على شكل مثلث. تم اعتماد قيمة $\gamma = 0.5$ في تابع الهدف.

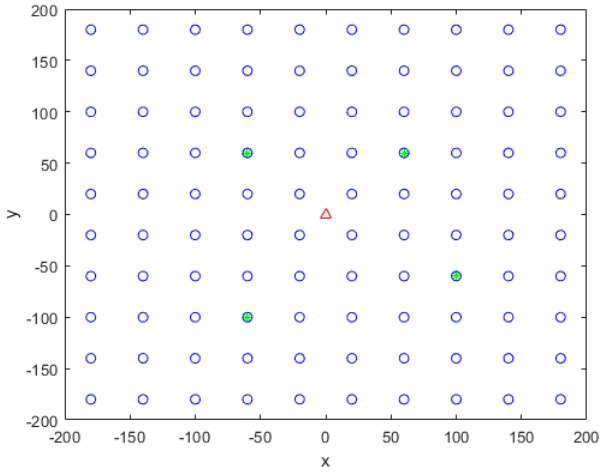
1.2.3 نمذجة خوارزمية اليراع FA

تم اعتماد القيم التالية في إنشاء الخوارزمية: حجم السرب 20 يراع، $\beta_0 = 0.01, \alpha = 30$. عدد الجولات 2500، وبالأخذ بعين الاعتبار قيم الطاقة الأولية التي تمتلكها جميع العقد بشكل متساوي وذلك باستخدام المعادلة (2–7). يوضح الجدول 3–1 القيم المعتمدة للموسطات أثناء إجراء المحاكاة.

الجدول 3–1.القيم المعتمدة في إجراء المحاكاة [اغلب المراجع]

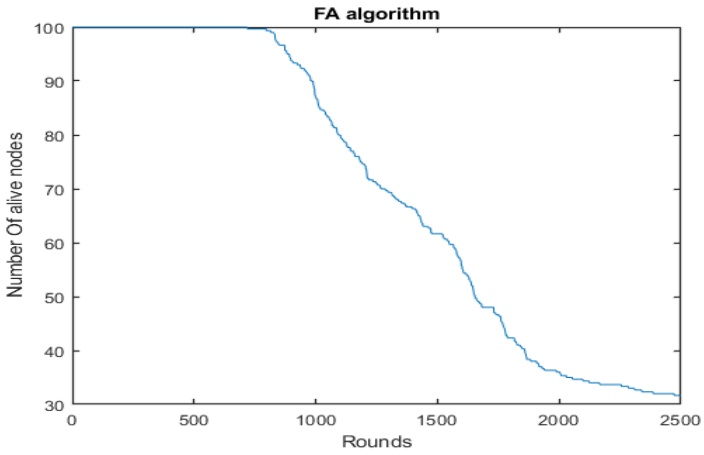
الموسطة	القيمة
مستوى الطاقة الابتدائية لكل عقدة	3 J
عدد العقد	100
عدد العناقيد	4
المساحة	400*400 m^2
كمية استهلاك الطاقة خلال كل إرسال	50 nj/bit
توزيع العقد	منتظم
التموضع	ثابت
efs طاقة التضخيم في حالة فضاء حر	10×10^{-12}
eamp طاقة التضخيم في حال متعدد المسارات	0.0013×10^{-12}
E_elec الطاقة الالكترونية	50×10^{-9}
عدد البيتات في الأطار	500×8 + 25×8

تم رسم توزع العقد بشكل منتظم مع تموضع ثابت. كما يبين الشكل 3–1.



الشكل 3–1. توزع العقد بشكل منتظم على كامل المنطقة. [الباحث]

يوضح الشكل 3–2 عدد العقد الحية مع تغير عدد الجولات لخوارزمية اليراع FA

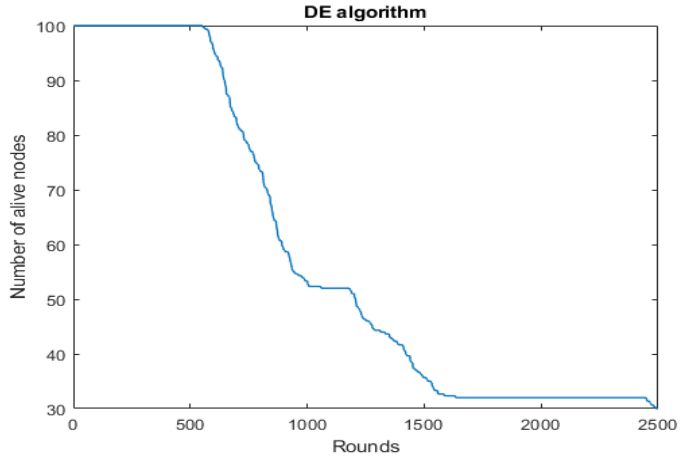


الشكل 3-2. عدد العقد الحية في الشبكة بدلالة الجولات في خوارزمية FA. [الباحث]

نلاحظ من الشكل 3-2 ان عدد العقد الحية تبقى حتى الجولة 820 وذلك وفق خوارزمية اليراع لان الاختيار الأمثل لرؤوس العناقيد ساعد على ذلك

2.2.3 نمذجة خوارزمية التطور التفاضلي DE

تم اعتماد القيم التالية في خوارزمية DE: حجم المجتمع السكاني 30 فرد، $F = 0.5, CR = 0.5$ وعدد الجولات 2500، وعدد التكرارات 30 تم رسم عدد العقد الحية كتابع لعدد الجولات كما يظهر في الشكل 3-3.

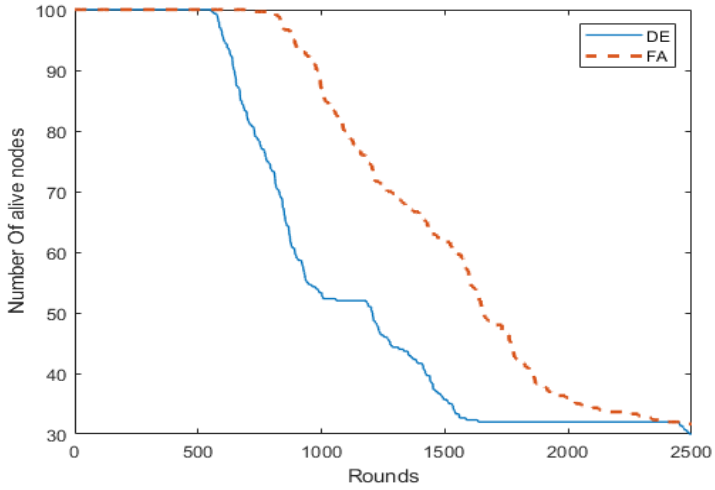


الشكل 3-3. عدد العقد الحية في الشبكة بدلالة الجولات في خوارزمية DE. [الباحث]

نلاحظ من الشكل3-3 ان عدد العقد الحية حافظ على العدد الكامل خلال 580 جولة وذلك عند استخدام خوارزمية التطور DE.

3.2.3 مقارنة بين الخوارزميتين

بعد تنفيذ المحاكاة ونمذجة خوارزمية FA وDE كل منهما على حدا، تم رسم أدائهما على شكل واحد للمقارنة الشكل 3–4. نجد من الشكل أن أداء خوارزمية FA في الحالة التي عالجناها أفضل من أداء خوارزمية DE في الحفاظ على العقد الحية في الشبكة اللاسلكية لأطول فترة ممكنة عبر اختيار رؤوس العناقيد بالشكل الأفضل. يبين الجدول 3–2 عدد العقد الحية لكل من الخوارزميتين مع الجولات.



الشكل 3–4. مقارنة بين DE –FAعدد العقد الحية بدلالة الجولات [الباحث]

إن الزمن الذي تستغرقه خوارزمية FA للقيام بعملية تقدير أمثلي واختيار رؤوس العناقيد 250 ميلي ثانية، بينما تستغرق خوارزمية DE 350 ميلي ثانية لنفس المعلمات، كما أن خوارزمية FA حافظت على عدد عقد تعمل حتى الجولة 820 في حين أن خوارزمية DE بدأت العقد بالموت عند الجولة 580.

الجدول 3–2.عدد العقد الحية المتبقية بدلالة تغير الجولات لخوارزمية FA وخوارزمية DE [الباحث]

عدد الجولات	عدد العقد الحيَّة المتبقية	
	DE	FA
500	100	100
1000	53	85
1500	36	61
2000	33	34
2500	31	31

مما تم ذكره ومن خلال مقارنة النمذجة بين خوارزمية DE وخوارزمية FA يُلاحظ التالي: تتفوق خوارزمية FA على خوارزمية DE في إطالة مدة حياة الشبكة اللاسلكية عبر توفير الطاقة المستهلكة في العقد الأمر الذي يقلل من عدد العقد غير الفعالة. يعود ذلك إلى أنه في خوارزمية FA، اليراع الأقل إضاءة (حل غير

جيد) يقترب من اليراع الأكثر إضاءة (حل أفضل) وهو ما يولد حل أفضل من أحدهما على الأقل، بينما في خوارزمية DE يكون إنتاج فرد جديد (حل جديد) بين أي أبوين بغض النظر عن جودتهما. بالإضافة إلى ذلك تتغلب خوارزمية FA في سرعة الوصول إلى الحل الأمثل لتوزيع رؤوس العناقيد في الشبكة. يعتمد ذلك إلى أنه في خوارزمية FA، لا يحدث اقتراب يراع من آخر إلا إذا كان أقل إضاءة منه، بينما في خوارزمية DE، يتم إنتاج الجيل الجديد من الأفراد على عدد التكرارات المفترضة. يظهر الجدول 3-3 مقارنة بين الخوارزميتين FA- DE من حيث الأداء وزمن التنفيذ والتعقيد وعدد المدخلات والأجيال والدقة والاستقرار كما وجد ان زمن التنفيذ اسرع في تنفيذ خوارزمية اليراع لانه يتم قياس اضاءة كل يراع في البداية ومقارنتهم لمرة واحدة مما ساعد على تقليل فترة تنفيذ الخوارزمية مقارنة بخوارزمية التطور التفاضلي التي تتم في كل عملية تنفيذ التزاوج بشكل عشوائي في كل بُعد لتوليد جيل جديد.

الجدول 3-3.مقارنة بين خوارزمية اليراع وخوارزمية التطور التفاضلي

الخوارزم	الأداء	زمن التنفيذ [s]	التعقيد	عدد المدخلات	عدد الأجيال	الدقة	الاستقرار
اليراع	أداء شبه أمثلي في اختيار رؤوس العناقيد في الشبكة وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة مقارنة DE	بطيئة مقارنة بالحل العشوائي ولكنها أسرع تنفيذا من DE	تعتمد على عملية تحريك الجسيمات وتحسين الحلول بشكل سريع.	تقل الدقة بزيادة عدد المدخلات	تحسين الحلول بشكل أسرع وبعدد أجيال أقل.	أقل دقة	تتمتع بالاستقرار أكثر من DE، حيث يمكنها الوصول إلى الحلول بشكل أسرع وأكثر ثباتاً.
التطور التفاضلي	أداء جيد في اختيار CH في الشبكة وبالتالي تقليل مقبول في استهلاك الطاقة مقارنة بالحل العشوائي	بطيئة مقارنة بالحل العشوائي وتستهلك زمن تنفيذ أعلى من FA	تتطلب عمليات تطور طبيعي وتوليد مجموعات كبيرة من الحلول المقترحة، مما يزيد من تعقيدها	تزداد الدقة بزيادة عدد المدخلات	تتطلب عدد أجيال أكبر للحصول على حل مثالي	أعلى دقة	أقل استقرار

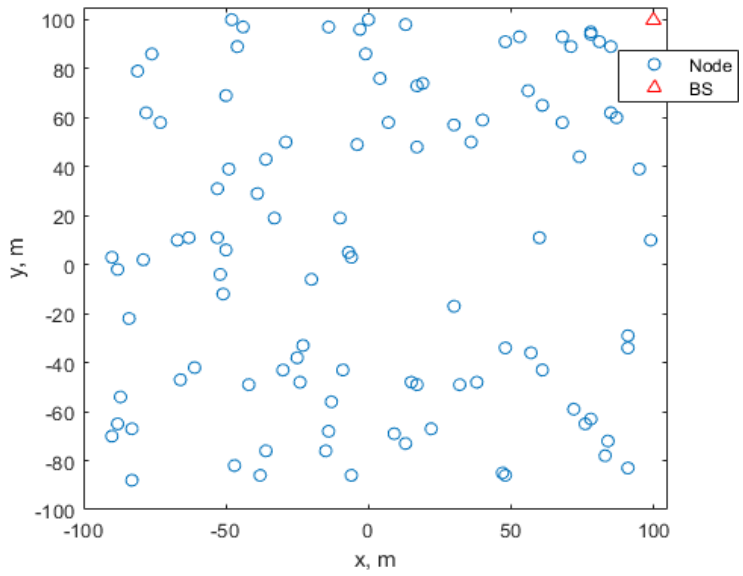
3.3 التقسيم الاقليدي الزاوي مع خوارزمية اليراع AEPFA

تم اعتماد أن تكون المحطة على حدود منطقة التغطية في هذا القسم، ومجموعة موسطات الشبكة وفق الجدول 3-4:

الجدول 3-4.موسطات سيناريو العمل [الباحث]

الموسطة	القيمة
مستوى الطاقة الابتدائية	(3-0.5) J
عدد العقد	100
عدد العناقيد	5
المساحة	200×200 m^2
مدى الإرسال	75 m
موقع المحطة القاعدية`	100,100
التوزيع	عشوائي
التموضع	ثابت– متوسط 15 تكرار

تم تنفيذ محاكاة لخوارزمية FA، DE وخوارزمية LEACH كما يظهر في الشكل 3-5. يلاحظ انه عند استخدام خوارزمية FA ووضع المحطة القاعدية على زاوية منطقة التغطية، بدأ موت العقد عند الجولة 225، وباستخدام خوارزمية LEACH تموت العقد عند الجولة 180 وبالنسبة لأداء DE عند 223. بالتالي عند وجود المحطة القاعدية خارج منطقة التغطية يكون أداء الخوارزميات متشابه أو بمعنى آخر، يكون أداء الخوارزميات شبه عشوائي بدون أي تحسين في إطالة مدة حياة الشبكة. يظهر الشكل 3-5 توزيع العقد في الحقل المراقب وتموضع المحطة القاعدية في زاوية الحقل.



الشكل 3-5. انتشار العقد ضمن الحقل وموقع المحطة القاعدية في الزاوية [الباحث]

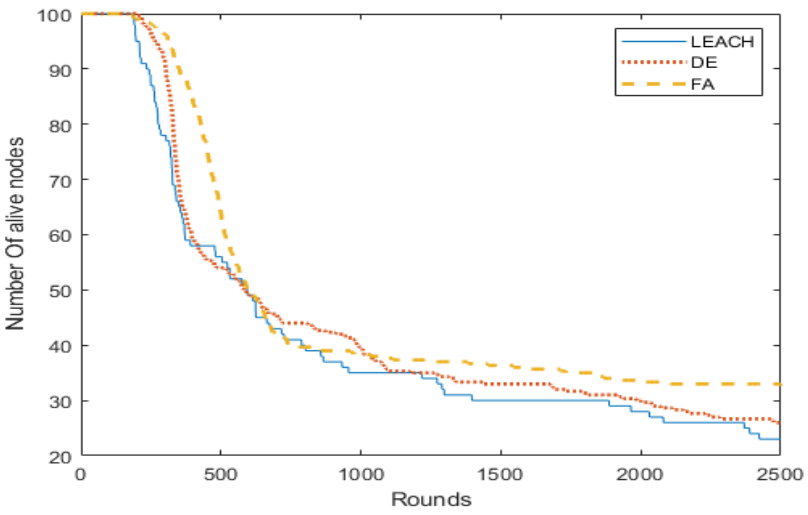
ملاحظة: تم الاعتماد في المحاكاة الحالية على توزيع العقد عشوائيا ضمن الحقل المراقب، وللحصول على نتائج دقيقة أثناء المقارنة تم اتباع طريقتين

الأولى: كان توزيع العقد واحد لكل الخوارزميات. مواقع العقد عند المحاكاة موجودة في الجدول 3-5.

الجدول 3-5.مواقع العقد المعتمدة في المحاكاة $r_i = (x_i, y_i)$ التموضع الثابت[الباحث]

x_i	{-78,-50,72,-63,95,85,-53,17,81,30,48,-23,57,-13,19,47,-66,-44,-67,-38,-6,-20,-25, 85,99,-51,-9,13,-83,-53,74,71,-0,7,-30,78,32,15,-79,9,76,38,-4,-10,-50,78,48,-88,-88,40,-48,78,17,-36,68,-14,22,61,91,-90,91,48,-24,-47,-46,53,-90,-61,-7,-33,61,-81,-39,87,-36,91,68,-49,-83,-84,13,4,-14,-6,-29,-73,-76,-52,83,30,-15,-1,-42,60,-87,84,17,56,-3,36}
y_i	{62,6,-59,11,39,89,11,73,91,-17,91,-33,-36,-56,74,-85,-47,97,10,-86,-86,-6,-38 ,62 ,10,-12,-43,98,-88,31,44,89,100,58,-43,-63,-49,-48,2,-69,-65,-8,49,19,69,95,-86,-65 ,-2,59,100,94,-49,43,58,-68,-67,-43,-83,3,-34,-34,-48,-82,89,93,-70,-42,5,19 ,65,79,29,60,-76,-29,93,39,-67,-22,-73,76,97,3,50,58,86,-4,-78,57,-76,86,-49,11,-54,-72,48,71,96,50}

يلاحظ من الشكل 3-6 مقارنة بين DE – FA – LEACH أن الأداء متقارب عند انتقال المحطة القاعدية الى زاوية الحقل المراقب وذلك بسبب مسافة الارسال الكبيرة بين رؤوس العناقيد والمحطة القاعدية التي أدت الى استهلاك طاقة بشكل اكبر من حالة وجود المحطة القاعدية داخل الحقل.



الشكل 3-6. علاقة عدد العقد الحية بدلالة الجولات[الباحث]

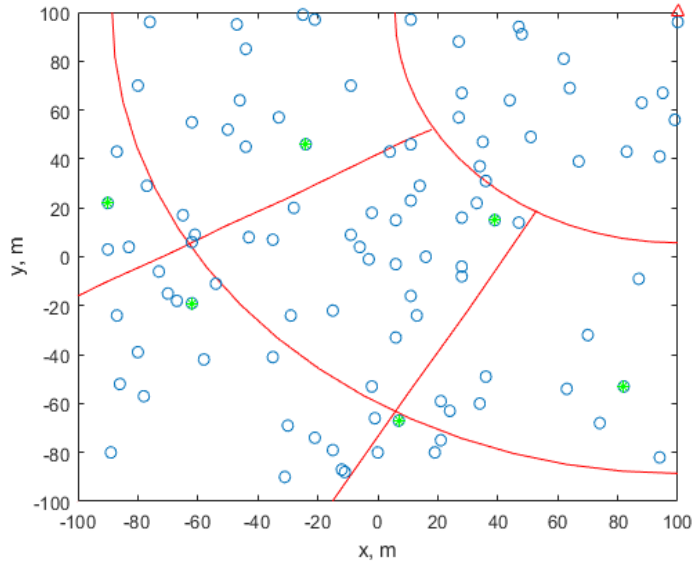
الجدول 3–6.تغير العقد الحية بدلالة الجولات عند BS في الزاوية والطاقة الأولية للعقد J 3. [الباحث]

FA	DE	LEACH	عدد الجولات
100	100	95	200
95	90	78	300
64	54	55	500
38	36	35	1000
34	29	28	2000
30	27	22	2500

الثانية: تم اخذ المتوسط لـ 15 نتيجة لنمذجة الخوارزمية.

بسبب النموذج الراديوي لقناة الارسال وفق المسارات المتعددة والذي يتناسب فيه استهلاك الطاقة عند إرسال إطار من عقدة إلى عقدة مع مربع المسافة d بين العقدتين إذا كان $d < d_0$ (مسافة قصيرة) . ويتناسب مع d^4 عند المسافات الاكبر. ومنه يؤدي الاختيار غير الأمثل لرؤوس العناقيد إلى موت العقد البعيدة عن المحطة القاعدية وتبقى العقد القريبة منها. وهذا هو السبب في تراجع أداء كل من خوارزميات FA، DE و LEACH.

استدعى الأمر البحث عن طريقة لتصغير المسار عند الإرسال الواحد وذلك باستخدام المسار متعدد القفزات ولكن ضمن مساحة محددة، وبالتالي نقترح تقسيم المنطقة لقطاعات جغرافية إقليديه ثابتة ومسبقة لتجنب الإرسال لمسافات طويلة. التقسيم الاقليدي للحقل المراد مراقبته في WSN يعتمد على مجموعة من العوامل والتحديات التي تؤثر على أداء الشبكة. أن هذا التقسيم يعتمد على عدة عوامل مثل مساحة منطقة التغطية، وتوزيع الحساسات فيها، ومتطلبات التغطية والاتصال في النظام. هذا التقسيم يساعد في تحسين كفاءة استخدام الطاقة ونقل البيانات بشكل أفضل في الشبكة. يقوم كل قطاع باختيار رأس لتجميع البيانات الخاصة بالقطاع وإرسالها إلى رأس القطاع الأقرب من المحطة القاعدية الموجودة على نفس الزاوية، وسيكون هناك عدد من القفزات أو التوجيه من رأس قطاع لآخر للوصول إلى المحطة القاعدية. يظهر الشكل 3–7 مثالاً عن طريقة التقسيم للحقل المراقب بعدد ثلاثة قطاعات وثلاث زوايا (سبعة قطاعات).



الشكل 3–7. طريقة التقسيم الإقليدية لحقل التغطية [الباحث]

العقد موزعة بشكل عشوائي في منطقة التغطية، بينما تتواجد المحطة القاعدية في زاوية منطقة التغطية.

يوضح الشكل 3–8 المخطط التدفقي للطريقة المقترحة والذي يمكن توصيفه بالخطوات التالية:

1– تحديد عدد الزوايا والقطاعات.

2– تقسيم المنطقة لعناقيد.

3– تحديد رأس العنقود لكل زاوية من الزوايا وفق:

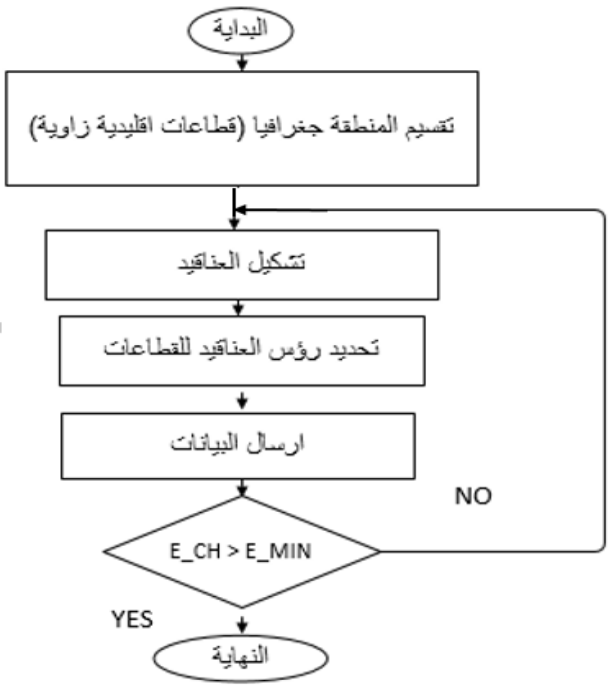
أ– تحديد رأس العنقود للقطاع الأبعد.

ب– تحديد رأس العنقود للقطاع الأقرب إلى المحطة القاعدية مع الأخذ بعين الاعتبار أن رأس العنقود للقطاع السابق هو عقدة في هذا القطاع الحالي.

ت– العقد في القطاع الأقرب تعتبر رأس العنقود لها هو المحطة القاعدية.

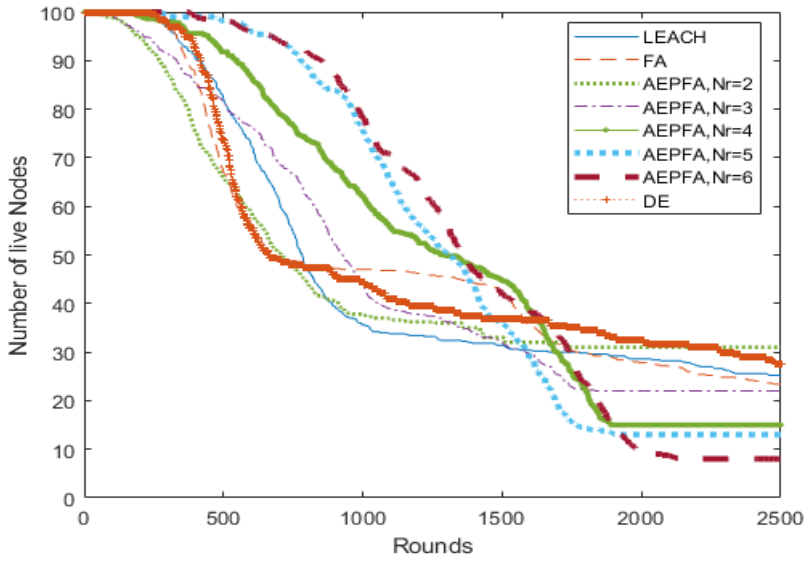
4– إرسال البيانات.

5– حساب طاقة العقد بعد الإرسال: في حال كانت قيمة الطاقة المتبقية أكبر من القيمة التي تمكن العقدة من إرسال بيانات جديدة إلى العنقود التالي تعتبر العقدة حية، وإذا كانت طاقة العقدة منخفضة وغير كافية لتستطيع العقدة ارسال البيانات، تعتبر العقدة ميتة. ثم يعاد اختيار رؤوس جديدة للعناقيد وفق خوارزمية اليراع في الجولة التالية.



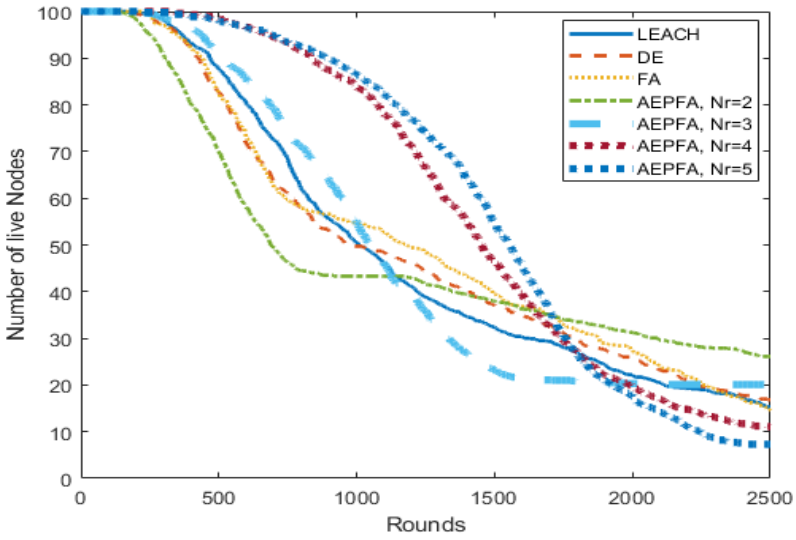
الشكل 3–8. المخطط التدفقي للطريقة المقترحة [الباحث]

نقوم بمحاكاة طريقة LEACH، DE وFA والطريقة المقترحة AEPFA للتوجيه عند: عدد القطاعات الزاوية Nr=[2-6]. مع طاقة ابتدائية للعقد 3 J يظهر الشكل 3–9 أداء كل من الخوارزميات المدروسة، حيث تبدأ جميع العقد بنفس الطاقة. والتي تعتمد على بيئة الإرسال. نجد أن الطريقة المقترحة تتغلب على كل من خوارزمية LEACH وFA و DE عند اختيار عدد القطاعات في كل زاوية أكبر من 3. حيث تزداد مدة حياة الشبكة (عدد العقد الحية) مقارنة بأداء خوارزميات LEACH، DE وFA. وذلك بعد تحديد المسارات فيتم ارسال من رأس عنقود الى رأس عنقود أخر ضمن نفس القطاع ولا يتم الارسال الى رأس عنقود اخر ضمن قطاع اخر مما ساعد الى تخفيض الطاقة المستهلكة نتيجة تقليل مسافة ارسال البيانات الى المحطة القاعدية وبالتالي زيادة مدة حياة الشبكة.



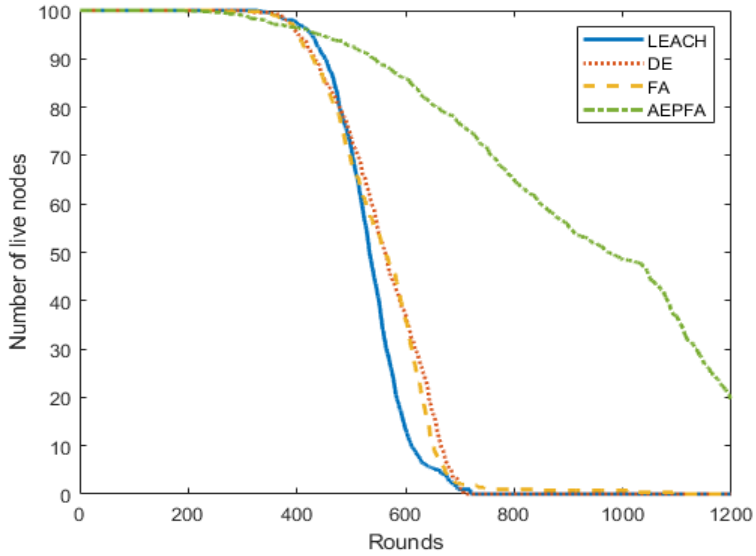
الشكل 3–9. مقارنة بين الخوارزميات LEACH وFA بالشكل العام و FA عند AEPFA. عند توزيع عشوائي وتموضع ثابت[الباحث]

كما تم محاكاة الخوارزمية وفق الطريقة الثانية والمتمثلة بأخذ متوسط النتيجة لـ 15 تكرار للنمذجة وذلك كما يظهر في الشكل 3–10 ونجد ان الطريقة المقترحة .AEPFA زادت مدة حياة الشبكة عند تكرار النمذجة وفق توزيع عشوائي للعقد في الحقل وذلك لتقييد مسارات الارسال وفق القطاعات المحددة وبالتالي تخفيض استهلاك الطاقة لأنه تم تحديد المسارات ضمن القطاعات الزاوية بدءاً من العقدة وصولاً إلى المحطة القاعدية وعند اختبار مدى جودة الطريقة المقترحة عند عدد قطاعات مختلفة لاحظنا تحسن أداء الشبكة عند زيادة عدد القطاعات الزاوية (ضمن المنطقة المحددة)، كان الأداء عند عدد قطاعات 5 افضل من 4 ولكن مقدار التحسين عند عدد قطاعات 6 كان قريب من الأداء عند عدد قطاعات 5 فتم اعتماد عدد قطاعات 5 .



الشكل 3–10. مقارنة بين الخوارزميات LEACHوFA بالشكل العام وFA عند AEPFA. عند اخذ متوسط للنتيجة عند 15 تكرار [الباحث]

بالإضافة للمحاكاة السابقة وفق السيناريو المحدد تم محاكاة الطريقة المقترحة AEPFA مع طاقة ابتدائية للعقد بقيمة 0.5 J وذلك عند وجود BS على زاوية الحقل المراد مراقبته واظهرت الخوارزمية AEPFA المقترحة تحسن وإطالة في مدة حياة الشبكة يبين الشكل 3–11 فعالية الطريقة AEPFA مقارنة بالخوارزميات LEACH, DE, FA عند مساحة 100×100 م^2 وطاقة أولية للعقد 0.5 J



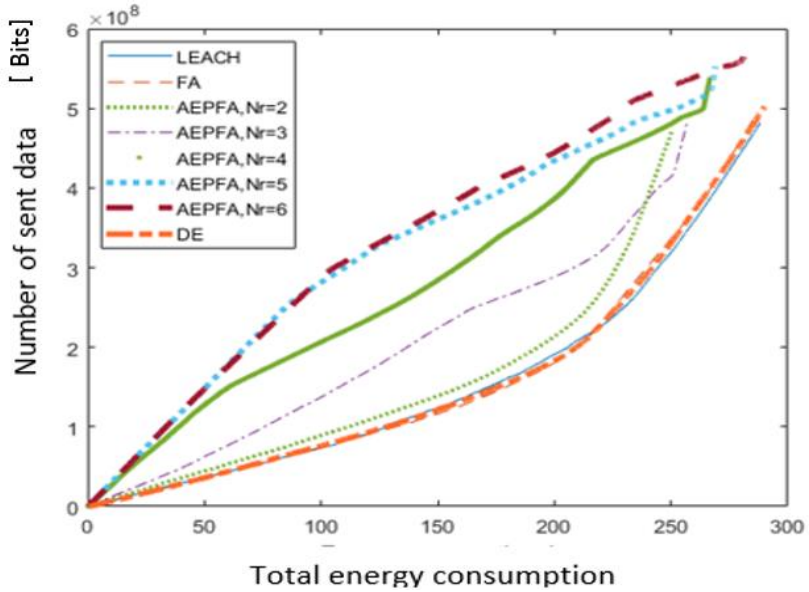
الشكل 3–11. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات لخوارزمية AEPFA عند طاقة ابتدائية 0.5 J

كما أن كمية البيانات المستلمة في المحطة القاعدية عند استخدام الطريقة AEPFA المقترحة تحتاج إلى طاقة أقل للإرسال، وبالتالي تقليل استهلاك طاقة العقد. يظهر الجدول 3-7 عدد العقد الحية خلال الجولات للخوارزميات المدروسة.

الجدول 3-7.عدد العقد أثناء الجولات [الباحث]

LEACH	DE	FA	AEPFA					عدد الجولات
			Nr=2	Nr=3	Nr=4	Nr=5	Nr=6	
82	68	64	68	81	92	98	98	500
35	45	48	37	42	62	76	76	1000
31	38	42	33	31	44	36	42	1500
28	31	27	31	22	15	13	9	2000
25	28	21	31	22	15	13	8	2500

نجد أن عدد العقد الحية باستخدام الخوارزمية AEPFA المقترحة ازداد بما يقارب 50% عند الجولة رقم 500 مقارنة بعددها عند استخدام الخوارزميات الأخرى، وذلك عند استخدام توزيع عشوائي بتموضع ثابت، كما ان كمية البيانات المرسلة يظهر بالشكل 3-12.



الشكل 3-12. كمية البيانات المرسلة بدلالة استهلاك الطاقة [الباحث]

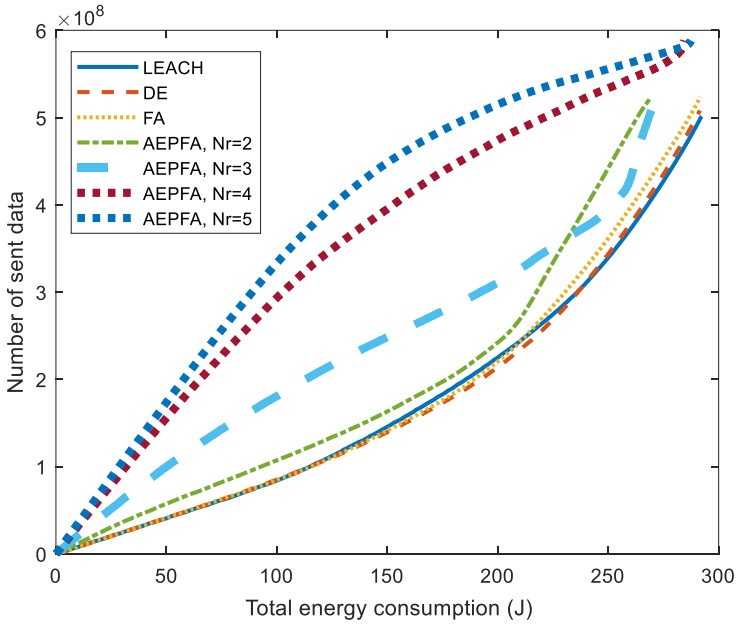
كما يظهر الجدول 3–8. كمية البيانات المرسلة للمحطة القاعدية بالبت عند استخدام الخوارزميات المدروسة. نجد أن الخوارزمية المقترحة تسهم في رفع كمية البيانات المرسلة للمحطة القاعدية بحدود 10% عند الجولة رقم 500 مقارنة بالخوارزميات الأخرى

الجدول 3–8.كمية البيانات المرسلة أثناء الجولات *108 بت [الباحث]

LEACH	DE	FA	الطريقة المقترحة					
			Nr=2	Nr=3	Nr=4	Nr=5	Nr=6	عدد الجولات
1.91	1.80	1.81	1.76	1.87	1.95	1.99	1.99	500
3.02	2.82	2.82	2.74	3.16	3.5	3.78	3.82	1000
3.68	3.5	3.5	3.45	3.89	4.54	4.87	5.01	1500
4.28	4.14	4.15	4.08	4.38	5.06	5.27	5.56	2000
4.82	4.77	4.73	4.7	4.82	5.36	5.53	5.73	2500

يظهر الجدول 3–9. كمية الطاقة المستهلكة خلال الجولات. نجد أن الطاقة المستهلكة حتى الجولة 500 عند استخدام الخوارزمية المقترحة تنخفض للربع على كامل العقد في الشبكة مقارنة بتلك الطاقة المطلوبة عند استخدام الخوارزميات الأخرى.

ويظهر الشكل 3–13 كمية البيانات المرسلة وفق طريقة اخذ المتوسط لـ 15 تكرار لنمذجة الخوارزميات



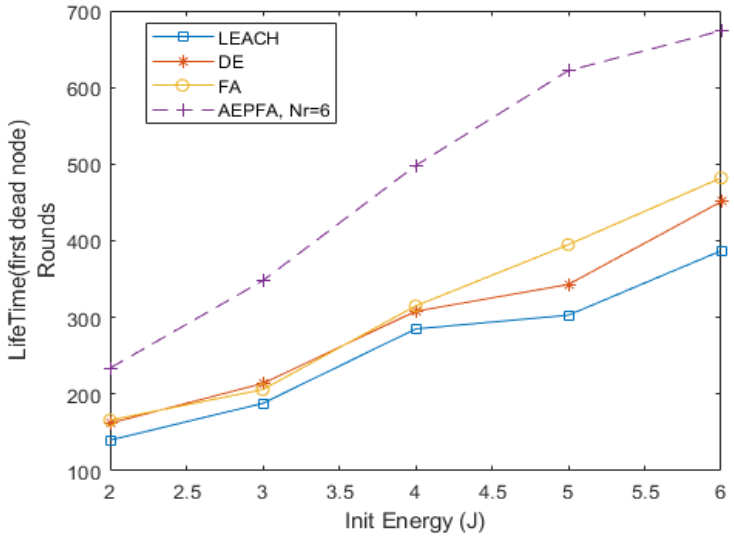
الشكل 3–13. كمية البيانات المرسلة بدلالة استهلاك الطاقة الكلي وفق طريقة اخذ المتوسط لـ 15 نتيجة

نلاحظ من الشكل 3–13 تفوق الطريقة AEPFA بكمية البيانات المستلمة في المحطة القاعدية مقارنة مع DE – FA - LEACH وذلك بسبب الاحتفاظ بطاقة عالية للعقد وكافية لارسال كمية اكبر من البيانات لاطول مدة . كما يظهر بالجدول 3–9

الجدول 3–9. كمية الطاقة المستهلكة اثناء الجولات مقدرة بـ J [الباحث]

LEACH	DE	FA	الطريقة المقترحة					
			Nr=2	Nr=3	Nr=4	Nr=5	Nr=6	عدد الجولات
200.22	200.15	202.18	179.21	130.21	91.69	67.23	67.92	500
245.15	241.10	242.11	221.44	217.41	183.05	164.45	156.68	1000
262.40	257.55	258.63	234.56	241.04	231.11	238.38	230.37	1500
276.26	273.24	274.31	242.76	252.78	265.00	267.48	275.45	2000
288.20	287.08	287.68	250.53	256.73	267.17	269.28	280.96	2500

يظهر الشكل 3–14 مقارنة بين الخوارزميات LEACH، DE. FA ، و AEPFA عند تغيير الطاقة الأولية في العقد. نجد زيادة في عدد الجولات مقارنة مع بقية الخوارزميات عند استخدام طريقة AEPFA.



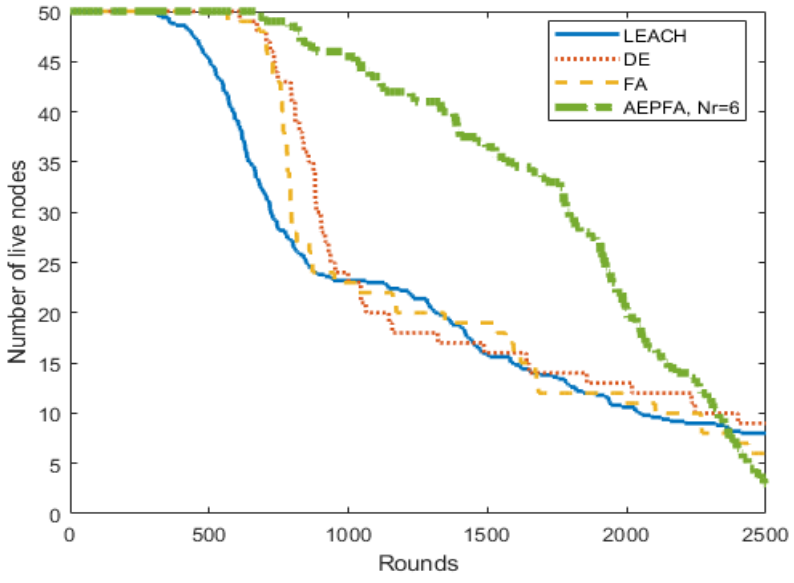
الشكل 3–14. موت أول عقدة وفق قيمة الطاقة الابتدائية للعقد. [الباحث]

يظهر الجدول 3– 10 قيم الجولات الموافقة لموت أول عقدة في الشبكة عند استخدام قيم طاقة أولية للعقد ضمن المجال[2–6].

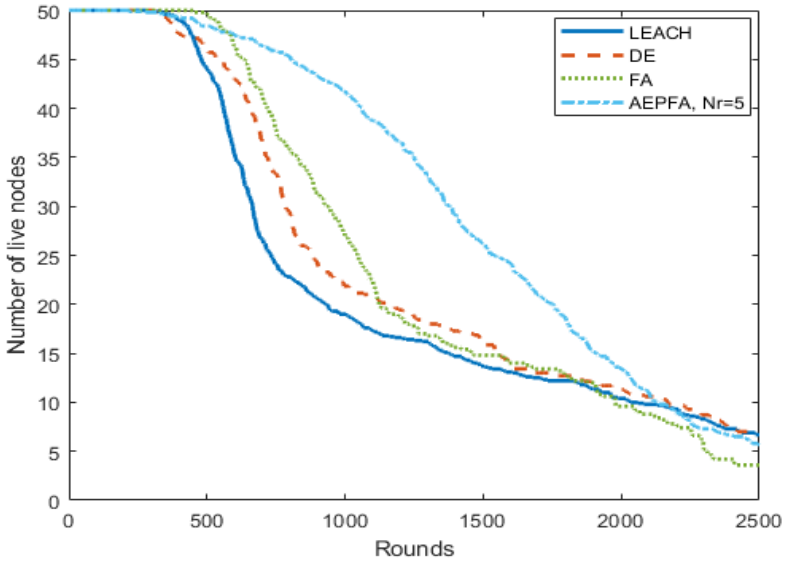
الجدول 3–10. قيم الجولات الموافقة لموت أول عقدة في الشبكة عند استخدام قيم طاقة أولية مستخدمة

رقم الجولة				الطاقة الأولية [J]
LEACH	DE	FA	AEPFA, Nr=6	
140	165	164	235	2
186	210	206	350	3
285	315	316	500	4
304	344	395	624	5
388	448	482	675	6

نجد من الجدول 3–10 كمية البيانات الأكبر التي تم تسليمها الى المحطة القاعدية مقارنة بـ FA – DE – LEACH وتم مقارنة أداء الخوارزميات عند تغيير العدد الأولي للعقد مع الحفاظ على مساحة منطقة التغطية نفسها وهي (200×200)م^2. تظهر الأشكال 3–15، 3–16 و3–17 و 3–18 و3–19 و 3–20 عدد العقد الحية خلال الجولات. نجد أن الطريقة المقترحة AEPFA تتقدم على الخوارزميات الأخرى المدروسة مهما كان العدد الأولي للعقد في منطقة التغطية. في الشكل 3–15 تم اعتماد التوزيع العشوائي بتموضع ثابت وفي الشكل 3–16 تم اعتماد التوزيع العشوائي وأخذ المتوسط لـ 15 تكرار.

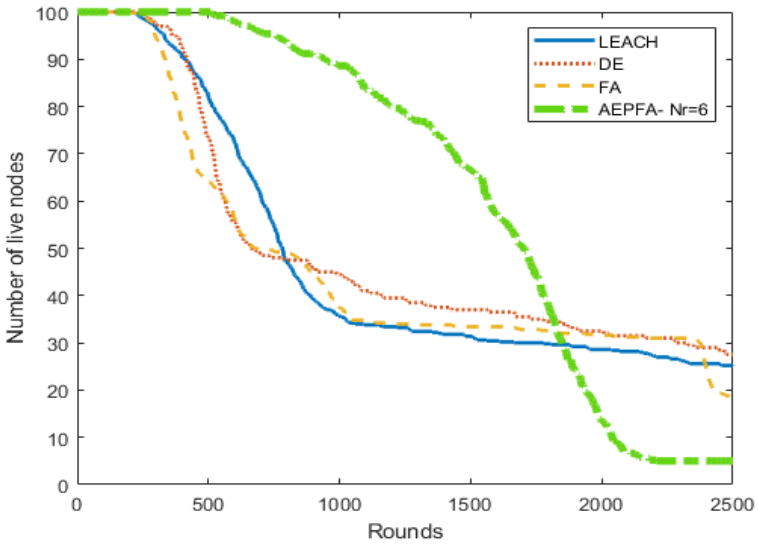


الشكل 3–15. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 50 عقدة في حالة التوزيع عشوائي والتموضع ثابت [الباحث]

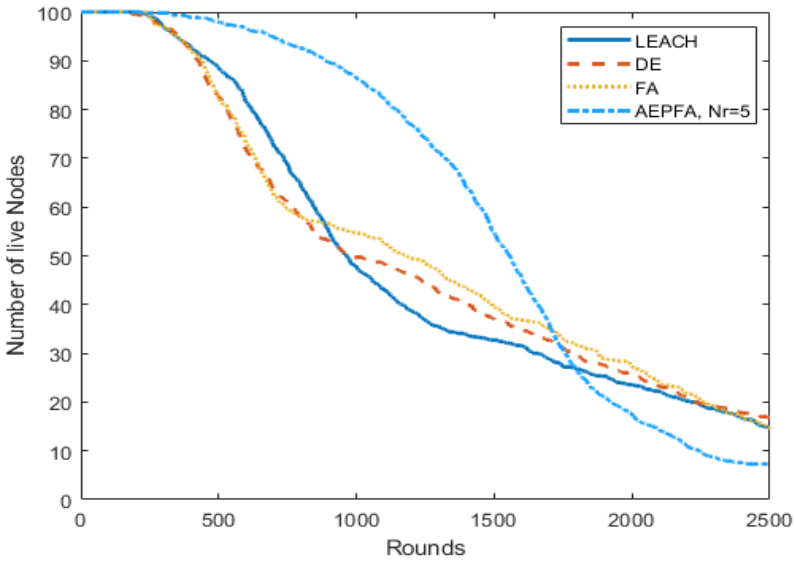


الشكل 3–16. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 50 عقدة في حالة التوزيع عشوائي وأخذ المتوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

يوضح الشكل 3–17 فعالية خوارزمية AEPFA عند استخدام 100 عقدة ضمن توزيع عشوائي وتموضع ثابت وفي الشكل 3–18 تظهر فعاليتها عند استخدام 100 عقدة متوسط لـ 15 تكرار

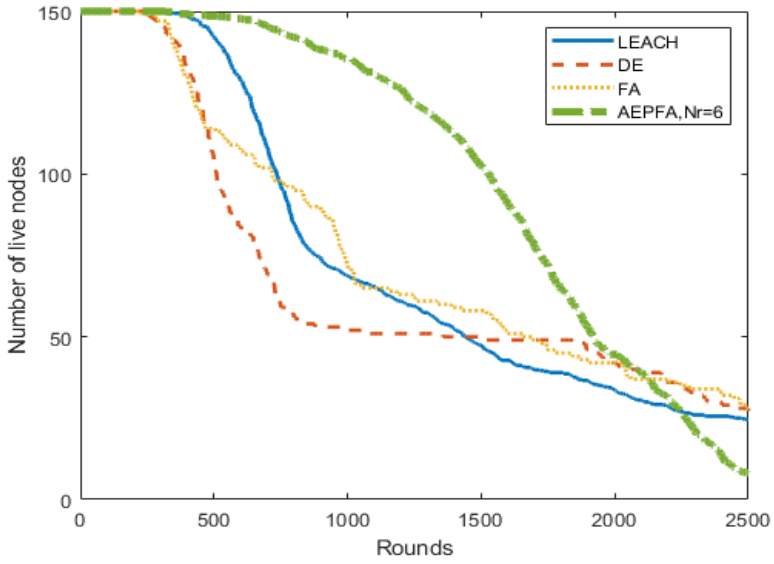


الشكل 3–17. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 100عقدة توزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث]

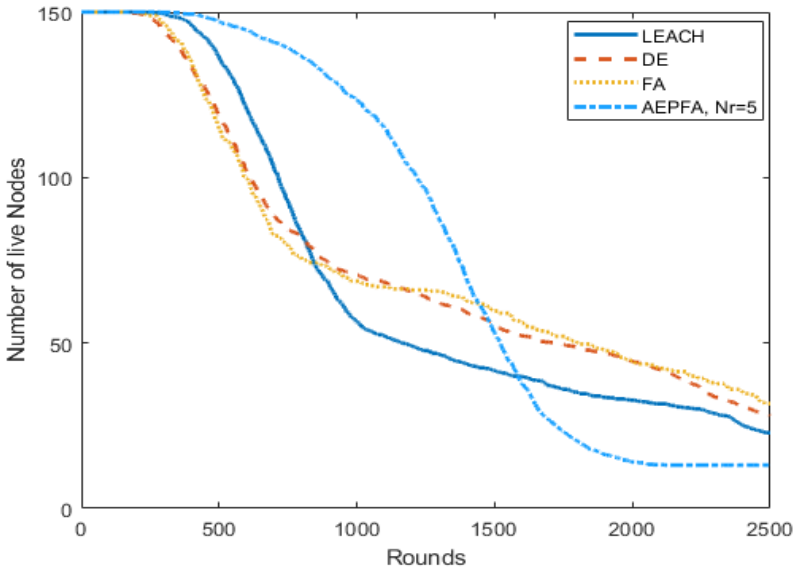


الشكل 3–18. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 100عقدة توزيع عشوائي واخذ المتوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

يوضح الشكل 3–19 فعالية خوارزمية AEPFA عند استخدام 150 عقدة ضمن توزيع عشوائي وتموضع ثابت وفي الشكل 3–20 تظهر فعاليتها عند استخدام 150 عقدة متوسط لـ 15 تكرار.



الشكل 3–19. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 150 عقدة بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث]



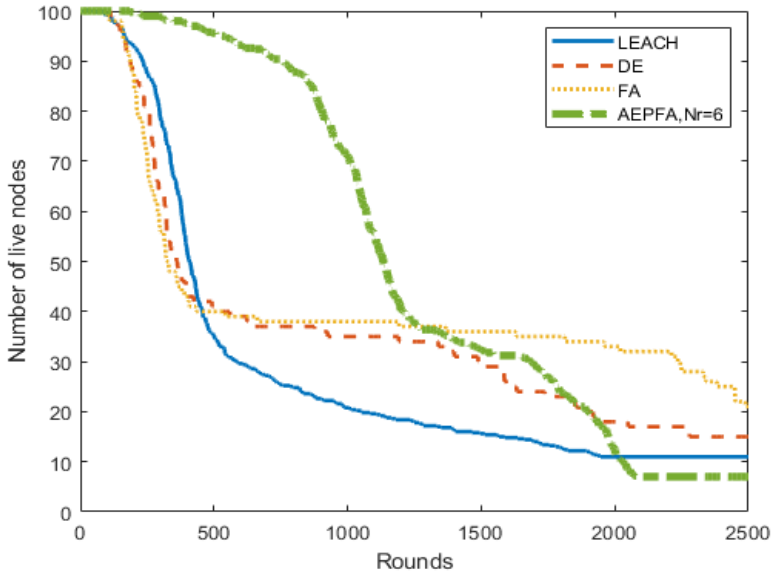
الشكل 3–20. عدد العقد الحية بدلالة الجولات في حالة 150 عقدة بتوزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 نتيجة [الباحث]

من الاشكال السابقة يظهر ان الطريقة AEPFA تتفوق على خوارزميات المقارنة بغض النظر عن عدد العقد 50–100–150 في الحقل المراقب عندما تكون المحطة القاعدية في زاوية الحقل المراقب. الجدول 3–11 عدد الجولات الموافقة لموت أول عقدة وموت 10% من العقد بالنسبة لجميع الخوارزميات المدروسة.

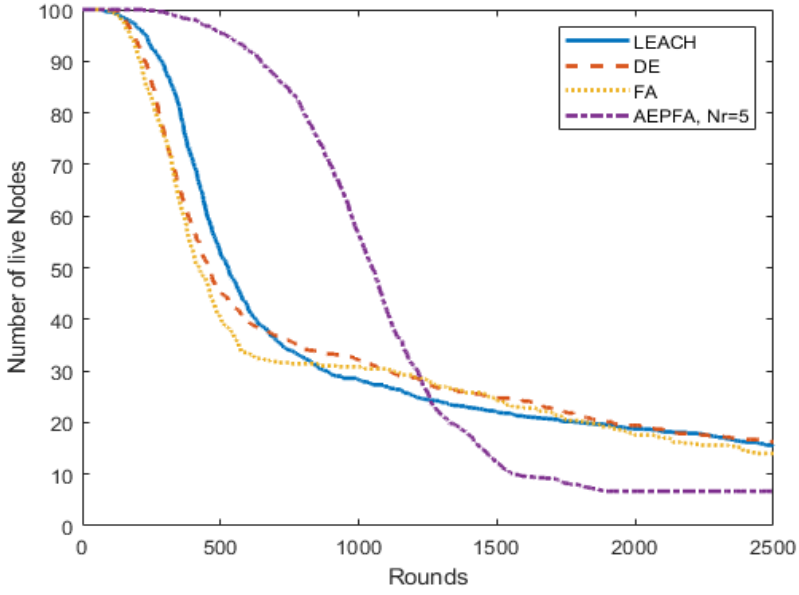
الجدول 3–11. عدد الجولات عند موت أول و10 % من العقد [الباحث]

AEPFA,Nr=6	LEACH	DE	FA		المساحة m^2	عدد العقد
670	300	566	570	موت أول عقدة	200*200	50
1200	590	775	780	موت 10% من العقد		
400	270	304	300	موت أول عقدة	200*200	100
798	415	430	409	موت 10% من العقد		
660	365	311	310	موت أول عقدة	200*200	150
1100	680	368	370	موت 10% من العقد		

قمنا بمقارنة أداء الخوارزمية المقترحة مع الخوارزميات DE،LEACH وFA عند عدد عقد 100 وتغيير مساحة منطقة التغطية m^2 300*300 وm^2 400*400 عند قيمة طاقة 6 و10 [J] على الترتيب. كما يظهر في الأشكال (3–21، 3–22). نجد أن الطريقة AEPFA المقترحة تتغلب على الخوارزميات الأخرى حتى مع زيادة مساحة التغطية وتم زيادة قيمة الطاقة الابتدائية لان زيادة المساحة للحقل مع المحافظة على عدد العقد نفسه 100 عقدة تؤدي الى زيادة المسافة بين العقد وبالتالي زيادة في كمية الطاقة المستهلكة في العقد عند الارسال ومنه انخفاض في مدة حياة الشبكة (موت مبكر للعقد).

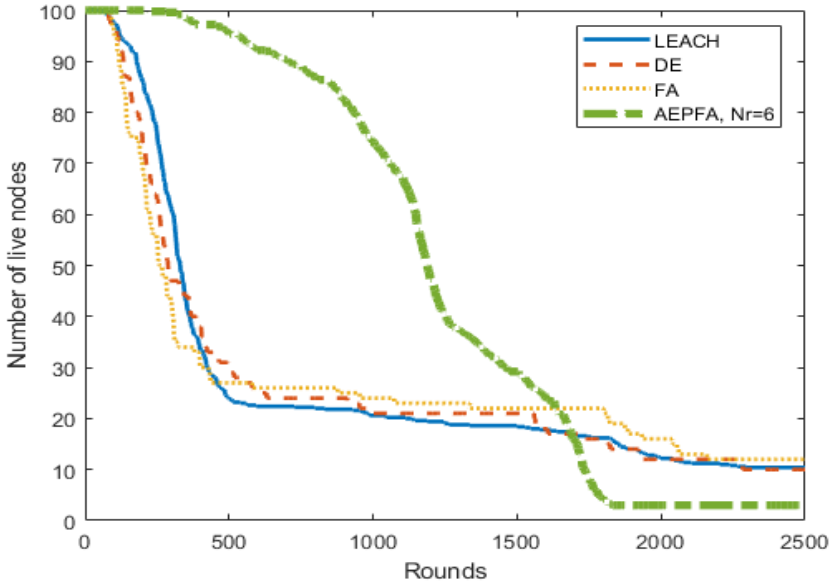


الشكل 3–21. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 300× 300 وطاقة 6J بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت. [الباحث]

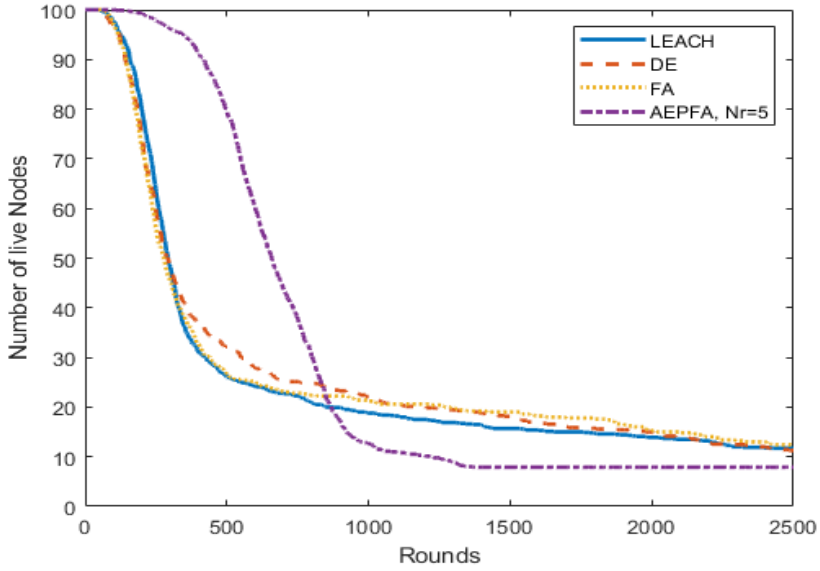


الشكل 3–22. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 300×300 م^2 وطاقة 6J باستخدام توزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 تكرار. [الباحث]

كما نلاحظ من الشكل 3–23 والشكل 3–24 العقد الحية مع عدد الجولات بمساحة 400×400 م^2 وطاقة 10 J تفوق الخوارزمية AEPFA عند استخدام توزيع عشوائي بتموضع ثابت وبأخذ متوسط لـ 15 تكرار



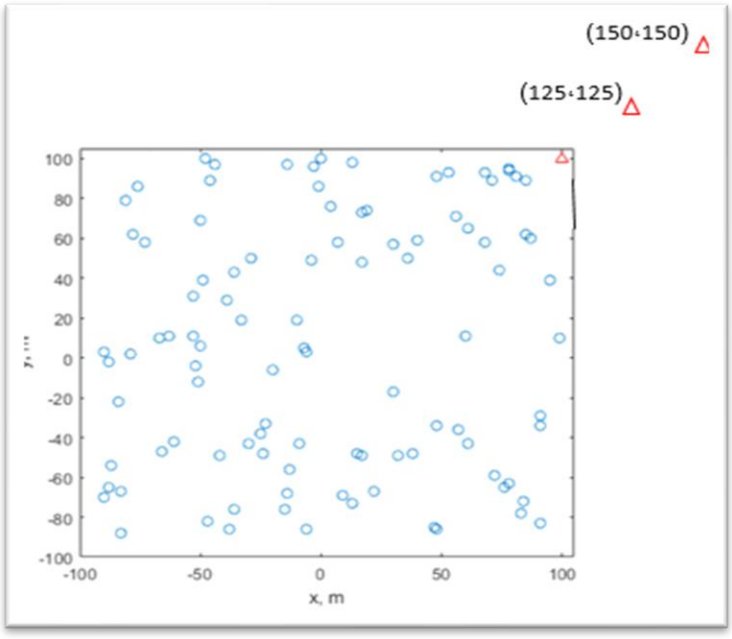
الشكل 3–23. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 400×400 م^2 وطاقة 10 J [الباحث]



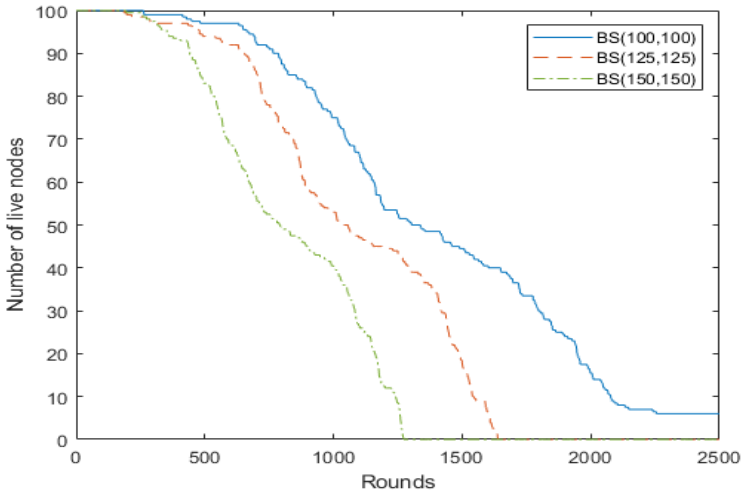
الشكل 3–24. عدد العقد الحية بدلالة الجولات بمساحة 400×400وطاقة 10 J في حالة توزيع عشوائي واخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

لقد أظهرت خوارزمية AEPFA تفوقها بالمقارنة على LEACH، DE وFA عند انتقال المحطة القاعدية إلى حواف منطقة التغطية ولكن إذا تم نقل المحطة القاعدية بعيداً عن حواف الحقل المراقب إلى الخارج سيبدأ أداء الخوارزمية AEPFAالمقترحة بالانخفاض وتبدأ العقد بالموت المبكر والتغطية بالانخفاض. قمنا بدراسة أداء خوارزمية AEPFA عند تغيير موقع المحطة القاعدية ليبتعد عن حواف منطقة التغطية عند كل من المواقع (100،100)، (125،125) و(150،150) كما يظهر بالشكل 3–25

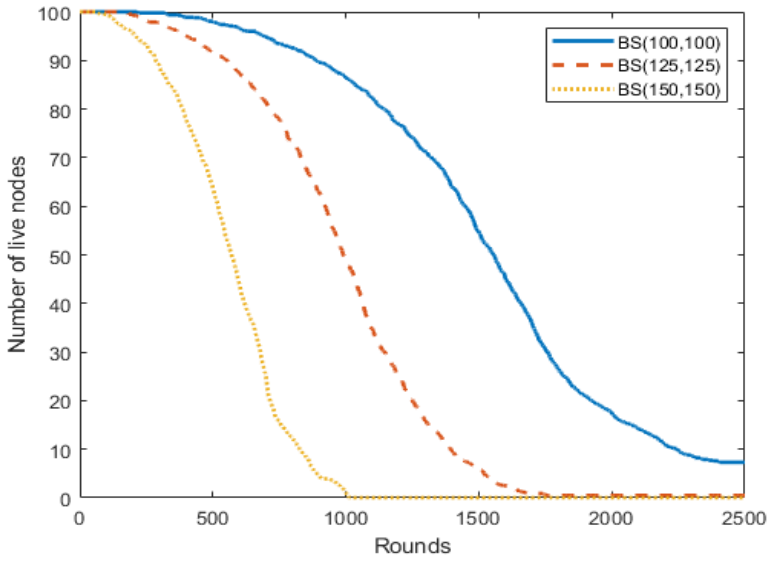
والذي يوضح تموضع المحطة القاعدية بالنسبة للحقل ويظهر الشكل 3–26 تغير منحني عدد العقد بدلالة الجولات عند تغير موقع المحطة القاعدية في توزيع عشوائي وتموضع ثابت والشكل 3–27 عند اخذ متوسط 15 تكرار.



الشكل 3–25. تموضع المحطة القاعدية بالنسبة للحقل المراقب



الشكل 3–26. تغير منحني عدد العقد بدلالة الجولات عند تغير موقع المحطة القاعدية في توزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث]



الشكل 3–27. تغير منحني عدد العقد بدلالة الجولات عند تغير موقع المحطة القاعدية مع اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

يعد نموذج تغطية العقدة مشكلة اساسية في WSN، حيث يتضمن كيفية تحديد مواقع وعدد العقد لتحقيق أقصى مساحة تغطية. تشير مشكلة تحسين تغطية عقدة WSN إلى السيناريو الذي يمكن فيه لكل مستشعر الاستشعار فقط ضمن نصف قطر استشعار ثابت في مواقع النشر المتوقعة. عند نشر أجهزة الاستشعار في منطقة المراقبة المطلوبة، يمكن لكل جهاز استشعار إجراء الاستشعار والاستكشاف فقط ضمن نصف قطر الاستشعار الخاص به. ولذلك، يجب أن يلتزم نشر كل عقدة بنصف قطر الاستشعار المقيد لضمان الاتصال بين بعضها البعض ومع الشبكة بأكملها. الحل الأفضل لهذه المشكلة هو العثور على حل لمشكلة تغطية العقد ضمن المجال الممكن.

تم توضيح نموذج مراقبة WSN في الشكل 3–28. بافتراض أن WSN تم إعداده في منطقة مراقبة ثنائية الأبعاد تبلغ مساحتها:

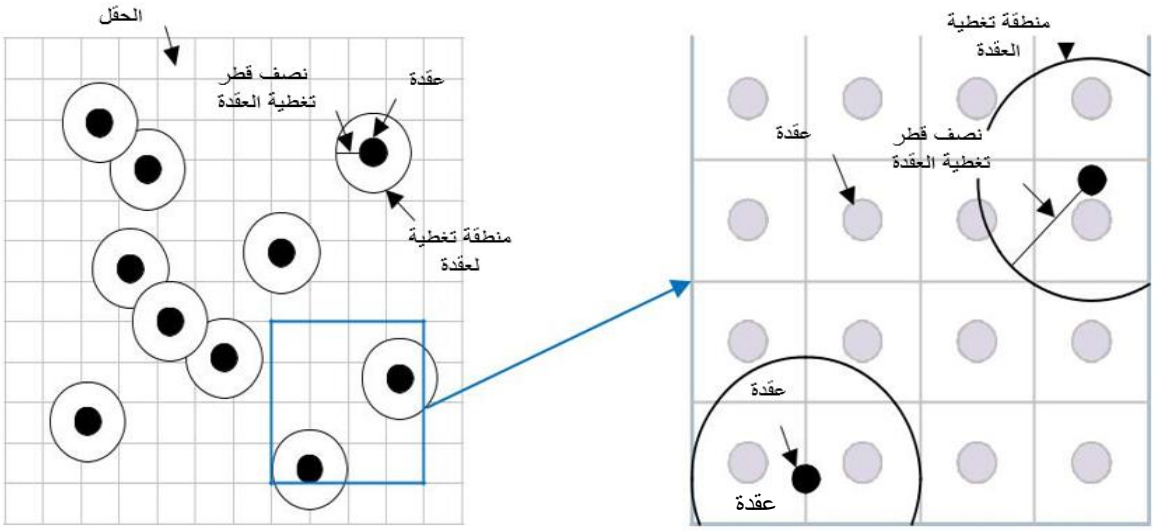
$$S(m^2) = H \times W$$

تتم تهيئة عقد الاستشعار N بشكل عشوائي. يتم الإشارة إلى مجموعة العقد بالرمز M، ممثلة بالرمز

$$M = \{M_i, i = 1,2,..,N\}$$

إحداثيات $\{M_i(\mathrm{x}), M_i(y), i = 1,..,N\}$.

نطاق الاستشعار لعقد الاستشعار عبارة عن دائرة يبلغ نصف قطر استشعارها Rp



الشكل 3–28. نموذج التغطية المتبع [الباحث]

يعتمد نموذج مراقبة WSN ثنائي الأبعاد على الافتراضات التالية:

1) R_S وRc نصف قطر الاستشعار ونصف قطر الاتصال لكل عقدة استشعار، على التوالي، بحيث $Rc \geq 2R_S$.
2) تمتلك كل عقدة استشعار نفس المعلمات وقدرات الاتصال.
3) تظل مواقع العقد ونشرها دون تغيير خلال فترة معينة، مما يعني أنه لا يتم الأخذ بالحسبان تنقل العقدة أو فشلها.

لتسهيل الحسابات، يتم تقسيم المساحة المستطيلة للشبكة المنشورة إلى شبكات H×W ذات مساحة متساوية. العقد المراد مراقبتها، والمشار إليها بـ

$G = \{G_j,\ j = 1,2,\ L = H \times W\}$-

تقع في وسط كل شبكة.

إحداثيات Gj هي $G_j\ \{(G_j(x), G_j(y)), j = 1,2\ L\}$

يتم تعريف المسافة الإقليدية بين عقدة الاستشعار Mi وعقدة المراقبة المستهدفة Gj على أنها

$$d(M_i, G_j) = \sqrt{(M_i(x) - G_j(x))^2 + (M_i(y) - G_j(y))^2} \qquad (4-3)$$

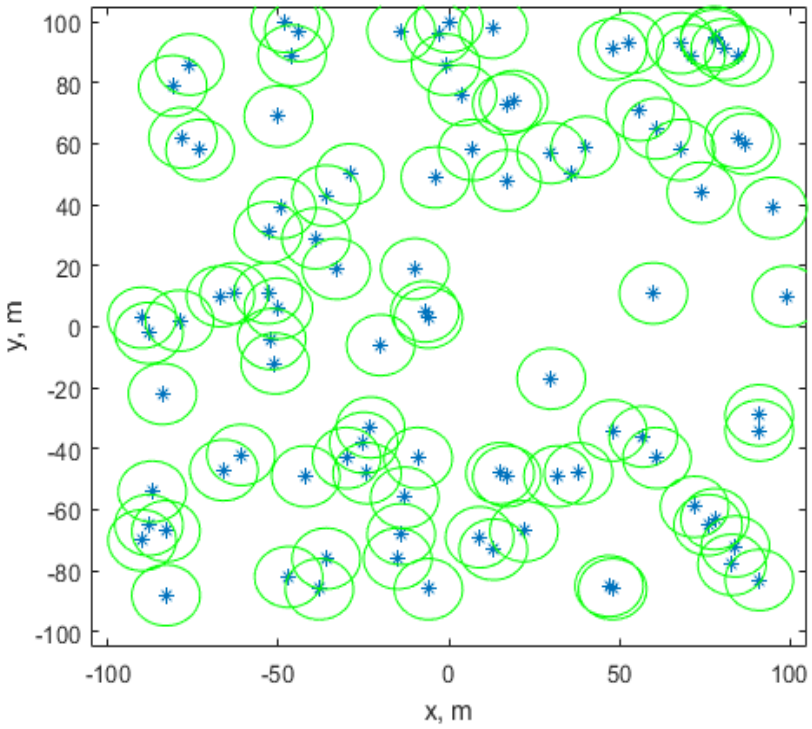
عندما تكون المسافة بين عقدة المراقبة المستهدفة Gj وأي عقدة استشعار أقل من أو تساوي نصف قطر الاستشعار Rp، فهذا يشير إلى أن عقدة المراقبة يتم استشعارها بواسطة المستشعر. ولذلك فإن احتمال الاستشعار p هو كما يلي:

$$p(M_i, G_j) = \begin{cases} 1, & d(M_i, G_j) \leq R_p \\ 0, & d(M_i, G_j) > R_p \end{cases} \qquad (5-3)$$

يمكن لعقد الاستشعار المتعددة أن تستشعر في نفس الوقت عقدة مراقبة الهدف. تم تقديم الاحتمال المشترك P الذي يتم استشعار عقدة المراقبة المستهدفة من خلال جميع عقد الاستشعار المنشورة، مما قد يزيد من احتمالية استشعار عقدة المراقبة المستهدفة. يتم تعريف الاحتمال المشترك P على النحو التالي

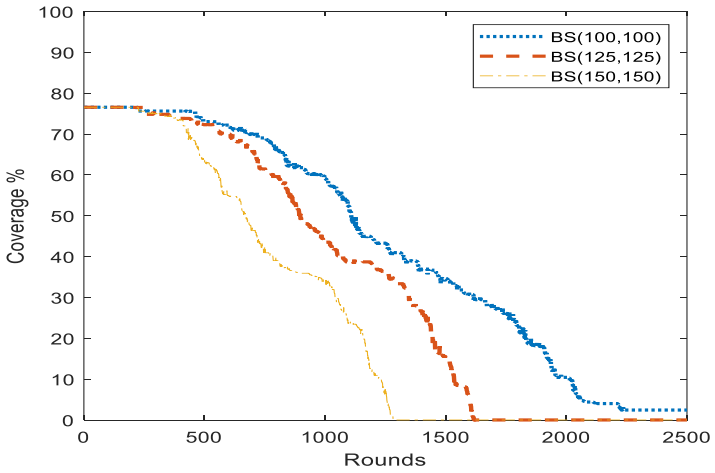
$$P(M_i, G_j) = 1 - \prod_{i=1}^{N}[1 - p(M_i, G_j)] \qquad (6-3)$$

يمكن تعريف نسبة تغطية الشبكة على أنها نسبة مجموع مساحات تغطية عقد مراقبة الهدف الخاضع للمراقبة في منطقة المراقبة إلى مجموع مساحات تغطية عقد مراقبة الهدف المنشورة في منطقة المراقبة، كما يظهر بالشكل3–29 توزع تغطية العقد تبعا للتوزع المتبع في نشر العقد كما يلي:

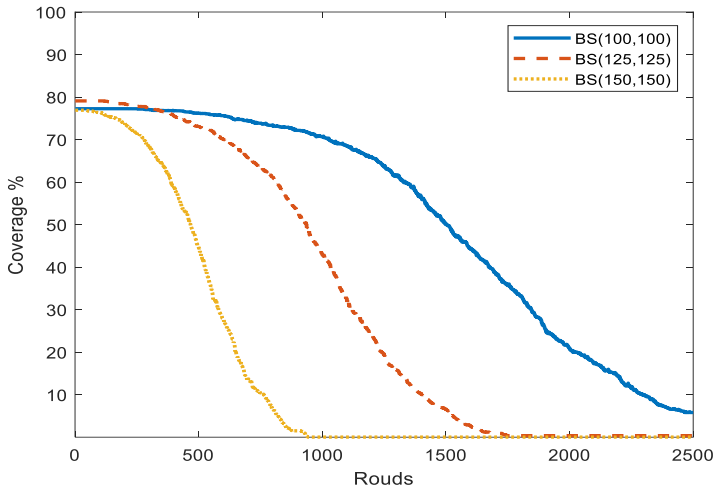


الشكل 3–29. تغطية المنطقة وفق نموذج النشر [الباحث]

يظهر الشكل 3–30 والشكل 3–31. نسبة التغطية التي تحققها الخوارزمية المقترحة في منطقة التغطية، حيث تغطي كل عقدة مساحة دائرية تكون العقدة مركزها ونصف قطرها 15 m عند توزيع عشوائي بتموضع ثابت وبأخذ متوسط 15 تكرار.



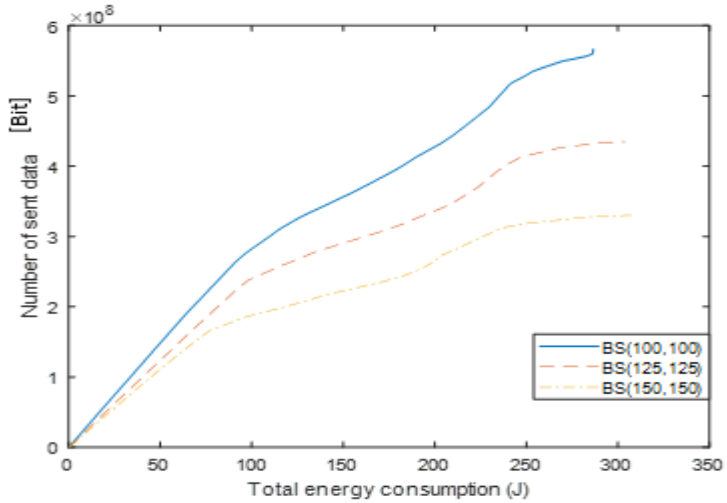
الشكل 3–30. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات عند مواقع مختلة للمحطة القاعدية [الباحث]



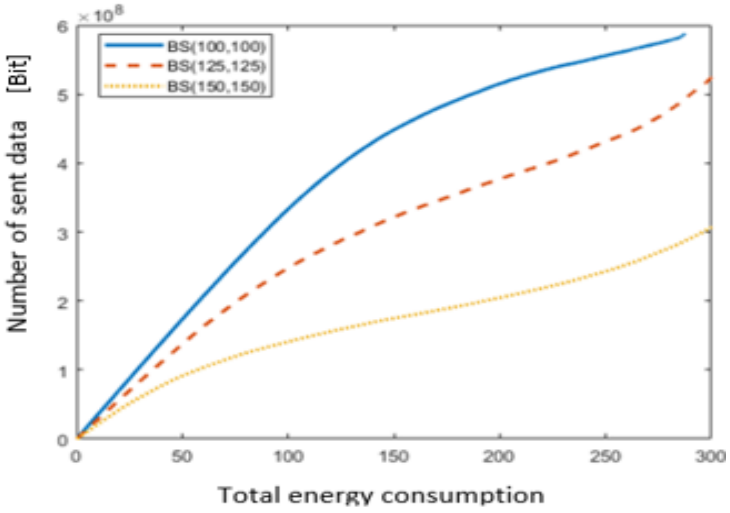
الشكل 3–31. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات عند مواقع مختلة للمحطة القاعدية عند اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

نجد أن نسبة التغطية تتناقص مع زيادة عدد الجولات عند ابتعاد المحطة القاعدية، وهذا متناسب مع كون عدد العقد الحية يتناقص مع زيادة عدد الجولات وابتعاد المحطة القاعدية.

يظهر الشكل 3–32. كمية المعطيات المرسلة مع كمية الطاقة اللازمة لأرسال هذه المعطيات عند توزيع عشوائي بتموضع ثابت وذلك من أجل المواقع الثلاثة المدروسة للمحطة القاعدية المذكورة أعلاه والشكل 3–33 من اجل توزيع عشوائي واخذ متوسط 15 تكرار.



الشكل 3-32. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الجولات عند مواقع مختلفة للمحطة القاعدية بتوزيع عشوائي وتموضع ثابت [الباحث]



الشكل 3-33. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الجولات عند مواقع مختلفة للمحطة القاعدية عند اخذ متوسط لـ 15 تكرار [الباحث]

وبذلك تم اقتراح طريقة لإرسال المعطيات من العقد إلى المحطة القاعدية بما يساهم في تقليل كمية الطاقة المستهلكة. تعمد هذه الطريقة على تقسيم منطقة التغطية إلى قطاعات ثابتة لها مساحة محددة مسبقاً، بهدف تقييد إرسال البيانات لمسافات طويلة في المرة الواحدة، بل يتم إرسال البيانات من العقد إلى رأس العنقود الموافق ومنه إلى رأس العنقود الأقرب للمحطة القاعدية لغاية الوصول إلى المحطة. بالتالي زيادة عدد الإرسالات مع تقليص مسافة الإرسال الواحد.

يمكن القول إن الطريقة المقترحة تساهم في زيادة مدة حياة الشبكة بغض النظر عن توزيع العقد أو عددها أو مساحة التغطية أو الطاقة الأولية للعقد. وبالتالي زياد كمية البيانات المستلمة في المحطة القاعدية وتقليل استهلاك الطاقة وذلك وفق ما تم مقارنته مع خوارزميات LEACH، DE وFA.

توفر AEPFA، العديد من الفوائد في تعزيز كفاءة الطاقة في WSN:

- إطالة حياة الشبكة: تعمل AEPFA، على تحسين اختيار رؤوس المجموعات بناءً على الطاقة المتبقية، وعدد القفزات، والمسافة. يمكن لاستراتيجية التجميع والتوجيه الفعالة هذه إطالة مدة حياة الشبكة بشكل كبير من خلال موازنة استهلاك الطاقة بين العقد.
- كفاءة التوجيه المحسنة: من خلال استخدام AEPFA، يمكن للشبكة تحقيق قرارات توجيه أفضل، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة أثناء نقل البيانات. يضمن هذا النهج توجيه رزم البيانات بكفاءة عبر رؤوس مجموعات مختارة إلى BS، مما يعزز الأداء العام للشبكة.
- الحفاظ على الطاقة: تركز AEPFA على اختيار رؤوس. تساعد عملية الاختيار المستهدفة هذه في الحفاظ على الطاقة من خلال ضمان نقل البيانات عبر الطرائق الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة، وبالتالي تقليل نفقات الطاقة غير الضرورية داخل الشبكة.

4.3 خوارزمية هجينة بين خوارزميتي اليراع والتطور التفاضلي H-FADE

ما تم ذكره من فعالية خوارزمية AEPFA وقدرتها على زيادة مدة حياة الشبكة وإمكانية التقليل من مشكلة عدم وجود المحطة القاعدية في مركز منطقة التغطية ولكن في هذه الطريقة نتعرض لمشكلة شكل الحقل المراقب وطبيعته التضاريسية بالإضافة إلى بعد المحطة القاعدية عن الحقل، وعدم ضبط موقع المحطة في زاوية الحقل تم العمل على إيجاد طريقة للتغلب على هذه المشكلة والمتعلقة بشكل الحقل المراقب وبعد المحطة عن الحقل المراقب مما استدعى قياس مقارنة بين موقع العقدة وموقع رأس العنقود وموقع المحطة القاعدية وذلك بخوارزمية هجينة بين FA وDE.

1.4.3 توصيف المسألة

يعد تأثير موقع المحطة القاعدية (داخل منطقة التغطية، على الحواف، في الزاوية، خارج منطقة التغطية على مسافات مختلفة) في شبكات الاتصالات اللاسلكية عاملاً مؤثراً ومهماً. تُعد المحطة القاعدية المكون الرئيسي للشبكة اللاسلكية، المسؤولة عن تنظيم واستقبال الإشارات من وإلى أجهزة المستخدم. يؤثر

موقع المحطة القاعدية على جودة الخدمة ومنطقة تغطية الشبكة. إن وضع المحطة القاعدية في وسط منطقة التغطية يضمن أفضل قوة إشارة وتغطية لجميع أجهزة المستخدم داخل المنطقة. ومن ناحية أخرى، فإن وضع المحطة القاعدية على حواف منطقة التغطية أو في أحد أركانها قد يؤدي إلى ضعف الإشارات وتقليل التغطية للأجهزة الموجودة في تلك المناطق. يمكن أن يؤثر وضع المحطة القاعدية خارج منطقة التغطية على مسافات مختلفة بشكل كبير على أداء الشبكة. تنخفض قوة الإشارة ومنطقة التغطية مع زيادة المسافة بين المحطة القاعدية والعقد، مما يؤدي إلى انخفاض جودة الخدمة ومشكلات الاتصال المحتملة. لذلك، من الضروري التخطيط بعناية وتحسين موقع المحطات القاعدية في شبكات الاتصالات اللاسلكية لضمان أفضل اتصال وتغطية وجودة خدمة ضمن الشبكة.

الدافع وراء تطوير هذه الخوارزمية الهجينة هو الجمع بين نقاط القوة في الخوارزميتين –خوارزمية Firefly والتطور التفاضلي –لإنشاء تقنية تحسين عامة أكثر فعالية ولذلك، فإن الخوارزمية الناتجة التي تم تطويرها من خلال الجمع بين خوارزمية اليراع والتطور التفاضلي تسمى " Hybrid-Firefly Algorithm and Differential Evolution" أو "H-FADE" للاختصار.

2.4.3 مبدأ عمل الخوارزمية H-FADE

يتم اعتماده المسافة بين عقدة المصدر ورأس العنقود في الخوارزميات السابقة (وهي الموسط الوحيد أثناء تشكيل العناقيد وتحديد العقد المشكلة لكل عنقود) أما في الطريقة الجديدة المقترحة تم إجراء تفاضلات بين المسافتين (عقدة رأس عنقود والمسافة الثانية رأس عنقود محطة قاعدية) وذلك لتقليل الأثر الناتج عن الازدياد الأسي لاستهلاك الطاقة اللازمة للإرسال مع زيادة المسافة عند الإرسال لمسافات بعيدة (مقارنة طول المسار الكلي من عقدة المصدر إلى المحطة القاعدية). كما هو موضح بالشكل 3–34 أ–طريقة تشكيل العناقيد، حيث تنتمي العقدة للعنقود الذي يحقق أقل مسافة بين رأس عنقوده والعقدة. ب–طريقة تشكيل العناقيد في الخوارزمية المقترحة، حيث يتم الأخذ بعين الاعتبار المسار الكلي لنقل البيانات . يتم الأخذ بعين الاعتبار المسار الكلي عقدة – رأس عنقود ورأس عنقود – محطة قاعدية عند تشكيل العناقيد.

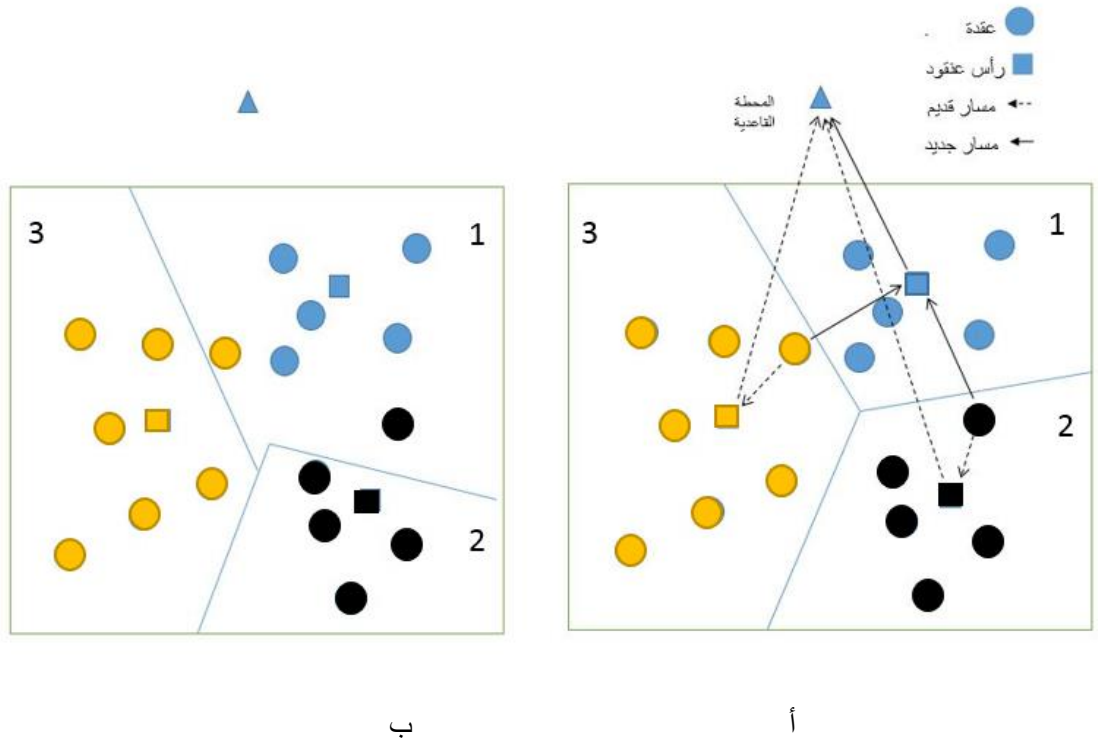
يتم مقارنة كل فرد (حل) كما عرضنا سابقا من المجتمع (أو السرب) مع أخر على أساس تابع الهدف ويتنج حل جديد إما عبر اقتراب يراع من آخر كما في خوارزمية اليراع، أو ينتج الحل من مفاضلة حلين كما في خوارزمية التطور التفاضلي في الطريقة الهجينة المقترحة يقترب فرد من أخر وفق طريقة

خوارزمية اليراع مع تبديل الجزء العشوائي في معادلة التقارب بتزاوج أبوين عشوائيين من السرب فتصبح معادلة الاقتراب الجديدة كالتالي:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i + \beta_0 e^{-\gamma|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) + F(\mathbf{r}_{n1} - \mathbf{r}_{n2}) \qquad (7-3)$$

$\mathbf{r}_i$ موقع اليراع i، $\mathbf{r}_j$ موقع اليراع j، $\boldsymbol{n1}$ و $\boldsymbol{n2}$ أرقام عشوائية طبيعية بين 1 و العدد الكلي للحلول

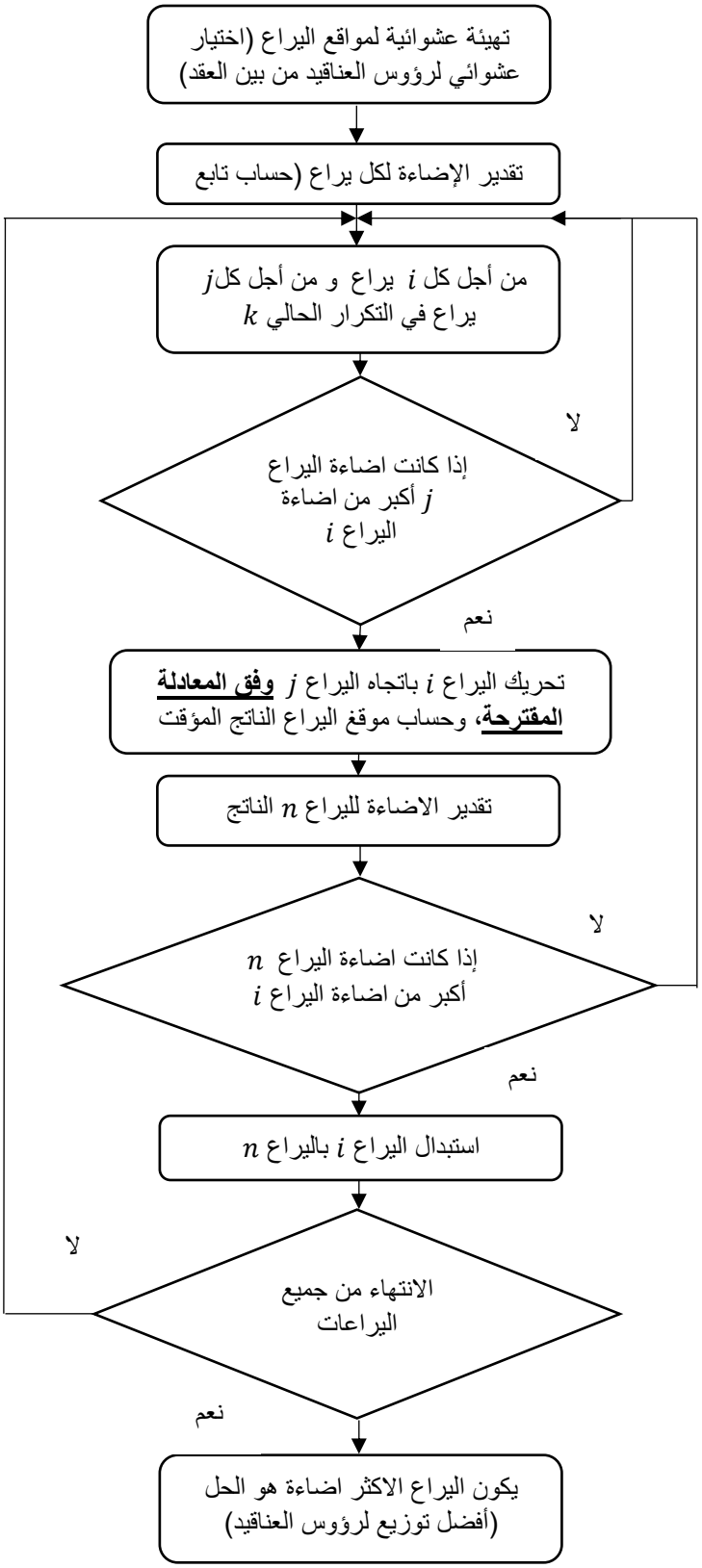
كما يظهر الشكل 3–35 المخطط التدفقي للخوارزمية H-FADE



الشكل 3–34. مبدأ عمل خوارزمية H-FADE، [الباحث]

كما يظهر الشكل 3–35 المخطط التدفقي للخوارزمية H-FADE بداية تم إجراء محاكاة لتوزيع عشوائي لتوزيع العقد ضمن مساحة $100\times100\ m^2$ كما يظهر في الشكل 3–36 وتم تكرار عملية المحاكاة 15 مرة لكل طريقة في كل مرة مواقع عشوائية للعقد بالنسبة للمحطة القاعدية موجودة في الموقع $(0{,}125)$ علماً أن العقد تنتشر وفق المحاور $x \in [-50{,}50]$ و $y \in [-50{,}50]$. تحتوي العقد على طاقة أولية 1 جول.

يظهر الجدول 3–12 موسطات المحاكاة المستخدمة في محاكاة الخوارزمية الهجينة H-FADE وفق كل سيناريو مستخدم.



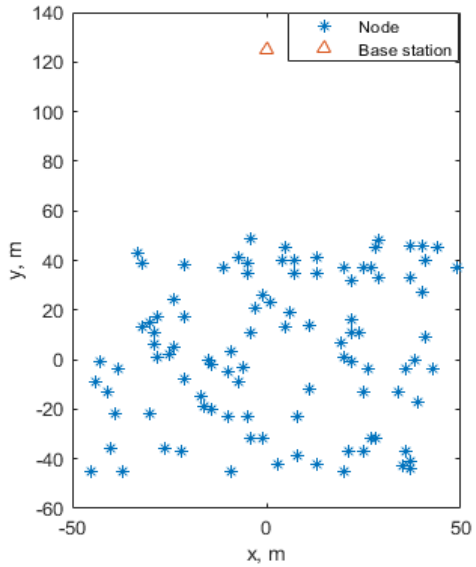
الشكل 3–35. المخطط التدفقي للخوارزمية H-FADE [الباحث]

ملاحظة: تم القيام بإعادة محاكاة الاداء للخوارزميات المدروسة 15 مرة، وفي كل مرة جرى توزيع العقد بشكل عشوائي في الحقل المراقب.

الجدول 3–12. موسطات المحاكاة المستخدمة في محاكاة الخوارزمية الهجينة H-FADE

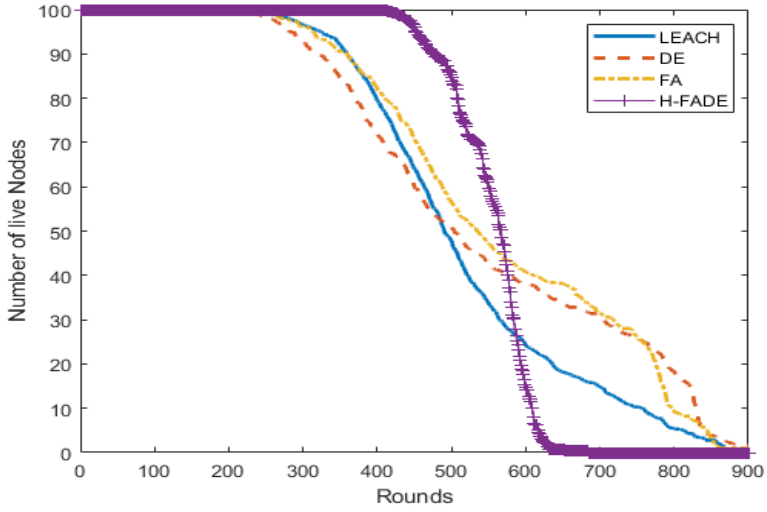
الموسطة	القيمة
مستوى الطاقة الابتدائية	(3-1) J
عدد العقد	100
عدد العناقيد	5
المساحة	100×100 M^2
مدى الإرسال	75 m
موقع المحطة القاعدية	خارج الحقل
التوزيع	عشوائي
التموضع	ثابت

ثم أخذنا متوسط نتائج الاداء، وبالتالي مقارنات صحيحة للتأكد من أثر الخوارزميات المدروسة وفعاليتها في إطالة مدة حياة الشبكة بالإضافة الى تعزيز التغطية وتعزيز جودة الخدمة في الشبكة بغض النظر عن مواقع العقد.



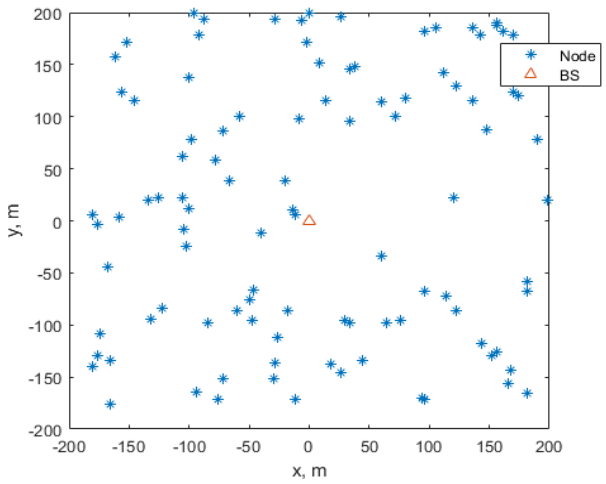
الشكل 3–36. توزع العقد وفق التوزع العشوائي مساحة منطقة $100\times100\ m^2$ وموقع BS (0,125) [الباحث]

يوضح الشكل 3–37 فعالية الطريقة المقترحة H-FADE في زيادة مدة حياة الشبكة مقارنة بالخوارزميات DE، FA ، LEACH عند استخدام طاقة أبتدائية للعقد 1 J مع مساحة $100\times100\ m^2$ وموقع BS (0,125). تم اجراء محاكاة الخوارزميات المدروسة 15 مرة، في كل مرة يكون توزيع عشوائي ضمن الحقل المراقب ويختلف عن المرات السابقة.

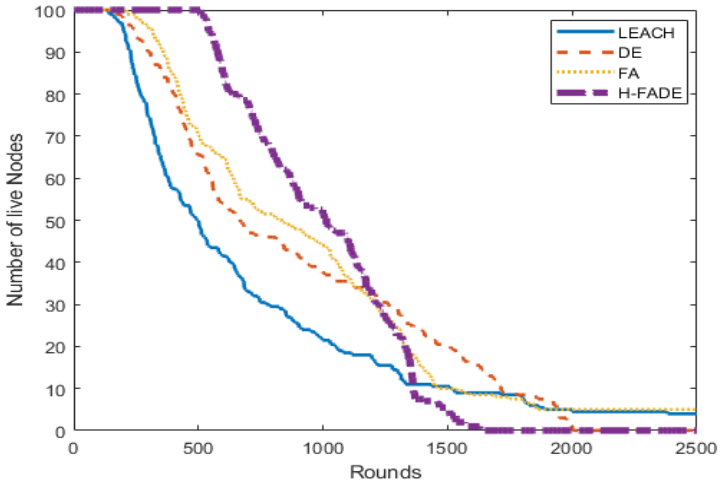


الشكل 3–37. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة أولية للعقد 1J[الباحث]

كما نه تم القيام بمحاكاة لأداء الخوارزمية الهجينة H-FADE مع كل من الخوارزميات DE، LEACH و FA. مع مساحة تغطية ($400\times400\ m^2$) وتوزيع عشوائي للعقد بتموضع ثابت وموقع المحطة القاعدية في مركز منطقة التغطية. يظهر الشكل 3–38 توزع العقد وفق النشر العشوائي مع وجود المحطة القاعدية في مركز منطقة التغطية. ويظهر في الشكل 3–39 أداء الخوارزميات المدروسة. اعتمدنا طاقة أولية للعقد مقدارها 3 J.

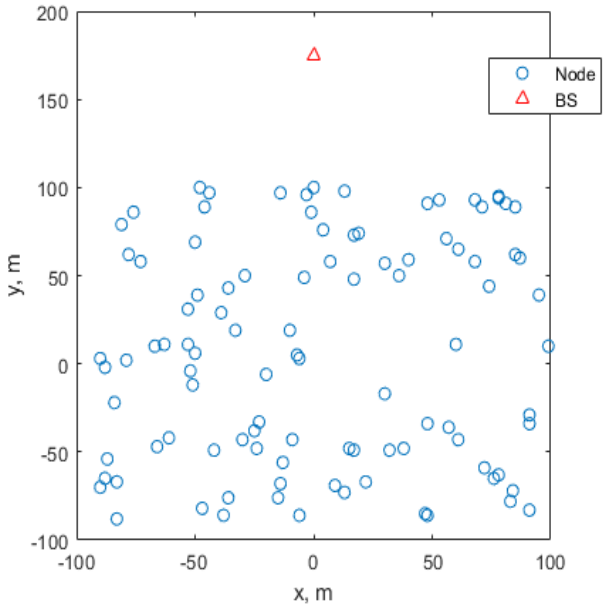


الشكل 3–38. توزع العقد بالنشر العشوائي والتموضع الثابت مع تموضع المحطة القاعدية في مركز المنطقة [الباحث]



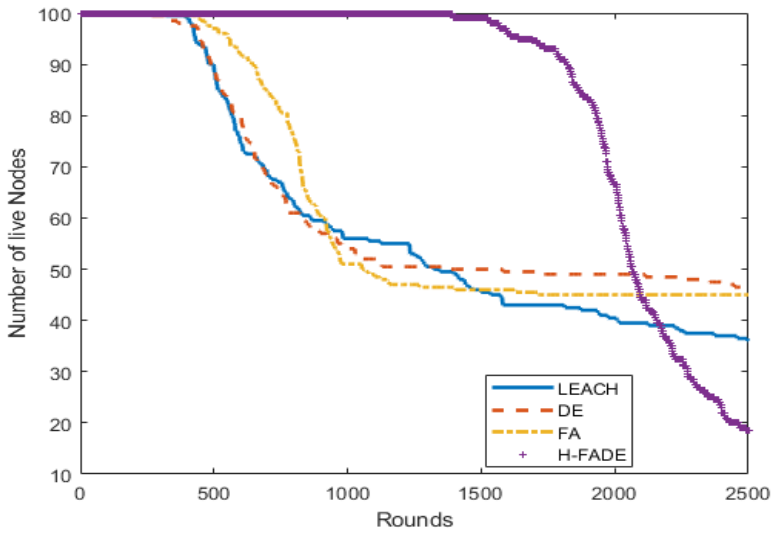
الشكل 3–39. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة عند طاقة 3 J [الباحث]

نلاحظ من الشكل 3–39 تفوق الخوارزمية H-FADE على خوارزميتي FA , DE بالإضافة إلى LEACH واستمر استقرار الشبكة حتى 750 جولة عند استخدام خوارزمية H-FADE مقارنة باستقرار الشبكة لاقل من 500 جولة عند استخدام الخوارزميات الاخرى. بتجربة إضافية، قمنا باعتماد موقع المحطة القاعدية خارج منطقة الحقل وتم تصغير مساحة المنطقة، وذلك في محاولة التخلص من الموت السريع للعقد بسبب وجود مسافات اتصال كبيرة بين العقد عند زيادة مساحة المنطقة، تنتشر العقد وفق المحاور $x \in [-100,100]$ و$y \in [-100,100]$.. يظهر الشكل 3–40 النشر المقترح وفق أبعاد المنطقة وتواجد المحطة القاعدية (0،175). ويلاحظ في هذه الحالة زيادة استهلاك الطاقة عند استخدام خوارزميات (DE – FA – LEACH) وتضعف فعالية خوارزمية AEPFA عند انتقال موضع المحطة بعيداً عن الزاوية. في هذه المحاكاة اعتمدنا الطاقة الاولية للعقد 7 J. يظهر الشكل 3–41 عدد العقد الحية مع عدد الجولات، نجد أن الخوارزمية الهجينة تعطي تحسين واضح في الحفاظ على حياة العقد لفترة أطول مقارنة بالخوارزميات الأخرى. حيث نجد أنه عند استخدام الخوارزمية H-FADE الهجينة، تحافظ الشبكة على جميع عقدها حية حتى الجولة 1500 تقريبا، بينما يُفقد عدد كبير من العقد في الشبكة عند استخدام الخوارزميات الأخرى عند الجولة 500 تقريباً.



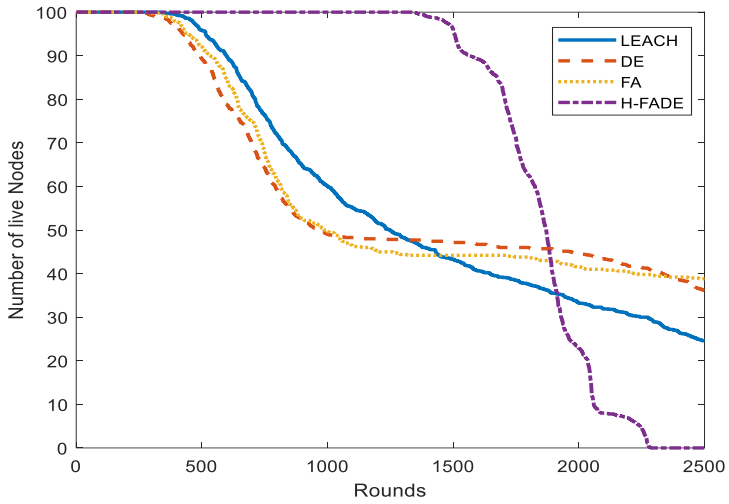
الشكل 3-40. مخطط نشر العقد العشوائي مع التموضع الثابت ضمن الحقل مع إيضاح موقع المحطة القاعدية [الباحث]

ثم تم حساب متوسط النتيجة للمرات الـ 15 في الشكل 3-42.



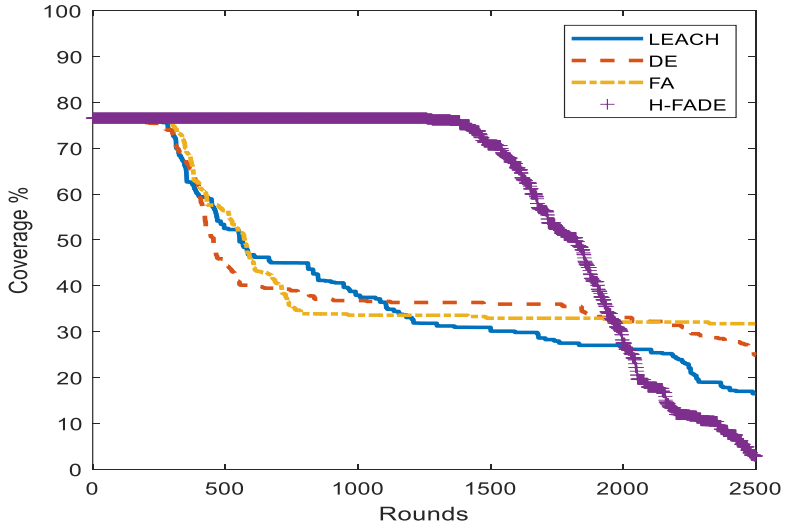
الشكل 3-41. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من LEACH، FA، DE،H-FADE .[الباحث]

يلاحظ من الشكل 3-42 تفوق الطريقة المقترحة H-FADE لأكثر من الضعف مقارنة بالخوارزميات التي تم المقارنة معها وذلك لانه تم في كل عملية عنقدة قياس المسافة عقدة رأس عنقود والمسافة رأس عنقود محطة قاعدية ومن ثم تحديد انتماء العقدة الى العنقود تبعا للمسافة الأقل.



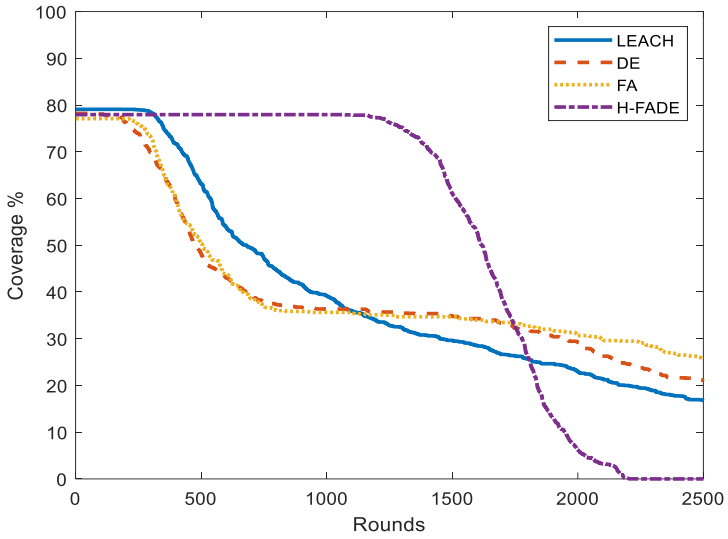
الشكل 3–42. تغير عدد العقد الحية بدلالة الجولات عند طاقة أولية للعقد 3J و متوسط النتيجة لـ 15 تكرار [الباحث]

يبين الشكل 3–44 تغير التغطية مع عدد الجولات ومدى التحسن في النسبة المئوية للتغطية عند استخدام الخوارزمية الهجينة مقارنة بها عند استخدام الخوارزميات الأخرى.



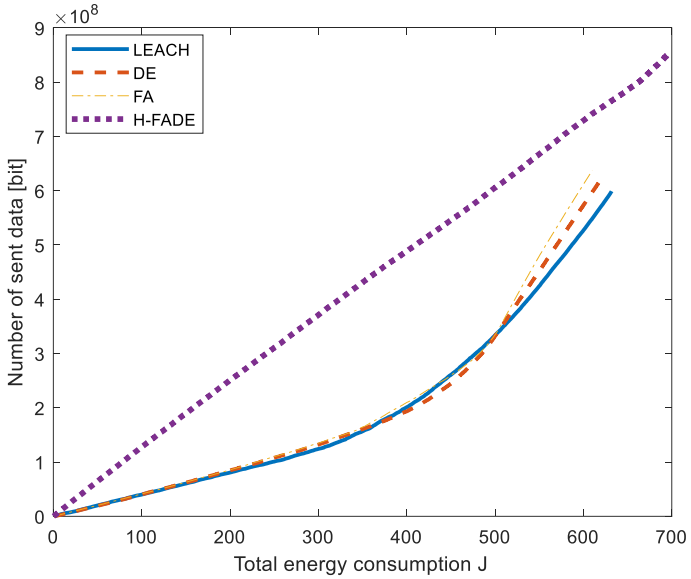
الشكل 3–43. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات لكل من الخوارزميات LEACH ، FA،DE وH-FADE [الباحث]

ويظهر الشكل 3–44 تغير النسبة المئوية للتغطية مع تغير الجولات لكل من خوارزميات المقارنة عند اخذ متوسط لـ 15 تكرار.



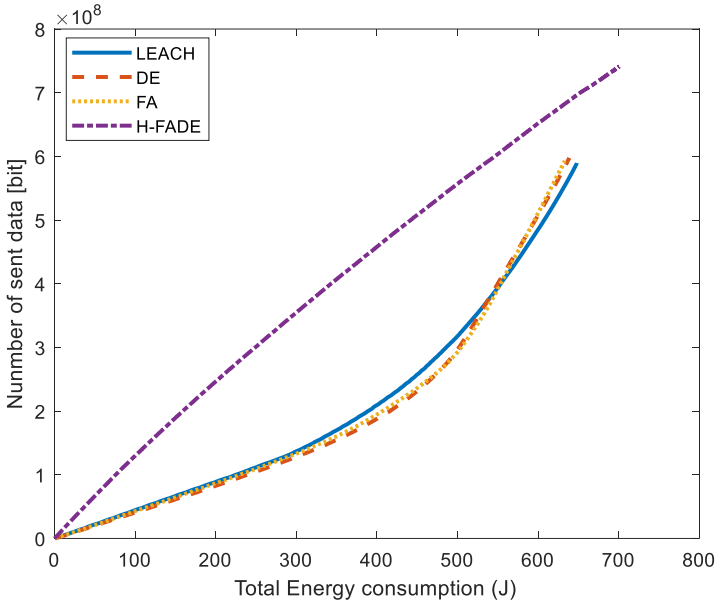
الشكل 3–44. تغير النسبة المئوية للتغطية بدلالة الجولات للخوارزميات DE،FA ، LEACH و H-FADE واخذ متوسط 15 تكرار [الباحث]

نلاحظ تفوق الطريقة الهجية بتعزيز التغطية بالمقارنة ببقية الخوارزميات التي تم المقارنة معها كما نجد ان النسبة المئوية العظمى للتغطية ضمن الحقل كانت 80% وذلك لان التوزيع عشوائي للعقد في الحقل مما شكّل مناطق من الحقل دون تغطية، ويظهر الشكل 3–45. كمية المعطيات المرسلة مع كمية الطاقة اللازمة لإرسالها إلى المحطة القاعدية. نجد أن الطاقة اللازمة لأرسال كمية من المعطيات عند استخدام الخوارزمية الهجينة أقل منها عند استخدام الخوارزميات الأخرى.



الشكل 3–45. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الطاقة اللازمة لإرسالها وذلك من أجل كل من الخوارزميات DE،FA ، LEACH و H-FADE [الباحث]

يظهر الشكل 3-46 كمية المعطيات المرسلة مع كمية الطاقة اللازمة لإرسالها إلى المحطة القاعدية مع اخذ متوسط لـ 15 تكرار وفق توزيع عشوائي.



الشكل 3-46. تغير كمية البيانات المرسلة بدلالة الطاقة اللازمة لإرسالها وذلك للخوارزميات FA،DE ، LEACHو H-FADE عند اخذ متوسط 15 تكرار [الباحث]

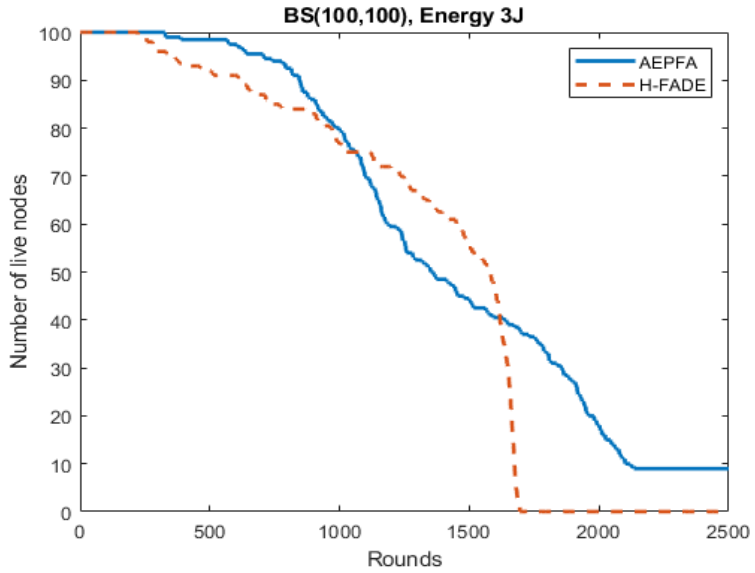
يظهر الجدول 3-13. عدد العقد الحية عند قيم محددة لعدد الجولات من أجل الخوارزميات المدروسة. نجد أن الخوارزمية الهجينة تساهم في حفاظ الشبكة على عقدها خلال الجولات لمدة تصل لضعفي الجولات عند استخدام الخوارزميات الأخرى. عند الجولة رقم 1500 يكون عدد العقد الحية في الشبكة 99 عند استخدام الخوارزمية الهجينة مقابل 50 عقدة عند استخدام الخوارزميات الأخرى. أي نسبة تصل بحدود 100% من العقد.

الجدول 3-13. عدد العقد الحية بدلالة الجولات للخوارزميات المدروسة [الباحث]

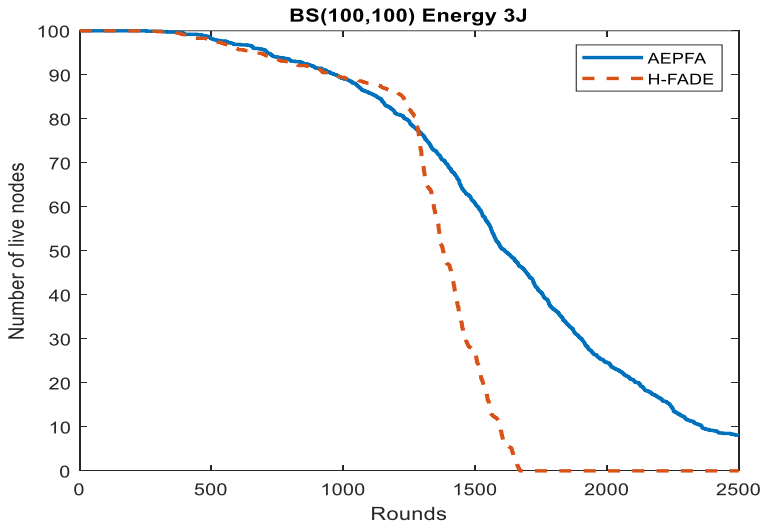
عدد العقد الحية				الجولة
H-FADE	FA	DE	LEACH	
100	100	100	100	0
100	95	87	80	500
100	52	55	55	1000
99	44	50	43	1500
70	42	48	40	2000
20	41	47	36	2500

قمنا بعمل محاكاة للخوارزمية الهجينة H-FADE مع الخوارزمية AEPFA المقترحة سابقاً عند وجود المحطة القاعدية عند زاوية منطقة التغطية في الموقع (100،100). والنقطتين (125،125) والموقع (150،150)

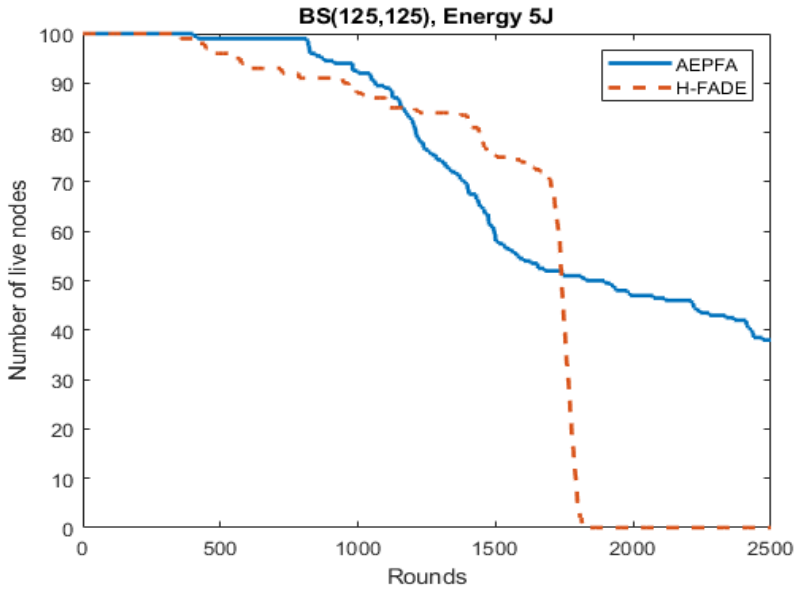
كما يظهر في الأشكال 3-47 ، 3-48 ، 3-49 ، 3-50 ، 3-51 ، 3-52 للحالتين على التوالي الأولى توزيع عشوائي مع تموضع ثابت والثاني توزيع عشوائي وأخذ متوسط لـ 15 تكرار.



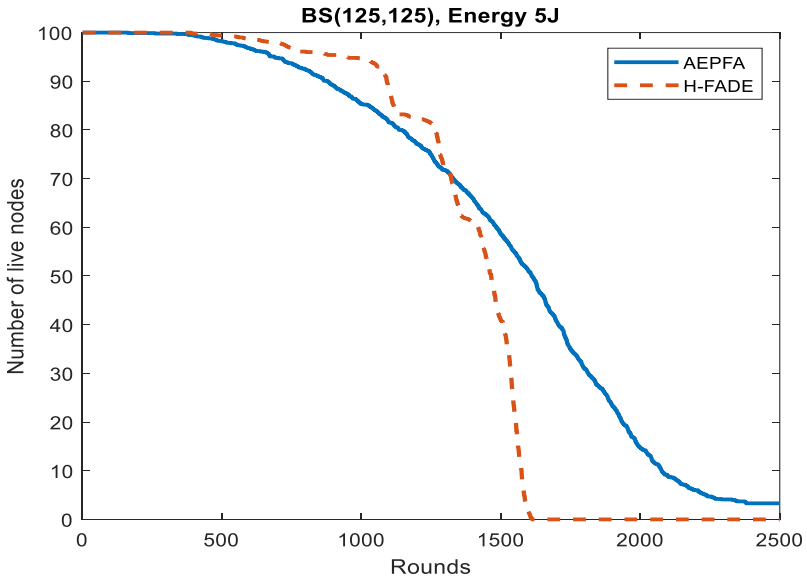
الشكل 3-47. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من AEPFA – H-FADE عند موقع محطة قاعدية (100,100) وطاقة أولية للعقد 3 جول[الباحث]



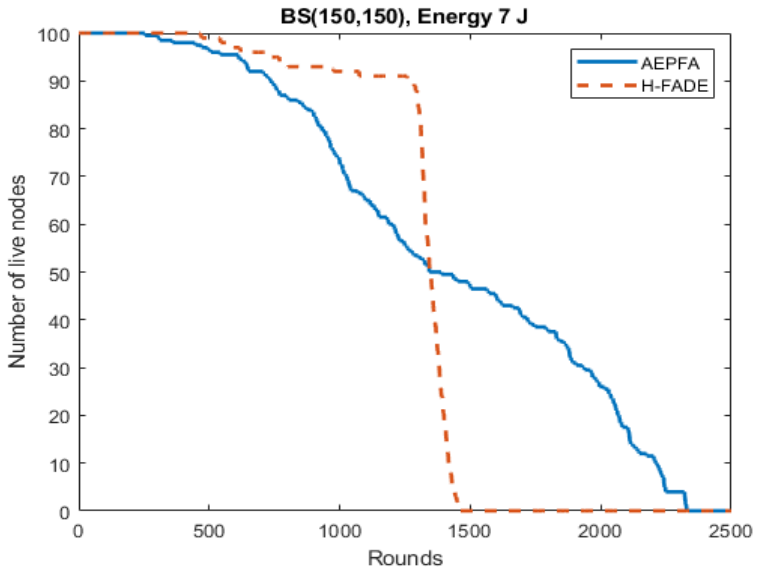
الشكل 3-48. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من AEPFA – H-FADE عند موقع محطة قاعدية (100,100) وطاقة أولية للعقد 3 جول عند اخذ متوسط 15 تكرار[الباحث]



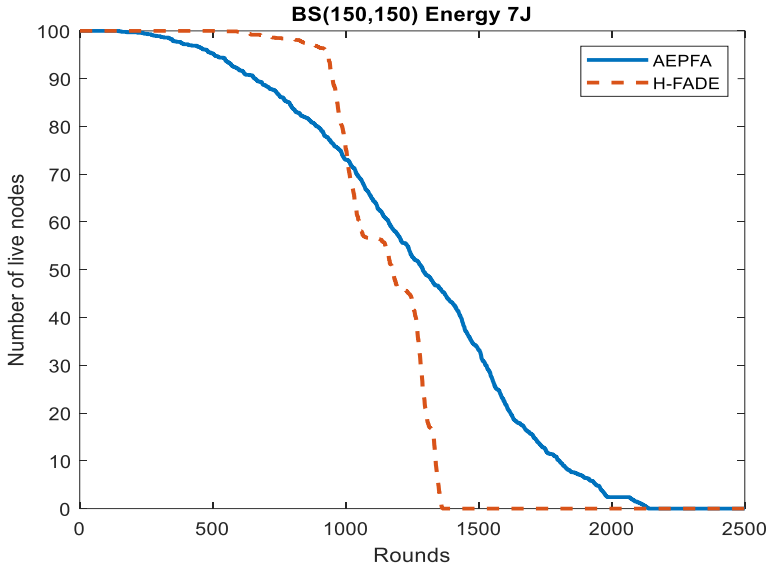
الشكل 3–49. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFA عند موقع محطة قاعدية (125,125) وطاقة أولية للعقد 5 جول [الباحث]



الشكل 3–50. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من H-FADE – AEPFA عند موقع محطة قاعدية (125,125) وطاقة أولية للعقد 5 جول واخذ متوسط ل 15 تكرار [الباحث]

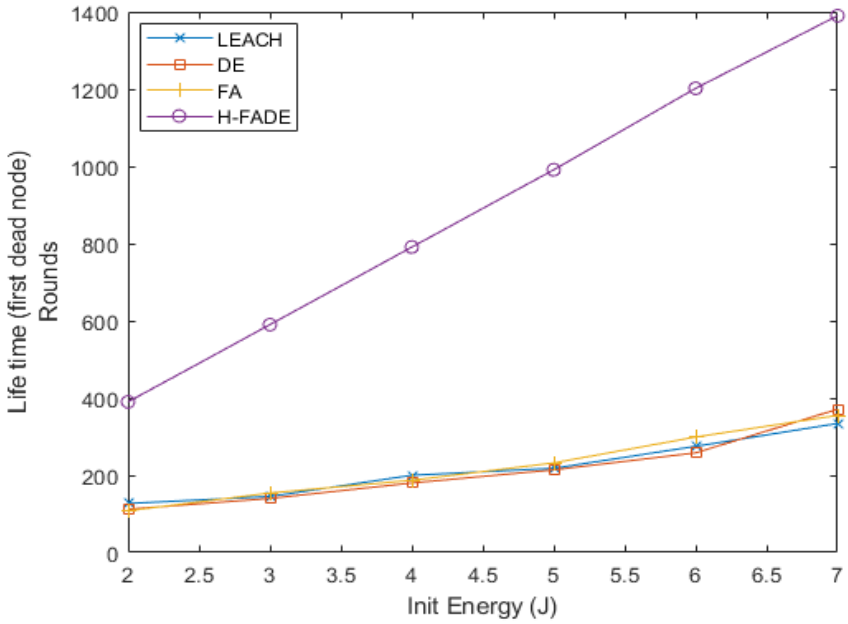


الشكل 3–51. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من AEPFA – H-FADE عند موقع محطة قاعدية (150,150) وطاقة أولية للعقد 7 جول [الباحث]



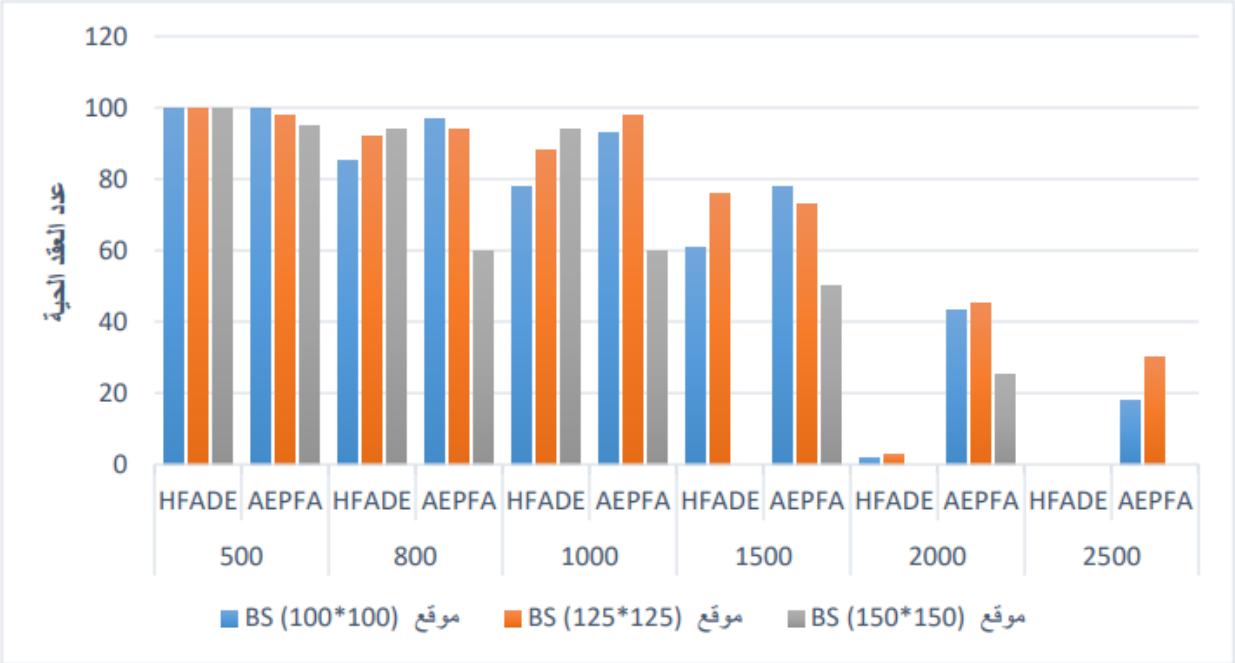
الشكل 3–52. عدد العقد الحية بدلالة الجولات لكل من AEPFA – H-FADE عند موقع محطة قاعدية (150,150) وطاقة أولية للعقد 7 جول واخذ المتوسط لـ 15 تكرار[الباحث]

يظهر الشكل 3–53 موت العقد عند تغير القيمة الابتدائية لطاقة العقد مع تغير الجولات بالنسبة للخوارزميات المستخدمة



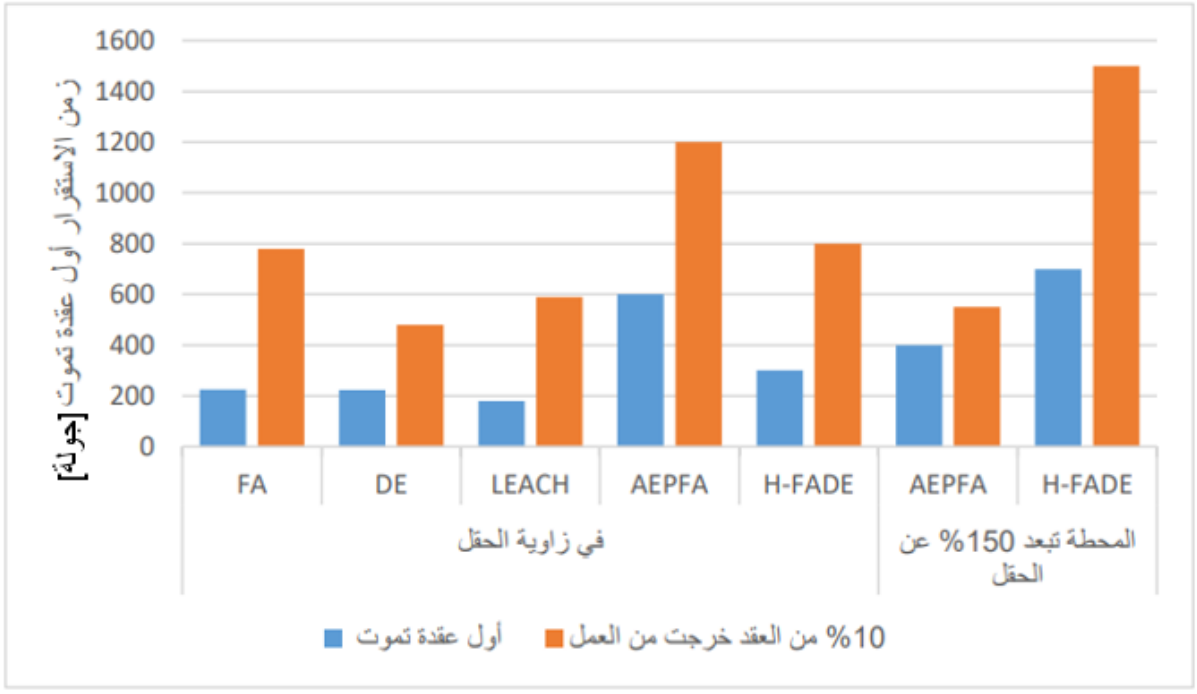
الشكل 3–53. يعبر عن موت العقد عند تغير القيمة الابتدائية لطاقة العقد بدلالة الجولات [الباحث]

نجد من الأشكال السابقة أن خوارزمية التقسيم الإقليدية AEPFA أفضل من الخوارزمية الهجينة H-FADE عندما تكون المحطة القاعدية على زاوية منطقة التغطية، في حالتي النشر (التوزيع العشوائي بتموضع ثابت – والتوزيع العشوائي وتكراره 15 مرة واخذ متوسط مواقع العقد وتنفيذ اختبار المحاكاة) ولكن مع ابتعاد المحطة القاعدية عن حواف منطقة التغطية، تغلب الخوارزمية الهجينة H-FADE على خوارزمية التقسيم الإقليدية AEPFA . يعود ذلك إلى أن الخوارزمية الهجينة هي ذات استخدام عام أينما وجدت محطة التغطية، بينما تستخدم خوارزمية التقسيم الإقليدية عند وجود المحطة القاعدية في مكان محدد وهو زاوية منطقة التغطية. نلاحظ من الشكل (3–54) مقارنة بين خوارزمية H-FADE وخوارزمية AEPFA بالنسبة لعدد العقد الحية مع عدد الجولات. نجد ان فعالية الخوارزمية AEPFA تكون افضل من HFADE عند وجود المحطة القاعدية في زاوية الحقل بينما تكون فعالية HFADE اكبر من AEPFA عند ابتعاد المحطة القاعدية عن الحقل وفي كلتا الحالتين تكون الخوارزميتين المقترحتين افضل من FA – DE – LEACH في إطالة مدة حياة الشبكة وتعزيز تغطية العقد في الحقل المراقب.



الشكل 3–54. مخطط مقارنة تغير عدد العقد الحية بدلالة عدد الجولات بالنسبة AEPFA –H-FADE [الباحث]

كما نلاحظ في الشكل (3–55) التغير في مدة الاستقرار بين الخوارزميتان المدروسة في البحث.



الشكل 3–55. طول فترة الاستقرار عند استخدام خوارزميات العمل [الباحث]

مناقشة

استناداً إلى الأشكال السابقة بلاحظ أن الخوارزمية H-FADE وخوارزمية AEPFA قدمت حلاً لموضوع القيود المفروضة على الطاقة حيث أنها تقوم بإطالة مدة حياة الشبكة وزيادة فترة الاستقرار فيها مما يزيد النسبة المئوية للتغطية ضمن الحقل ويقلل من ثقوب التغطية وبالتالي زيادة وثوقية النتائج التي يتم تحصيلها من الحقل المراقب. وكان هذا التحسين بشكل عام بغض النظر عن موضع المحطة القاعدية (داخل المنطقة – على زاويتها– خارجاً بعيدة عن حوافها) وبسبب بعد المحطة القاعدية عن حواف منطقة التغطية في H-FADE أدى لموت مبكر للعقد (تبقى أفضل من الخوارزميات الأخرى) وذلك لان إرسال أي رسالة بين رأس العنقود والمحطة هو اكبر من المسافة الصغرى d_0 والتي تجعل استهلاك الطاقة في حال الزيادة عن هذه القيمة d_0 وفق المعادلة (2–6) من الرتبة الرابعة بالنسبة للمسافة d أما بالنسبة AEPFA نتيجة التقسيم الاقليدي السابق والثابت ممكن أن يكون الإرسال اقل من العتبة.

يظهر الجدول 3–14 مقارنات بين دراسات سابقة حديثة والخوارزميتين AEPFA , H-FADE ويبين مقدار التحسن بنسبة تجاوزت 90% لخوارزمية H-FADE

5.3 الخاتمة Conclusion

تناولت هذه الأطروحة دراسة WSNs وبعض الطرائق التي تستخدم للحد من المشكلات التي تواجه عمل هذه الشبكات وبالأخص مشكلة محدودية الطاقة واثرها على مدة حياة الشبكة وعلى تغطية العقد للحقل المراقب وبالتالي على جودة الخدمة لهذه الشبكة ضمن متطلبات التطبيق الذي تم نشر الشبكة لتحقيقه في الحقل المراد مراقبته إضافةً إلى دراسة خوارزمية FA وخوارزمية DE ونمذجة الشبكة ضمن برنامج MATLAB ومحاكاة اثر استخدام كل من الخوارزميتين في التوجيه كآلية للحد من استهلاك الطاقة ومقارنة بين الخوارزميتين مع بروتوكول LEACH ومن ثم تطوير خوارزمية AEPFA ونمذجته ضمن الشبكة وتحديد إيجابياتها وسلبياتها ومن ثم تطوير خوارزمية هجينة بين FA وDE ونمذجتها ضمن شبكة الحساسات اللاسلكية وتبيان اثرها على مشكلة استهلاك الطاقة وتقليل ثقوب التغطية ومقارنة النتائج بين الخوارزميات السابقة التي تم العمل عليها وأخيرا المقارنة مع الدراسات المشابهة الحديثة.

لقد قدمت الدراسة تطوير خوارزمية هجينة تجمع بين Firefly وDE في WSN والتي توفر العديد من الفوائد لزيادة كفاءة الطاقة وتعزيز التغطية، خاصة عند التعامل مع التحدي المتمثل في تحديد موقع

المحطة القاعدية خارج منطقة مجال المراقبة. فيما يلي المزايا الرئيسية لهذا النهج بناءً على المصادر المقدمة.

زيادة مدة حياة الشبكة وكفاءتها: يهدف النهج المتبع إلى تحسين خوارزميات التجميع في WSN لزيادة مدة حياة الشبكة وكفاءتها. ومن خلال تحسين استهلاك الطاقة وأداء الشبكة، يمكن لهذه المنهجية إطالة مدة حياة الشبكة وتعزيز كفاءتها الإجمالية.

نقل بيانات موفر للطاقة: يمكن لإدارة الطاقة المثلى الهجينة للتجميع في WSN أن تدعم نقل بيانات موفر للطاقة، مما يقلل من استهلاك الطاقة ويطيل مدة حياة الشبكة. وهذا أمر بالغ الأهمية للحفاظ على عمليات الشبكة مع الحفاظ على موارد الطاقة.

إدارة الطاقة المحسنة: تعمل الخوارزمية الهجينة المقترحة على تحسين استخدام الطاقة في WSN، مما يضمن إدارة فعالة للطاقة. وهذا يؤدي إلى توازن أفضل للطاقة وتوجيه امثلي لنقل البيانات.

يعزز تطوير خوارزمية هجينة تدمج Firefly وDE في WSN بشكل كبير كفاءة الطاقة، ويحسن التغطية، ويحسن إدارة الطاقة، ويضمن نقل البيانات بكفاءة، مما يؤدي في النهاية إلى معالجة التحديات المرتبطة بتحديد موقع المحطة القاعدية للشبكة. خارج منطقة مجال المراقبة.

الجدول 3-14. المقارنة بين الخوارزمية المقترحة مع بعض الأبحاث السابقة [الباحث]

البحث	موسطات				الخوارزميات المقترحة	مزايا	محددات
	مساحة المنطقة	عدد العقد	E [J]	موقع BS			
Rami Reddy at el 2023	100×100	100	1	مركز الحقل	تحسين الذئب الرمادي المحسن (IGWO)	تحسين استقرار الشبكة بنسبة 16-19%. عدد جولات لأول عقدة تموت 5800	استهلاك الطاقة يزيد خلال عملية اختيار CH.
Samiayya, at el 2023	100×100	100	1	داخل الحقل	تهجين الحوت الافعواني المحسن (HSWO)	تخفيض استهلاك الطاقة إلى 5-10%. عدد جولات لأول عقدة تموت900	استنزاف الطاقة المبكر يحدث في عقد الحساسات خلال عملية اختيار CH .
Ramalingam at el 2023	1500×1000	150	1	داخل المنطقة	خوارزمية تحسين الأرانب الاصطناعية AROA	تمديد مدة حياة الشبكة والإنتاجية بنسبة 15% و5% عدد جولات لأول عقدة تموت 350	تستغرق فترة أطول.
Abraham, R at el 2023	500×500	100	1	منتصف الضلع الخارجي (250,500)	خوارزمية بحث فلامنغو (FSA)	تعزيز مدة حياة الشبكة وكفاءة الطاقة. عدد جولات لأول عقدة تموت400 جولة	اختيار عقد CH المحدد بواسطة الخوارزمية ليست أفضل.
Pratha, S.J. at el 2023	100×100	100	1	زاوية الحقل	خوارزمية تحسين الفراشة والزهرة (HMMB-FPOA)	تحسين مدة حياة الشبكة ونسبة تسليم الرزمة بنسبة 16.21% و13.28%. عدد جولات لأول عقدة تموت500	نهج HMMB-FPOA هو مناسبة لسيناريوهات محددة.
Cherappa at el 2023	500×500	500	0.5	داخل الحقل	تحسين سمكة أبو شراع التكيفية (ASFO)	تحسين الأداء للشبكة 93.19%. عدد جولات لأول عقدة تموت 5500	يستغرق المزيد من الوقت
الباحث	200×200 100×100 300×300 400×400	50 100 150	0.5 3 6 10	زاوية الحقل خارج الحقل	AEPFA FAمع التقسيمات الإقليدية الثابتة	تحسين حياة الشبكة بنسبة تتجاوز 50 % وتعزيز تغطيتها تبعا لمتطلبات التطبيق عدد جولات لأول عقدة تموت 800	عدم فعاليتها الكاملة بعيدا عن الزاوية سواء للداخل او خارجاً
الباحث	50×50 100×100 200×200	100	1 3 5 7	داخل الحقل زاوية الحقل خارج الحقل	H-FADE FA +DE	تحسين حياة الشبكة بنسبة تتجاوز 90% وتعزيز تغطيتها تبعا لمتطلبات التطبيق	وجود المحطة القاعدية في زاوية الحقل

الآفاق المستقبلية Future Work

يمكن تطوير هذا البحث في عدة محاور منها:

يعتبر مستقبل خوارزميات التحسين في توفير الطاقة لـWSN واعد، مع تطبيقات محتملة في الشبكات الذكية وأنظمة الطاقة المتجددة وWSN عموماً.

- يمكن أن يؤدي تكامل الذكاء الاصطناعي مع خوارزميات التحسين إلى حلول أكثر تقدماً لهذه التطبيقات.
- يمكن دراسة زيادة حياة الشبكة باستخدام DE و FA عندما تكون مواقع العقد غير ثابتة (كالطائرات المسيرة)
- يمكن دراسة استخدام الخوارزميات السابقة لاقتراح مواقع جديدة للعقد لزيادة تغطية الحقل المراقب
- يمكن استخدام الخوارزميات لتحسين استهلاك الطاقة في تطبيقات مختلفة مثل الشبكات الذكية والمركبات الذكية وأنظمة الطاقة المتجددة.

يمكن القول إن الخوارزميات الحديثة تعد وسيلة فعالة لتحسين فعالية استهلاك الطاقة وتعزيز الأداء في WSN، ومن المتوقع أن تستمر التطورات في هذا المجال لتحقيق حلول أكثر تطوراً وكفاءة.

منشورات البحث Research Publications

1- جرى الحصول على موافقة نشر Research Approval لجزء من نتائج البحث في مجلّة جامعة دمشق للعلوم الهندسية تحت عنوان **" مقارنة تحليلية لأداء كل من خوارزمية اليراع وخوارزمية التطور التفاضلي في شبكات الحساسات اللاسلكية"**.

تاريخ الإيداع 2023 /1/23

تاريخ القبول 2023/5/23.

2- جرى الحصول على موافقة نشر Research Approval لجزء من نتائج البحث في مجلّة جامعة دمشق للعلوم الهندسية تحت عنوان **" فعالية خوارزمية التطور المعدَّلة لتحسين عمر الشبكة في WSN"**.

تاريخ الإيداع 2023/2/20

تاريخ القبول 2023/7/9.

3- جرى الحصول على موافقة نشر Research Approval لجزء من نتائج البحث في مجلّة جامعة دمشق للعلوم الهندسية تحت عنوان " **مسح وتحليل تجريبي لخوارزمية التطور التفاضلي**".

تاريخ الإيداع 2022/8/30

تاريخ القبول 2022/10/27.

4-تم إيداع بحث من نتائج البحث في مجلّة جامعة دمشق للعلوم الهندسية تحت عنوان "**استخدام التقسيم الاقليدي الزاوي لزيادة فعالية خوارزمية اليراع في شبكات الحساسات اللاسلكية**" وتم طلب تعديلات تم تنفيذها وإعادة البحث

تاريخ الايداع 2024/4/20

تاريخ القبول 2014/12/4

References المراجع

1- Abbasi, A. A., & Younis, M. (2007). *A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks.* Computer Communications, 30, 2826–2841.

2- Abraham, R., & Vadivel, M. (2023). *An energy efficient wireless sensor network with flamingo search algorithm based cluster head selection*. Wireless Personal Communications , 130(3), 1503–1525.

3- Ali, M.Z., Awad, N.H., & Suganthan, P.N. (2015*). Multi-population differential evolution with balanced ensemble of mutation strategies for large-scale global optimization*. Applied Soft Computing, 33 , 304–327. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.019

4- Ambareesh, S., Kantharaju, H.C., & Sakthivel, M. (2023). *A novel fuzzy TOPSIS based hybrid jarratt butterfly optimization for optimal routing and cluster head selection in WSN*. Peer-to-Peer Networking and Applications , 16(2), 2512–2524.

5- Anastasi, G., Conti, M., Di Francesco, M., & Passarella, A. (2009*). Energy conservation in wireless sensor networks: A survey*. Ad Hoc Networks, 7 , 537–568.

6- Arunachalam, N., Shanmugasundaram, G., & Arvind, R. (2021). *Squirrel search optimization-based cluster head selection technique for prolonging lifetime in WSNs*. Wireless Personal Communications, 121 , 2681–2698.

7- Bachir, W., Bechkit, Y., Challal, A., & Bouabdallah, A. (2013*). Temperature-aware density optimization for low power wireless sensor networks*. IEEE Communications Letters, 17 (1), 15–18.

8- *Bluetooth Low Energy* (2014). http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy.aspx

9- Cayirci, E., Tezcan, H., Dogan, Y., & Coskun, V. (2006). *Wireless sensor networks for underwater surveillance systems*. Ad Hoc Networks, 4 , 431–446.

10- Chaurasia, S., Kumar, K., & Kumar, N. (2023*). Mocraw: A meta-heuristic optimized cluster head selection based routing algorithm for WSNs*. Ad Hoc Networks , 141, 103079.

11- Cherappa, V., Thangarajan, T., Meenakshi Sundaram, S.S., Hajjej, F., Munusamy, A.K., & Shanmugam, R. (2023*). Energy-efficient clustering and routing using ASFO and a cross-layer-based expedient routing protocol for wireless sensor networks*. Sensors , 23(7), 2788.

12- Cui, S., Goldsmith, A., & Bahai, A. (2004). *Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 22 (6), 1089–1098.

13- Dandekar, D., & Deshmukh, P. (2013*). Energy balancing multiple sink optimal deployment in multi-hop wireless sensor networks.* IEEE 3rd International Advance Computing Conference ،Ghaziabad ،408–412.

14- Dietrich, I., & Dressler, F. (2009). *On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks*, 5 , Article 14.

15- Dondyk, E. (2014). SPS: *An SMS-based push service for energy saving in smartphone's idle state* (Master's thesis). University of Central Florida. Available at http://purl.fcla.edu/fcla/etd/CFE0005157

16- Elhoseny, M., Rajan, R.S., Hammoudeh, M., Shankar, K., & Aldabbas, O. (2020). *Swarm intelligence-based energy efficient clustering with multihop routing protocol for sustainable wireless sensor networks*. International Journal of Distributed Sensor Networks , 16(9), 16–19. DOI:10.1177/1550147720949133

17- Evangelakos, E. A., Kandris, D., Rountos, D., & Tseliki, G. (2022*). Energy sustainability in wireless sensor networks: An analytical survey*. Journal of Low Power Electronics and Applications, 12 , 65. https://doi.org/10.3390/jlpea12040065

18- Gao Q., Zhang J., Shen X.S., Larish B.(2008). A cross-layer optimization approach for energy efficient wireless sensor networks: Coalition-aided data aggregation, cooperative communication and energy balancing. Advances in Multimedia , Article ID 1–12 .

19- Gao, G., Zhang, H., & Li, L. (2013). *A reliable multipath routing strategy for WirelessHART mesh networks using subgraph routing*. Journal of Computational Information Systems, 9 , 2001–2008.

20- Griffin, B., & Detweiler, C. (2017). *Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV*. IEEE International Conference on Robotics and Automation ،Saint Paul ، MN ،2660–2665.

21- Gui, T., Ma, C., Wang, F., & Wilkins, D.E. (2016). *Survey on swarm intelligence based routing protocols for wireless sensor networks: An extensive study*. (2016) في: IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) ،Piscataway ،NJ ،1944–1949.

22- Hadjidj, A., Bouabdallah, A., & Challal, Y. (2011). *Rehabilitation supervision using wireless sensor networks*. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM) ،Lucca3–1 .

23- Hadjidj, A., Bouabdallah, A., & Challal, Y. (2013). *Wireless sensor networks for rehabilitation application: Challenges and opportunities*. Journal of Network and Computer Applications, 36, 1–15.

24- Hao, S., & Zhang, H. (2021). *A cross-layered theoretical model of IEEE 1901 power-line communication networks considering retransmission protocols*. IEEE Access, 9 , 28805–28821.

25- Hao, S., & Zhang, H.Y. (2020). *Theoretical modeling for performance analysis of IEEE 1901 power-line communication networks in the multi-hop environment*. Journal of Supercomputing, 76 , 2715–2747.

26- *Hart Communication Foundation* (2014). http://www.hartcomm.org *IEEE802 (2014).*

27- Hosseini, S.M., Joloudari, J.H., & Saadatfar, H. (2019). *MB-FLEACH: A new algorithm for super cluster head selection for wireless sensor networks*. International Journal of Wireless Information Networks, 26 (2), 113–130.

28- *IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4) Body Area Networks.* http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html

29- *IEEE 802.15 WPAN Task Group 6 (TG6) Body Area Networks* (2014). http://www.ieee802.org/15/pub/TG6.html

30- IETF (2013*). Routing over low power and lossy networks (roll).* http://datatracker.ietf.org/wg/roll/charter/

31- *ISA100 Wireless Systems for Automation* (2014). http://www.isa.org

32- Jabbar, S., Iram, R., Minhas, A.A., Shafi, I., Khalid, S., & Ahmad, M. (2013). *Intelligent optimization of wireless sensor networks through bio-inspired computing: Survey and future directions*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 9 (2), Article 421084. https://doi.org/10.1155/2013/421084

33- John, J., & Rodrigues, P. (2019). *A survey of energy-aware cluster head selection techniques in wireless sensor networks*. Evolutionary Intelligence, 2 (1), 45–56.

34- Jones, C. E., Sivalingam, K. M., Agrawal, P., & Chen, J. C. (2001). *A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. Wireless Networks*, 7 (4), 343–358.

35- Jung, J.W., Wang, W., & Ingram, M.A. (2011). *Cooperative transmission range extension for duty cycle-limited wireless sensor networks*. في: International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology ،Chennai ،1–5.

36- Kardi, A., & Zagrouba, R. (2020). Rach*: A new radial cluster head selection algorithm for wireless sensor networks*. Wireless Personal Communications , 2(1), 13–26.

37- Kardi, A., & Zagrouba, R. (2020). Rach: *A new radial cluster head selection algorithm for wireless sensor networks*. Wireless Personal Communications , 21(2), 89–96.

38- Karmaker, A., Alam, M.S., Hasan, M.M., & Craig, A. (2019). *An energy-efficient and balanced clustering approach for improving throughput of wireless sensor networks*. International Journal of Communication Systems, 33 (3), Article e4118.

39- Kaushik, K., Mishra, D., De, S., Basagni, S., Heinzelman, W., Chowdhury, K., & Jana, S. (2013). *Experimental demonstration of multi-hop RF energy transfer*. IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications ، London ،UK ،1–5.

40- Khan, B.M., & Bilal, R. (2020). *Fuzzy-TOPSIS-based cluster head selection in mobile wireless sensor networks*. Sensors Technology, 2 (1), 596–627.

41- Khedo, K.K., Perseedoss, R., & Mungur, A. (2010*). A wireless sensor network air pollution monitoring system*. International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2 (1), 31–45.

42- Kranakis, E., Krizanc, D., & Williams, E. (2004). *Directional versus omnidirectional antennas for energy consumption and k-connectivity of networks of sensors*. International Conference on Principles of Distributed Systems ،Grenoble ،France ، 357–368.

43- Kumar D., Aseri T.C., & Patel R.(2009). EEHC*: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks*. Computer Communications , 32(5), 662–667 .

44- Kumar, D., Aseri, T. C., & Patel, R. (2009). EEHC: *Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks*. Computer Communications, 32 , 662–667.

45- *Lawrence Berkeley National Laboratory (2015). What is energy efficiency?* http://eetd.lbl.gov/ee/ee1.html

46- Li, H., Liu, Y., Chen, W., Jia, W., Li, B., & Xiong, J. (2013). *COCA: Constructing optimal clustering architecture to maximize sensor network lifetime*. Computer Communications, 36 , 256–268.

47- -Liu, A., Ren, J., Li, X., Chen, Z., & Shen, X. S. (2012). *Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks*. Computer Networks, 56, 1951–1967.
48- Lorincz, K., Chen, B.R., Waterman, J., Werner-Allen, G., Welsh, M. (2008). *Resource aware programming in the Pixie OS.*6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems ،Raleigh ،NC ،USA ،211–224.
49- Lu, H., Liu, J.Y.Z., Lane, N.D., Choudhury, T., & Campbell, A.T. (2010). *The Jigsaw continuous sensing engine for mobile phone applications*. ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems ،Zurich ،Switzerland ،71–84.
50- Lubin Balasubramanian, D., & Govindasamy, V. (2019). *Study on evolutionary approaches for improving the energy efficiency of wireless sensor networks applications*. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.164856
51- Maheshwari, P., Sharma, A.K., Verma, K. (2021*). Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization*. Ad Hoc Networks , 110, Article 102317.
52- *MQ Telemetry Transport* (2013). http://mqtt.org/
53- *MQTT For Sensor Networks (MQTT-S) Protocol Specification* (2013). http://mqtt.org/MQTT-S_spec_v1.2.pdf
54- *MQTT projects (*2013). http://mqtt.org/projects
55- Nanda, A., Rath, A. K., & Rout, S. K. (2010). *Wireless sensor network for coastal erosion: A national perspective*. International Journal of Computer Science & Communication, 1, 1–5.
56- Nosratinia, A., Hunter, T., & Hedayat, A. (2004). *Cooperative communication in wireless networks*. IEEE Communications Magazine, 42(10), 74–80.
57- Olivo, J., Carrara, S., & De Micheli, G. (2012). *IronIC patch: A wearable device for the remote powering and connectivity of implantable systems*. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) ،Graz ،286–289.
58- Osamy, W., Khedr, A.M., Salim, A., AlAli, A.I., & El-Sawy, A.A. (2022). *Recent studies utilizing artificial intelligence techniques for solving data collection, aggregation and dissemination challenges in wireless sensor networks: A review*. Electronics , 11(3), Article 313. https://doi.org/10.3390/electronics11030313
59- Panniem, A., & Puphasuk, P. (2018*). A modified artificial bee colony algorithm with firefly algorithm strategy for continuous optimization problems*. Journal of Applied Mathematics , Article ID 1–9.
60- Pascale, A., Nicoli, M., Deflorio, F., Dalla Chiara, B., & Spagnolini, U. (2012*). Wireless sensor networks for traffic management and road safety*. IET Intelligent Transport Systems, 6, 67–77.
61- Patil, V.S., Mane, Y.B., & Deshpande S.(2019). *FPGA based power saving technique for sensor node in wireless sensor network (WSN*). In: Computational Intelligence inSensor Networks . Springer Berlin Heidelberg (pp. 385–404).
62- Pinto, D., Viana, S., Nacif, J., Vieira, L., Vieira, M., A. Vieira, & Fernandes, A. (2012). *HydroNode: A low cost, energy efficient, multi-purpose node for underwater sensor networks*. IEEE Conference on Local Computer Networks ،Clearwater ،148–151.

63- Poonguzhali, P.K., & Ananthamoorthy N.P.(2019). *Improved energy efficient WSN using ACO based HSA for optimal cluster head selection*. Peer-to-Peer Networking and Applications , 2(1), 34–46.

64- Pratha S.J., Asanambigai V., & Mugunthan S.R.(2023). *Hybrid mutualism mechanism-inspired butterfly and flower pollination optimization algorithm for lifetime improving energy-efficient cluster head selection in WSNs*. Wireless Personal Communications , 128(4), 1567–1601 .

65- Prayati, A., Antonopoulos, C., Stoyanova, T., Koulamas, C., & Papadopoulos, G. (2010*). A modeling approach on the TelosB WSN platform power consumption*. Journal of Systems and Software, 83, 16–19.

66- Qin, H., Li, Z., Wang, Y., Lu, X., & Zhang W. (2010*). An integrated network of roadside sensors and vehicles for driving safety: Concept , design and experiments*. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom) ، Mannheim ،Germany ،79–87.

67- Ren, H., Meng, M., & Chen, X. (2006). *Wireless assistive sensor networks for the deaf.: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* ،Beijing ،4804–4808.

68- Samiayya, D., Radhika, S., & Chandrasekar, A. (2023). *An optimal model for enhancing network lifetime and cluster head selection using hybrid snake whale optimization*. Peer-to-Peer Networking and Applications , 16(5), 1959–1974.

69- Sharma, R., Vashisht, V., & Singh, U. (2020). *EeTMFO/GA: A secure and energy efficient cluster head selection in wireless sensor networks*. Telecommunications Systems, 74 (3), 253–268.

70- Sheng, H., Yong Hong, & He, Y. (2022). *An energy-efficient routing algorithm based on greedy strategy for energy harvesting wireless sensor networks*. Sensors , 22(4), Article 1645. https://doi.org/10.3390/s22041645

71- *Shimmer Sensing (2014*). http://www.shimmersensing.com

72- Singanamalla, V., Patan, R., Khan, M.S., & Kallam, S. (2019). *Reliable and energy-efficient emergency transmission in wireless sensor networks*. Internet Technology Letters , 2(2), Article e1507.

73- Sodhro, A.H., Zongwei, L., Pirbhulal, S., Sangaiah, A.K., Lohano, S., & Sodhro, G.H. (2020). *Power-management strategies for medical information transmission in wireless body sensor networks*. IEEE Consumer Electronics Magazine , 9(2), 47–51.

74- Sridhar, V., Ranga Rao, K., Vinay Kumar, V., Mukred, M., Ullah S.S., & AlSalman H.(2022). *A machine learning-based intelligence approach for multiple-input/multiple-output routing in wireless sensor networks*. Mathematical Problems in Engineering , Article ID 6391678. https://doi.org/10.1155/2022/6391678

75- Stajano, F., Hoult, N., Wassell, I., Bennett, P., Middleton, C., & Soga, K. (2010). *Smart bridges, smart tunnels: Transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure*. Ad Hoc Networks, 8 , 872–888.

76- Subramanian, A. P., & Das, S. R. (2010). *Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks*. Wireless Networks, 16, 1557–1567.

77- Tang, D., Jiang, T., & Ren, J. (2010). *Secure and energy aware routing (SEAR) in wireless sensor networks*. IEEE Global Telecommunications Conference ،1–5.
78- Tavares, J., Velez, F.J., & Ferro, J.A.M. (2008). *Application of wireless sensor networks to automobiles*. Measurement Science Review, 8 , 65–70.
79- *The ETX Objective Function for RPL* (2010). http://tools.ietf.org/html/draft-gnawali-roll-etxof00
80- Tong, B., Li, Z., Wang, G., & Zhang, W. (2010). *How wireless power charging technology affects sensor network deployment and routing*. IEEE ICDCS ،1–6.
81- Valente, J., Sanz, D., Barrientos, A., del Cerro, J., Ribeiro, A., & Rossi, C. (2011). *An air-ground wireless sensor network for crop monitoring*. Sensors, 11 (6), 6088–6108. https://doi.org/10.3390/s110606088
82- Wang, S., Vasilakos, A., Jiang, H., Ma, X., Liu, W., Peng, K., Liu, B., & Dong, Y. (2011). *Energy efficient broadcasting using network coding aware protocol in wireless ad hoc network*. IEEE International Conference on Communications (ICC) ،Kyoto ،1–5.
83- Wenjie, C., Lifeng, C., Zhanglong, C., & Shiliang, T. (2005). *A realtime dynamic traffic control system based on wireless sensor network*. International Conference Workshops on Parallel Processing ،Oslo ،Norway ،258–264.
84- Xie, L., Shi, Y., Hou, Y.T., Lou, W., Sherali, H.D., & Midkiff, S.F. (2012*). On renewable sensor networks with wireless energy transfer: The multi-node case*. In: IEEE SECON (pp. 1–5).
85- Yao, S., Dong, Z., Wang, X., & Ren, L. (2020). *A multiobjective multifactorial optimization algorithm based on decomposition and dynamic resource allocation strategy*. Information Sciences, 511, 18–35.
86- https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.058
87- Zhang, F., Hackworth, S. A., Liu, X., Chen, H., Sun, M. (2012*). Wireless energy transfer platform for medical sensors and implantable devices*. International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society ،Minneapolis ،MN ،1045‑1048.
88- *ZigBee Alliance (2014*). http://www.zigbee.org
89- Hosseini, S.M., Joloudari, J.H., Saadatfar; (2019). *MB-FLEACH: a new algorithm for super cluster head selection for wireless sensor networks*. Int. J. of Wirel. Inf. Netw. 26(2), 113–130
90- Wei, Q., Bai, K., Zhou, L., Hu, Z., Jin, Y., & Li, J. (2021). *A Cluster-Based Energy Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks with Mobile Sink.* Sensors*, 21*(7), 2523.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Damascus University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Department of Electronics and Communications Engineering

A Synergistic Algorithm (Firefly – Differential Evolution) to Increase Energy Efficiency while Reducing Percentage of Coverage Holes in WSNs

A Dissertation Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Ph.D. in Applied Electronics Engineering

By
Eng. Aretas Khaleel

Supervisor
Prof. Dr. Mohammad Alhussin

Academic Year
2024-2025